

Het toepassen van SmartSoils technieken om bodemeigenschappen aan te passen aan de eisen van de gebruiker.

# Bacteriën - de aannemers van de moderne civiel-ingenieur

In dit artikel wordt een omschrijving van de innovatieve SmartSoils®-technieken BioSealing en BioGrout gegeven. Het gaat om ontwikkelingen op civiel-technisch gebied waar geotechnologie met biochemie gecombineerd wordt. SmartSoils® is een innovatieve ontwikkeling waarbij natuurlijke biogeochemische processen worden bevorderd, met als doel de eigenschappen van de bodem aan te passen en geschikt te maken voor civieltechnische doeleinden.

Irina Cirpus en Dianne den Hamer

GeoDelft, Stieltjesweg 2, Postbus 69, 2600 AB Delft. E-mail: [smartsoils@geodelft.nl](mailto:smartsoils@geodelft.nl), [www.smartsoils.com](http://www.smartsoils.com), Telefoon: (015) 2693500, Fax: (015) 2610821.



**D. den Hamer**  
Milieuwetenschapper  
bij R&D SmartSoils®,  
GeoDelft.



**I. Cirpus**  
Microbioloog bij  
R&D SmartSoils®,  
GeoDelft.

Specifieke biogeochemische processen worden tot stand gebracht door de activiteit van bacteriën, die van nature aanwezig zijn in de bodem, te stimuleren. Stimulatie van microbiële activiteit wordt bewerkstelligd door injectie van een specifiek substraat. Zodoende ontstaat in situ een verbetering van de bodemeigenschappen. Toepassing van de BioGrout techniek leidt tot een versterking van het zandpakket, met behoud van doorlatendheid. BioGrout kan toegepast worden om bijvoorbeeld dijken en oevers tegen golfinslag bestendig te maken, om vervorming van spoor- en snelwegen te verhelpen en zelfs te voorkomen. Met de techniek BioSealing worden met micro-organismen lekkages afgedicht in waterhoudende en -werende constructies zoals dijken, aquaducten en natuurlijke afdichtingslagen van klei.

De bodembacteriën functioneren bij de SmartSoils technieken als het ware als micro-aannemers om grote civieltechnische werkzaamheden mogelijk te maken.

## GROND ALS BOUWMATERIAAL

Grond is in de civiele en geotechniek een belangrijk, maar ook een complex en moeizaam bouw materiaal. Tot nu toe

accepteren we de negatieve eigenschappen van de bodem echter als een vaststaand gegeven. Technieken tot bodemverbetering maken voornamelijk gebruik van chemische en cementgebaseerde verharders. Constructie en funderingsproblemen zijn echter onderdeel van een complex humaan, geologisch en biologisch systeem. Met het betrekken van milieu en biotechnologie in de geowetenschappen (Technische Universiteit Delft<sup>1</sup>) is het biologische systeem geïntroduceerd in de conventionele geotechniek. Echter de markt neemt, vooralsnog, in risico management en in technologische toepassingen het biologische systeem niet mee in haar overwegingen. Een samenspel van conventionele geotechnieken en biogeochemische bodemprocessen kan echter een zeer effectieve oplossing bieden voor complexe en kostbare constructie- en funderingsproblemen.

## SMARTSOILS®

GeoDelft, het nationale instituut voor geo-engineering, heeft met de introductie van het SmartSoils concept 'Grond op bestelling', een aanvang gemaakt met de toepassing van biogeochemische processen in de geotechniek. SmartSoils® staat voor de ontwikkeling van methoden en



technieken ter verbetering van bodem als bouw materiaal en legt hierbij de nadruk op biotechnologische en natuurlijke biochemische processen in de bodem. Het doel is de efficiëntie en duurzaamheid van ondergronds bouwen en grondverbeteringstechnieken te vergroten. Door de nadruk te leggen op biochemische processen zijn de ontwikkelde technieken en methoden *in situ*. De invloed van constructie activiteiten op ecologische en maatschappelijke aspecten van het milieu wordt zodoende geminimaliseerd. Binnen GeoDelft werkt een multidisciplinair onderzoeksteam bestaand uit technici, geologen, microbiologen, milieukundigen en scheikundigen aan de ontwikkeling en de toepassing van SmartSoils® in de civiele techniek.

### BIOGROUT®

#### Microbiële mineraalvorming

BioGrout maakt gebruik van microbiële mineraalvorming om *in situ* de ondergrond te verstevigen. In de natuur spelen micro-organismen een rol bij de vorming van mineralen, de zogenaamde biomineralisatie [Baeuerlein, 2000<sup>2</sup>]. Goed bestudeerde voorbeelden zijn microbiële carbonaten als calciet ( $\text{CaCO}_3$ , kalk) [Boquet, 1973<sup>3</sup>], de fosfaten struviet ( $\text{NH}_4\text{MgPO}_4$ ) [Rivadeneira, 2005<sup>4</sup>], apatiet ( $\text{CaPO}_4$ ) [Schulz, 2005<sup>5</sup>] en ijzermineralen [Konhauser, 1998<sup>6</sup>]. De vorming van de mineralen kan een gecontroleerd bacterieel proces zijn, maar kan ook een gevolg zijn van de biologische omzettingen met aansluitend chemische reacties.

#### Het proces BioGrout

BioGrout maakt gebruik van het bacteriële proces tot calciëtvorming. Ter initiatie van het proces wordt een laboratoriumcultuur van bodembacteriën en een oplossing van ureum en calcium in de ondergrond geïnjecteerd. De bacteriën zetten het substraat ureum om in carbonaat. Het carbonaat slaat vervolgens in aanwezigheid van calcium neer als calciet op het oppervlak van de zandkorrels. De calciëtkristallen vormen 'bruggen' tussen de zandkorrels en cementeren het zandpakket tot een zandsteenachtige laag. De open structuur van het zandpakket en daarmee de doorlaatbaarheid blijft gewaarborgd. Een milieutechnisch functioneel bijproces van de calciëtkristallisatie is de immobilisatie van zware metalen in de ondergrond [Smith, W; 2000<sup>7</sup>]. Het resulterende gesteente beschikt over materiaaleigenschappen vergelijkbaar met die van natuurlijke zandsteen. Het verschil tussen beide materialen ligt in het vormingsproces. Natuurlijke zandsteenvorming vindt plaats onder hoge temperaturen en druk en het proces kan miljoenen jaren voortduren. Biologisch

geïnitieerde zandsteenvorming vindt plaats binnen dagen tot weken onder gematigde condities.

#### Fundamenteel onderzoek naar BioGrout

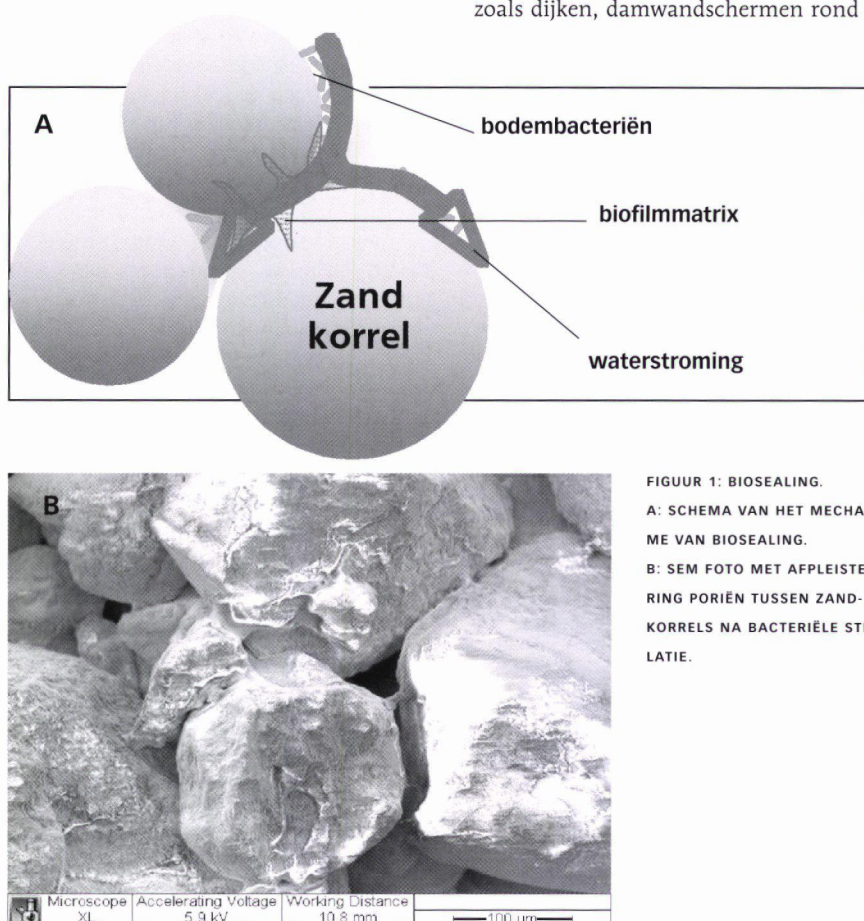
Laboratorium experimenten hebben aangetoond dat het BioGrout proces binnen enkele dagen uit losse zandkorrels zandsteen met druksterktes tot 30 MPa kan vormen. Dit is vergelijkbaar met de druksterkte van klinkerbouwstenen. Desondanks is de porositeit van het biologische gesteente nauwelijks afgenomen. De huidige werkzaamheden zijn gericht op optimalisatie van het BioGrout proces onder 'werkelijke' schaal en bodemomstandigheden. Onderwerpen van huidig en toekomstig onderzoek zijn grondwaterstromingen, verzadigingsgraad, toepassing bij verschillende zandsoorten en bij klei- of humushoudende zandgronden. In het najaar van 2007 zal in samenwerking met de Technische Universiteit Delft, afdeling Biotechnologie, de stap worden gezet tot opschaling van het BioGrout proces buiten het laboratorium. In de Botanische Tuin zal 1 m<sup>3</sup> natuurlijk zand met het BioGrout proces worden gecementeerd. Parallel aan dit onderzoek loopt in samenwerking met de Technische Universiteit van Delft een onderzoeksprogramma naar de toepassing van alternatieve calciëtvormingsprocessen en de vorming van andere microbiële mineralen.

*De toepassingsmogelijkheden van BioGrout*  
De resultaten uit het laboratoriumonderzoek tonen aan dat BioGrout uiterst geschikt is voor verschillende toepassingsgebieden. Een voorbeeld is de toepassing van BioGrout ter versterking van dijken tegen erosie door golfafslag. Andere mogelijke toepassingen van BioGrout® betreffen de stabilisatie van kustbeschermende duinen, zodat duinafslag vermindert. Daarnaast kan ook gedacht worden aan BioGrout als lichter en steviger ophoogmateriaal ter voorkoming van verzakkingen bij snel- en spoorwegen. De versterking van verwerkingsgevoelige zandlagen in een onderwater talud ter voorkoming van zettingsvloeiing is ook een mogelijkheid. Het proces BioGrout vermindert de schade aan constructies, omdat het water vrij in- en uitspoelt zonder zand mee te voeren. In samenwerking met de Deltaris instituten Waterkundig Laboratorium en TNO zijn in 2007 verscheidende toegepaste onderzoeksprojecten opgezet.

### BIOSEALING

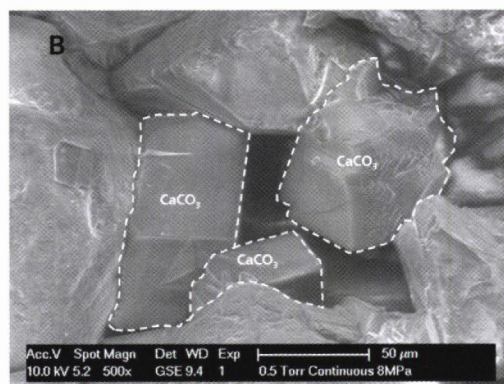
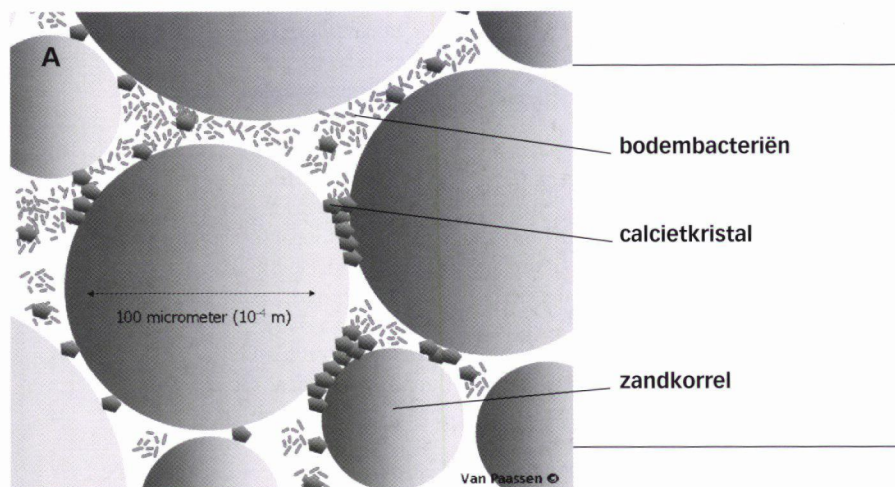
#### De techniek BioSealing

BioSealing is een techniek waarbij door stimulatie van de microbiële activiteit ter plaatse van een ondergrondse lekkage de waterdoorlatendheid snel, eenvoudig en doeltreffend teruggedrongen kan worden. Hierbij is te denken aan ongewenste lekkages in waterremmende constructies zoals dijken, damwandschermen rond



FIGUUR 1: BIOSEALING.  
A: SCHEMA VAN HET MECHANISME VAN BIOSEALING.  
B: SEM FOTO MET AFPLEISTE-RING PORIËN TUSSEN ZAND-KORRELS NA BACTERIËLE STIMULATIE.





FIGUUR 2: BIOGROUT.

A: SCHEMA VAN DE BIOGROUT MECHANISME.  
B: ZANDKORRELS DOOR CALCIESKRISTELLEN  
NA BIOGROUT BEHANDELING.

bouwputten, afdichtende lagen en folies. Bij alle toepassingen is BioSealing te kenmerken als een effectieve, goedkope en milieuvriendelijke methode die breed inzetbaar is.

Tijdsintensief geotechnisch grondonderzoek voor het lokaliseren van lekkages in de ondergrond is met de huidige methoden noodzakelijk. Het vervolgens afdichten is moeizaam, omdat de locatie vaak slecht toegankelijk is, en vraagt om kostenverhogende maatregelen als ontgraving of waterstandverlaging. De exacte plaatsbepaling van het lek wordt met BioSealing overbodig. Voor het effectief toepassen van BioSealing hoeft men enkel te beschikken over algemene kennis waar de lekkage zich bevindt. Het injectiepunt dient zich namelijk te bevinden binnen het intrekgebied van de ondergrondse lekkage.

#### Het mechanisme achter BioSealing

Ter initiatie van het BioSealing proces wordt een substraat in de grond geïnjecteerd dat met de grondwaterstroming naar het lek wordt getransporteerd. De geïnjecteerde vloeistof bevat een hoog gehalte aan suikers, proteïnen, colloïde deeltjes en ook zouten en sporenelementen. Deze stoffen stimuleren de microbiële activiteit in de bodem ter plaatse van de lekkage. De geactiveerde bacteriën vormen biomassa en grote hoeveelheden biofilm. De biofilm zorgt voor verstopping van de poriën tussen de bodemdeeltjes.

Gelijktijdig wordt de geïnjecteerde vloeistof door de bacteriën deels omgezet naar organische zuren. Deze veroorzaken een chemische vertering van bodemdeeltjes en het vrijkomen van colloïde deeltjes. Deze colloïde deeltjes worden met het grondwater naar de lekkage meegevoerd. Daar worden zij bij wijze van spreken in de biofilm matrix gevangen wat mogelijk door flocculatie en neerslag reacties resulteert in stabilisatie van de verstopping. De gevormde organische zuren initiëren dus een chemisch en mechanisch gestuurde afpleistering van de porieruimten tussen de zandkorrels in en rond het gat. De verstopping blijft op basis van dit proces ook na afbraak van de biofilm stabiel. Laboratorium proeven hebben aangetoond dat de verstopping tot zes weken na injectie van de vloeistof stabiel blijft. De werking en doeltreffendheid van BioSealing® is niet enkel door laboratorium proeven aangetoond maar ook middels verscheidene veldexperimenten {Terbruggen, 2006<sup>8</sup>; GeoDelft HSL 2005<sup>9</sup>; GeoDelft 'Noordplas', 2006<sup>10</sup>}.

#### Onderzoek naar toepassingsmogelijkheden van BioSealing

In Nederland zijn momenteel twee projecten in voorbereiding. Daarnaast bestaat in het buitenland veel belangstelling: in Oostenrijk (2007) en Japan (2008) worden door GeoDelft in samenwerking met lokale partners praktijkexperimenten

gerekend gemaakt. Op wetenschappelijk vlak zijn er contacten met de universiteiten van Delft, Utrecht, Kingston (Canada), Ottawa (Canada) en Leipzig (Duitsland). Deze contacten zijn gericht op uiteenlopende toepassingen (civiele techniek, waterbouwkundige werken, mijnbouw en milieutechniek) en omstandigheden. Gezamenlijk met de Technische Universiteit Delft en de Rijks Universiteit Utrecht wordt de komende jaren met fundamenteel onderzoek de werkwijze van BioSealing verder onderbouwd. Het doel is om de achterliggende processen nauwkeurig te kunnen voorspellen en te sturen.

#### DANKWOORD

**Het hier gepresenteerde onderzoek is het resultaat van gezamenlijke inspanningen van het SmartSoils® team.** Bij deze willen de auteurs de volgende personen van het SmartSoils team danken voor hun praktische en inhoudelijke bijdrage: V. Whiffin, M.-N. Latil, M. Blaauw, V. van Beek, M. Harkes, J. Booster, L. van Paasen, W. van der Zon, H. van Heusden, F. Schenkeveld, M. Ketelaars, D. van Ree, W. Molendijk, J. de Feijter, J. Lambert en G. van Meurs.

#### LITERATUUR

1. Faculteit Civiele techniek & Geowetenschappen Technische Universiteit Delft; [www.tudelft.nl](http://www.tudelft.nl)
2. Baeuerlein, E. (2000) Biomineralization - From Biotechnology and Medical Application, Wiley-VCH.
3. Boquet, E., Boronot, A. & Ramos-Cormenzana, A. (1973) Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon, Nature. 246, 527-528.
4. Rivadeneyra, A. M., Pérez-García, I. & Ramos-Cormenzana, A. (2005) Struvite precipitation by soil and fresh water bacteria Current Microbiology. 24.
5. Schulz, H. N. & Schulz, H. D. (2005) Large sulfur bacteria and the formation of phosphorite, Science. 307, 416-418.
6. Konhauser, K. O. (1998) Diversity of bacterial iron mineralization Earth-Science Reviews. 43, 91-121.
7. Smith, R.W. (2000) Calcite Precipitation and Trace Metal Partitioning in Groundwater and the Vadose Zone: Remediation of Strontium-90 and Other Divalent Metals and Radionuclides in Arid Western Environments DOE Scientific and Technical Information.
8. Terbruggen, S. & Biesboer, F. (2006) BioSealing van GeoDelft bewijst zich bij aquaduct HSL - Blokkade door bacteriën in De Vernufteling 2006 (De Ingenieur)
9. Veenbergen, V & Lambert, J. (2004-2005) Veldexperiment BioSealing bij de HSL - GeoDelft kenmerk Co- 406290;
10. Kumar Gautam, R. & Lambert, J. (2006) Veldexperiment in polder 'De Noordplas' GeoDelft kenmerk Co-217330.