

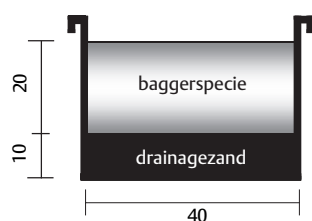
Droging en waterbinding

Versnelde rijping en immobilisatie van baggerspecie (2)

ir. B. Krikke, dr.ir. H.J.H. Brouwers en dr.ir. D.C.M. Augustijn, Universiteit Twente, Faculteit CTW, afdeling Civiele Techniek
 dr. A. Honders, Bodem+/Senter Novem
 ing. J. van der Plicht, Waterschap Rijn en IJssel

In het vorige nummer van *Cement* is de problematiek van verontreinigde baggerspecie geschetst en de rol van rijping besproken. Vervolgens zijn de eigenschappen van de behandelde baggerspecie behandeld (klasse 4 baggerspecie uit stedelijk gebied). Met deze baggerspecie zijn voorproeven met cement uitgevoerd om procescondities, recepturen en rijpingstrend te herkennen. Op basis van de opgedane ervaringen worden hoofdproeven opgezet en uitgevoerd, die in dit artikel nader worden uitgewerkt. Achtereenvolgens komen de proefopzet, drogingresultaten en de chemische waterbinding aan bod. In de volgende uitgave van *Cement* zullen de duurzame vastlegging (immobilisatie) van de verontreinigingen en de dichtheid van het product worden behandeld.

1 | Geprepareerde kuip (in cm)



Experimentele opzet

De hoofdproeven worden op grotere schaal uitgevoerd dan de experimenten van het vooronderzoek [1]. De verschillende monsters zullen een grotere massa hebben, omdat dit een realistischer beeld geeft en meetfouten verkleint. De behaalde resultaten van de vorige experimenten zijn meegenomen bij het opstellen van deze opzet. Zo wordt er uitgegaan van een start %ds van 35% en worden de monsters in een omgeving met een relatieve vochtigheid van rond de 70% opgesteld. Tevens wordt bij dit experiment naast cement ongebluste kalk (CaO) en enkele specifieke hulpstoffen toegevoegd. Voor aanvang, gedurende en na afloop van deze proef worden verscheidene parameters zoals massa, droge stof, temperatuur en luchtvochtigheid gemonitord.

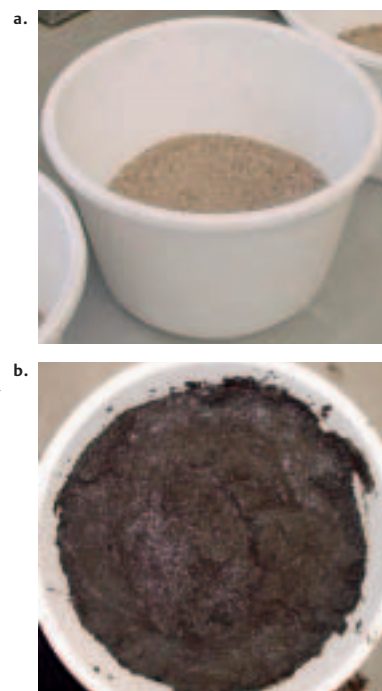
2 | Kuip met drainagezand (A) en met baggerspecie (B)

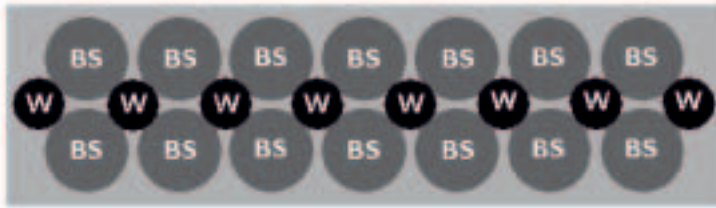
Bij de proef zijn speciekuipen gebruikt (fig. 1), die zijn voorzien van 10 cm zand (0-2 mm), zoals gebruikt in rijpingsdepots) als drainagelaag met daarbovenop 20 cm baggerspecie om een rijpingsdepot na te bootsen. Een drainagesysteem door middel van buizen en afvoer wordt niet nodig geacht, aangezien de baggerspecie reeds grotendeels van ongebonden water is ontdaan.

Nadat de baggerspecie in de kuip is gedaan is deze ingemengd met verschillende hoeveelheden van verschillende soorten bindmiddelen. De hoeveelheden zijn zo gekozen om uiteindelijk de werking van het rijpingsproces, het cement en/of de ongebluste kalk te kunnen zien. Zo is er gekozen voor 'nul' monsters zonder additief, extrema met 15% additief en een aantal met gemiddelde hoeveelheid van 7,5%. De hoeveelheden cement en ongebluste kalk zijn gekozen op basis van literatuur [2, 3]. Toevoeging van 0,5-1% ongebluste kalk is voldoende voor de verbetering van de uitloging. Meer ongebluste kalk zal niet bijdragen aan een verbetering van de

uitloging. De hoeveelheden variëren van een combinatie van 7% cement en 0,5% ongebluste kalk, 14% cement en 1% ongebluste kalk, tot uitsluitend 15% cement. Elke opzet is uitgevoerd met kuipen zonder mengen en met mengen gedurende het experiment, dit ter bevordering van de luchtdoorlatendheid van het mengsel. Elke opzet is in tweevoud uitgevoerd.

Uit [1] kwam naar voren dat de omgevingsfactoren een grote invloed hebben op met name de snelheid van het proces. Om dit ook hier realistischer te maken is weer gekozen voor een relatieve vochtigheid van ongeveer 70% gedurende het experiment. Om dit te realiseren zijn emmers water tussen de kuipen geplaatst en is het geheel met plastic overdekt. Dit plastic is voorzien van kunststof folie om fluctuaties van de relatieve vochtigheid te kunnen compenseren. Dit wordt met een





Op tijdstip $t = 0$ zijn de monsters handmatig ingemengd, door middel van tien slagen met een kleine schep. Dit proces werd zwaarder naarmate er meer additief bijgevoegd moest worden. Na twee weken, op $t = 2$, is gestart met het mengen van de monsters X/X/1. Ook dit is handmatig gebeurd door middel van vijf slagen met een grote schep. Hiermee is alle baggerspecie een keer grof omgezet. Door toevoeging van de bindmiddelen werd ook dit zwaarder naarmate de tijd verstreek. Dit is tweewekelijks herhaald tot en met week twaalf. De meetwaarden van $t = 20$ zijn uiteindelijk nog toegevoegd om zo de nauwkeurigheid van extrapolatie op een later tijdstip te vergroten. De spreiding van de massa van de monsters in tweevoud is na twintig weken maximaal $\pm 0,2$ kg.

3 | Schematische opstelling
(BS = baggerspecie;
W = water)

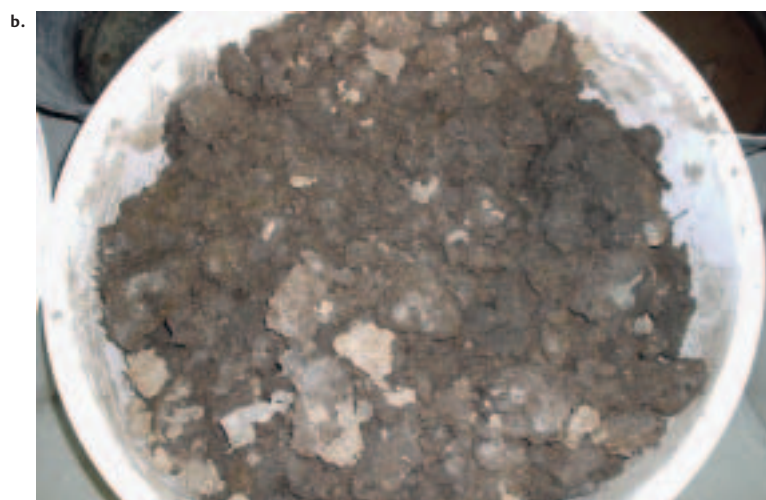
4 | Opstelling laboratorium;
kuipen met daartussenin
emmers water, geheel
afgedekt met plastic

hygrometer gemeten en zonodig gecorrigeerd, zodat de RV $\pm 5\%$ rond de 70% blijft. Figuren 3 en 4 geven een overzicht van deze opstelling.

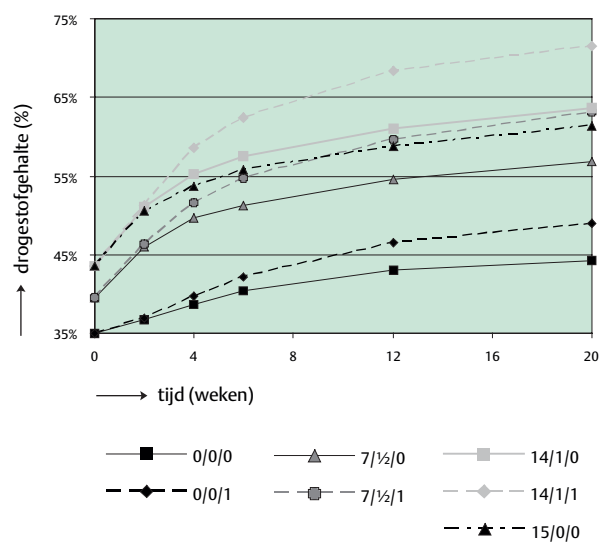
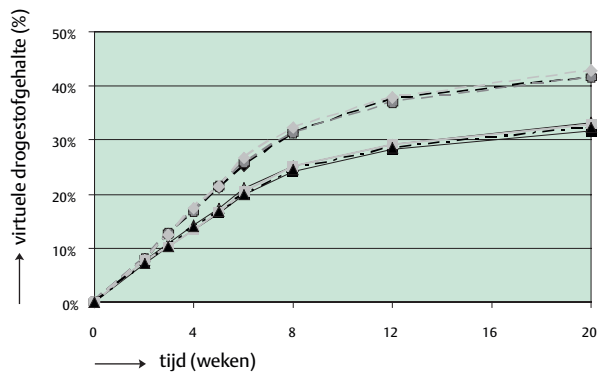
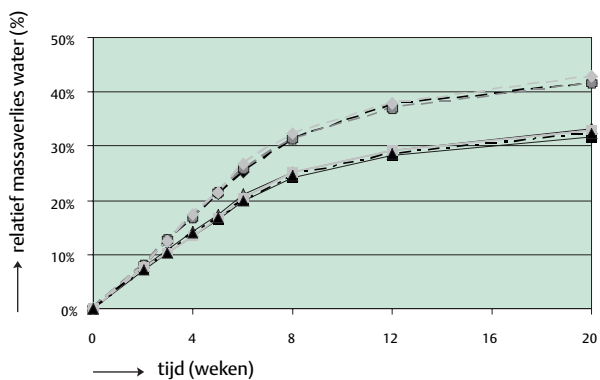
Tijdens de proef zijn regelmatig de massa's van de baggerspecie in de verschillende kuipen bepaald. Enkele malen tijdens het experiment zijn uit een aantal kuipen monsters genomen om het droge stofgehalte te bepalen. Uiteindelijk als afsluiting van de proef – dit zal zijn als de baggerspecie een %ds heeft bereikt van 50-55% of na maximaal twaalf weken – zijn de verschillende monsters op uitloging getest. Tevens is na afloop van de proef de verdichting bepaald (zie volgende artikel).

Droging (verhoging ds)

Het droge-stofgehalte is een van de maatstaven of de gerijpte baggerspecie inzetbaar is als bouwstof. Dit wordt rond de 50 tot 55% ds bereikt. Het meest ideale tijdstip om een bindmiddel toe te voegen is als de baggerspecie na ontwateren een %ds van ongeveer 35% heeft bereikt.



5 | Kuipen met ongemengde
(A) en gemengde (B)
baggerspecie



6 | Relatief massaverlies water (in %) versus de tijd (in weken)

7 | Virtuele droge-stofgehalte (in %) versus de tijd (in weken)

8 | Werkelijke droge-stofgehalte (in %) versus de tijd (in weken)

De verdamping van water is bepaald door tweewekelijks de massa's van de monsters te meten. Het gewichtsverschil op de tijdstippen met de massa op $t = 0$ is het massaverlies (mv) van water door verdamping. Vervolgens is het relatieve massaverlies (%mv) van water in de loop van de tijd gezet. Hier is de spreiding na twintig weken maximaal $\pm 0,4\%$. Deze waarden zijn in figuur 6 uitgezet. Duidelijk is te zien dat de verdamping van water bij ongemengde monsters even groot is. Tevens is

te zien dat bij alle gemengde monsters het water sneller verdampt. Als vervolgens het droge-stofgehalte in de loop van de tijd wordt bepaald aan de hand van de hoeveelheid verdampt water in verhouding tot de hoeveelheid ds aan het begin van het experiment krijgen we het virtuele droge-stofgehalte (fig. 7). De spreiding van het gemiddelde virtuele %ds van de monsters in tweevoud is na twintig weken maximaal $\pm 0,2\%$.

In figuur 7 is te zien dat de gemengde monsters een grotere toename van het droge-stofgehalte hebben dan de ongemengde monsters. De gemengde monsters hebben na twintig weken een ongeveer 3 tot 4% hoger %ds dan de ongemengde monsters. Het regelmatig mengen van de baggerspecie zorgt voor een betere toe- en afvoer van lucht, wat het verdampingsproces bevordert. In de praktijk wordt dit gerealiseerd door het omwoelen van de baggerspecie met een dragline. Dit omzetten heeft dus een positieve uitwerking op het droge-stofgehalte van de baggerspecie. Verder is ook te zien dat de toevoegingen ongebluste kalk en cement de toename van verdamping en daardoor het virtuele %ds bevorderen.

In figuur 8 zijn de werkelijke %ds gegeven, bepaald door droging bij $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. De waarden bij $t = 0$ zijn berekend aan de hand van de gegevens zoals ingemengd. Ook hier is net zoals bij de voorgaande proeven een grotere stijging van het droge-stofgehalte bij de monsters ingemengd met een additief waarneembaar. Door de binding van water met cement ontstaat chemisch gebonden water, dat niet verdampt bij droging bij $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, zodat het droge-stofgehalte toeneemt.

In figuur 8 is te zien dat de gemengde monsters een sterkere toename van het droge-stofgehalte hebben dan de ongemengde monsters, maar ook dat de monsters met de beide bindmiddelen

een snellere toename van het droge-stofgehalte hebben dan de monsters zonder bindmiddel. De monsters met ongebluste kalk vertonen daarnaast ook een iets grotere hellingshoek.

Buiten de voordelen van de versnelde droging en het chemisch gebonden water hebben de monsters met additief al direct na inmenging een hogere beginwaarde als %ds. Monsters met 7,5% additief hebben een tijdvoordeel op de monsters zonder additief van ongeveer vier weken. De monsters met 15% additief winnen door inmenging direct acht weken. Bovendien stijgt na inmenging van het bindmiddel het droge-stofgehalte de eerste vier weken sneller dan bij de monsters zonder additief. Dit wordt veroorzaakt door de reactie van het cement met het water. De weken daarna stijgt het droge-stofgehalte ongeveer met dezelfde snelheid als de monsters zonder additief. Dit is te verklaren aangezien cement enige tijd nodig heeft om volledig te reageren met het aanwezige water.

De grafiek van de gemengde monsters zonder bindmiddelen bereiken, vastgesteld door middel van extrapolatie vanaf twintig weken, na ongeveer 26 (gemengd) tot 60 (ongemengd) weken de waarde van 50% ds. Deze waarde wordt door het monster met 7,5% bindmiddel en ongemengd reeds 21 weken eerder bereikt, waarvan 4 weken tijdwinst al geboekt worden door de inmenging met additief. Met de acht weken dat de baggerspecie vóór het begin van het experiment ontwatert betekent dit een tijdwinst van ongeveer 62% ten opzichte van het gemengde monster zonder additieven (tabel 1). Hierbij is rekening gehouden met de acht weken dat de baggerspecie vóór het begin van het experiment ontwatert. Bij de gemengde monsters is dit 66% en bij de monsters met 15% additief is dit zelfs rond de 71% tijdwinst. Wordt de grafiek verder geëxtrapolerd dan krijgt men na 52 weken een waarde van rond de 55% ds voor de gemengde mon-

sters zonder additief. De monsters met 7,5% additief, ongemengd, gemengd, bereiken dit reeds na respectievelijk negen en zes weken. Ook hier wordt een tijdvoordeel behaald van 60 tot 70%.

Dit tijdvoordeel naar de praktijk levert een vergroting van de effectiviteit van het depot op van een factor 3. Met andere woorden, in de tijd dat baggerspecie met de huidige behandelingsmethode een depot vult, kunnen nu drie ladingen baggerspecie verwerkt worden.

Waterbinding

Reeds bij de eerste proeven kwam naar voren dat de monsters met inmenging van cement na droging op 105 °C meer droge stof bevatten dan op basis van inmenging verwacht mag worden. Het cement reageert met het aanwezige water en houdt dit zodoende vast, zelfs na droging. Nu is reeds vanuit de literatuur [4] bekend dat volledig gereageerd cement ongeveer 40% van zijn eigen gewicht vasthoudt aan water; hiervan is 15% fysisch gebonden water dat verdampt bij droging op 105 °C, de overige 25% is het chemisch

gebonden water (cgw) en verdampst bij droging op 105 °C niet. Om dit te verifiëren is een aantal basisproeven met cement en water uitgevoerd. De proef is zo opgezet dat de water-cementfactor (wcf) overeenkomt met de wcf zoals bij de proeven met de baggerspecie met een ds van 35% (tabel 2).

In tabel 3 zijn de gemeten massa's droge stof na droging op 105 °C op de verschillende tijdstippen omgerekend naar de procentuele hoeveelheid chemisch gebonden water. Dit wordt gedaan aan de hand van de volgende vergelijking.

$$\%cgw = \frac{m_{ds} - m_{CEM}}{m_{CEM}} \cdot 100\%$$

waarin:

%cgw hoeveelheid chemisch gebonden water in het monster (in %);

m_{ds} massa droge stof van het monster (in g);

m_{CEM} massa cement in het monster (in g).

Het chemisch gebonden water (cgw) van 25 gram op 100 gram

Tabel 1 | Geschatte tijd (in weken) en tijdwinst (in %) nodig voor product met %ds van 50%

codering	ontwatering	rijping	tijdwinst t.o.v. 0/0/1
0/0/0	8	60	-50%
0/0/1	8	26	0%
7/12/0	8	5	62%
7/12/1	8	3½	66%
14/1/0	8	2	71%
14/1/1	8	1½	72%
15/0/0	8	2	71%

Tabel 2 | Samenstelling mengsels (in grammen)

	cement	water	totaal	wcf
1	25,0	325,0	350,0	13,0
2	50,0	325,0	375,0	6,5
3	75,0	325,0	400,0	4,3

gehydrateerd cement uit tabel 3 is in overeenstemming met [3]. Reeds na twee weken benadert de waarde van het cgw de bekende waarde uit de literatuur. Door de hoge wcf heeft het cement dan waarschijnlijk al volledig gereageerd.

Als vervolgens naar de proeven met baggerspecie wordt gekeken, worden na vier weken andere waarden voor het chemisch gebonden water gevonden. In tabel 4 staan enkele meetwaarden van drogingproeven. Het eerste getal van de codering geeft aan welk droge stofgehalte de baggerspecie voor inmenging heeft en het tweede getal is de hoeveelheid cement in percentage van de baggerspecie, droge stof en water. De wcf varieert van 4,2 tot 14,4 en is dus in alle gevallen groot en overeenkomend met de waarden van tabel 3.

In tabel 4 is bij vergelijking van de monsters zonder en met cement te zien dat door toevoeging van 25 g cement uiteindelijk een ds toename van 36,4 g wordt verkregen (36,0/0 tegenover 36,0/5). Dit betekent 11,4 g chemisch gebonden water op 25 g cement, ofwel 46 g chemisch gebonden water op 100 g gereageerd cement (in plaats van de gebruikelijke 25 g op 100 g). Wordt dezelfde analyse eveneens gedaan bij de andere waarden, dan volgen de resultaten van tabel 5. Monster 37,5/5 valt

Tabel 3 | Massa droge stof (in grammen) en chemisch gebonden water (in %) versus de tijd (in weken)

	t = 0		t = 1		t = 2		t = 4	
	massa	wcf	massa	%cgw	massa	%cgw	massa	%cgw
1	25,0	13,0	27,3	9,2%	31,1	24,4%	31,3	25,2%
2	50,0	6,5	55,5	11,0%	62,0	24,0%	62,7	25,4%
3	75,0	4,3	81,9	9,2%	93,7	24,9%	93,6	24,8%

Tabel 4 | Meetresultaten drogingproeven (in grammen) na vier weken

codering	BS	W	CEM	M	ds M	%ds M
36,0/0	500	0	0	500	180,1	36,0%
36,0/5	500	0	25	525	216,5	41,2%
36,0/10	500	0	50	550	254,9	46,3%
36,0/15	500	0	75	575	291,7	50,7%
27,9/0	375	125	0	500	139,6	27,9%
27,9/5	375	125	25	525	177,9	33,9%
27,9/10	375	125	50	550	210,6	38,3%
37,5/0-1	500	0	0	500	187,7	37,5%
37,5/0-2	500	0	0	500	187,7	37,5%
37,5/5	500	0	25	525	208,5	39,7%
37,5/10	500	0	50	550	256,4	46,6%
28,1/0-1	375	125	0	500	140,3	28,1%
28,1/0-2	375	125	0	500	140,5	28,1%
28,1/5	375	125	25	525	175,6	33,4%
28,1/10	375	125	50	550	215,3	39,1%

Tabel 5 | Bepaling droge-stofgehalte - chemisch gebonden water (in %)

codering	%ds BS	%cgw	%ds M
36,0/0	36,0%		36,0%
36,0/5		46%	41,2%
36,0/10		50%	46,3%
36,0/15		49%	50,7%
27,9/0	27,9%		27,9%
27,9/5		54%	33,9%
27,9/10		42%	38,3%
37,5/0-1	37,5%		37,5%
37,5/0-2			37,5%
37,5/5		-15%	39,7%
37,5/10		38%	46,6%
28,1/0-1	28,1%		28,1%
28,1/0-2			28,1%
28,1/5		40%	33,4%
28,1/10		50%	39,1%

buiten de trend; hier is waarschijnlijk iets misgegaan. Het kan bijvoorbeeld zijn dat cement uit het monster is gespoeld. Bij alle andere monsters is echter duidelijk meer chemisch gebonden water te zien dan de 25% die bij uitsluitend cement wordt gevonden. Dit cgw bedraagt tussen de 38 en 54 g (gemiddeld 46 g) per 100 g cement. Bij de proeven met baggerspecie wordt dus meer water chemisch gebonden per g cement dan bij cement alleen. Dit kan worden verklaard doordat een aantal minerale bestanddelen (zie tabel 2 in [1]) van de baggerspecie een binding met het water en cement aangaat, leidend tot meer en waarschijnlijk andere reactieproducten met een hogere cgw. Deze 'winst' in de hoeveelheid chemisch gebonden water brengt weer voordelen met zich mee als het gaat om het versnellen van de rijping van baggerspecie. Hierdoor bereikt de baggerspecie namelijk eerder het gewenste droge-stofgehalte en kan dus sneller verwerkt worden als bouwstof.

Conclusies

In dit artikel zijn procescondities van de hoofdproef besproken, alsmede de drogingresultaten (verlaging vochtgehalte) en waterbinding. Een belangrijke maatstaf of baggerspecie inzetbaar is als bouwstof, is de steekvastheid van het materiaal. Dit wordt bereikt bij

een droge-stofgehalte van 50 tot 55%. Tijdens de experimenten is door zowel gewichtsmetingen als droging bij 105 °C regelmatig het droge-stofgehalte bepaald. Al snel werd duidelijk dat de monsters ingemengd met cement een sterkere toename van het droge-stofgehalte vertonen dan de monsters zonder additief. Dit geldt eveneens voor de monsters die gedurende het hoofdexperiment regelmatig omgezet werden.

Echter de waarden die werden gevonden door middel van gewichtsmetingen (het virtuele droge-stofgehalte) waren bij monsters ingemengd met cement lager dan de werkelijke droge-stofgehalten, gevonden door droging bij 105 °C. Met andere woorden, er is een toename van de droge stof ontstaan. Het cement heeft met het aanwezige water gereageerd en houdt dit zodoende vast, ook bij droging op 105 °C. Onder normale omstandigheden houdt volledig gereageerd cement na droging op 105 °C ongeveer 25% van zijn eigen gewicht aan chemisch gebonden water vast. Echter bij de proeven met baggerspecie is een gemiddelde stijging van de ds van 46% gemeten. Deze 'winst' in de hoeveelheid chemisch gebonden water brengt weer voordelen met zich mee. Hierdoor bereikt de baggerspecie eerder het gewenste droge-stofgehalte en kan dus sneller verwerkt worden als bouwstof. Door toevoeging van 7% cement en 0,5% ongebluste kalk wordt een versnelde rijping van een factor 3 bewerkstelligd ten opzichte van rijping zonder toevoeging. Een grotere hoeveelheid bindmiddelen geeft geen evenredig snellere rijping van de baggerspecie meer. Door deze versnelde rijping worden de bestaande depots efficiënter gebruikt. Hierdoor kan meer baggerspecie in de huidige depots worden verwerkt en hoeven er minder depots aangelegd te worden. Hiermee worden de problemen die naar voren komen bij de aanleg van nieuwe tijdelijke opslagdepots voorkomen. Het

eerste doel van dit onderzoek, tijdswinst bij droging, is hiermee bereikt. In het volgende nummer van *Cement* wordt nader ingegaan op de tweede doelstelling van het onderzoek: de vastlegging van de contaminanten.

Dankwoord

De auteurs danken de UT-medewerkers ing. G.H. Snellink en de heer H.M. Menkehorst voor hun technische assistentie en ondersteuning van dit onderzoek. Dit onderzoek is financieel ondersteund door de Cornelis Lely Stichting, Delta Marine Consultants, Betoncentrale Twenthe, Rokramix, Jaartsveld Groen en Milieu, Bodem+/Senter Novem en de Bouwdienst Rijkswaterstaat. ■

Literatuur

1. Krikke, B. et al., Versnelde rijping en immobilisatie van baggerspecie (1): Problematiek, materialen en vooronderzoek. *Cement* 2005 nr. 4.
2. Kalk, www.kalk.nl, 2004.
3. Lhoist Nederland NV, Verbetering uiterwaardenklei met kalk. Breda, september 2004.
4. Reinhardt, H.W., Beton als constructiemateriaal, eigenschappen en duurzaamheid. Delftse Universitaire Pers, Delft, 1998.