



dr. T. Sweijen  
CRUX Engineering  
Universiteit Utrecht



dr. N. Hartog  
Universiteit Utrecht  
KWR Watercycle  
Research Institute



drs. G. Winters  
CRUX  
Engineering



ir. J.K. Haasnoot  
CRUX  
Engineering



dr. ir. A.E.C. van der Stoep  
CRUX Engineering  
Hogeschool van  
Amsterdam

# GEOCHEMIE VAN WATERGLASINJECTIES

## Introductie

Waterglas wordt in de civiele techniek toegepast bij bodeminjectie voor het creëren van tijdelijk waterremmende lagen of als (permanente) versterking van grondconstructies. Het gebruik van waterglas wordt steeds aantrekkelijker voor nieuwbouwprojecten, vanwege de lage kosten in vergelijking met onderwaterbeton en de significant kleinere omgevingsinvloeden in vergelijking met spanningsbemaling. Gezien de 'drukte' in de stedelijke bodem, met name in relatie tot ondergrondse energieopslag (WKO's) wordt het steeds belangrijker om de efficiëntie van de waterglasinjectie te vergroten en de beïnvloeding van de ondergrond te monitoren en zoveel mogelijk te verminderen.

Vanuit de civiele techniek is in het recente verleden met name aandacht besteed aan de sterkte-eigenschappen van waterglas en de praktische aspecten van bodeminjectie. De chemische reacties bij de vorming en uiteindelijke degeneratie van de waterglasgel en de rol van de interactie met het grondwater en de bodembestanddelen zijn daarbij echter grotendeels onderbelicht gebleven. Inzicht

ten hierin kunnen echter duidelijkheid geven over de werking en risico's bij de toepassing van waterglas en harders onder verschillende bodem- en bemalingscondities. In dit artikel wordt daarom de (geo)chemische kant van waterglasinjectie nader uiteengezet. Dit artikel is het derde artikel in een serie van drie over de toepassing van waterglas in het Vakblad Geotechniek [1][2].

## Wat is waterglas?

Waterglas is een oplossing van silica ( $\text{SiO}_2$ ) met natronloog ( $\text{NaOH}$ ) dat in enige mate verdund is met water. Door de aanwezigheid van natronloog is de pH hoog, waardoor de silica in oplossing blijft en het waterglas injecteerbaar is.

## Oplosbaarheid silica

Een essentieel aspect van waterglas is de hoeveelheid silica dat opgelost kan blijven in water. Bij een neutrale pH is de oplosbaarheid van (amorfe) silica ca. 0,1 à 0,2 g/l (zie figuur 1). De oplosbaarheid van silica neemt toe met temperatuur, maar loopt veel sterker op met afnemende zuurgraad (hogere pH, figuur 2). Boven een pH van 9 à 10 kan silica veel

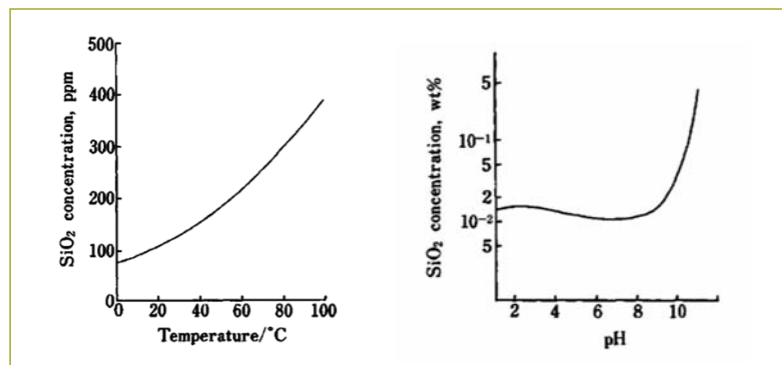
makkelijker in oplossing blijven. Commercieel beschikbaar waterglas met hoge pH heeft een silica concentratie van ca. 200 à 300 g/l (een factor 1000 hoger dan onder een neutrale pH); deze concentratie wordt gehaald omdat waterglas industrieel geproduceerd wordt.

## Polymeervorming tijdens condensatie

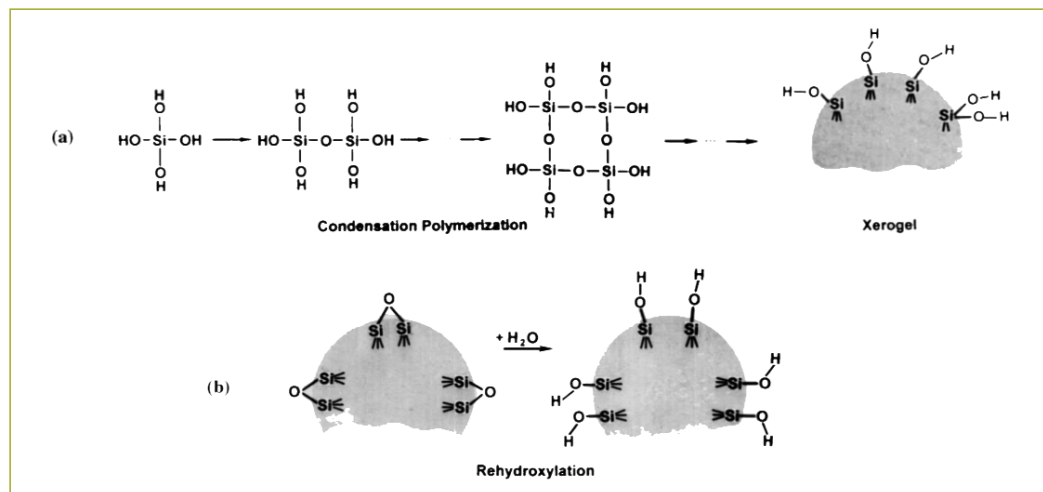
De opgeloste silica in waterglas kan geleren (en uiteindelijk neerslaan) als gevolg van een daling in de pH. Een verbinding van silicium kationen ( $\text{Si}^{4+}$ ) met hydroxides ( $\text{OH}^-$ ) is namelijk alleen stabiel bij een specifieke pH. Als de pH omlaag gaat, zal de vorming van silicapolymeren optreden [3]. Gedurende de polymeervorming zullen silicium kationen met elkaar verbonden worden via oxides ( $\text{O}^{2-}$ ). De verbinding van  $\text{Si}^{4+}$  met  $\text{O}^{2-}$  is een stabiele verbinding. In figuur 2 is te zien hoe een individuele  $\text{Si}(\text{OH})_4$  molecuul zich verbindt met verschillende andere  $\text{Si}(\text{OH})_4$  moleculen om zo een polymeer te vormen. Als voldoende moleculen zich aan elkaar binden kan het polymeer groeien en zichtbaar worden. Het polymeer kan een individuele korrel (ofwel colloïde vormen) vormen of het kan groeien aan de bodem (bijv. aan silica van zand zoals weergegeven in figuur 3).

Polymeervorming resulteert in geling van de waterglasoplossing. De mate van polymeervorming is dan ook bepalend voor de kwaliteit van een gel. Om de polymeervorming te kwantificeren kan gekeken worden naar de gemiddelde hoeveelheid oxide verbindingen per siliciumatoom. Silicium heeft 4 positief geladen posities die alle een aparte verbinding met een oxide kunnen maken. Als alle 4 posities zijn ingenomen door een oxide, spreken we van  $\text{Q}^4$ . Als er slechts 3 verbindingen met oxides zijn, dan spreken we van  $\text{Q}^3$ . Uiteindelijk wordt siliciumhydroxide weergegeven als  $\text{Q}^0$  (zie figuur 4). In principe geldt dat hoe hoger de graad van verbindingen met oxides, des te sterker de uiteindelijke gel en/of vaste silica.  $\text{Q}^0$  heeft geen sterkte/structuur (het is immers opgelost) terwijl  $\text{Q}^4$  sterk is en structuur heeft (het is dan een vast amorf mineraal).

Gel kan gevormd worden als de vloeistof voldoende ionisch is, dat wil zeggen voldoende opgeloste stoffen aanwezig zijn per volume water. Hierbij geldt dat een stevige gel verkregen kan worden als er ook complexen/polymeren gevormd worden. De gradatie van een opgeloste stof  $\text{Si}(\text{OH})_4$  tot  $\text{SiO}_2$  gaat van een vloeibare substantie



Figuur 1 - Oplosbaarheid van amorfe  $\text{SiO}_2$  in water [4]; ter info: 100 ppm = 10<sup>-2</sup> wt% ≈ 0,1 g/L.



Figuur 2 - Vorming van silicium hydroxides [6].

## SAMENVATTING

Waterglas wordt in de civiele techniek toegepast als bodeminjectie voor het creëren van tijdelijk waterremmende lagen of als versterking van grondconstructies. De (geo)chemische achtergrond van waterglas is daarbij veelal onderbelicht gebleven en wordt daarom in dit artikel toegelicht.

Waterglas heeft een hoge pH en wordt geïnjecteerd in de bodem samen met een harder en water. De harder zal gelvorming veroorzaken. Twee soorten 'harders' worden gebruikt die beide een ander soort gel creëren: i) verzurende

harder en ii) natriumaluminaat. Door het gebruik van verzurende harders zal de pH van de gel dalen, terwijl natriumaluminaat de hoge pH van waterglas in stand houdt.

Het type waterglas en harder (en tevens de mengverhouding) zijn afhankelijk van de toepassingsdoeleinden. Zolang de toepassingsdoeleinden bekend zijn en de injectie zorgvuldig uitgevoerd wordt is bodeminjectie met waterglasinjectie voldoende beheersbaar en betrouwbaar.

(Q<sup>0</sup>), naar gel (Q<sup>1</sup>, Q<sup>2</sup>, Q<sup>3</sup>) tot amorphe siliciumoxide (Q<sup>4</sup>). Tijdens deze gradatie wordt water uit de structuur van de siliciumoxides gedreven, waardoor een vaste vorm kan ontstaan. Het uitdrijven van water uit de silica structuur wordt ook wel Synerese genoemd. De mate van geling en uitharding (de zogenaamde neutralisatie van het waterglas) is, naast genoemde pH en temperatuur, ook afhankelijk van de aanwezigheid van andere stoffen.

### Si/Na ratio en uiteindelijke kwaliteit van amorphe siliciumoxide

De uiteindelijke structuur van de gel is tevens afhankelijk van het waterglas dat gebruikt wordt. De verhouding van opgeloste silica ten opzichte van het natronloog (ofwel alkali) blijkt hierin een bepalende factor te hebben. Deze ratio ( $\frac{SiO_2}{Na_2O}$ ) is ca. 3.22 voor commercieel gebruikte waterglas. Het effect van de ratio op de uiteindelijke gel structuur is terug te zien in NMR-data (Nuclear Magnetic Resonance) waarin onderscheid gemaakt kan worden tussen Q<sup>0</sup> t/m Q<sup>4</sup> posities, figuur 5.

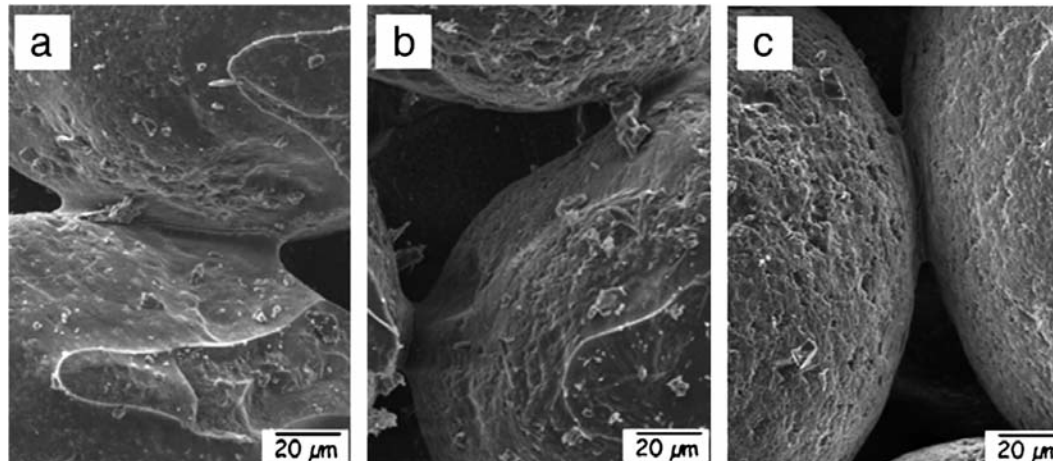
Het feit dat meer Q<sup>3</sup> en Q<sup>4</sup> posities gevuld worden in de gel naarmate de ratio  $\frac{SiO_2}{Na_2O}$  groter wordt resulteert in een slechtere oplosbaarheid van het uiteindelijk product (ofwel een hardere gel/vaste vorm). Dit is bijvoorbeeld weergegeven in figuur 6.

### Wat wordt geïnjecteerd in de bodem?

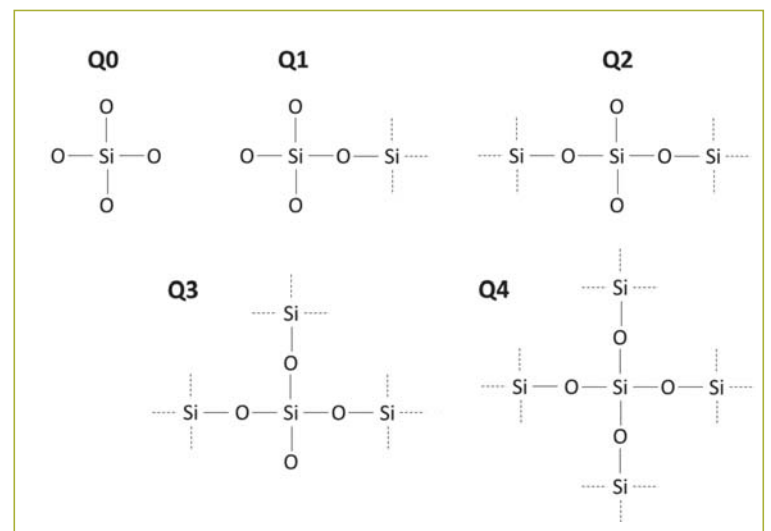
Een waterglasinjectie bevat drie ingrediënten, namelijk: waterglas, water en een harder. De mengverhouding van de drie ingrediënten is afhankelijk van de beoogde eigenschappen van de injectie, die samenhangen met de doeleinden van de waterglasinjectie. Normaliter wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende twee doeleinden:

- Het realiseren van een waterremmende laag. Hiervoor wordt een zogenaamde softgel geïnjecteerd, die relatief weinig waterglas bevat en veel water. Het doel van een softgel is het opvullen van porieruimtes, zodat de doorlatendheid van de bodem sterk afneemt.
- Het versterken van de bodemmatrix. Hiervoor wordt een zogenaamde hardgel gebruikt, die een constructieve laag vormt. Een hardgel bevat relatief veel waterglas zodat zandkorrels verkit kunnen worden door amorphe silica.

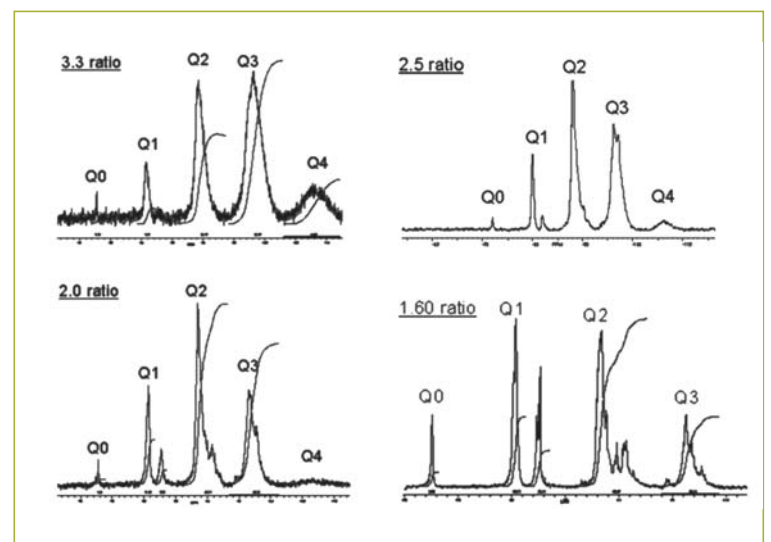
De termen softgel en hardgel moeten niet te



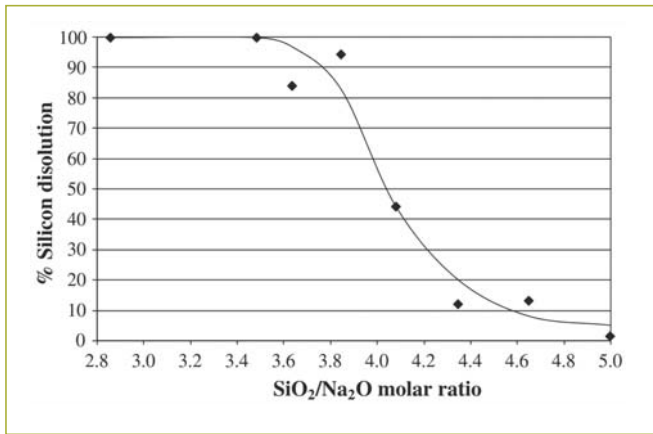
**Figuur 3 – SEM metingen van verhard waterglas aan kwarts [5] voor verschillende silica concentraties (a 18 wt%, b 13 wt% en c 7 wt%). De verkitting tussen zandkorrels is duidelijk zichtbaar en ook hoe de verkitting afneemt als gevolg van een afname in silica concentratie.**



**Figuur 4 – Illustratie van de verschillende Si verbindingen.**



**Figuur 5 – Distributie van NMR scattering profielen voor verschillende molaire ratio's van SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O [7].**



**Figuur 6** – Oplosbaarheid van verhard waterglas [7]; des te lager de silica concentratie des te hoger de oplosbaarheid.

letterlijk genomen worden: ook de softgel is in 'uitgeharde' vorm zeker geen geleïchtige substantie, maar vormt samen met het injectiemedium (zand) een 'zandsteenachtig' materiaal.

Bij het toepassen van een hardgel wordt veel waterglas gebruikt zodat silica hecht aan de zandkorrels; hierbij is het opvullen van porieruimte niet zozeer van belang. Daarom is het segregeren van water en natronloog uit silica (i.e. synerese) niet zozeer een probleem. Voor een softgel is synerese juist wel ongunstig, omdat de gel krimpt tijdens synerese en de doorlatendheid van de laag die is afgedicht met de gel juist zal toenemen. Immers de poriën dienen opgevuld te blijven met gel om de doorlatendheid laag te houden.

### Harders

Om de geïnjecteerde waterglasoplossing te verharden wordt een harder vermengd met het waterglas en water, zodat de injectie tot op zekere mate verhardt. Commercieel worden vaak twee soorten 'harders' gebruikt die elk een ander geleingsmechanisme hebben.

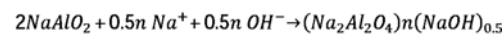
### Verzurende harders

Harders die de pH omlaag brengen betreffen o.a. Durcisseur, R100, triacetine en Condat stab. Door het omlaag brengen van de pH, komt polymeervorming van het opgeloste silica tot stand. Met andere woorden: de gemiddelde Q-waarde gaat omhoog; de fractie van Q<sup>3</sup> en Q<sup>4</sup> verbindingen wordt vergroot ten opzichte van de fractie Q<sup>0</sup> en Q<sup>1</sup> verbindingen. Het toevoegen van een zuur resulteert dus in een gecontroleerde, langzame verharding van de gel, al dan niet door vorming van harde amorfe silica. Doordat polymeervorming plaatsvindt zal de gel een neiging hebben zich tevens aan de zandmatrix te vestigen zodat een gebonden gel ontstaat; dit is ook zichtbaar in figuur 3. Immers, zand is ook een silica waar omheen Si-OH verbindingen aanwezig zijn; vooral wanneer het porie water sterk basisch is. Naar alle waarschijnlijkheid zullen overblijfselen van de

zuren (langere organische moleculen) tevens bijdragen tot gatering door het faciliteren van een nucleatie positie waar andere moleculen zich omheen kunnen ordenen.

### Natriumaluminaat

Natriumaluminaat (NaAlO<sub>2</sub>) heeft een ander geleingsmechanisme dan verzurende harders [9]. Natriumaluminaat zal namelijk reageren met het aanwezige natronloog om zo een complex te vormen, dat vervolgens zal dienen voor nucleatie van nieuwe complexen van het aanwezige opgeloste silica. De complexen zullen netto geen lading hebben. De chemische reactievergelijking van de omzetting van natriumaluminaat kan beschreven worden als



Hieruit blijkt dat hydroxide reageert met natriumaluminaat, echter het gevormde complex bevat nog steeds hydroxide. Deze hydroxide is gebonden in het ionencomplex, maar dat wil niet zeggen dat deze uit het systeem is verdwenen.

Als de pH omlaag gaat, zal deze reactie waarschijnlijk reversibel zijn waardoor de pH op een hoog niveau gebufferd blijft. Het gevormde complex kan verdere complexen vormen met siliciumhydroxides/oxides en zal zo een gel vormen.

Deze gel wordt 'verhard' door de nieuwgevormde complexen, maar dit resulteert niet zozeer in de verharding van de siliciumhydroxides/oxides (het waterglas zelf). Dit heeft als gevolg dat de gevormde gel minder gebonden zal zijn met het aanwezige zand ten opzichte van verzurende harders, hetgeen consequenties kan hebben voor het mobiliseren van deze gel bij grondwaterstromingen en bemaling.

### Neutralisatie

Gelvorming van de injectie wordt vaak omschreven middels een neutralisatiegraad. Bij een lage neutralisatiegraad (20-30%) wordt een softgel verkregen en bij een hoge neutralisatie (60-70%) wordt een hardgel verkregen.

**Tabel 1** Overzicht van de verhoudingen van het geïnjecteerde waterglas en de uiteindelijke molaire massa's van verschillende speciaties. Let wel dat de exacte speciatie van de verschillende componenten complex is en niet weergegeven in de tabel.

		Hardgel R100	Softgel R100	Aluminaat
Injectiemengsel (vol%)	Water	42 %	83 %	83 %
	Waterglas (SiO <sub>2</sub> :Na <sub>2</sub> O= 3,22)	50 %	15 %	15 %
	Harder	8 %	2 %	2 %
Concentratie na uitharding (mol/l)	Na <sub>2</sub> O	0,71	0,21	0,21
	SiO <sub>2</sub>	2,37	0,71	0,71
	OH-	0,34	0,16	0,79
	Harder	1,09	0,27	0,37
	Neutralisatie	0,76	0,63	< 0

Wat houdt de neutralisatiegraad eigenlijk in? De neutralisatiegraad geeft weer hoeveel basische oplossing overblijft nadat de gel verhard is geraakt (met andere woorden: hoeveel base/alkali is geneutraliseerd door het toevoegen van verzurende harders). De eigenschappen van de gel zijn sterk afhankelijk van de neutralisatiegraad. Het verschijnsel is alleen van toepassing op verzurende harders en niet op natriumaluminaat; immers, natriumaluminaat zal juist hydroxides (ofwel alkali) toevoegen aan de gel in plaats van deze te verwijderen.

De neutralisatiegraad is gedefinieerd door Littlejohn et al. [8] voor een specifieke R100 harder. In principe is de neutralisatiegraad de ratio van het zuur (H<sup>+</sup>) afkomstig van harders ten opzichte van de hydroxides (OH<sup>-</sup>) afkomstig van het waterglas; in molaire concentraties. Als we de formule van Littlejohn et al. [8] algemener opschrijven, krijgen we<sup>2</sup>:

$$Neutralisatie = \frac{[H^+]}{[OH^-]} = \frac{V_h \rho_h}{V_s \rho_s N_s^{Na2O}} \frac{\alpha_h M_{Na2O}^{wt}}{2M_h^{wt}}$$

De term is een stoichiometrische term, die staat voor de hoeveelheid zuur die vrijkomt per molecuul van de harder; bijvoorbeeld: R100 is een dizuur (α<sub>h</sub> = 2), triacetine is een trizuur (α<sub>h</sub> = 3).

### Levensduur

Een veel gestelde vraag over waterglas is de vraag over levensduur; hoelang gaat een waterglasinjectie mee? Om deze vraag te beantwoorden moet men zich realiseren dat aan een waterremmende injectie andere eisen worden gesteld dan aan een constructieve injectie<sup>3</sup>.

### Constructieve waterglasinjectie

De levensduur van een constructieve waterglasinjectie wordt bepaald door het sterkteverlies in de tijd. De additionele sterkte van een waterglasinjectie is afkomstig van de verkitting van zandkorrels door waterglas waarbij synerese van de gel niet zozeer een negatief proces is. Amorfe silica kan gaan oplossen waardoor de sterkte langzaam afneemt; het achterliggende proces is het oplossen van

amorphe silica in het grondwater wat een langzaam proces is. Gezien het feit dat grondwater over het algemeen relatief langzaam stroomt, is de levensduur van een constructieve waterglasinjectie lang. Bijvoorbeeld:

- Kurhaus in Scheveningen; hier is een bewezen levensduur van ruim 40 jaar aangetoond [10].
- Bij de verbouwing van het Mauritshuis in Den Haag is de constructieve waterglas ook aangebracht die enige decennia eerder onder het pand was aangebracht.
- Littlejohn et al. hebben aangetoond in laboratoriumproeven dat een constructieve waterglasinjectie geen sterkteverlies vertoont tijdens één jaar [11].

### Waterremmende waterglasinjectie

De levensduur van een waterremmende waterglasinjectie is veel korter dan die van een constructieve waterglasinjectie. Processen die de waterremmendheid negatief beïnvloeden zijn:

- Synerese: gel maakt plaats voor porie water.
- Fysische erosie: denk aan erosie langs imperfecties in een injectie laag zoals langs aansluitingen van verschillende injectiebollen of langs damwanden, waar grondwaterstroming zorgt voor het fysisch verwijderen van de gel.
- Chemische erosie: het oplossen van de gel als gevolg van langsstromend grondwater doordat dit veelal relatief zuur is ten opzichte van de basische softgel.

Vooralsnog is de levensduur van een waterremmende injectie niet zozeer bekend. Veelal wordt in de praktijk een levensduur van ca. 1 à 2 jaar aangehouden.

### Bedrijfszekerheid bemaling (risico verstopping)

Bij toepassing van waterglasinjecties wordt nogal eens gevreesd voor de potentiële verstopping van bemalingsfilters en/of Warmte-Koude Opslag (WKO) systemen. Belangrijk is dat men zich hierbij realiseert dat bemalingsfilters IN de bouwkuip liggen en WKO-systemen over het algemeen daarbuiten.

Het potentiële verstoppingsmechanisme van bemalingsfilters bij bodeminjectie is als volgt te definiëren:

1. De bodeminjectie zorgt voor een verhoging van pH van het grondwater in de bouwkuip als het gevolg van het uitspoelen van natronloog (ook wel uitloging genoemd). Waterglas blijft over een langere duur een bron voor de hoge pH. Met name bij aluminaat blijft de pH onveranderd hoog, immers aluminaat verhoogt de alkaliniteit van het waterglas terwijl verzurende harders een deel van deze alkaliniteit neutraliseren.
2. Grondwater buiten de bouwkuip bevat van nature vele (kat)ionen, die door een verhoging in pH vaak in slecht oplosbare neerslagen resulteren (zoals calciumcarbonaat, ijzeroxides en

opeenhopingen van organisch materiaal). De ionen worden door de lekkage van grondkerende wanden aangevoerd, of ook via het waterglas zelf. De aanvoer is in de tijd ongelimiteerd en in hoeveelheid alleen gemaximeerd door het debiet van instromend grondwater.

3. De bemaling zorgt voor menging van de waterstromen met (a) een hoge pH van de bodeminjectie en (b) het instromende grondwater door de damwanden en (c) eventueel regenwater uit de bouwkuip bodem. Deze menging zorgt voor verschuiving van het chemisch evenwicht o.a. ten aanzien van opgelost ijzer en calciumcarbonaat, waardoor slecht oplosbare neerslagen gevormd worden, die vervolgens de bemalingsbron kunnen doen verstopen.

Slecht oplosbare neerslagen verzamelen zich op bemalingsfilters, waardoor de onttrekkingscapaciteit van deze bemalingsfilters/bronnen (sterk) terugloopt en de ontwateringsniveaus (lokaal) niet langer gehaald kunnen worden. Hierdoor kunnen vooral de waterspanningen in de bouwkuip (lokaal) minder goed of niet worden beheerst, met als gevolg dat er lokaal vernatting en mogelijk ook welvorming kan optreden.

De potentiële verstopping van bemalingen is complex proces, waar tot op heden weinig ervaring mee is om het mechanisme vooraf 'kwantitatief' te voorspellen; meestal wordt pas achteraf geconstateerd dat de bemaling niet werkt door het verstopen van bemalingsfilters.

Een potentiële beheersmaatregel om het risico op verstopping te minimaliseren is sturing op de mengverhouding in het opgepompte water door de verticale positie van de filters te variëren en door het toepassen van slotvulling in de damwand. Hierbij helpt het om de bemalingsfilters hoog in het profiel te plaatsen en/of (ondiepe) horizontale drains toe te passen.

Een andere belangrijk keuze is die van het type harder. Een receptuur met natriumaluminaat houdt de pH van de gel per definitie over lange termijn hoog, omdat deze harder zelf alkaliniteit toevoegt aan het waterglas. Natriumaluminaat is in de basis ook dan ook geen harder, maar eerder een 'vertrager' (dat wil zeggen: het vertraagt de oplossing van de gel in water). Bij toepassing van een harder bestaande uit organische zuren is het voordeel dat een dergelijke organische harder voor een geleidelijke neutralisatie van het gelfront zorgt en een daarmee voor een redelijke correctie van de verhoogde pH in de bodem van de kuip, zodat het negatieve effect van een langdurige hoge pH concentratie daarmee duidelijk minder aanwezig is.

Als extra maatregel is het aan te bevelen om de bemaling in twee fasen op te delen:

- Opstartfase met leegpompen van de bouwkuip;

- Onderhoudsfase met op niveau houden van grondwaterstand in de bouwkuip (waarbij de focus op aanwezige waterspanningen gericht dient te zijn).

Bij het leegpompen van een bouwkuip met een bodemafdichting van waterglas heeft men te maken met verstoring van de natuurlijke hydrochemische condities die er waarschijnlijk al snel voor zorgt dat een aanzienlijk deel van de bemalingscapaciteit uit kan vallen door verstopping. De langdurige bemaling om de kuip op niveau te houden moet een grote mate van bedrijfszekerheid hebben en lang mee gaan. Een van de belangrijke aspecten hierin is om fysiek ruimte te hebben en te houden voor het ondiep (her)plaatsen van bemalingsfilters.

### Conclusies en aanbevelingen

Samenvattend kan worden gesteld dat een bodeminjectie op basis van waterglas een beheersbaar proces is wanneer de samenhang tussen bodemcondities en de vorming van silicagel voldoende bekend zijn. Waterglas wordt vooral voor twee doeleinden gebruikt, namelijk: i) als een waterremmende waterglasinjectie in bouwkuipen of ii) als een constructieve waterglasinjectie ter versteviging van de bodemmatrix.

Voor constructieve waterglasinjecties is het van belang om harde gels te vormen, die hoofdzakelijk bestaan uit amorfe silica. Voor deze injecties is het zaak om een hoge neutralisatiegraad te behalen, zodat amorfe silica gevormd wordt die zandkorrels verkit. Hiervoor moet een organische harder worden gebruikt. De levensduur van dergelijke injecties is lang, omdat het oplossen van amorfe silica een langzaam proces is. Het bepalen van de levensduur kan indicatief gedaan worden middels geochemische berekeningen, ter ondersteuning van praktijkervaring.

Waterremmende waterglasinjecties, zogenaamde softgels, zijn tijdelijk en hebben een levensduur van naar verwachting 1 à 2 jaar. In bouwkuipen worden softgels toegepast in combinatie met een bemaling, zodat een droge bouwkuip verkregen wordt. De receptuur van de gelinjectie en met name de toepassing van het soort harder (organische harder of natriumaluminaat) is een belangrijke factor in de bedrijfszekerheid van de bemaling. De verstoorde (hoge) pH in combinatie met de natuurlijke mineralen in grondwater zorgt per definitie voor een bepaalde mate van slecht oplosbare neerslagen, die voor verstopping in bemalingsfilters kunnen zorgen. De toepassing van een natriumaluminaat houdt de pH langdurig hoger dan de toepassing van een organische harder. In combinatie met een voortdurende aanvoer van natuurlijk grondwater van buiten de kuip is een voortdurend hoge pH extra belastend voor de bemalingsfilters en creëert daarmee een significant hoger risico ten aanzien van verstoppingen. Dit geldt met name voor

natriumaluminaat ten opzichte van organische harders.

Ten aanzien van de bemaling in bouwkuipen die zijn afgedicht met waterglasinjectie moet het volgende worden opgemerkt.

Monitoring op verstopping is bijzonder moeilijk. De pH-veranderingen zijn eenvoudig te meten, maar weinig zinvol omdat de verandering zich, na een lang traject met neerslagvorming, zeer plotseling voordoet. De verhouding tussen debiet en verlaging in de filters en de bouwkuip is wel een bruikbare indicator. Het is daarbij aan te bevelen om de grondwaterstijghoogte midden in de bouwkuip met waterspanningsmeters te meten, omdat peilbuizen daar bij ontgraving nogal eens verloren gaan.

Om de risico's van verstopping van de filters te minimaliseren worden de onderstaande aanbevelingen gedaan.

### Toepassen van een organische harder in combinatie met waterglas

Installeren van een initieel onttrekkingssysteem dat chemisch beïnvloed grondwater uit de bouwkuip afvoert (in het begin water met hoge pH) met diepere filters.

Installeren van een 'secundair' onttrekkingssysteem met een andere set filters, die relatief hoog in de bouwkuip staan, om het aantrekken van

basisch water te verminderen; dit mogelijk in combinatie met horizontale drains.

Monitoring van onttrekkingsdebieten, waterstandsverlagingen, waterspanningen en visuele inspecties van de bouwkuipbodembodem.

### Voetnoten

1 Bij het gebruik van pH metingen is het van belang om te realiseren dat de pH de activiteit van hydroxides weergeeft. Gezien het feit dat waterglas sterk ionisch is zullen niet alle (kat)ionen "actief" zijn maar eerder verwerkt zitten in een gel. Dit betekent dat slechts een fractie van de concentratie opgemerkt zal worden bij een pH bepalingen.

2 waarin  $V$  is de volume fractie en  $\rho$  is de dichtheid (subscriptie  $h$  staat voor harder en  $s$  staat voor waterglas), daarnaast is  $M_{Na_2O}^{wt}$  de molaire massa van  $Na_2O$ ,  $M_h^{wt}$  de molaire massa van de harder,  $N_s^{Na_2O}$  de massa fractie van  $Na_2O$  in het waterglas.

3 Op dit moment worden proeven uitgevoerd naar de levensduur van constructieve waterglasinjecties en tevens voor waterremmende waterglasinjecties, onder verschillende condities om meer generieke uitspraken over de levensduur te kunnen doen.

### Referenties

[1] A.E.C. van der Stoel; Waterremmende bodeminjectie: Volwassen techniek met gebruiksaanwijzing. Geotechniek, oktober 2013.

[2] A.E.C. van der Stoel, E. van de Werfhorst, R. Gerssen; Onderzoek naar de verbetering van de horizontale bodemafsluiting door middel van bodeminjectie. Geotechniek, maart 2018.

[3] Y.A. Owusu; Physical-chemical study of sodium silicate as a foundry sand binder; Advances in Colloid and Interface Science 18(1982)57-91.

[4] Tarutani, 1989; Polymerization of Silicic Acid; A Review; Analytical Sciences, June 1989, Vol 5.

[5] Lucas et al. (2011) Interactions between silica sand and sodium silicate solution during consolidation process; Journal of Non-Crystalline Solids 357 (2011) 1310-1318.

[6] Zhuravlev, 2000; The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model; Colloids and Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects 173 (2000) 1-38.

[7] D. Dimas; I Giannopoulou, D. Panias; Polymerization in sodium silicate solutions: a fundamental process in geopolymerization technology. J. Mater Sci (2009) 44:3719-3730.

[8] G.S. Littlejohn, M. Concannon, R.H. Wright; Engineering properties of silicate-R100 ester chemical grouts; Ground Engineering April 1997.

[9] Merrill and Spencer, 1949; Gelation of Sodium silicate, Effect of sulfuric Acid, Hydrochloric Acid, Ammonium sulfate and Sodium Aluminate; The Journal of Physical Chemistry, 1950.

[10] Van Weele A.F., 1983, Moderne Funderingstechnieken.

[11] Littlejohn G.S., Mollamahmutoglu M. 1992, Time dependent behavior of silicate grouted sand, Proceedings of the conference organized by the Institution of Civil Engineers, London, 1992. ●