

---

Product-methodeblad nummer 16

# **Zandophoging op maaiveld met de beaudrain methode**

# Inhoudsopgave

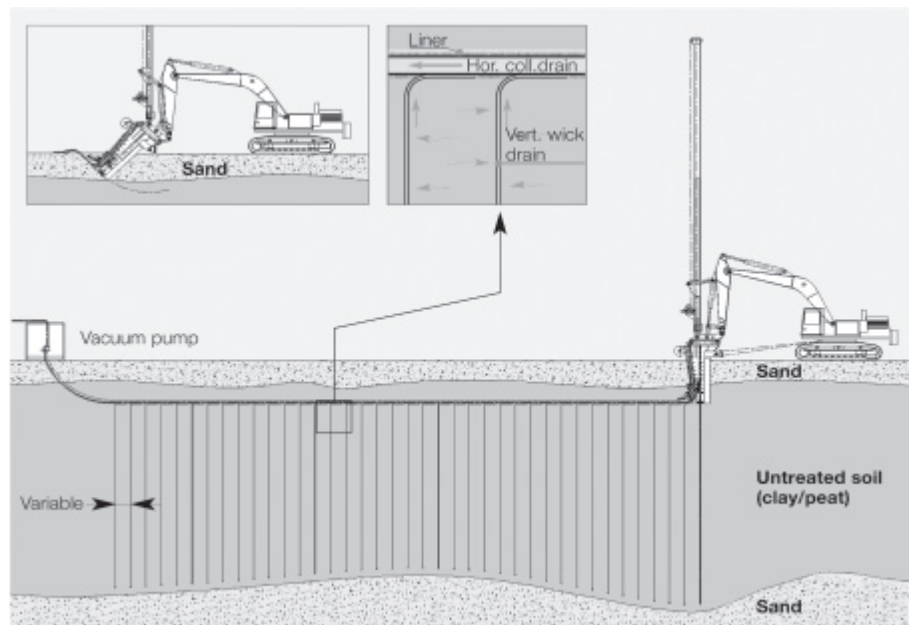
<b>16.1 Algemeen</b>	299
16.1.1 Principe methode	299
16.1.2 Technische levensduur	301
16.1.3 Voor- en nadelen	302
16.1.4 Beperkingen	302
<b>16.2 Ontwerpfase</b>	303
16.2.1 Benodigd grond- en laboratoriumonderzoek	303
16.2.2 Geotechnische ontwerpaspecten	305
16.2.3 Ontwerpdetails	306
16.2.4 Effect op bestaande weg	306
16.2.5 Effect op omgeving	306
16.2.6 Relevante wetgeving en doorlooptijd vergunningen	307
16.2.7 Raming aanlegkosten	309
16.2.8 Risico's, monitoring en maatregelen	310
16.2.9 Duurzaam bouwen	312
16.2.10 Verdere aandachtspunten	312
<b>16.3 Uitvoeringsfase</b>	313
16.3.1 Uitvoeringsmethode	313
16.3.2 K.A.M-zaken	315
16.3.3 Besteksteksten	317
<b>16.4 Beheer en onderhoud</b>	317
<b>16.5 Ombouw / sloop</b>	318
16.5.1 Toekomstige ombouw / uitbreiding	318
16.5.2 Sloop	318
<b>16.6 Referenties</b>	318
16.6.1 Ervaringen	318
16.6.2 Literatuur	318

## Zandophoging op maaiveld met de beaudrain methode

### 16.1 Algemeen

#### 16.1.1 Principe methode

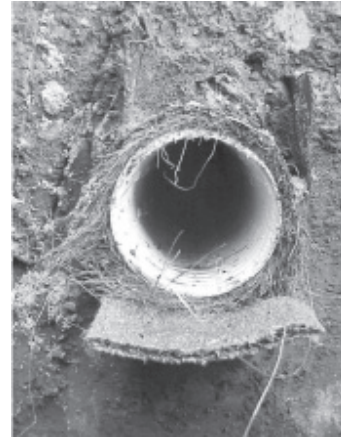
De werking van het BeauDrain systeem is gebaseerd op het principe van vacuüm- of luchtdrukconsolidatie, zoals beschreven in product-methodeblad nr. 6. Door in een te consolideren, van de atmosferische omgeving afgesloten grondlichaam de luchtdruk te verlagen wordt een druk gemobiliseerd, die direct als een alzijdige belasting op het grondlichaam werkt, zie figuur 16.1. Door consolidatie neemt de effectieve spanning geleidelijk toe in de tijd. De luchtdruk wordt verlaagd met vacuümpompen. De consolidatie wordt versneld met verticale drains en het uitgereste water wordt afgepompt. De luchtdrukbelasting werkt als een tijdelijke voorbelasting, die snel kan worden aangebracht zonder stabiliteitsproblemen zoals bij een tijdelijke voorbelasting door een extra overhoogte met zand. Bij een dik en slap lagenpakket kan de methode worden toegepast om de restzetting te verminderen. De methode is ook toegepast om het effect van de ophoging op kabels, leidingen en belendingen te verkleinen.



Principe van de installatie van het BeauDrain systeem



*detail van ploegmes*



*doorsnede loodrecht op scherm*

*Figuur 16.1 Principe zandophoging op maaiveld met de BeauDrain methode*

Het BeauDrain systeem bestaat uit een combinatie van horizontale en verticale drains, aangebracht in het samendrukbare grondlichaam. De horizontale drains zijn aangesloten op pompen. De afdichting naar de atmosfeer wordt door de samendrukbare grond zelf verzorgd. Tevens wordt op de horizontale drain een strook dichte folie aangebracht. Een rij verticale drains met daarboven een horizontale drain wordt een scherm genoemd. Het complete scherm wordt in één werkgang aangelegd.

Er wordt op gewezen, dat met luchtdrukconsolidatie de waterspanning wordt verlaagd en niet de grondwaterstand. Het luchtdrukverschil werkt als bovenbelasting waardoor grondwater uit de ondergrond wordt geperst. Voor de korrelspanning in de ondergrond maakt het in principe geen verschil of het terrein wordt belast met een ophoogmateriaal (zand) of met luchtdruk. Alleen als verticale drainage is aangebracht, werkt luchtdrukconsolidatie effectief tot onderin de samendrukbare laag. Bij slecht functionerende verticale drainage daalt de effectiviteit van de methode sterk.

Het BeauDrain systeem is ontwikkeld door Koninklijke Boskalis Westminster NV. Vooral nog is dit ook het enige bedrijf dat de methode toepast. Voor een nadere toelichting wordt verwezen naar de literatuur [5] en [17].

De maximale belasting die met luchtdrukconsolidatie kan worden bereikt, is afhankelijk van de aanzuighoogte van een pomp. Deze is theoretisch 10 m-waterkolom, doch in de praktijk aanzienlijk minder door drukverliezen (leidingweerstand, lekkage, plaatshoogte e.a.). Ook het soort pomp speelt hierbij een rol. Het luchtdrukverschil, dat werkt als bovenbelasting op de ondergrond, kan in optimale omstandigheden circa 50 kPa bedragen. Door een optimale afsluiting moet worden verhinderd dat valse lucht wordt aangezogen. Het consolidatieproces dat hierdoor op gang komt, is vergelijkbaar met dat van een circa 3 m hoge zandophoging. De BeauDrain methode wordt veelal in combinatie met een traditionele zandophoging toegepast. De extra belasting door de luchttonderdruk komt dan in de plaats van de tijdelijke extra overhoogte zoals ook is beschreven in product-methodeblad nr. 2.

Tijdens de voorbelastingsperiode, dat wil zeggen de periode waarin luchttonderdruk toegepast wordt, is een intensieve controle en bewaking nodig om de luchttonderdruk op het juiste niveau te handhaven.

Door de verticale drainage wordt het overspannen water in de samendrukbare lagen snel afgevoerd, zodat het zettingsproces sneller plaatsvindt en de stabiliteit tijdens de uitvoering toeneemt. De verticale drains mogen geen verbinding maken met het diepe zand en eventueel aanwezige tussenzandlagen omdat dan geen onderdruk kan worden opgebouwd. In principe worden de drains niet dieper doorgezet dan tot 1,0 à 1,5 m boven de onderliggende waterdoorlatende lagen (Pleistoceen). De werking van een verticaal drainagesysteem berust primair op verkorten van de afstroomweg. Daarnaast wordt gebruik gemaakt van het principe dat de horizontale doorlatendheid van samendrukbare lagen groter is dan de verticale doorlatendheid. Hierdoor wordt de tijd die het overspannen poriënwater nodig heeft voor het afstromen uit de slecht waterdoorlatende laag sterk verkort. Gezien het feit dat de methode sterk afhankelijk is van het functioneren van de verticale drainage, worden de drains op een korte h.o.h.-afstand geplaatst, bijvoorbeeld 1,0 à 1,5 m.

In dit product-methodeblad worden alleen samengestelde drains beschouwd, dat wil zeggen drains, die bestaan uit een kern die is voorzien van noppen, ribbels of een profilering met daaromheen een omhulling (filter).

De luchttonderdruk kan zonder wachttijden worden aangebracht. Een eventuele zandophoging op maaiveld wordt, om stabiliteitsverlies te voorkomen, gefaseerd aangebracht, dat wil zeggen in dunne lagen. De toegepaste laagdikte is meestal niet groter dan 0,50 à 0,75 m. Na iedere ophoogslag wordt dan een wachttijd in acht genomen waarin de waterspanningen in de grond zich kunnen aanpassen.

Het doel van het BeauDrain systeem is het forceren van zetting, door de grond aan een hogere belasting te onderwerpen dan in de gebruiksfase. Hierdoor zullen de zettingen in de gebruiksfase kleiner zijn dan wanneer geen luchtdrukconsolidatie wordt toegepast.

Door toepassing van het BeauDrain systeem met luchtdrukconsolidatie zullen de horizontale vervormingen aan de polderzijde van de ophoging kleiner zijn dan bij een traditionele zandophoging, zie verder §16.2.4 en 16.2.5.

#### *16.1.2 Technische levensduur*

De horizontale drainage, de folie en de verticale drainage hebben alleen tijdens de uitvoering een functie. De gevraagde levensduur bedraagt bij deze toepassing in het algemeen minder dan 6 maanden en is vrijwel altijd korter dan de technische levensduur. De effectieve levensduur van de verticale drains is afhankelijk van het dichtslibben van de drain met fijne deeltjes en het knikken als gevolg van zetting. Gedurende de gebruiksfase van de drains blijft echter altijd voldoende drainerende capaciteit over.

### 16.1.3 Voor- en nadelen

Voor- en nadelen van de ophogingsmethode ten opzichte van een zandop-hoging op maaiveld met verticale kunststofdrains zijn gegeven in tabel 16.1.

### 16.1.4 Beperkingen

De in §16.1.3 genoemde nadelen kunnen een beperking voor toepassing vormen. Daarnaast kunnen de volgende omstandigheden een beperking vormen voor toepassing van de methode:

- bij aanwezigheid van oude drainagesystemen, doorgaande zandlagen, boomstronken en andere obstakels in de zone van 2 m en wegfunderingen is de toepassing van BeauDrain niet mogelijk
- aaneengesloten zandlaag of zandlagen in de samendrukbare laag; vanwege de grote doorlatendheid van de zandlagen kan onvoldoende onderdruk (belasting) in de samendrukbare lagen worden bereikt
- smal terreinoppervlak; als richtlijn wordt aangehouden dat de breedte van het terrein ten minste 2 à 3 x de dikte van de samendrukbare laag moet zijn; bij een kleinere breedte kunnen de randeffecten tot onvoldoende resultaat leiden
- sterk organische grondsoorten; door gasbelvorming ten gevolge van de onderdruk kan een geringere onderdruk en dus een geringere belasting optreden dan gewenst
- diepe ligging freatische grondwaterstand; als de horizontale drainage in de onverzadigde zone wordt gelegd (maximum diepte 3 m beneden werkniveau), neemt de kans op lekkage toe (aanzuigen valse lucht) waardoor de gewenste onderdruk niet wordt gehaald
- toepassing van luchtdrukconsolidatie is weinig zinvol bij samendrukbare lagen met een geringe dikte (3,0 à 4,0 m)
- kunststofdrains zijn moeilijk te installeren bij dichtgepakte tussenzandlagen (conusweerstand, sondering,  $q_c > \text{circa } 6 \text{ MPa}$ ).

Aspect	Voordeel	Nadeel	Toelichting
kosten		iets hoger	handhaving onderdruk en monitoring
bouwtijd	relatief kort		korte 'ophoog'tijd: geen wachttijden bij aanbrengen luchtonderdruk en relatief snel ophogen met zand mogelijk
zetting gebruiksfase	gering		mits zettingstijd voldoende lang
ruimtebeslag	gering		geen tijdelijke extra overhoogte nodig en relatief steile taluds mogelijk
complexiteit uitvoering		matig	gevoelig voor storingen (hoge eisen aan pompapparatuur en bewaking, o.a. via gsm)
ervaring met uitvoering		matig	slechts 1 aannemingsbedrijf voert de techniek uit
aanwezigheid van risico's *)		matig	gasbelvorming bij organische grond; gering effect bij ingesloten zandlagen beneden de grondwaterspiegel; te grote samendrukking toplagen
levensduur	neutraal		
status in relatie tot Bouwstoffenbesluit	bekend		
risico schade bestaande weg		groot	bij toepassing direct naast bestaande weg
risico schade kabels/leidingen	gering		
risico belendingen	gering		mits niet dichterbij dan 5 à 10 m
overig	toepasbaarheid		toepasbaar bij zeer slappe ondergrond

\*) waaronder begrepen onzekerheid in de grondparameters, onvolkomenheid van ontwerpmodellen, uitvoeringstechnische onzekerheid / beheersbaarheid; een verdere uitsplitsing staat in §16.2.8

Tabel 16.1 Voor- en nadelen zandophoging op maaiveld met de BeauDrain methode

## 16.2 Ontwerpfase

### 16.2.1 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* [18]. 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.

Met behulp van zogenaamde flanksonderingen dient de zijkant van het bestaande cunet te worden vastgesteld. Deze informatie is van belang om de plaats van de drainschermen zodanig te kiezen dat geen doorsnijding van het bestaande cunet ontstaat.

#### *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 [9] dient te worden toegepast.

Voor de onderkenning van goed doorlatende tussenlagen kunnen sonderingen met meting van de waterspanning worden uitgevoerd. Met behulp van dissipatietesten in zandlagen kan de stijghoogte van die lagen worden bepaald.

#### *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](http://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 [13]
- de samendrukkings- en consolidatie-eigenschappen (samendrukkingsproeven) volgens NEN 5118 [14]
- de schuifweerstandseigenschappen (triaxiaalproeven) volgens NEN 5117 [15].



Een eerste schatting van de sterkteparameters kan worden ontleend aan tabel 1 van NEN 6740 [7].

In verband met lozing van het vrijgekomen drainagewater op het oppervlaktewater, kan het nodig zijn de milieu-hygiënische samenstelling van het grondwater te bepalen. Hiertoe kan worden besloten als uit verkennend bodemonderzoek is gebleken dat de bouwlocatie verdacht is, zie NEN 5740 [8].

#### 16.2.2 *Geotechnische ontwerpaspecten*

Het ontwerp van een zandophoging op verticale zandschermen met bemaling omvat de bepaling van:

- de eindzetting van de ophoging
- het zettingsverloop in de tijd
- bepaling van de bouwtijd
- de restzetting
- de stabiliteit van het talud tijdens de aanleg en in de eindsituatie

Bij wegverbredingen omvat het ontwerp ook bepalingen van:

- het effect op de bestaande weg.

Bij belendingen, kabels en leidingen:

- het effect van zettingen en horizontale grondvervormingen op belendingen, kabels, en leidingen.

In principe wordt de bouwtijd als een vaste randvoorwaarde voor het ontwerp opgevat.

Het geotechnisch ontwerp resulteert in een advies omtrent:

- drainafstand, drainlengte en draintype
- detaillering van pompen
- de gewenste luchtongedrukte in grootte en tijd; Boskalis hanteert 50 kPa. Dit is allen onder optimale omstandigheden haalbaar. Daarom dient er met een lagere waarde rekening te worden gehouden.
- bruto zanddikte
- taludhelling tijdens aanleg en ophoogtempo / dwarsdoorsnede van ophoging
- het wel of niet terugpompen van het bemalingswater in de ophoging
- te hanteren pompduur en wachttijden
- taludhelling / dwarsdoorsnede in de eindsituatie
- 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, monitorings- en maatregelenplan tijdens uitvoering conform §16.2.8
- geotechnische risicoanalyse, monitorings- en maatregelenplan tijdens gebruiksfase conform §16.2.8.

Bij wegverbredingen bovendien:

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

Bij belendingen en kabels en leidingen bovendien:

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

### 16.2.3 *Ontwerpdetails*

Niet van toepassing.

### 16.2.4 *Effect op bestaande weg*

De drainschermen dienen buiten het bestaande cunet te worden geplaatst. De ligging van de zijkant van het bestaande cunet wordt met de eerder genoemde flanksonderingen (zie §15.2.1) vastgesteld.

Het aanbrengen van een zandlichaam kan horizontale en verticale vervormingen van de bestaande weg veroorzaken. Deze kunnen leiden tot scheurvorming in de verharding. Door het toepassen van luchtdrukconsolidatie en verticale kunststofdrains zal de zetting versneld optreden, zodat de zetting (en dus ook het onderhoud) sneller onder controle zal zijn.

Bij de start van de luchtdrukconsolidatie zal de rand van de bestaande aardebaan een buitenwaarts gerichte horizontale vervorming ondergaan. Deze vervorming kan ertoe leiden dat de rand van de bestaande aardebaan enige extra zetting ondergaat. Door het aanbrengen van een zandophoging op het maaiveld zullen de horizontale vervormingen geleidelijk tot staan en wellicht in tegengestelde richting worden gebracht. Na het beëindigen van de luchttonderdruk wil de grond in theorie weer in de richting van de bestaande aardebaan verplaatsen. Mede door de hoge stijfheid van de geconsolideerde grond zal hiervan in de praktijk weinig terechtkomen. In vergelijking met een traditionele zandophoging zal een zandophoging met luchtdrukconsolidatie daarom mogelijk kunnen resulteren in een iets grotere zetting van de bestaande aardebaan.

In veel gevallen is onder de bestaande rijksweg geen verticale drainage aanwezig. Dit dient ook zo in de berekeningen te worden ingevoerd. Vanwege het ontbreken van verticale drainage zal de bestaande aardebaan nog geringe vervormingen kunnen ondergaan nadat de verbreding gereed is.

### 16.2.5 *Effect op omgeving*

Het aanbrengen van de zandophoging leidt tot verticale en horizontale grondvervorming, waardoor de volgende effecten kunnen optreden:

- zetting van belendingen
- buigende moment in funderingspalen
- vervorming of breuk van kabels en leidingen.

Door de toepassing van luchtdrukconsolidatie zullen de horizontale deformaties aan de polderzijde van de verbreding kleiner zijn dan bij een traditionele zandophoging.

Kortsluiting van verschillende watervoerende lagen, mogelijk resulterend in een verstoring van de waterhuishouding in de omgeving, is over het algemeen niet toegestaan. In het ontwerp van de verticale drainage dient hiermee rekening te worden gehouden.

#### *16.2.6 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 water onttrokken zodat in het kader van de Grondwaterwet een vergunning nodig kan zijn, afhankelijk van de bemalingsduur en de hoeveelheid onttrokken water. De randvoorwaarden voor de bemalingsvergunning variëren per provincie. Een vuistregel voor de totale hoeveelheid te onttrekken water is:

$$Q \leq \text{circa } 1,5 \times (\text{zetting [m]} \times \text{oppervlak [m}^2\text{)})$$

Tabel 16.2 Naar alle waarschijnlijkheid benodigde vergunningen bij toepassing van een zandophoging op maaiveld met de BeauDrain methode

WW GBV BB WBR WM IVB GWW WGH	Woningwet Gemeentelijke bouwverordening Bouwbesluit wet beheer rijkswaterstaatswerken wet milieubeheer Inrichtingen en vergunningenbesluit Grondwaterwet wet geluidhinder	OGW WA WVO WBB PMV PGV WWH Keur	ontgrondingenwet wet afvalwater wet verontreiniging oppervlaktewateren wet bodembescherming provinciale milieuverordening provinciale grondwaterverordening wet op de waterhuishouding keurverordening (waterschap, hoogheemraadschap)	BSB PWV WOT WVW Bos Kap GW APV	Bouwstoffenbesluit provinciale wegenverordening wet op de telecommunicatievoorzieningen wegenverkeerswet boswet kapverordening Gemeentewet Algemene Politieverordening
<b>Maximum behandelingsduur ca. (in maanden)</b>					
<b>Benodigde vergunning/verordening</b>	WW	GBV	BB	RWS	4
Sloopwerkzaamheden, duikers, portalen, geleiderail, geluidsschermen, viaducten, overkluizingen	•	•	•	•	•
Werkzaamheden aan bestaande rijksweg					
Werkzaamheden aan bestaande provinciale weg					
Vervoer/opslag van grond (droog)					
Verwerken van zand en grond					
PTT-kabels					
Geluidshinder tijdens werkzaamheden					
Rooien van bomen en struweel					
Lozen van water op oppervlaktewater					
Onttrekken van water					
Peilbesluit wijzigen i.v.m. tijdelijke verlaging waterstand					
Gebruik van diverse bouwstoffen					
Aanleg van watergangen, duikers, overkluizingen en wegsloten					
Lozen van grondwater op riolering					
Reconstruiewerkzaamheden ... (vergunning eigen dienst)					
Verkeersbesluiten bij uitvoering					

#### 16.2.7 Raming aanlegkosten

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

Voor de kosten van de BeauDrain methode kan worden aangehouden circa € 18,- per m<sup>2</sup>. In deze kosten zijn begrepen: de verticale drainage, de horizontale drainage, de folie en het handhaven van de luchtonderdruk gedurende circa 3 maanden.

De gemiddelde prijs voor een verticale kunststofdrain inclusief installatie bedraagt ongeveer € 0,65 per meter. Voor de drainlengte wordt aangehouden de lengte tussen onderkant werkvloer en voet van de drain.

Verticale kunststofdrains zijn een massa-artikel en dus relatief goedkoop. De kosten zijn afhankelijk van de installatiesnelheid die weer afhankelijk is van de drainlengte, de bodemopbouw en de bereikbaarheid. Een project met korte drains zal tot een kleine dagproductie leiden door het vele stelwerk. Bij zeer lange drains kan de productie ook afnemen door de noodzaak omzichtiger om te gaan met het materieel en door de grotere gemiddelde grondweerstand.

Harde bovenlagen maken de installatie van de BeauDrain-schermen gecompliceerd. Dit werkt kostenverhogend.

Belangrijk is dat een aannemer de juiste gegevens krijgt ter bepaling van de prijs. Zo kan het voorkomen dat bij een sterk wisselende grondopbouw een prijs wordt afgegeven per grondopbouw.

De gemiddelde prijs voor een werkvloer/draineerlaag (draineerzand) in het werk bedraagt ongeveer € 12,50 per m<sup>3</sup>. Zie voor opmerkingen omtrent het gebruik van draineerzand §16.3.2.

De gemiddelde prijs voor een zandophoging (ophoogzand) in het werk bedraagt ongeveer € 10,- à € 11,- per m<sup>3</sup>.

Het afgraven van zand (tijdelijke extra overhoogte) geschiedt doorgaans kostenneutraal (geen kosten voor de opdrachtgever).

Bovengenoemde prijzen zijn exclusief de kosten voor zaken zoals:

- voorzieningen ten behoeve van de toegankelijkheid van het terrein
- waterbeheersing zowel kwalitatief als kwantitatief, dat wil zeggen de maatregelen voor het afvoeren van het uit de drains vrijkomende water en de eventuele maatregelen in verband met de chemische samenstelling van het water (bijvoorbeeld een te hoog zoutgehalte)
- ontgraven, afvoeren en tijdelijk opslaan aanwezige grond
- de afwerking van de taluds.

### 16.2.8 Risico's, monitoring en maatregelen

#### *Risicofactoren*

Er bestaan de volgende onzekerheden (risicofactoren):

- bepaling van de eigenschappen van de slappe lagen qua samen-drukking, doorlatendheid, sterkte en stijfheid
- de gangbare ontwerpmodellen, met name voor de bepaling van de vervorming van de bestaande baan bij een verbreding en de mate waarin luchtdrukconsolidatie grondverplaatsingen beïnvloedt
- de mate waarin de verharding op de bestaande baan, kabels, leidingen en belendingen de extra belasting van de ophoging kunnen weerstaan.

De risicofactoren kunnen resulteren in de volgende ongewenste gebeurtenissen:

- een te grote zetting in de gebruiksfase, waardoor onvoorzien 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 risico-analyse 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 risico's worden beheerst:

- 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 in de samendrukbare, te consolideren lagen voor de beoordeling van het zettingsverloop en, bij toepassing van een zandophoging op maaiveld, de stabiliteit
- eventueel: meting van de zetting als functie van de diepte (met name bij sterk wisselende lagen).

Opgemerkt wordt dat er door afwijkingen van de verticaal onzekerheid bestaat over de positie van de waterspanningsmeters ten opzichte van de verticale drains. Bij de interpretatie van de meetresultaten moet hiermee rekening worden gehouden.

Ter controle van de luchttonderdruk (belasting op de ondergrond) worden hierbij de volgende metingen verricht:

- drukmetingen in de pompen en leidingen
- drukmetingen in de horizontale drainage en, indien mogelijk in de verticale drainage
- meting pompdebiet.

Bij kans op instabiliteit van de ophoging tijdens de uitvoering:

- periodieke meting van de waterspanning onder de teen van de ophoging voor de beoordeling van het stabiliteit
- plaatsen en waarnemen ('doorzichten') van perkoenpalen voor de beoordeling van de stabiliteit van de ophoging.

Bij kans op schade aan kabels en leidingen en belendingen:

- periodieke hellingmetingen in inclinometerbuizen voor de bepaling van de horizontale deformaties ten gevolge van het aanbrengen van de zandophoging
- verticale deformaties met meetboutjes of zakbaken, in combinatie met de zakbaken en waterspanningsmeters ter bepaling van de stabiliteit van de verbreding
- het inmeten en fotograferen van gevoelige belendingen; visuele inspectie.

Bij kans op schade aan de bestaande weg bij verbreding:

- het regelmatig inmeten van meetboutjes
- visuele inspectie van de toestand van de bestaande weg.

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*

Eerdergenoemde ongewenste gebeurtenissen kunnen op verschillende manieren worden beheerst:

- bij te grote zetting in gebruiksfase (consolidatiesnelheid is lager dan verwacht): een extra overhoogte aanbrengen, de luchtonderdruk langer handhaven (bouwtijd verlengen) en/of het opgepompte water in de ophoging brengen; voor nog in uitvoering te nemen vakken: extra verticale drains aanbrengen (kleinere h.o.h.-afstand); een deel van de ophoging uitvoeren in licht ophoogmateriaal
- bij afwijkende eindzetting: langer pompen (handhaven onderdruk) en/of het aanpassen van de hoeveelheid ophoogzand
- bij instabiliteit van de verbreding: steunbermen of damwanden aanbrengen; een deel van het ophoogzand weer verwijderen en licht ophoogmateriaal toepassen
- bij schade aan de bestaande weg bij verbreding: een deel van het ophoogzand weer verwijderen en licht ophoogmateriaal toepassen
- bij het optreden van schadelijke effecten op de omgeving als gevolg van verticale en/of horizontale grondvervormingen: damwandschermen aan de polderzijde aanbrengen of het ophoogzand deels verwijderen en eventueel vervangen door lichter materiaal.

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.

#### *16.2.9 Duurzaam bouwen*

Opgemerkt wordt dat met het begrip duurzaamheid in dit document niet zozeer de levensduur bedoeld wordt, maar met name de milieu-duurzaamheid.

#### *Typering gebruikte bouwstoffen*

Kunststoffen zoals gebruikt in verticale en horizontale drains en folie vallen niet onder het Bouwstoffenbesluit.

Voor het zand wordt verwezen naar de *Leidraad Bouwstoffen* [4]. 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). Ontzilt zeezand is meestal categorie 1 bouwstof. Bij zand uit baggerspecie is de categorie-indeling afhankelijk van de herkomst en scheidingsresultaat van de baggerspecie.

#### *Terugwinbaarheid / hergebruik*

In de praktijk is het onmogelijk verticale drains terug te winnen en her te gebruiken. Door de optredende zettingen zijn de drains vaak geknikt. Bovendien is de treksterkte gering. Daarnaast zorgt het ankerplaatje voor een grote weerstand om de drain terug te winnen.

De horizontale drain met de folie kan alleen worden teruggewonnen na verwijdering van de zandophoging. Een deel van het vrijgekomen materiaal (polymeren) kan worden verwerkt tot nieuwe producten (vuilniszakken, markeringspaaltjes en dergelijke).

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.

#### *Extra milieumaatregelen*

Bij de toepassing van zeezand dient, indien het zand moet voldoen aan categorie 1 volgens het Bouwstoffenbesluit, te worden ontzilt.

Voorkomen moet worden dat verticale drainage een kortsluiting maakt tussen het oppervlaktewater en het grondwater in het diepe, pleistocene zand. Gebruikelijk is de draandiepte te beperken tot 1,0 à 1,5 m boven het diepe zand.

#### *16.2.10 Verdere aandachtspunten*

De methode is niet gepatenteerd. Echter beschikt alleen één aannemer over deze methode.



## 16.3 Uitvoeringsfase

### 16.3.1 Uitvoeringsmethode

De uitvoering is in grote lijnen als volgt:

- aanbrengen van een werkvloer van circa 0,5 m zand, bij zeer slappe grondslag 1,0 of 1,5 m
- aanbrengen BeauDrain systeem, bestaande uit:
  - verticale drains
  - horizontale verzameldrains
  - blinde flexibele slang
  - verzamelblokken ('spenen')
  - pompen.
- starten bemaling; dit dient minimaal 1 week voor het aanbrengen van de zandophoging te gebeuren
- aanbrengen zandophoging, inclusief eventuele tijdelijke extra overhoogte
- handhaven bemaling totdat voldoende zetting is opgetreden (afhankelijk van de interpretatie van de metingen inclusief een postdictie van de gemeten zetting)
- verwijderen pompsysteem en, indien van toepassing, afgraven extra overhoogte
- afdoppen horizontale drain.

Het BeauDrain systeem wordt aangebracht met behulp van een speciaal ontworpen ploegmes, dat aan een hydraulische kraan bevestigd is. In dit mes zijn de installatiemast voor het aanbrengen van verticale drains en een schaar om de verticale drain af te knippen geïntegreerd. Bovendien is het mes voorzien van een doorvoer voor een horizontale drain en een folie. De kraan trekt het ploegmes door de grond. Op tevoren vastgestelde afstanden stopt de kraan, wordt een verticale drain geïnstalleerd en op een in te stellen maat afgeknipt. Als vervolgens de kraan weer in beweging komt wordt de verticale drain omgevouwen en tegen een tegelijkertijd ingebrachte horizontale drain aangeleid. De diepte waarop de horizontale drain aangebracht wordt kan gekozen worden, maar bedraagt maximaal 3 m beneden maaiveld (= bovenkant werkvloer). Doordat het mes slank is sluit na passeren de samendrukbare grond zich weer. Om desondanks van een goede afdichting verzekerd te zijn wordt direct boven de horizontale drain nog een smal folie aangebracht.

Om de verzameldrain onder licht afschot kunnen leggen wordt de hoogte van het mes m.b.v. een laser gestuurd. Het principe van het installatieproces is in Figuur 16.1 weergegeven. Daarin is ook een detail van het ploegmes te zien en een doorsnede loodrecht op een opgegraven scherm.

Elk samenstel van 1 horizontale drain en meerdere verticale drains wordt een scherm genoemd. Aan het eind van elk scherm gaat de horizontale drain over op een stuk blinde flexibele slang om te voorkomen dat valse lucht wordt aangezogen op de plaats waar de verzameldrain uittreedt uit de slecht doorlatende grond. Via verzamelblokken zijn alle blinde einden van de horizontale drains verbonden met de pompen.

De pompen zijn speciaal voor de BeauDrain toepassing gebouwd. De pompen bestaan uit een geluidsgedempte container waarin 2 pompsets zijn opgenomen. Iedere set bestaat uit een stalen vat waarop de verzameldrains zijn aangesloten alsmede een speciale industriële vacuümpomp. In de stalen vaten zijn niveausensoren opgenomen die een op het vat aangesloten waterpomp aansturen. Bij een nagenoeg gevuld vat slaat de pomp aan waardoor het vat wordt leeggepompt. Is het vat nagenoeg leeg dat slaat de waterpomp weer af.

#### *Harde bovenlagen*

In geval van harde bovenlagen geschiedt de installatie in 2 gangen. In de eerste gang wordt de grond voorgesneden waarbij geen materiaal in de bodem wordt ingebracht. In de tweede gang wordt dezelfde snede gebruikt waarbij het materiaal (horizontale en verticale drainage en folie) wordt aangebracht.

Toepassing van BeauDrain is niet mogelijk bij de aanwezigheid van oude drainagesystemen, doorgaande zandlagen, boomstronken en andere obstakels in de zone van 2 m en wegfunderingen. De kans op deze factoren in een specifieke situatie wordt vooraf bij een aanbieder beoordeeld mede op basis van gegevens van de opdrachtgever.

#### *Hoogteligging horizontale drainage*

Om de luchtdrukbelasting optimaal te kunnen benutten, dienen de horizontale drains op of beneden het niveau van de freatische lijn te worden gelegd. Het plaatsen van de horizontale drains op een hoger niveau leidt tot kans op lekkage (aanzuigen valse lucht) waardoor geen of onvoldoende onderdruk kan worden bereikt (kleinere verhoging van de korrelspanning). Met de huidige BeauDrain-apparatuur kunnen de horizontale drains op maximaal 3 m beneden werkniveau worden aangelegd.

#### *Pompen*

De pompen vormen een essentieel onderdeel van het systeem, zodat permanente monitoring, bijvoorbeeld met gsm-melders, noodzakelijk is. Voortdurend is onderhoud nodig om de vereiste luchtdrukbelasting te kunnen handhaven. Bij grote en langdurige werken dient een hydrauliekmonteur op afroep ter beschikking te staan. Reserve pompen dienen op korte termijn te kunnen worden ingezet. Bij combinatie van luchtdrukconsolidatie met een zandophoging kan met name in de beginfase een storing van de pompen leiden tot problemen ten aanzien van de stabiliteit.

De aanzuighoogte van een pomp is theoretisch maximaal 10 m-waterkolom. In de praktijk is de aanzuighoogte door drukverliezen (lekkage, plaatshoogte e.a.) minder. Iedere meter die de pomp boven het freatisch niveau wordt geplaatst, betekent een meter verlies in het te realiseren luchtdrukverschil. Daarom dienen ook de pompen zo dicht mogelijk bij het freatisch niveau te worden opgesteld.

#### *Lucht- en waterdichtheid afdeklaag*

Voor een optimale werking van het systeem moet de laag boven de horizontale drains voldoende ondoorlatend zijn. Enerzijds wordt dit bereikt

door de drains in de cohesieve, samendrukbare grond beneden de grondwaterspiegel te plaatsen en anderzijds door op de drain een strook folie aan te brengen. Zandige stoorlagen op het niveau van de horizontale drain kunnen de effectiviteit van het systeem nadelig beïnvloeden. Een goed grondonderzoek naar de kwaliteit en de samenstelling van de toplagen is dan ook vereist.

#### *Vorst*

Treedt vorst op tijdens de fase waarin wordt bemalen, dan zijn isolerende maatregelen noodzakelijk om te voorkomen dat de pompen en de leidingen bevroren.

#### *Ophoogzand*

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 versprend 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* [19].

Een alternatieve wijze van ophogen is het hydraulisch ophogen (nat aanbrengen of spuiten). Deze methode voorkomt dat slecht begaanbaar terrein moet worden bereiden 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 hst. U van *Handleiding Wegenbouw, Ontwerp Onderbouw* [2].

#### *Waterhuishouding*

Ter verhoging van de tijdelijke belasting op de ondergrond kan het afgepompte water in de zandophoging worden gebracht, waardoor het gewicht hiervan toeneemt. Op de stabiliteit heeft dit echter een negatieve invloed, zodat per geval moet worden beoordeeld wanneer deze maatregel nodig en mogelijk is.

Ook dient het gebied waar de waterstand in de ophoging wordt verhoogd, te worden beperkt tot het gebied waar de verticale drains aanwezig zijn.

#### *16.3.2 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 een kwalitatief verantwoorde horizontale en verticale drainage is het noodzakelijk dat, naast een goed ontwerp, eisen worden gesteld aan het materiaal van de drains en de wijze waarop de drains worden geïnstalleerd. De eisen waaraan de verticale drains moeten voldoen, zijn gegeven in hoofdstuk 23 van de *Standaard RAW Bepalingen* [5]. Voor horizontale drainage zijn geen specifieke eisen opgenomen. De belangrijkste eisen voor verticale drainage zijn de afvoercapaciteit en de karakteristieke poriegrootte:

- afvoercapaciteit gestrekte drain moet ten minste  $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  zijn
- afvoercapaciteit geknikte drain moet ten minste  $37,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  zijn
- karakteristieke poriegrootte  $O_{90}$  van het drainfilter mag niet groter zijn dan 80 mm.

Bovenstaande eisen gelden voor categorie 2. Opgemerkt kan worden dat door ontwikkelingen in de productiesfeer, de kostenbesparingen door toepassing van kunststofdrains met minder goede eigenschappen, niet meer relevant zijn.

De aannemer dient een bewijs van oorsprong van de door hem geleverde kunststofdrain (van de producent) te leveren. Op dit bewijs dienen een aantal zaken te worden vermeld zoals de naam van de producent, de datum van fabricage en enkele productspecificaties, zie hoofdstuk 23 van de *Standaard RAW Bepalingen* [5].

In §22.06.01 en §22.06.02 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. Aan de andere kant zijn de eisen gesteld aan draineerzand volgens §22.06.02 van de *Standaard RAW Bepalingen* [1] voor toepassing in de werkvloer nogal streng. Gebruik van dergelijk zand werkt daardoor kostenverhogend. Ten aanzien van het zand voor de werkvloer kunnen daarom minder strenge eisen worden gesteld, mede gezien het feit dat de drainerende functie van de werkvloer van ondergeschikt belang is.

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 *Standaard RAW Bepalingen* [1].

#### *ARBO en veiligheidszaken*

Het aanbrengen van de werkvloer geschiedt machinaal. Ook de verticale en horizontale drains worden machinaal aangebracht. De drainrol, achterop de stelling, dient regelmatig met handkracht te worden vervangen. Het aanbrengen van de zandophoging geschiedt ook machinaal. In het gehele proces is geen sprake van zware fysieke arbeid.

#### *Milieu*

Geen bijzonderheden.

#### *16.3.3 Besteksteksten*

De bepalingen over verticale en horizontale drains en ophoogzand zijn gegeven in het RAW standaardbestek en hoofdstuk 22 en 23 van *Standaard RAW Bepalingen* [1]. Belangrijk voor de aannemer is dat deze de juiste grondgegevens heeft ter bepaling van het in te zetten materieel.

Belangrijk voor de aannemer is dat deze de juiste grondgegevens heeft ter bepaling van het in te zetten materieel.

### **16.4 Beheer en onderhoud**

Bij een juist ontwerp zal de aardebaan na oplevering slechts een beperkte zetting ondergaan.

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 en 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 langrichting 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.

## 16.5 Ombouw / sloop

### 16.5.1 Toekomstige ombouw / uitbreiding

Een toekomstige verbreding van de ophoging kan op dezelfde wijze worden uitgevoerd als de oorspronkelijke constructie.

Als bij een toekomstige uitbreiding een methode wordt gekozen, waarbij een spanningsverhoging in de ondergrond ontstaat, moet rekening worden gehouden met deformaties (verticaal en mogelijk ook horizontaal) van de dan aanwezige ophogingen.

### 16.5.2 Sloop

De zandophoging (aardebaan) kan eenvoudig worden verwijderd. De horizontale drains en de folie zijn eventueel op te graven doch kunnen niet meer worden gebruikt. De verticale kunststofdrains zijn in principe als verloren te beschouwen.

## 16.6 Referenties

### 16.6.1 Ervaringen

In Nederland is bij circa 25 projecten de BeauDrain methode toegepast, zoals bij:

- proefveld Zevenhuizen - Nesselande
- N11 terp + aardebaan bij kunstwerk Bodegraven West
- bouwrijp maken Pijnacker Rietlanden 1 en 2
- verbreding aardebaan A4 / HSL bij Hoogmade
- verbreding aardebaan A2 bij Vinkeveen Oost

In CUR-verband wordt momenteel (medio 2004) gewerkt aan een publicatie over geforceerde consolidatie door het afpompen van water.

### 16.6.2 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] *Leidraad Bouwstoffen*, RWS - DWW, maart 2000
- [5] Mathijssen, F.A.J.M. *BeauDrain, een innovatieve methode van vacuümconsolidate*, lezingenmiddag KVIV Antwerpen, 23 oktober 2002
- [6] *Handleiding Wegenbouw. Ontwerp Onderbouw. Richtlijn Luchtdrukconsolidatie*, RWS DWW, 1994, voorlopige versie
- [7] NEN 6740 *Geotechniek. TGB 1990. Basiseisen en belastingen*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997

- [8] NEN 5740 *Bodem - Onderzoeksstrategie bij verkennend onderzoek - Onderzoek naar de milieuhygiënische kwaliteit van bodem en grond*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 2000
- [9] NEN 5140 *Geotechniek, Bepaling van de conusweerstand en de plaatselijke wrijvings weerstand van grond. Elektrische sondeermethode*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1996
- [10] *Verticale drainage*, CROW-publicatie 77, november 1993
- [11] *Moderne funderingstechnieken*, A.F. van Weele, 1993
- [12] *Handleiding wegenbouw - ontwerp verhardingen*, DWW, 1998
- [13] NEN 5112 *Geotechniek. Bepaling van het watergehalte van grond in het laboratorium*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1995
- [14] NEN 5117 *Geotechniek, Bepaling van de schuifweerstand- en vervormingsparameters van grond. Triaxiaalproef*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997
- [15] NEN 5118 *Geotechniek, Bepaling van de een-dimensionale samendrukkings-eigenschappen van de grond*, Nederlands Normalisatie-Instituut, 1997
- [16] *Handleiding Wegenbouw, Ontwerp Overgangsconstructies*, DWW, 1995
- [17] Nooy van der Kolff, A.H., F.A.J.M. Mathijssen *BeauDrain: A new system to accelerate the consolidation process*, HANSA 140, Jahrgang - 2003 - Nr. 5
- [18] *Bepaling geotechnische parameters*, CUR-rapport 2003-7, 2003
- [19] *Verdichting van de zandbaan*, CROW-rapport 04-04, 2004