



## Diepteverdichting (systeem Keller)

Het proces van grondverbetering

Geotechnische oplossingen voor de bouwindustrie



# Overzicht van diepteverdichtingstechnieken

## De ondergrond

Bodemomstandigheden worden doorgaans beschreven in een bodemonderzoeksrapport. Diepteverdichtingstechnieken kunnen worden ingezet wanneer de eigenschappen niet voldoen aan de gestelde eisen. Deze economische oplossing voor grondverbetering kan tot elke willekeurige diepte worden uitgevoerd.

## De trilnaald

De cilindrische trilnaald is ongeveer 3 tot 5 meter lang en weegt ca. 2 tot 3,5 ton, afhankelijk van het type. Als belangrijkste element bevindt zich in de trilnaald een elektrisch aangedreven onbalans die de trilnaald in horizontale slingering brengt. Met de benodigde opzetstukken wordt de trilnaald tot de gewenste lengte opgebouwd en het geheel wordt gevoerd door een draadkraan of speciaal ontwikkelde stellingen (met makelaar).

## Het proces

De dieptevibrator wordt gebruikt voor drie verschillende technieken die verschillen in grondverbetering en in mechanismen voor belastingoverdracht. Het funderingsontwerp wordt daarom vaak door Keller ontwikkeld in nauwe samenwerking met de geotechnische en constructieve ingenieurs van de adviseur.

De diepteverdichtingstechniek bestaat uit het verdichten van niet-cohesieve grondsoorten met een verwaarloosbaar gehalte aan fijne delen door de korrels naar een dichtere pakking te brengen.

De grindkolom bestaat uit het vervaardigen van dragende kolommen met toevoeging van grind of steenpuin in cohesieve grondsoorten, en in niet-cohesieve grondsoorten met een hoog gehalte aan fijne delen.

De derde techniek bestaat uit het creëren van funderingselementen in de grond. Hierdoor kunnen relatief hoge belastingen veilig worden gedragen in gronden waar geen adequate zijdelingse steun voor grindkolommen kan worden voorzien.

## De uitvoering

Het vibro-proces begint voor alle technieken met het inbrengen van de oscillerende trilnaald in de grond tot de vereiste diepte. Vervolgens wordt de vibrator teruggetrokken afhankelijk van de toegepaste techniek om de grond van beneden naar boven te verdichten, om een stenen kolom te vervaardigen of om een paalvormig funderingselement te vervaardigen.

# Overzicht

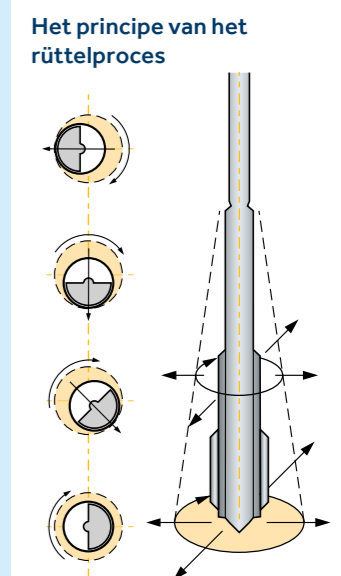
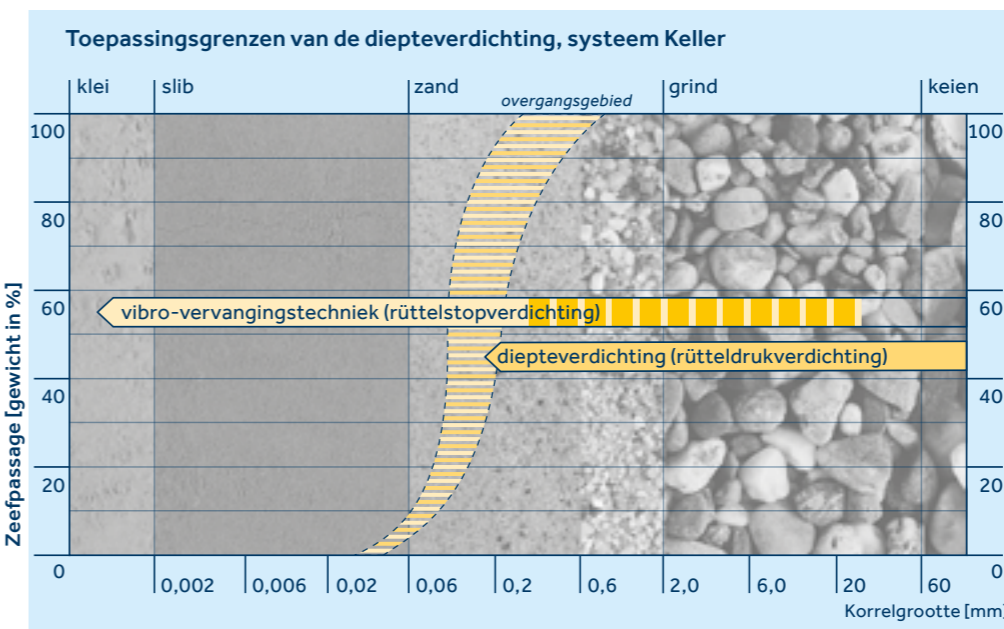
Diepteverdichtingstechnieken bieden een flexibele oplossing voor grondverbetering. Deze worden voornamelijk gebruikt onder funderingen van bouwwerken die op grond met een laag draagvermogen moeten worden gebouwd. Keller ontwikkelde de dieptevibrator (gepatenteerd in 1934), die oorspronkelijk werd gebruikt om cohesieve grond zoals zand en grind te verdichten. Tegenwoordig verbetert Keller een verscheidenheid aan niet-cohesieve en cohesieve grondsoorten met behulp van een breed scala aan diepteverdichtingstechnieken.

## De voordelen

De diepteverdichtingstechnieken bieden zeer veelzijdige grondverbeteringsmethoden die kunnen worden aangepast aan een grote verscheidenheid aan bodemgesteldheden en funderingseisen. Het proces is relatief snel, zelfs als grote hoeveelheden grond moeten worden verbeterd, kunnen daaropvolgende bouwwerkzaamheden zeer snel worden aangevangen. Dankzij de grondverbetering kan de aannemer standaard funderingen op

staal gebruiken, wat op zijn beurt leidt tot extra besparingen.

Een ander voordeel is de milieuvriendelijkheid van de dieptevibratietechnieken, omdat natuurlijke, lokale en gerecyclede materialen worden gebruikt. De grindkolommen kunnen daardoor worden beschouwd als een duurzaam circulair funderingssysteem met een lage CO2 uitstoot.





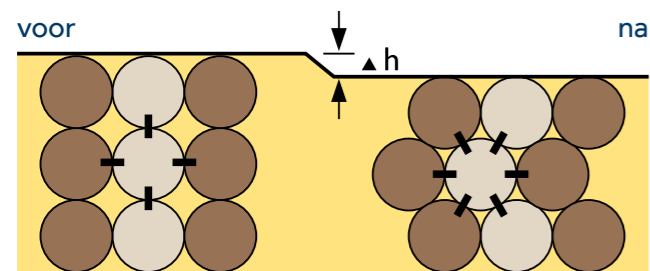
# Diepteverdichting in niet-cohesieve grond

## Materieel en uitvoering

De verdichting van niet-cohesieve ondergronden wordt het meest economisch uitgevoerd bij gebruik van vibratoren die met een relatief lage frequentie oscilleren om een optimale verdichting van de bodemdeeltjes te bereiken. De vibrator wordt gewoonlijk opgehangen aan een dragline of kraan. De penetratie van de vibrator, en tot op zekere hoogte het verdichtingsproces, wordt ondersteund door spoelen met waterstralen met variabele druk. De drukleidingen en nozzels vormen een integraal onderdeel van de vibratorstreng. De verdichting wordt vanaf het laagste penetratiepunt stapsgewijs naar boven uitgevoerd in vooraf bepaalde verdichtingsintervallen. Het verdichtingsresultaat is afhankelijk van de effectiviteit van de vibrator en de bodemgesteldheid.

## Grondmechanische aspecten

Onder invloed van de vibratie van de trilnaald worden de korrels in het invloedsgebied, dat afhankelijk is van het type grond, het type trilnaald en de verdichtingswijze, in een dichtere pakking gebracht. Afhankelijk van de oorspronkelijke pakking en de toegepaste verdichtingsenergie kan een vermindering optreden tot 15% van het te verdichten volume.

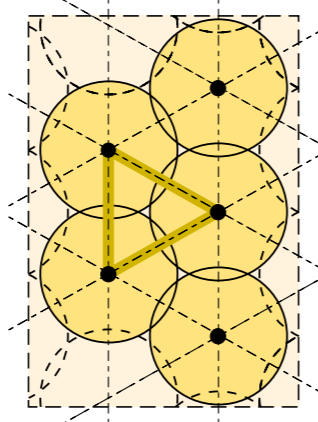


## Het funderingsconcept

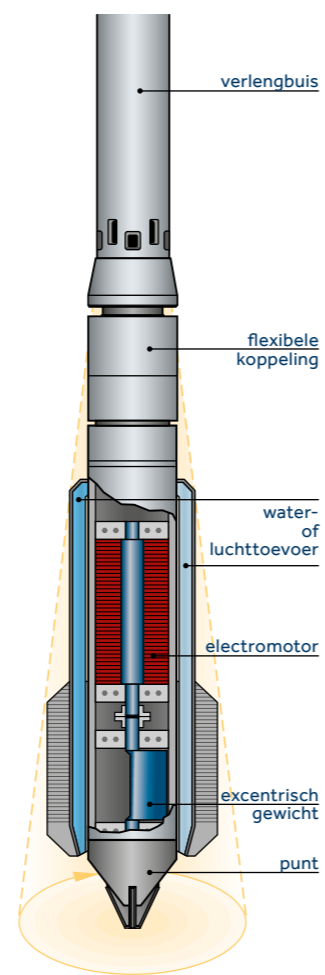
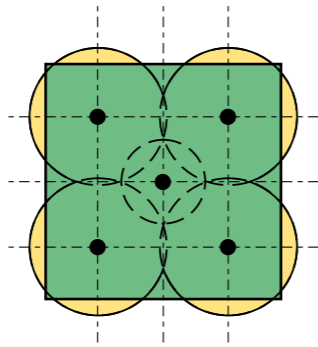
Het verdichtingsbereik voor een individueel punt wordt bepaald door verschillende parameters. Keller kan putten uit een schat aan ervaring om

het geschikte basisontwerp voor te stellen. Het basisontwerp van de vibro-verdichtingspunten wordt meestal geoptimaliseerd door een proef op locatie, waar verschillende verdichtingsrasters en -methoden kunnen worden getest en geëvalueerd. Na verdichting kunnen hoge lasten veilig worden gedragen en kunnen funderingsdrukken tot 1 MN/m<sup>2</sup> worden bereikt. De indeling van de verdichtingspunten kan worden aangepast, zodat grondvolumes van elke grootte kunnen worden verdicht. De bereikte mate van verdichting kan gemakkelijk en betaalbaar worden geverifieerd met behulp van een reeks verschillende testen waaronder sonderingen.

Verdichting onder vloervelden



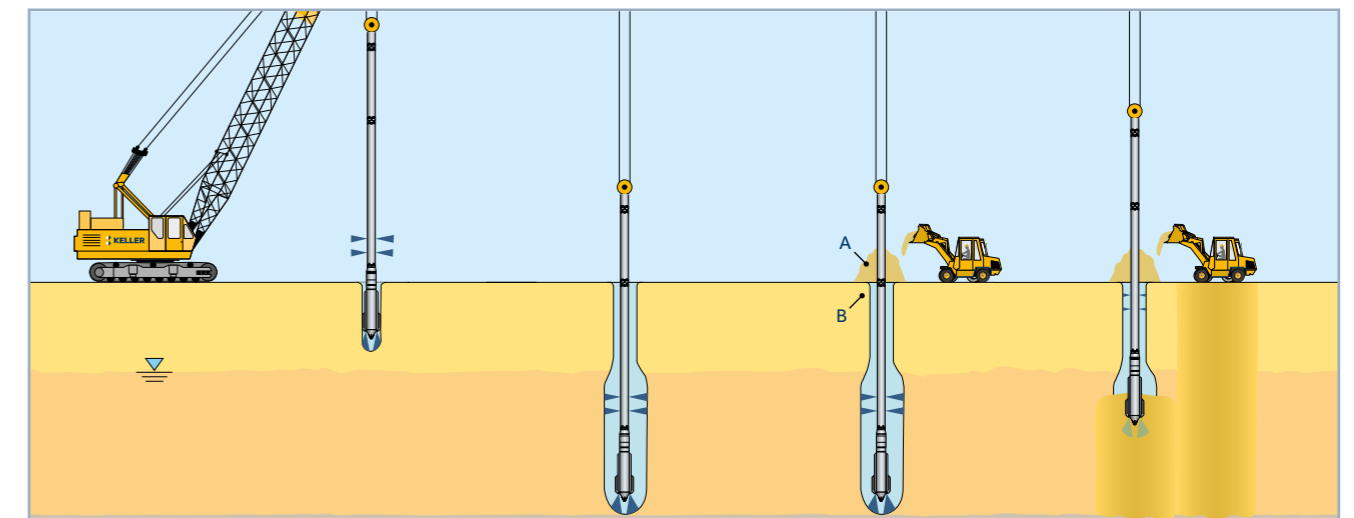
Verdichting onder poeren



# Technische merites

De vibro-verdichtingstechniek verdicht niet-cohesieve grond met een gering gehalte aan fijne delen door de korrels naar een dichtere pakking te brengen.

## Het proces



### 1. Inbrengen

De vibrerende trilnaald dringt, ondersteunt door waterspoeling, tot de gewenste diepte in de bodem. Daarbij kunnen fijne deeltjes met het retourwater worden uitgespoeld. Na het bereiken van de einddiepte wordt de watertoevoer verminderd of gestopt.

### 2. Verdichten

De grondverdichting wordt in stappen uitgevoerd vanaf de maximale penetratiediepte naar boven toe. Deze omvat een cilindrisch invloedsgebied in de ondergrond met een diameter tot wel 5 m. De verhoging van de verdichtingsgraad wordt gekenmerkt door een stijgend stroomgebruik van de trilmotor.

### 3. Navullen

Rond de trilnaald ontstaat een trechter die met aangevoerd materiaal (A) of het voorhanden materiaal (B) gevuld wordt. Hiervoor is tot wel 15% van het behandelde volume benodigd.

### 4. Afwerking

Na de uitgevoerde grondverdichting kan de bovenste laag worden ontgraven of kan de toplaag met een oppervlakteverdichting worden naverdicht.

## Voordelen van diepteverdichting

- Vermindert zetting van de fundering
- Verhoogt het draagvermogen, waardoor op de afmeting kan worden bespaard
- Verhoogt de stijfheid
- Verhoogt de schuifsterkte
- De permeabiliteit vermindert
- Vermindert liquifactie
- Verstevt taluds
- Verbeterd aanvullingen
- Maakt fundering op staal mogelijk
- Voorkomt aardbeving geïnduceerde liquifacties

# Grindkolommen (Rüttelstopverdichting) in cohesieve ondergronden

## Materieel en uitvoering

Meestal wordt bij een grindkolommen de sluzentrilnaald ingezet, waarbij toegevoegd grofkorrelig materiaal, met ondersteuning van luchtdruk, bij de punt uittreedt. Vanwege het speciaal benodigde materieel zijn speciale kranen met makelaars ontwikkeld, die tevens een additionele kracht leveren bij het inbrengen en verdichten. Er wordt in afwisselende trappen gewerkt. Het bij het trekken van de sluzentrilnaald uittredende grind of steenslag wordt bij het opnieuw aandrukken ("stoppen") verdicht en zijdelings in de bodem verdrongen. Op deze wijze ontstaat een grind- of steenkolom die samen met de verbeterde bodem de belastingen draagt.

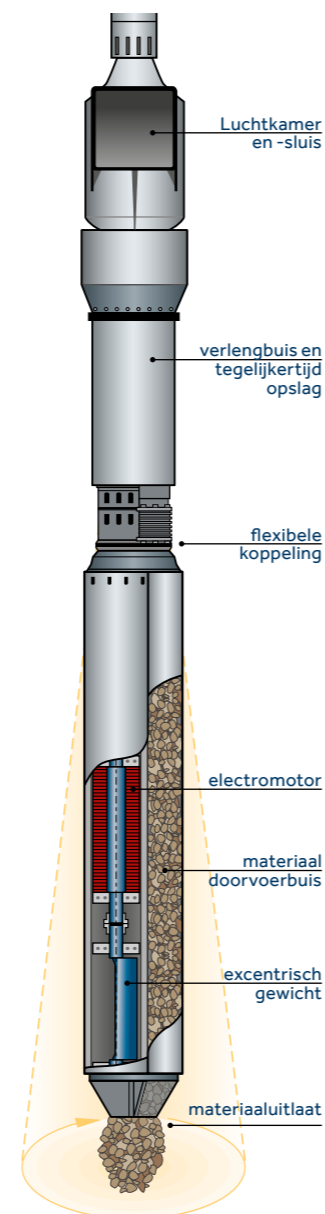
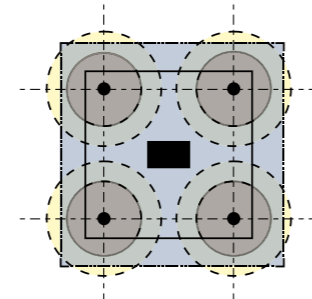
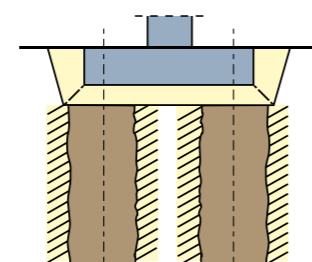
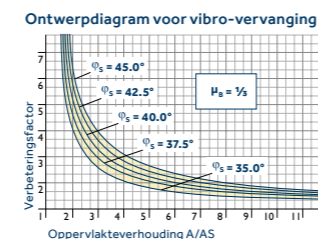
## Grondmechanische aspecten

Voor zover in gemengde en cohesieve gronden door oscillatie en zijdelingse verdringing nog enige verdichting bereikt kan worden, wat in eerste instantie van de waterverzadigingsgraad afhangt, is dit verbeteringsaandeel net als bij de diepteverdichting in rekening te brengen. De grindkernentechniek in zijn zuiverste vorm gaat er daarentegen vanuit dat de omliggende grond zelf niet verdicht wordt. De verbetering berust op de hoge stijfheid en de hoge schuifweerstand van de ingebrachte rüttelstopkolommen.

## Het funderingsconcept

Waar een diepteverdichting nog eenvoudig kan worden gecontroleerd, kan de werking van de rüttelstopkolommen eigenlijk alleen door middel van proefbelastingen worden gecontroleerd. Keller heeft echter betrouwbare ontwerpmethoden ontwikkeld die de geometrie van de grindkolommen en de hoek van inwendige wrijving van het aangebrachte materiaal meenemen. Funderingstechnisch wordt

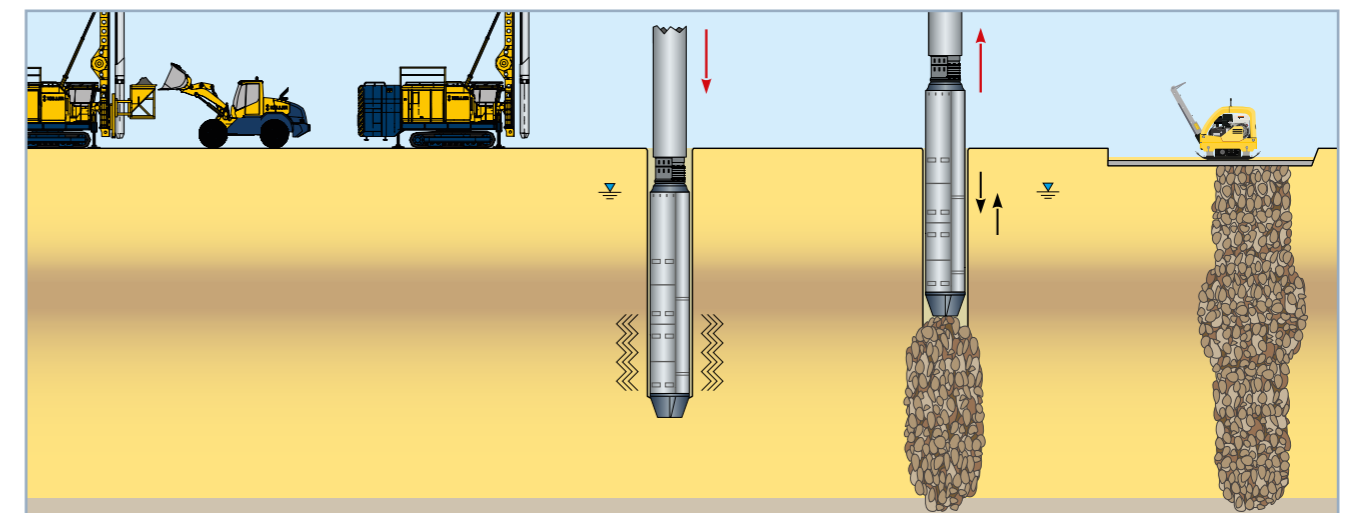
een grondverbetering met grindkolommen behandeld als een normale grondverbetering. De rekenwaarde van de draagkracht ligt na uitvoering met grindkolommen tussen de 150 en 400 kPa en is met name afhankelijk van de toegestane zettingen.



# Technische merites

De vibro-vervangingstechniek (grindkolommen) bestaat uit het vervaardigen van dragende kolommen, voorzien van grind of steenpuin in cohesieve en in niet-cohesieve grondsoorten met een hoog gehalte aan fijne delen.

## Het proces



- | 1. Voorbereiden   | 2. Vullen   | 3. Inbrengen   | 4. Verdichten  | 5. Afwerken  |
|---|---|--|--|--|
| Met de stelling wordt de aan de makelaar gevoerde sluzentrilnaald boven het ingemeten punt opgesteld, waarna de machine hydraulisch wordt afgesteund. Een frontlader belaaft de aan de makelaar bevestigde kubel. | De kubel wordt aan de mast omhoog gevoerd en leegt zijn inhoud in de sluzentrilnaald. Na het sluiten van de sluis klep ondersteunt luchtdruk de materiaaltoestroom naar de uitstroomopening aan de punt van de trilnaald. | De trilnaald verdringt en penetreert de bodem tot op de gewenste diepte, ondersteunt door de uittredende luchtdruk en de kracht van de lieren. | Na het bereiken van de einddiepte wordt de trilnaald iets omhoog getrokken, zodat het vulmateriaal door de luchtdruk in de ontstane ruimte loopt. Bij het opnieuw op diepte brengen wordt dit materiaal verdicht en zijdelings de bodem ingedrukt. | Door afwisselend trekken en trillend drukken ("stoppen") wordt een grindkolom opgebouwd tot op het gewenste niveau. Voor een goede aansluiting van de fundering op staal dient de bovenste laag te worden ontgraven of dient een nivelleringslaag te worden aangebracht. |

## Voordelen van grindkolommen

- vermindert zettingen van de fundering
- verhoogt het draagvermogen, waardoor de grootte van de fundering afneemt
- verhoogt de stijfheid
- verhoogt de schuifsterkte
- ondersteunt een snelle afvoer van overtollig poriënwater
- vermindert liquefactie
- verstevigt taluds
- fundering op staal
- verbeterd grondaanvullingen
- ondersteunt constructie van ondiepe funderingen
- Voorkomt aardbeving geïnduceerde liquefactie

# Funderingselementen (paalvormig)

## Met cement of beton verbeterde grindkolommen

### Materieel en uitvoering

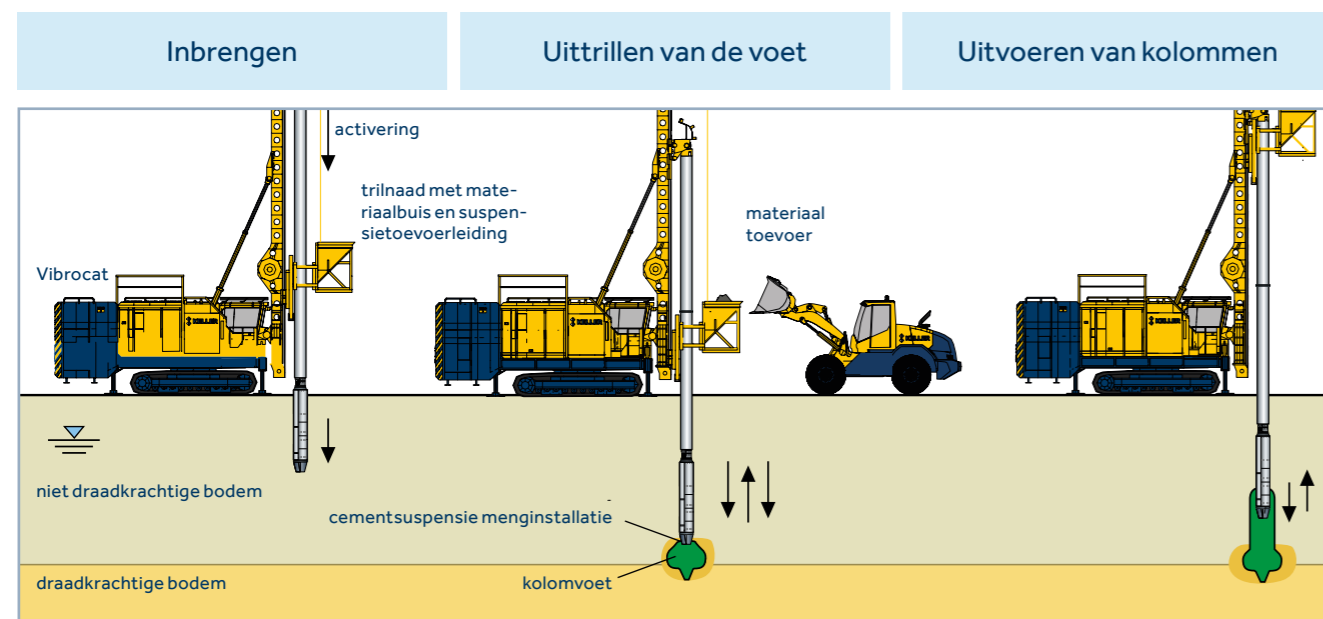
Deze funderingselementen worden op dezelfde wijze uitgevoerd als de grindkolommen die reeds zijn beschreven. Bij de verbeterde grindkolommen wordt bij het ingebrachte materiaal tijdens de uitvoering een cementsuspensie als bindmiddel toegevoegd, zodat bij het verharden een vaste kolom ontstaat. Bij de mortel rüttelstopkolommen wordt als additief droge mortel met kwaliteit C12/15 of C20/25 toegevoegd. Beide systemen gedragen zich als normale grindkolommen. Het verdichtingseffect van de omliggende bodem door het trillen en verdringing worden er echter niet door verminderd.

### Grondmechanische aspecten

De werking van deze funderingselementen toont de meeste overeenkomsten met palen.

### Funderingsconcept

Bij het ontwerp wordt voor deze funderingselementen de maximale draagkracht aangegeven, die door een groot aantal belastingproeven wordt onderbouwd. Afhankelijk van de bodemopbouw en het toegepaste materiaal kan de rekenwaarde van de draagkracht oplopen tot 900 kN. Met cement/ beton verbeterde grindkolommen laten zich zeer goed met normale grindkolommen combineren, waarbij het onderste of bovenste deel van de kolom onverstevigd blijft en daardoor een zekere bufferzone ontstaat. Zulke kolommen worden als deels met cement/beton verbeterde grindkolommen aangeduid. In gevallen waarbij een watervoerende laag moet worden overbrugd, kan de bufferzone als afsluiting fungeren.



# Technische merites

- Het vulmateriaal wordt altijd rechtstreeks naar het uiteinde van de vibrator gevoerd, waardoor een ononderbroken kolom ontstaat;
- Er is slechts een enkele penetratiegang nodig;
- Het gat blijft open vanwege de luchtdruk, zelfs in kritieke bodems.

## Vibro-betonkolommen (VBK)

### Materieel en uitvoering

Betonrüttelkolommen worden over de gehele lengte uit verpompbare beton van kwaliteit C25/30 opgebouwd. Hierbij wordt het puntdraagvermogen door verscheidene malen trekken en weer opnieuw inbrengen, verhoogt. De eigenlijke schacht wordt vanwege de inwendige sterkte van de beton in één keer getrokken.

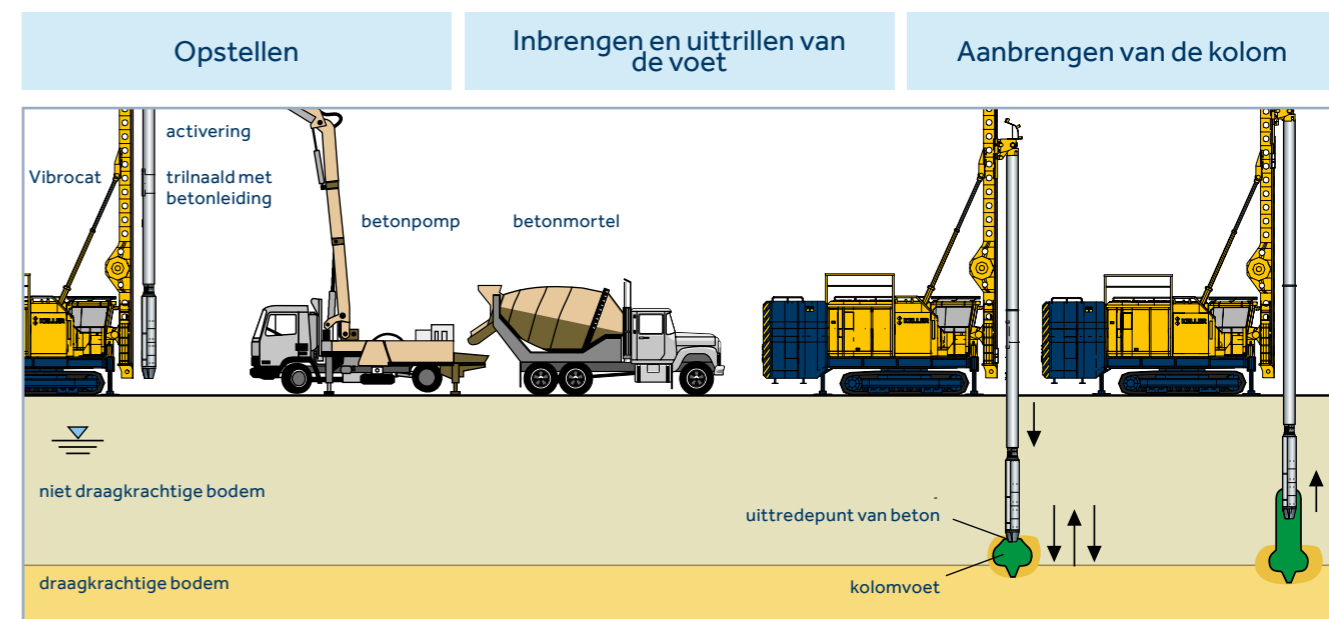
### Grondmechanische aspecten

Bij betonrüttelkolommen wordt afgezien van de verdichting van de omliggende grond. Zoals ook bij andere paalachtige funderingselementen

kan echter in het gebied rondom de punt een hoogwaardige verdichting worden bereikt waarmee een hogere draagkracht en geringere vervormingen gerealiseerd worden.

### Het funderingsconcept

Vibro-betonkolommen zijn over het algemeen smaller in vergelijking met andere bouw funderingselementen. De diameter van betonrüttelkolommen bedraagt in de regel tussen de 40 en 60 cm. De rekenwaarde van de belasting kan, afhankelijk van de bodemopbouw en de vergroting van de paalvoet, oplopen tot 1000 kN.





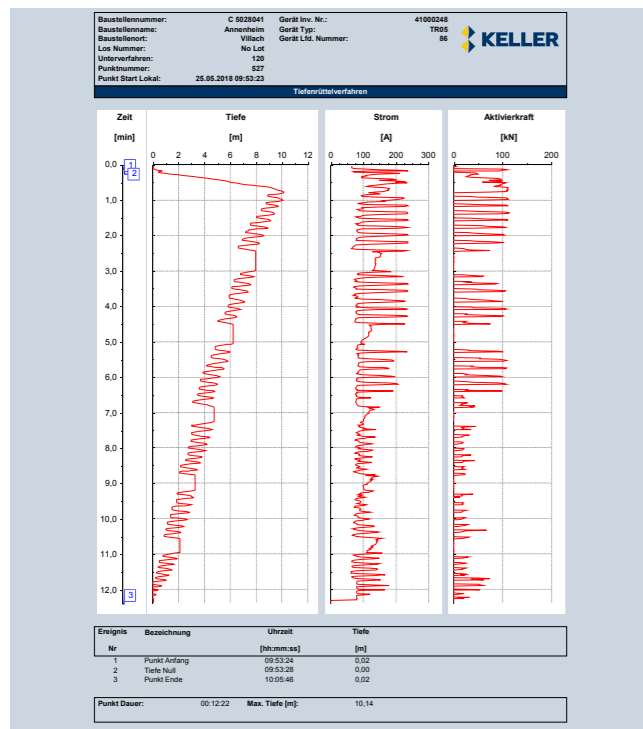
# Kwaliteitsborging en kwaliteitsgarantie

Bij alle grondverbeteringstechnieken wordt elektronische meetapparatuur ingezet om een betrouwbare, gelijkmatige uitvoering zeker te stellen en te documenteren.



## De meetresultaten

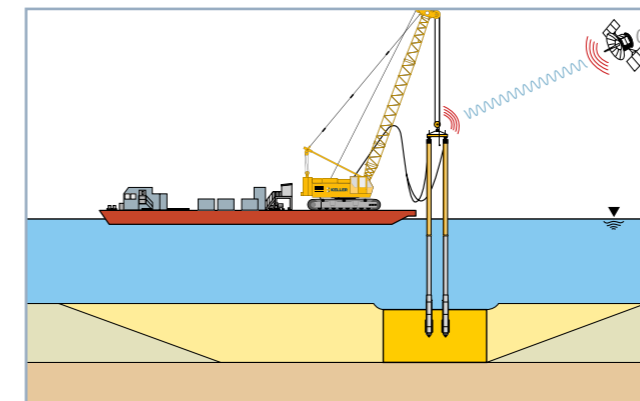
Tijdens het verdichten worden verschillende projectgegevens automatisch geregistreerd. Gegevens als tijd, diepte, voortgangssnelheid, drukkracht en stroomverbruik kunnen bovendien grafisch vastgelegd worden. Het is eventueel mogelijk ook het energieverbruik te registreren.



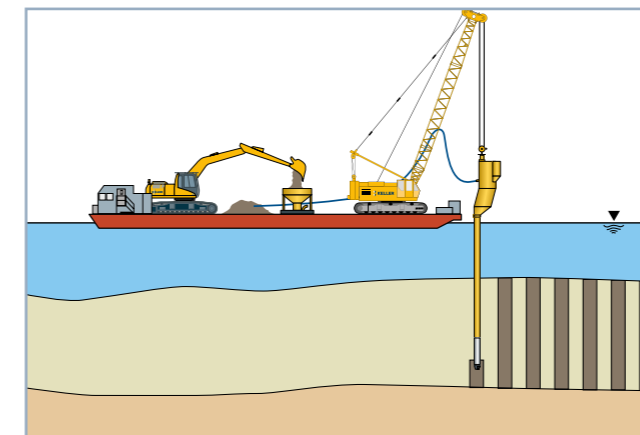
# Speciale toepassingen

## Meervoudige trilnaalden en onderwatervedichting

Diepteverdichtingen van grote oppervlakten of onder water, kunnen met meervoudige trilnaalden worden uitgevoerd.



Bij rüttelstopkolommen van grind onder water, bijvoorbeeld voor de fundering van kademuren of brugpijlers, wordt grind/steenslag middels een speciale aggregaten pomp in de sluzentrilnaald gepompt en vervolgens in de ondergrond getrild.



## Grindkernen top-feed

Bij een specifieke bodemopbouw kunnen rüttelstopkolommen ook met trilnaalden aan draadkranen worden uitgevoerd. Daarbij wordt met waterspoeling of droog gewerkt. De spoeling dient om sneller op diepte te komen, voor het openhouden van het gat rondom de trilnaald en incidenteel voor het realiseren van grotere kolomdiameters. Het is ook mogelijk recyclingmateriaal toe te passen.





**Keller Funderingstechnieken B.V.**

Europalaan 16  
2408 BG Alphen aan den Rijn

[info.nl@keller.com](mailto:info.nl@keller.com)  
+31 (0) 17 24 71-798