
Product-methodeblad nummer 14

**Zandophoging op
geokunststof omhulde zandpalen
(GEC)**

Inhoudsopgave

14.1 Algemeen	257
14.1.1 Principe methode	257
14.1.2 Technische levensduur	259
14.1.3 Voor- en nadelen	259
14.1.4 Beperkingen	260
14.2 Ontwerpfase	261
14.2.1 Benodigd grond- en laboratoriumonderzoek	261
14.2.2 Geotechnische ontwerpaspecten	262
14.2.3 Ontwerpdetails	263
14.2.4 Effect op bestaande weg	263
14.2.5 Effect op omgeving	264
14.2.6 Relevante wetgeving en doorlooptijd vergunningen	264
14.2.7 Raming aanlegkosten	266
14.2.8 Risico's, monitoring en maatregelen	266
14.2.9 Duurzaam bouwen	269
14.2.10 Verdere aandachtspunten	270
14.3 Uitvoeringsfase	270
14.3.1 Uitvoeringsmethode	270
14.3.2 K.A.M-zaken	272
14.3.3 Besteksteksten	273
14.4 Beheer en onderhoud	273
14.5 Ombouw / sloop	274
14.5.1 Toekomstige ombouw / uitbreiding	274
14.5.2 Sloop	274
14.6 Referenties	275
14.6.1 Ervaringen	275
14.6.2 Literatuur	275

Zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen (GEC)

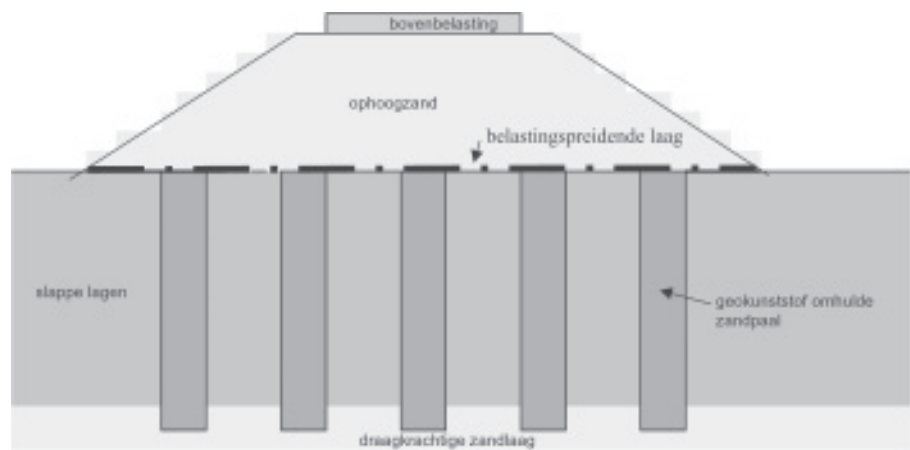
14.1 Algemeen

14.1.1 Principe methode

Geokunststof omhulde zandpalen, kortweg GEC genoemd (*Geotextile Encased Columns*), zijn relatief sterke en stijve elementen in slappe cohesieve grond. Geokunststof omhulde zandpalen kunnen worden toegepast om:

- de zetting van de ophoging te versnellen en te beperken
- de stabiliteit van de ophoging te vergroten.

De geokunststof kous wordt tijdens het vullen met zand opgespannen, waardoor de zandpaal zijn functie kan vervullen. Tijdens het gefaseerd aanbrengen van de zandophoging krijgt de grond tussen de zandpalen de gelegenheid te consolideren. In figuur 14.1 is het principe van de methode en een voorbeeld van het aanbrengen van een kolom gegeven.



Figuur 14.1a Principe GEC-methode

De methode is in de jaren '90 van de vorige eeuw in Duitsland ontwikkeld, zie de artikelen van Kempfert et al [4], [5] en [6]. In Nederland zijn enkele proefprojecten uitgevoerd (onderzoek op het proefveld Rijkswaterstaat - Hoge snelheidslijn te 's Gravendeel terp HW4 en voor de Betuwe route, proefvak Wijngaarden [26]), zie *Handreiking toepassing No-Recess technieken* [25] en *Evaluatie testbanen Hoeksche Waard* [8]. Vervolgens is de methode in 2001 toegepast bij 2 opritten van een brug over het Merwedekanaal in de Betuweroute bij Gorinchem en in 2002 voor de aanleg van de HSL bij Prinsenbeek [10].

Voor de methode is door Josef Möbius Bau-Gesellschaft GmbH & Co voor Duitsland patent aangevraagd. Toekenning van een patent is echter onwaarschijnlijk.



Figuur 14.1b Aanbrengen geokunststof omhulde zandpaal (proefvak Wijngaarden)

De installatie van de zandpalen geschiedde aanvankelijk grondverwijderend. Vanwege het gevaar voor opbarsten gaat voor de Nederlandse omstandigheden de voorkeur echter uit naar een grondverdringende installatiewijze. In grote lijnen verloopt de aanleg als volgt:

- aanbrengen van een werkvloer van zand met een dikte van 0,5 tot 1,0 m
- intrillen gesloten stalen buis (casing voorzien van speciale bodemklep) waarbij de ondergrond wordt verdrongen (bij de grondverwijderende methode wordt door intrillen een open stalen buis in de ondergrond aangebracht en wordt de grond binnen de buis ontgraven)
- neerlaten prefab kous in de casing
- vullen van de kous met zand
- trillend trekken van de casing
- zo nodig, aanbrengen van een belastingspreidende laag met geokunststof wapening
- aanbrengen van de ophoging van zand, met eventueel een extra tijdelijke overhoogte
- wachttijd ten behoeve van de consolidatie van de slappe lagen
- verwijderen van de eventuele extra overhoogte en herprofilieren van de ophoging.

De kolomdiameter varieert tussen 0,6 m en 1,5 m. De zandpalen worden veelal in een driehoekig stramien geplaatst op een hart-op-hart-afstand van 1,0 à 3,0 m, mede afhankelijk van de kolomdiameter. De draagkracht van de kolom wordt mede ontleend aan de trekkracht in de omhullende geokunststof en de horizontale gronddruk in de slappe laag. Bij de grondverdringende methode wordt een kleinere kolomdiameter (0,6 à 0,8 m) toegepast dan bij de grondverwijderende methode (circa 1,5 m). Voordelen van de grondverdringende methode zijn de snellere bouwtijd en het feit dat geen grond hoeft te worden afgevoerd (met name bij verontreinigde grond belangrijk). Aan de andere kant moet bij de grondverdringende methode gerekend worden op aanzienlijke buitenwaarts gerichte deformaties door de installatie van de zandpalen. Bij gevoelige belendingen kunnen dan aanvullende maatregelen nodig zijn. Dit werkt kostenverhogend.

Uit de proefprojecten en de daarbij uitgevoerde metingen is gebleken dat de geokunststof kous pas optimaal gaat functioneren als deze naadloos is en een diameter heeft die kleiner is dan de binnendiameter van de stalen buis.

De zandpalen worden in principe doorgezet tot in de draagkrachtige zandlaag. De zandpalen werken tevens als verticale drain. Voor de afvoer van het uitgeperste water dient een drainagelaag, zonodig voorzien van horizontale drains, aanwezig te zijn. Om kortsluiting met de onderliggende zandlaag te voorkomen, dient onderin de zandpalen een geohydrologische prop te worden aangebracht, bestaande uit een zand-bentoniet mengsel. Een mogelijk alternatief is de zandpalen te beëindigen boven de watervoerende zandlaag, net als bij verticale drains wordt gedaan. In dat geval dient gerekend te worden op extra zetting door samendrukking van de slappe laag beneden de zandpalen.

Bij de grondverwijderende methode kunnen maatregelen nodig zijn om tijdens de installatie opbarsten van de voet van de kolom te voorkomen.

Na voltooiing van de zandpalen wordt de zandophoging in lagen aangebracht waarbij de grond tussen de zandpalen de gelegenheid krijgt te consolideren.

Om te kunnen voldoen aan strenge eisen ten aanzien van de restzetting kan een tijdelijke extra overhoogte (voorbelaasting) worden toegepast. De extra overhoogte kan bestaan uit een zandlaag met een dikte 2 à 2,5 m zand gedurende bijvoorbeeld 3 maanden. De grootte en duur van de extra overhoogte zijn afhankelijk van de toekomstige belasting en de gemeten zetting. In Nederland is een extra overhoogte toegepast bij KW 40 in de Betuweroute [27] en bij de aardebaan van de HSL over een vuilstort bij Prinsenbeek [10].

14.1.2 Technische levensduur

De technische levensduur van de zandpalen wordt voornamelijk bepaald door de technische levensduur van de omhullende geokunststof kous. Factoren, die van invloed zijn op de technische levensduur van de geokunststof, zijn de productie onzekerheden, de belasting, de kruip, de mechanische aantasting en de aantasting door omgevingsinvloeden (uv-straling, chemisch en biologisch). Bij de toepassing als kous om een zandpaal spelen aantasting door uv-straling en biologische aantasting geen rol van betekenis. Met betrekking tot mogelijke chemische aantasting wordt, op basis van het grondwateronderzoek, een geokunststof product gekozen met voldoende weerstand.

Door middel van partiële 'veiligheids'factoren op de korte-duur-sterkte van de geokunststof wordt met bovengenoemde aspecten gehouden. De grootte van de factoren is mede afhankelijk van de gebruiksduur van de geokunststof. De gewenste gebruiksduur (bijvoorbeeld 80 à 100 jaar) wordt op deze wijze in het ontwerp meegenomen.

14.1.3 Voor- en nadelen

Voor- en nadelen van de ophogingsmethode ten opzichte van een zandophoging op maaiveld met verticale kunststofdrains zijn gegeven in tabel 14.1.

Aspect	Voordeel	Nadeel	Toelichting
kosten		hoog	
bouwtijd	normaal		zandpalen dragen groot deel belasting en werken ook als verticale drains
zetting gebruiksfase	klein		mits voorbelasting met tijdelijke extra overhoogte wordt toegepast
ruimtebeslag	klein		steil talud mogelijk door hogere j'-waarde ondergrond
complexiteit uitvoering		specialistisch	kan echter met bestaand en bekend materieel worden uitgevoerd
ervaring met uitvoering		gering	
aanwezigheid van risico's *)		beperkt	gedrag kous; ontwerpmodel ; wellicht risico door extra overhoogte te beperken
levensduur	onbeperkt		
status in relatie tot Bouwstoffenbesluit	bekend		
risico schade bestaande weg		beperkt	enige trillingshinder (naverdichting aardebaan) en horizontale deformatie bij grondverdringende methode
risico schade kabels/leidingen		beperkt	enige trillingshinder en horizontale deformatie bij grondverdringende methode
risico belendingen		beperkt	enige trillingshinder en horizontale deformatie bij grondverdringende methode
overig	flexibiliteit ontwerp		kolomplaatsing en geometrie

*) waaronder begrepen onzekerheid in de grondparameters, onvolkomenheid van ontwerpmodellen, uitvoeringstechnische onzekerheid / beheersbaarheid; een verdere uitsplitsing staat in §14.2.8

Tabel 14.1 Voor- en nadelen zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen (GEC)

14.1.4 Beperkingen

De in §14.1.3 genoemde nadelen kunnen een beperking voor de toepassing vormen. Daarnaast zijn er de volgende beperkingen:

- ervaring met ontwerp (interactie grond - kolom) en uitvoering zit vooral bij gespecialiseerde aannemer (Möbius)
- bij Nederlandse aannemers is maar beperkte ervaring aanwezig
- onbekendheid zettingsgedrag op lange termijn (restzettingen)
- indien tussenzandlagen aanwezig zijn met een stijghoogte die afwijkt van het polderpeil, zijn maatregelen nodig om een verbinding tussen de

- waterregiems te voorkomen, of dient een andere bouwmethode te worden toegepast.
- de installatie van zandpalen in het talud van een bestaand weglichaam kan schade veroorzaken aan de verharding ten gevolge van naverdichting; als dat reden is om geen zandpalen in het talud te plaatsen, zijn aanvullende maatregelen nodig om een zettingsarme constructie te realiseren, zie §14.2.4.

14.2 Ontwerpfase

14.2.1 *Benodigd grond- en laboratoriumonderzoek*

Het benodigd grondonderzoek is afhankelijk van de Geotechnische Categorie waarin een object valt. Rijkswegen vallen in het algemeen in Geotechnische Categorie 2 volgens NEN 6740 art. 6.2 [7]. Het standaard grondonderzoek staat vermeld in hst. 4.7.3 van *Construeren met grond* [3] en in §2.4 van *Bepaling geotechnische parameters* [13]. Het doel van het grondonderzoek is het vaststellen van de bodemopbouw, de grondwaterpeilen, het volumieke gewicht van de grondlagen, de samendrukkings- en de schuifweerstandseigenschappen.

Bij wegverbredingen dient het grondonderzoek ook informatie te verschaffen over de kwaliteit (pakkingsdichtheid) van het bestaande weglichaam en de uitgestrektheid in de ondergrond.

Sonderingen

De onderlinge afstand tussen de sonderingen is met name afhankelijk van de samendrukbaarheid van de grond en de variatie van de bodemopbouw. De gemiddelde afstand tussen de sonderingen ligt tussen de 50 en 100 m. De sonderingen dienen ten minste tot 1 à 2 m in de draagkrachtige laag te worden doorgezet.

Voor een goede karakterisering van de laagopbouw dient naast de conusweerstand ook de plaatselijke wrijving te worden gemeten. De elektrische sondeermethode met sonderingen volgens klasse 2 NEN 5140 [12] dient te worden toegepast.

In het bestaande weglichaam dienen ook een aantal sonderingen te worden uitgevoerd ter bepaling van de pakkingsdichtheid van het zand.

Om de ontwikkeling van de ongedraineerde schuifsterkte in de kolom te kunnen volgen zijn vinproeven in-situ uit te voeren.

Boringen en peilbuizen

Door middel van boringen dienen ongeroerde monsters te worden gestoken ten behoeve van laboratoriumproeven. De gemiddelde afstand tussen de boringen ligt tussen de 250 en 500 m. De boringen dienen te reiken tot de onderkant van de slappe lagen.

Tevens dient door het plaatsen van peilbuizen de grondwaterstand te worden bepaald in met name de eventuele tussenzandlagen en het onderliggende

watervoerend pakket. Een inzicht in de fluctuatie van de waterstanden is alleen te verkrijgen indien metingen over geruime tijd worden uitgevoerd. Een indicatie omtrent het polderpeil kan worden verkregen met behulp van Waterstaatskaarten, bodemkaarten van Stiboka, gegevens van het DINO-loket van TNO-NITG (www.nitg.tno.nl) en door waterpassing van het slootpeil.

Laboratoriumonderzoek

Ten behoeve van het geotechnisch ontwerp dient van de slappe lagen door middel van laboratoriumonderzoek te worden bepaald:

- het volumiek gewicht en het watergehalte volgens NEN 5112 [11]
- de samendrukkings- en consolidatie-eigenschappen (samendrukkingsproeven) volgens NEN 5118 [16]
- de schuifweerstandseigenschappen (triaxiaalproeven) volgens NEN 5117 [15]
- de chemische samenstelling en de pH van het grondwater volgens proef 119 RAW *Standaard RAW Bepalingen* [1]; dit onderzoek is van belang in verband met de mogelijke aantasting van de geokunststof kous.

14.2.2 Geotechnische ontwerpaspecten

Bij het ontwerp van een zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen wordt iteratief de geometrie van de zandpalen bepaald. Dit betreft de hart-op-hart afstand en de kolomdiameter. De zandpalen worden meestal volgens een driehoekstramien geplaatst. Hoe hoger de zandophoging, hoe dichter de zandpalen bij elkaar geplaatst moeten worden aangezien de draagkracht van de zandpalen afhangt van de sterkte van de geokunststof omhulling. Bij het ontwerp worden beschouwd:

- de eindzetting van de ophoging
- het zettingsverloop in de tijd, rekening houdend met het feit dat de zandpalen ook als verticale drains werken en dat de zandpalen door hun draagkracht consolidatievertragend zullen werken; bepaling van de bouwtijd
- de restzetting
- de stabiliteit van het talud tijdens aanleg en in de eindfase
- de dimensionering van een eventuele belastingspreidende laag
- het effect van zettingen en horizontale grondvervormingen op kabels, leidingen en belendingen
- het effect van trillingen op de omgeving en het bestaande weglichaam.

Het geotechnisch ontwerp resulteert in een advies omtrent:

- kolomgegevens: diameter, afstand, geometrie, lengte, vulmateriaal
- lengte en samenstelling van de geohydrologische prootype en kwaliteit geokunststof omhulling
- bruto zanddikte; eventuele tijdelijke extra overhoogte
- dwarsprofiel / taludhelling tijdens de aanleg
- aanvullende maatregelen om zetting te voorkómen ter plaatse van het talud van het bestaande weglichaam
- het traject waarvoor het advies geldt en de wijze waarop de overgangen naar trajecten waar andere methoden zijn gebruikt, moeten worden uitgevoerd

- prognose van het verhardingsonderhoud in de gebruiksfase
- geotechnische risicoanalyse, monitoring- en maatregelenplan tijdens uitvoering en gebruiksfase conform §13.2.8

Bij wegverbredingen, bovendien in:

- verwachte omvang van en maatregelen tegen de schade aan de bestaande baan.

Bij belendingen en kabels en leidingen bovendien in:

- verwachte omvang van en maatregelen tegen de schade aan belendingen en kabels en leidingen.

14.2.3 *Ontwerpdetails*

Om kortsluiting met het onderliggende watervoerend pakket te voorkomen, wordt met zand-bentoniet een geohydrologische prop aangebracht. Bij het proefveld Rijkswaterstaat - Hoge snelheidslijn te 's Gravendeel is een bentonietgehalte van 6% toegepast. Een dergelijke geohydrologische prop zou ook ter plaatse van eventuele tussenzandlagen met afwijkende stijghoogte kunnen worden toegepast.

Een mogelijk alternatief is de zandpalen te beëindigen boven de watervoerende zandlaag, net als bij verticale drains wordt gedaan. In dat geval dient gerekend te worden op extra zetting door samendrukking van de slappe laag beneden de zandpalen.

Indien de bruto zanddikte kleiner is dan 3 à 4 maal de vrije overspanning tussen de zandpalen kan met geogrids een lastspreidende laag worden aangebracht.

Daar waar de zone met zandpalen aansluit op een star gefundeerde constructie, zoals een landhoofd van een brug of viaduct, kan een overgangsgebied worden gerealiseerd door de hart-op-hart-afstand van de zandpalen te verkleinen naarmate de afstand tot de star gefundeerde constructie kleiner is.

14.2.4 *Effect op bestaande weg*

Door de ophoging zullen de geokunststof omhulde zandpalen tijdens de uitvoering enige samendrukking ondergaan. Ook zal de bestaande aardebaan zakken waardoor er kans is op scheurvorming in de verharding. In vergelijking met andere methoden geldt:

- er treedt minder zetting op dan bij toepassing van een zandophoging met verticale drains, al dan niet met overhoogte
- er treedt meer zetting dan bij een evenwichtsconstructie.

Omdat de meeste bestaande weglichamen zijn opgebouwd uit losgepakt zand, is er grote kans op klink ten gevolge van naverdichting door de trillingen bij het inbrengen van de casing. Hierdoor treedt schade aan de bestaande verharding op.

Vaak zullen ook palen in het talud van de bestaande aardebaan moeten worden aangebracht. In dat geval is er een groot risico voor naverdichting en

schade, mede gezien het grote aantal palen dat moet worden aangebracht. Bij het project bij Gorinchem zijn daarom eerst hulp-casings \varnothing 1,2 m (open stalen buispaal) ingetrild tot ongeveer de onderkant van de bestaande aardebaan. Vervolgens zijn deze leeg geboord en konden de geokunststof omhulde zandpalen worden aangebracht.

Als alternatief kan worden overwogen de geokunststof omhulde zandpalen alleen buiten het invloedsgebied van het bestaande talud aan te brengen. De zandophoging op het talud kan dan zettingsvrij worden aangelegd met bijvoorbeeld lichtgewicht materiaal.

14.2.5 *Effect op omgeving*

Naast de bovengenoemde effecten kunnen tijdens de uitvoering nadelige effecten optreden:

- bij het aanbrengen van zandpalen met de grondverdringende methode kunnen horizontale deformaties optreden; door passende maatregelen (zoals voorboren) kunnen de effecten voor belendende infrastructuur binnen acceptabel grenzen te houden
- bij het installeren van de zandpalen kan sprake zijn van trillings- en geluidshinder
- bij het aanbrengen en consolidatie van de zandophoging treden zettingen en horizontale grondvervormingen op; deze zijn echter aanzienlijk kleiner dan bij een ophoging op onbehandelde grond.

14.2.6 *Relevante wetgeving en doorlooptijd vergunningen*

Op de volgende pagina is in tabelvorm weergegeven welke vergunningen naar alle waarschijnlijkheid moeten worden aangevraagd en wat daarbij de te verwachten doorlooptijd is.

Opmerking

Er is verondersteld dat geen puntlozingen van het drainagewater op het riool plaatsvinden. Er wordt geen water onttrokken zodat in het kader van de Grondwaterwet geen vergunning nodig is.

14.2.7 Raming aanlegkosten

De onderstaande kosten zijn, tenzij anders vermeld, exclusief BTW, VAT (Vorbereiding-Administratie-Toezicht) en winst en risico en betreffen prijspeil 2004.

- zand voor drainagelaag en ophoging, in het werk € 10,- à 11,- / m³
- het afgraven van zand (tijdelijke extra overhoogte) geschiedt doorgaans kostenneutraal (geen kosten voor de opdrachtgever)
- in Nederland bestaat weinig ervaring met geokunststof omhulde zandpalen; voor de installatie van de zandpalen zijn tot op heden buitenlandse, gespecialiseerde aannemers ingeschakeld; in *Evaluatie No-Recess testbanen Hoeksche Waard* [8] is voor een geokunststof omhulde zandpaal, diameter 0,8 m, inclusief winst & risico de volgende prijs genoemd:

€ 40,- /m-kolom, bij een vervangingpercentage van 15% en een kolomlengte van 5 m bedraagt de kostprijs circa € 60,- / m², bij een kolomlengte van 10 m circa € 120,- / m²

Opgemerkt wordt dat de kosten voor de geokunststof kous ongeveer 35% van de kosten van de kolom uitmaken. Het is te verwachten dat bij een meer frequente en meer grootschalige toepassing de prijs van de zandpalen omlaag zal gaan.

In de bovengenoemde prijs zijn niet opgenomen de kosten voor:

- bij grondverwijderende methode: afvoer en/of opslaan van vrijkomende grond
- voorzieningen om terrein bereikbaar te maken
- leveren en aanbrengen van dekgrond
- regelen huishouding oppervlaktewater.

14.2.8 Risico's, monitoring en maatregelen

Risicofactoren

Bij een zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen bestaan de volgende risicofactoren:

- de eigenschappen van de slappe lagen qua samendrukking, doorlatendheid, sterkte en stijfheid
- de ontwerpmethodes voor de reductie van zettingen, de restzettingen en het effect van een tijdelijke extra overhoogte
- de hoeveelheid trillingen die wordt geproduceerd bij installatie van grondverdringende zandpalen
- de gangbare ontwerpmodellen, met name voor de bepaling van de vervorming van de bestaande baan bij een verbreding
- de mate waarin de verharding op de bestaande baan, kabels, leidingen en belendingen de extra belasting bij installatie van de zandpalen en van de ophoging kunnen weerstaan
- de mate waarin het bestaande weglichaam en de omgeving gevoelig zijn voor trillingen

- de opspanning van de geokunststof omhulling bij grondverdringende installatie van de kolom; zonder goede opspanning functioneert het systeem niet
- lange termijn gedrag kunststof kous (is in ontwerp afgedekt door partiële factoren op materiaalsterkte)
- de in-situ doorlatendheid van de geohydrologische prop; deze is afhankelijk van de uitvoeringsmethode
- het opbarsten van de kolomvoet vóór het vullen van de casing met zand.

De risicofactoren kunnen resulteren in de volgende ongewenste gebeurtenissen:

- het functioneren van de geohydrologische scheiding tussen oppervlaktewater en grondwater
- toenemende en/of een te grote zetting in de gebruiksfase, waardoor onvoorziën verhardingsonderhoud nodig is
- instabiliteit van de ophoging tijdens de uitvoering
- schade aan kabels en leidingen en belendingen
- schade aan de bestaande weg in het geval van wegverbredingen.

Als onderdeel van het ontwerp wordt een geotechnische risicoanalyse gemaakt. Hierbij wordt nagegaan of een realistische variatie van de meest onzekere parameters er toe leidt dat het ontwerp niet meer voldoet aan het Programma van Eisen. In dat geval wordt voor het desbetreffende risico een monitorings- en maatregelenplan opgesteld, of wordt het ontwerp of het Programma van Eisen bijgesteld.

Monitoring

Door monitoring kunnen de procesmatige risico's worden beheerst. Tijdens de installatie van de geokunststof omhulde zandpalen worden de volgende metingen verricht om de ongewenste gebeurtenissen kunnen beheersen:

- algemene controlemeting tijdens installatieproces: penetratiegegevens casing (tijd- en diepte-afhankelijke registratie van de frequentie en het vermogen van het trilblok)
- functioneren van de geohydrologische scheiding: bepaling stijghoogte in de verschillende zandlagen (opbarstgevaar bij grondverwijderende methode)
- te grote zetting in de gebruiksfase: eventueel meting van de rek in de geokunststof kous en meting van de diameter van de geokunststof kous (in principe alleen bij onderzoeksprojecten)
- schade aan kabels en leidingen en belendingen: meting van horizontale deformatie door middel van inclinometerbuizen; visuele inspectie en meting van trillingen aan belendingen
- schade aan het bestaande weglichaam: het regelmatig inmeten van meetboutjes; visuele inspectie van de toestand van de bestaande weg.

Het gedrag van de zandophoging wordt gevolgd door:

- te grote zetting in de gebruiksfase: periodieke waterpassingen van zakbaken voor de bepaling van de zetting en het verloop van de zetting in de tijd; eventueel aangevuld met metingen aan zettingsmeetslangen;

periodieke meting van de waterspanning tussen de zandpalen in het hart van de ophoging; eventueel meting van de rek in de geokunststof omhulling en meting van de diameter van de geokunststof omhulling (in principe alleen bij onderzoeksprojecten)

- kans op instabiliteit van de ophoging tijdens de uitvoering: periodieke meting van de waterspanning buiten de teen van de ophoging; plaatsen en waarnemen ('doorzichten') van perkoenpalen
- kans op schade aan kabels, leidingen en belendingen: periodieke hellingmetingen in inclinometerbuizen voor de bepaling van de horizontale deformaties ten gevolge van het aanbrengen van de zandophoging
- kans op schade aan de bestaande weg: het regelmatig inmeten van meetboutjes; visuele inspectie van de toestand van de bestaande weg.

Het verdient aanbeveling vóór het maken van het werk een aantal proefpalen in de directe omgeving te maken. Naar aanleiding van de opgedane ervaring en eventueel de meetresultaten (horizontale deformatie; rek in geokunststof) kan worden besloten de afmetingen, de plaatsing en/of de uitvoeringswijze van de zandpalen aan te passen.

Voor de controle van het functioneren van de geohydrologische prop kan bij een aantal zandpalen een falling head doorlatendheidsproef worden uitgevoerd. Gedurende de proef blijft de casing in de grond; de casing is alleen gevuld met de geohydrologische prop. Het waterpeil in de casing wordt verlaagd tot beneden de stijghoogte in het Pleistocene zand. Door de stijging van het waterpeil te observeren kan het functioneren van de prop worden beoordeeld.

Als onderdeel van het ontwerp wordt een monitoringsplan gemaakt. Hierin wordt beschreven wat, hoe, waar, wanneer en door wie wordt gemeten, hoe de gegevens worden opgeslagen en gepresenteerd. Ook wordt voor elke meting vooraf aangegeven, wat de verwachtingswaarde van de te meten grootte is, en wat de grenswaarde is waarbij sprake is van een ontoelaatbare afwijking.

Maatregelen

Bij tegenvallende resultaten tijdens installatie van de zandpalen kunnen de volgende maatregelen worden genomen:

- functioneren van de geohydrologische scheiding: bij het opbarsten van de geohydrologische prop bij de grondverwijderende methode, onder water een (deel van de) geohydrologische prop aanbrengen (gecompliceerd); overstappen op grondverdringende installatiemethode; eventueel: tijdelijke spanningsbemaling in het Pleistocene zand toepassen (let op vergunningsproblematiek)
- bij schade aan kabels en leidingen en belendingen ten gevolge van gronddeformaties (grondverdringende methode): ter compensatie in de belendende zone grond verwijderen (bijvoorbeeld met avegaar cementbentoniet kolommen aanbrengen); ontwerp aanpassen en overstappen op grondverwijderende methode

- bij schade aan belendingen ten gevolge van trillingen: ander type trilblok toepassen; voorboren; casing statisch wegdrukken
- bij schade aan de bestaande weg ten gevolge van trillingen: ander type trilblok toepassen; voorboren; casing statisch wegdrukken
- bij te grote zetting in de gebruiksfase: indien de opspanning van de geokunststof onvoldoende is kan het ophoogzand geheel of gedeeltelijk worden vervangen door licht materiaal.

Bij tegenvallende resultaten wat betreft het gedrag van de zandophoging kunnen de volgende maatregelen worden genomen:

- bij te grote zetting in de gebruiksfase: toepassen van een tijdelijke extra overhoogte (is nog onderwerp van studie); ophoogzand geheel of gedeeltelijk vervangen door licht materiaal
- bij instabiliteit van de ophoging tijdens de uitvoering: ophoogzand verwijderen; flauwer talud toepassen; langere wachttijden in acht nemen; lichte ophoogmaterialen toepassen
- bij schade aan kabels en leidingen en belendingen: grotere afstand aanhouden tussen zandpalen en teen van het talud; tussenliggende zone op andere manier zettingsvrij aanleggen (bijvoorbeeld met lichte ophoogmaterialen)
- bij schade aan de bestaande weg in het geval van wegverbredingen: grotere afstand aanhouden tussen zandpalen en teen van het talud; tussenliggende zone op andere manier zettingsvrij aanleggen (bijvoorbeeld met lichte ophoogmaterialen).

Als onderdeel van het ontwerp wordt een maatregelenplan opgesteld. Hierin wordt aangegeven welke van bovengenoemde maatregelen wordt toegepast als uit de monitoring blijkt dat de grenswaarden van één van de gemeten grootheden wordt overschreden.

14.2.9 Duurzaam bouwen

Opgemerkt wordt dat met het begrip duurzaam bouwen in dit document niet zozeer de levensduur bedoeld wordt, maar met name de milieuduurzaamheid.

Typering gebruikte bouwstoffen

Voor het zand wordt verwezen naar de *Leidraad Bouwstoffen* [24]. Natuurlijk zand is veelal als schone grond of categorie 1 bouwstof aan te merken. Bij zeezand is de categorie-indeling afhankelijk van het succes van de ontziltingsstap (chloride kan kritisch zijn). Toegepast ontzilt zeezand is meestal categorie 1 bouwstof. Bij zand uit baggerspecie is de categorie-indeling afhankelijk van de herkomst en scheidingsresultaat van de baggerspecie.

Kunststoffen vallen niet onder de werkingssfeer van het Bouwstoffenbesluit.

Terugwinbaarheid / hergebruik

Het ophoogzand kan eenvoudig worden teruggewonnen en hergebruikt. Kostentechnisch gezien is het de vraag of het zinvol is, daar transportkosten hoog zijn in verhouding tot de zandprijs.

De geokunststof omhulde zandpalen kunnen alleen tegen zeer hoge kosten worden teruggewonnen. In de praktijk zal dit niet gebeuren. Ook zal het terugnemen van de zandpalen meer schade toebrengen aan grondslag en waterhuishouding dan het laten zitten van de zandpalen. Wel kan worden geëist dat de bovenste meter van de behandelde grond wordt vervangen door teelaarde, om bijvoorbeeld landbouwkundig gebruik mogelijk te maken. Het hierbij vrijkomende zand kan worden hergebruikt. De vrijkomende geokunststof kous kan worden gebruikt voor de vervaardiging van andere kunststofproducten (recycling).

Extra milieumaatregelen

Om kortsluiting met het onderliggende watervoerend pakket te voorkomen, wordt met zand-bentoniet een geohydrologische prop aangebracht. Bij het proefveld Rijkswaterstaat - Hoge snelheidslijn te 's Gravendeel is een bentonietgehalte van 6% toegepast. Een dergelijke geohydrologische prop zou ook ter plaatse van eventuele tussenzandlagen met afwijkende stijghoogte kunnen worden toegepast.

14.2.10 Verdere aandachtspunten

Niet van toepassing.

14.3 Uitvoeringsfase

14.3.1 Uitvoeringsmethode

Voordat de geokunststof omhulde zandpalen worden geïnstalleerd, wordt ten behoeve van het bouwmaterieel een werkvloer bestaande uit zand aangebracht. De werkvloer heeft ook een drainerende functie voor de afvoer van het water dat uit de zandpalen naar maaiveld stroomt.

De zandpalen worden geïnstalleerd met behulp van trilblok en een stalen casing. De installatie kan op twee manieren geschieden:

- met grondverwijdering
- met grondverdringing.

De penetratiegegevens van de casing moeten worden vastgelegd, dat wil zeggen de tijd- en diepteafhankelijke registratie van de frequentie en het vermogen van het trilblok.

Kolominstallatie met grondverdringing

- trillend inbrengen van de stalen casing tot in de draagkrachtige laag; casingdiameter circa 0,6 à 0,8 m; de casing is afgesloten door een conische klep; er wordt een hoogfrequent trilblok met variabel moment gebruikt; eventueel het intrillen vergemakkelijken met lucht- of waterdruk
- neerlaten van de prefab geokunststof kous in de casing; de kous is naadloos en bestaat uit een weefsel (met hoge sterkte) met wapenings- en filterfunctie; de kousdiameter is kleiner dan de binnendiameter van de casing; na afknippen op de juiste lengte wordt een voetsnaad aangebracht
- vullen van de kous met zand waarbij de kous tijdelijk aan de bovenrand van de casing of de trechter wordt vastgeklemd; tijdens het vullen wordt een trechter gebruikt

- trillend trekken van de casing, waarbij de conische klep zich automatisch opent; door de trillingen wordt het zand in de casing verdicht.

Volledigheidshalve volgt hier de beschrijving van de kolominstallatie met grondverwijdering

- trillend inbrengen van de stalen casing tot circa 1,5 m in de draagkrachtige laag; casingdiameter circa 1,5 m; slagkracht 2000 kN, frequentie 30 Hz; eventueel met aangelaste spuitlans het intrillen vergemakkelijken
- ontgraven van de grond uit de casing tot circa 0,5 m in de draagkrachtige zandlaag; de resterende zandvulling in de casing (circa 1,0 m) dient als tijdelijke waterafdichting; voor het ontgraven kan een speciale grijper worden toegepast
- neerlaten van de prefab geokunststof kous in de casing; de kous is naadloos en bestaat uit een weefsel (met hoge sterkte) met wapenings- en filterfunctie; de kousdiameter is circa 0,1 m groter dan de binnendiameter van de casing; door de relatief grote kousdiameter wordt, bij de latere vulling van de kous en de bijbehorende uitdijning, de horizontale gronddruk geactiveerd; na afknippen op de juiste lengte wordt een voetnaad aangebracht
- vullen van de kous met zand waarbij de kous tijdelijk aan de bovenrand van de casing wordt vastgeklemd (zie figuur 14.1); tijdens het vullen wordt een trechter gebruikt
- trillend trekken van de casing; door de trillingen wordt het zand in de casing verdicht.

De kolominstallatie met grondverdringing geschiedt sneller dan met grondverwijdering. Ook hoeft geen grond te worden afgevoerd. Met name bij verontreinigde grond is dit een voordeel. De horizontale en verticale vervormingen die tijdens het grondverdringend inbrengen van de casing optreden, zijn een punt van aandacht. Eventueel kan worden voorgeboord om de deformaties te beperken.

Bij de grondverwijderende methode, die aanvankelijk in het No-Recess proefveld HW4 van Rijkswaterstaat - Hoge snelheidslijn te 's Gravendeel werd gebruikt, barstte bij het ontgraven de grond onderin de buis op, zie *Evaluatie No-Recess testbanen Hoeksche Waard 3 september 1999* [8a].

In voornoemd proefveld en in het proefvak te Wijngaarden, beide met de grondverdringende uitvoeringswijze, bleek dat de geokunststof kous onvoldoende met zand werd gevuld. Het gevolg was dat bij het trekken van de casing de horizontaal opgespannen grond terugveert en de kolom samenknijpt tot een diameter die aanzienlijk kleiner is dan die van de kous. Bij belasten van deze zandpalen bleek de geokunststof kous pas onder spanning kwam nadat grote zettingen waren opgetreden.

Naar aanleiding van deze ervaringen is de uitvoeringsmethode aangepast zodat toch een goede opspanning bij het vullen van de kous werd bereikt. Voor een nadere beschrijving van de opgedane ervaringen wordt verwezen naar *Handreiking toepassing No-Recess technieken* [25].

Zandophoging

Na voltooiing van de zandpalen en eventueel, het aanbrengen van een belastingsspreidende laag, wordt de zandophoging in lagen aangebracht. Doordat de zandpalen ook als verticale drains fungeren krijgt de grond tussen de zandpalen de gelegenheid te consolideren waardoor deze in staat is de benodigde steundruk te leveren.

Om te kunnen voldoen aan strenge eisen ten aanzien van de restzetting kan een tijdelijke extra overhoogte (voorbelasting) worden toegepast. Het effect van de extra overhoogte op het gedrag van de zandpalen, met name van de geokunststof kous, is momenteel nog onderwerp van studie.

Het ophoogzand wordt in het algemeen door middel van vrachtwagens of dumptrucks aangevoerd, waarna het door bijvoorbeeld een bulldozer of laadschop in dunne lagen van 0,5 à 0,75 m wordt uitgereden. Daarbij dienen de voertuigen verspreidend te rijden, zodat het zand wordt verdicht. Het belangrijkste voordeel van inrijden is dat het zand een laag watergehalte heeft, waardoor de verwerkbaarheid en de weerstand tegen afschuiven relatief hoog zijn. Vaak zal een trilwals ingezet moeten worden om te voldoen aan de verdichtingsgraad zoals vermeld in §22.02.06 van de *Standaard RAW Bepalingen* [1]. Nadere informatie is te vinden in *Verdichting van de zandbaan* [30]. Een alternatieve wijze van ophogen is het hydraulisch ophogen (nat aanbrengen of spuiten). Deze methode voorkomt dat slecht begaanbaar terrein moet worden bereden en maakt een hoge productie mogelijk. Het gedeponeerde materiaal is echter inhomogeen, heeft een geringe stabiliteit tijdens de uitvoering en kan grotere schadelijke gevolgen hebben op de omgeving door het waterbezwaar en/of de uitslag van zout en fijn materiaal. Voor een verdere omschrijving wordt verwezen naar hoofdstuk U van *Handleiding Wegenbouw, Ontwerp Onderbouw* [2].

14.3.2 K.A.M-zaken

In deze paragraaf worden de K.A.M.-zaken beschouwd die betrekking hebben op de uitvoering (K.A.M. staat voor Kwaliteits-afname controle, ARBO en veiligheidszaken en Milieu).

Kwaliteits-afname controle

Voor uitvoering dient een installatieplan te worden overlegd, waarop is aangegeven:

- locatie van de zandpalen
- nummer van de zandpalen
- diameter van de zandpalen
- lengte van de zandpalen.

Tot de kwaliteitsbewaking wordt ook gerekend het maken van enkele proefpalen zoals is beschreven in §14.2.8.

Op de bouwplaats dient gecontroleerd te worden:

- afmetingen en kwaliteit prefab kous, inclusief kwaliteit van de naden
- kolominstallatie (penetratiegegevens casing, zie §14.2.8).

In §22.06.01 van de *Standaard RAW Bepalingen* [1] worden eisen gesteld aan ophoogzand. Hierover wordt het volgende opgemerkt.

De eisen gesteld aan ophoogzand zijn dermate ruim, dat slecht drainerend materiaal met veel fijne deeltjes zou mogen worden toegepast (§22.06.01: 50% mag kleiner zijn dan 63 mm). Gebruik van zand dat aan deze eisen voldoet, kan leiden tot taludinstabiliteit vanwege verzadiging met water. Uit dit oogpunt zijn voor het ophoogzand strengere eisen noodzakelijk dan in §22.06.01 van de *Standaard RAW Bepalingen* [1] worden aangegeven. Uit ervaring is bekend dat zowel voor de werkvloer als de zandophoging het beste matig fijn tot matig grof zand met maximaal 5 à 10 % fijne deeltjes (<63 mm) kan worden gebruikt.

Eisen voor de verdichting van de zandophoging zijn gegeven in §22.02.06 van de *Standaard RAW Bepalingen* [1].

ARBO en veiligheidszaken

De normale ARBO en veiligheidsregels voor grond- en heiwerk zijn van toepassing.

Milieu

Geen bijzonderheden.

14.3.3 Besteksteksten

In Nederland zijn nog geen geokunststof omhulde zandpalen volgens bestek uitgevoerd. Bij de proefvelden is gebruik gemaakt van een werkschrijving. Belangrijk voor de aannemer is dat deze de juiste grondgegevens heeft ter bepaling van het in te zetten materieel.

14.4 Beheer en onderhoud

Het belangrijkste aandachtspunt voor de wegbeheerder is het optreden van zettingen en horizontale deformaties in de gebruiksfase.

Indien de geokunststof omhulde zandpalen naar verwachting functioneren, zal de ophoging in de gebruiksfase vrijwel geen zakking ondergaan. Dan zijn in het kader van beheer en onderhoud geen bijzondere maatregelen nodig.

Ondanks het feit dat de ophoging weinig vervorming meer zal ondergaan, verdient het aanbeveling bij overdracht van uitvoering naar beheerder een prognose te maken van de verwachte zettingen en vervormingen in de gebruiksfase, en de consequenties daarvan voor het verhardingsonderhoud. De prognose dient te worden gebaseerd op zettings- en vervormingsmetingen tijdens de aanleg. Ook verdient het aanbeveling het geotechnisch ontwerp te evalueren aan de hand van de metingen en ervaringen tijdens de aanleg. De evaluatie dient aanbevelingen te bevatten ten aanzien van de grondparameters rekenmodellen die moeten worden gebruikt bij het ontwerp van een eventuele toekomstige reconstructie of verbreding van de weg.

Tijdens de gebruiksfase dient de weg regelmatig te worden geïnspecteerd op schade. In het kader van de meerjarenplanning verhardingsonderhoud

gebeurt dit tweejaarlijks. Afhankelijk van de verwachte zettingen en vervormingen in de gebruiksfase kan het nodig zijn om vaker een inspectie uit te voeren. De toestand van de verharding wordt hierbij getoetst aan de volgende interventiewaarden:

- de Immediate Roughness Index (IRI-waarde) mag maximaal 3,5 bedragen
- zettingsverschillen in langsricting mogen maximaal 0,05 m over een lengte van 25 m bedragen
- het verschil in langshelling tussen de verharding op de stootplaten van een kunstwerk en de verharding op het kunstwerk mag maximaal 1:100 bedragen
- de afwatering van de rijbaan mag niet worden belemmerd als gevolg van zetting van de verharding
- de dwarshelling van de rijstroken in rechtstanden dient minimaal 1 % en maximaal 5 % te zijn
- scheuren in de verharding mogen maximaal 20 mm breed zijn
- het hoogteverschil over de scheuren mag maximaal 10 mm zijn.

Indien één van deze interventieniveau's wordt overschreden, dient direct verhardingsonderhoud te worden uitgevoerd om te voorkomen dat de verkeersveiligheid in het geding komt.

14.5 Ombouw / sloop

14.5.1 Toekomstige ombouw / uitbreiding

Een toekomstige verbreding van de ophoging kan op dezelfde wijze worden uitgevoerd als de oorspronkelijke constructie. Deze methode wordt alleen gekozen als de geokunststof omhulde zandpalen onder de bestaande weg naar behoren functioneren en ook de eventuele belastingverhoging door de uitbreiding kunnen weerstaan.

Het verbreden en/of verhogen van de ophoging met zand is alleen mogelijk als de zandpalen voldoende sterkte bezitten. Het ontwerp van de zandpalen dient hierop afgestemd te zijn. Met name betreft dit de sterkte van de geokunststof omhulling. Hebben de zandpalen onvoldoende sterkte, dan is een toekomstige ophoging alleen uitvoerbaar met licht ophoogmateriaal.

Ook bij het onvoldoende functioneren van de zandpalen is een toekomstige ombouw alleen mogelijk met licht ophoogmateriaal of met een zandophoging op een paalfundering.

14.5.2 Sloop

De zandophoging (aardebaan) kan eenvoudig worden verwijderd. De geokunststof omhulde zandpalen zijn in principe als verloren te beschouwen. Het terugnemen van de zandpalen kan alleen tegen hoge kosten geschieden en zal meer schade toebrengen aan grondslag en waterhuishouding dan het laten zitten van de zandpalen. Wel kan worden geëist dat de bovenste meter van de behandelde grond wordt vervangen door teelaarde, om bijvoorbeeld landbouwkundig gebruik mogelijk te maken.

14.6 Referenties

14.6.1 Ervaringen

In Nederland zijn in 1998 en 1999 enkele proefprojecten uitgevoerd waarbij een zandophoging op geokunststof omhulde zandpalen is aangebracht. Het betreft:

- Terp HW4 op het proefveld Rijkswaterstaat - Hoge snelheidslijn te 's Gravendeel, zie *Bemessung der Gründung eines Dammes im Baufeld HW4* [7] en *Evaluatie No-Recess testbanen Hoeksche Waard* [8]. De ondergrond is hier gelaagd en bestaat uit organische klei, siltige klei, veen en zand. In het ontwerp was voorzien zandpalen met een diameter van 1,54 m volgens de grondverwijderende methode toe te passen met een hart-op-hart-afstand van circa 2,8 m. Bij het ontgraven van de grond uit de buis trad opbarsten op door de hoge waterdruk in het diepe zand. Er is toen besloten grondverdringende palen toe te passen met een diameter van 0,80 m en een kleinere hart-op-hart-afstand. Vooraf is geen voorspelling gedaan van het zettingsgedrag in de tijd; de eindzetting werd geschat op minder dan 0,5 m. Gedurende de eerste 2 jaar is echter aanzienlijk meer zetting opgetreden, die wordt toegeschreven aan een onvoldoende opspanning van de geokunststof omhulling.
- Terp bij Wijngaarden (zie figuur 14.1) in het kader van de aanleg van de Betuweroute.

Voor een nadere beschrijving van de opgedane ervaringen wordt verwezen naar *Handreiking toepassing No-Recess technieken* [25].

Verdere toepassingen in Nederland zijn:

- 2 brugopritten brug over het Merwedekanaal in de Betuweroute (KW 40) bij Gorinchem, 2001 [27]
- voor de aanleg van de HSL bij Prinsenbeek in 2002 [10], bij vuilstort Westerik.

14.6.2 Literatuur

- [1] *Standaard RAW Bepalingen*, CROW-publicatie, 2000, inclusief Wijziging december 2002
- [2] *Handleiding Wegenbouw. Ontwerp onderbouw. Deel II Techniek*, RWS DWW, april 1991
- [3] *Construeren met grond*, CUR handboek 162, 1993
- [4] Kempfert, H.-G. *Embankment foundation on geotextile-coated sand columns in soft ground*, Proceedings Geosynthetics: Applications, Design and Construction, Balkema, Rotterdam, 1996
- [5] Kempfert, H.-G., P. Wallis *Geokunststoffummantelte Sandsäulen - ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau*, 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über "Kunststoffe in der Geotechnik", Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Essen, 1997
- [6] Kempfert, H.-G., A. Jaup, M. Raithe *Interactive behaviour of a flexible sand column foundation in soft soils* Proceedings 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, Balkema, 1997

- [7] Kempfert, H *Bemessung der Gründung eines Dammes im Baufeld HW4 auf Geokunststoffummantelten Sandsäulen (GCC-Verfahren), Standsicherheits-untersuchungen und Einrichtung von Messquerschnitten*, Gutachten, Prof. Dr.-Ing. Kempfert und Partner - Ingenieurbüro für Geotechnik, Proj.-Nr. K-318. 4 November 1997, 27 November 1997 en 21 Januari 1998
- [8a] *Evaluatie No-Recess testbanen Hoeksche Waard 3 september 1999*, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, + Special Geotechniek, Oktober 1999
- [8b] *Evaluatie No-Recess testbanen Hoeksche Waard 17 januari 2001*, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, + Special Geotechniek, april 2001
- [9] *Gewapende granulaatmatras op palen. Toepassing, ontwerp- en uitvoeringsaspecten*, CUR rapport 2002-7, december 2002
- [10] Nods, N., Brok, C. *Met geotextiel ommantelde zandpalen als fundering voor HSL bij Prinsenbeek*, Geokunst, januari 2003
- [11] NEN 5112 *Geotechniek. Bepaling van het watergehalte van grond in het laboratorium*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1995
- [12] NEN 5140 *Geotechniek, Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvings weerstand van grond. Elektrische sondeermethode*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1996
- [13] *Bepaling geotechnische parameters*, CUR-rapport 2003-7, 2003
- [14] NEN 6740 *Geotechniek. TGB 1990. Basiseisen en belastingen*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997
- [15] NEN 5117 *Geotechniek, Bepaling van de schuifweerstand- en vervormingsparameters van grond. Triaxiaalproef*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997
- [16] NEN 5118 *Geotechniek, Bepaling van de een-dimensionale samendrukkingseigenschappen van de grond*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997
- [17] Poorashasb, H.B. *Foundation of light structures on problematic soils*, International Symposium on Problematic Soils, IS-TOHOKU, Sendai, Japan, October 1998
- [18] *Handleiding wegenbouw - ontwerp verhardingen*, DWW, 1998
- [19] *Handleiding wegenbouw - ontwerp overgangsconstructies*, DWW, 1995
- [20] BS 8006 *Code of practice for strengthened/reinforced soils and fills*, BSI, 1995/1999
- [21] Russel, D., N. Piermont *An assessment of design methods for piled embankments*, Ground Engineering, November 1997
- [22] Maddison, J.D., D.B. Jones, A.L. Bell, C.G. Jenner *Design and performance of an embankment supported using low strengths geogrids and vibro concrete columns*, Geosynthetics: Applications, design and Construction, De Groot, Den Hoedt & Termaat, Balkema, Rotterdam, 1996
- [23] Kempfert, H.-G., M. Stadel *Zum Tragverhalten geokunststoffbewehrter Erbauwerke über pfahlähnlichen Traggliedern*, Geotechnik, Sonderheft DGGT, Essen, 1995
- [24] *Leidraad Bouwstoffen* Rijkswaterstaat, RWS DWW, maart 2000
- [25] *Handreiking No-Recess technieken*, CUR rapport 199, januari 2001

- [26] Molendijk, W.O. *Funderingsmethode met zandkolommen voldoet*, Land + Water nummer 4/2000
- [27] Molendijk, W.O., J. Jonker, F. van den Berg *Geotextile wrapped columns successfully used for the Betuwe Route*, IABSE Symposium, Volume 87, Antwerp 2003
- [28] Raithel, M. *Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen*, Heft 6, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gh Kassel, Juli 1999
- [29] Alexiew, D., G.J. Horgan, D. Brokemper *Geotextile encased columns (GEC): load capacity & geotextile selection* BGA International Conference on Foundations, Dundee, September 2003, Thomas Telford
- [30] *Verdichting van de zandbaan*, CROW-rapport 04-04, 2004
- [31] Raithel, M., H.-G. Kempfert *Bemessung von Geokunststoffummantelten Sandsäulen*, Bautechnik 76 (1999), Heft 11 - Verlag Ernst & Sohn
- [32] Göbel, Kempfert, Alexiew, Trunk, Vogel, Hubal en Heitz. *Empfehlung 6.9 Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern*, Oktober 2003
- [33] Eekelen, S.J.M. van, A. Bezuijen, O.Oung *Aardebaan op palen: ontwerpberoeeningen en experimenteel onderzoek*, Wegbouwkundige werkdagen, CROW, 2004