

Voorspelling maaiveldzakking door het in- en uittrillen van damwanden

P. Meijers
Deltares

A.F. van Tol
Technische Universiteit Delft, Deltares

Samenvatting

Bij het in- en uittrillen van damwanden treedt vaak maaiveldzakking op. Deze zakking kan nadelige gevolgen hebben voor objecten in de omgeving, zoals leidingen, gebouwen, wegen en spoorwegen. Om de zakking te kunnen voorspellen is een numeriek model ontwikkeld dat de verschillende deelprocessen in rekening brengt. In dit artikel wordt het model, inclusief de verschillende deelprocessen, beschreven. Het model is gevalideerd door berekende zettingen te vergelijken met gemeten zakkingen. Een aantal voorbeelden van het gebruik van het model wordt gegeven.

Figuur 1 *Zakking bij intrillen van een damwand.*

Inleiding

Damwanden worden vaak gebruikt voor de verticale begrenzing van bouwputten. Vergeleken met andere technieken als diepwand, palenwand, grondinjectie en grondbevriezing zijn ze relatief goedkoop, eenvoudig te plaatsen en terug te winnen. De methode kent ook een aantal nadelen zoals geluid, trillingen en zakkingen in de omgeving. In de huidige situatie, waarbij een toenemend aantal bouwprojecten in binnenstedelijk gebied plaats vindt en bewoners steeds minder overlast accepteren, wordt het goed voorspellen van deze aspecten steeds belangrijker. Het is dan ook niet verwonderlijk dat deze aspecten onderwerp van onderzoek zijn.
In dit artikel wordt ingegaan op een nieuw rekenmodel om de zakkingen te voorspellen. Het model wordt beschreven. Voorspellingen met het nieuwe model worden vergeleken met gemeten maaiveldzakkingen. Tot slot wordt met een aantal voorbeelden mogelijke toepassingen van het model beschreven.

Problemen door verzakkingen

In- en uittrillen van damwanden gaat gepaard met, zoals de naam al aangeeft, trillingen.
In de weg- en waterbouw is het verdichten van zand door trillingen een beproefde methode. Daarbij is de verdichting een gewenst resultaat. Bij het in- en uittrillen van damwanden treden ook trillingen op. Hierbij is verdichting vaak juist niet gewenst omdat dit leidt tot verzakkingen. Dit kan weer tot schade veroorzaken zoals verzakking van wegen en spoorwegen, scheurvorming in gebouwen en breuk van leidingen.

Door Deltares worden de ervaringen tijdens het in- en uittrillen van damwand systematisch verzameld met Geobrain (Bles et al 2008).
Eén van de verzamelde ervaringen betreft de opgetreden zakking. In *figuur 2* zijn de gerapporteerde zakkingen bij het intrillen van damwanden, zoals deze eind 2008 beschikbaar waren, grafisch weergegeven. Alleen projecten waarbij het invoerveld maaiveldzakking is ingevuld zijn meegenomen. Op de horizontale as staat de afstand tot de damwand, genormeerd met de lengte van de damwand in de grond, en op de verticale as de gerapporteerde maaiveldzakking. In een aantal gevallen betreft dit gemeten zakkingen, maar in de meeste gevallen is het een visuele schatting van de rapporteur. In ongeveer 25% van de gevallen wordt een nulzakking gerapporteerd. De ervaring is dat een zakking van enige centimeters in het terrein niet wordt herkend. Waarschijnlijk zijn de werkelijke zakkingen groter dan men visueel heeft geschat. In figuur 2 zijn deze ervaringen weergegeven als een zakking van 1 cm. De zakking kan grote waarden (tot 1 m) aannemen.
De spreiding in de gerapporteerde zakkingen is groot. Voor een deel komt dit doordat in figuur 2 geen onderscheid is gemaakt naar de verschillende grondslagen die in Nederland aanwezig zijn. Het aantal beschikbare gerapporteerde (gemeten) ervaringen in Geobrain is nog onvoldoende om een zinvolle verdeling van de ervaringsdata over de grondslag te maken. Als de database verder wordt gevuld kan dit mogelijk in de toekomst wel. Vooralsnog is het voorspellen van de maaiveldzakking op basis van alleen ervaringen in de meeste gevallen niet mogelijk en zal een numerieke voorspelling nodig zijn.

Bestaande modellen

Door diverse onderzoekers is een rekenmodel voorgesteld om de zakkingen te bepalen. In Nederland is het door R. Hergarden opgestelde model het meest bekend (Hergarden, Tol 2001). Ook in het buitenland zijn door diverse onderzoekers modellen opgesteld om de zakking te voorspellen (Drabkin et al. 1996), (Massarsch 1992), (Massarsch 2004), (Bement, Selby 1997). Alle modellen veronderstellen dat in granulair materiaal verdichting optreedt. Voor cohesieve lagen wordt impliciet verondersteld dat daarin geen verdichting door cyclische belasting zal optreden. Het model van R. Hergarden is het enige model dat expliciet het effect van het damwandvolume op de zakking meeneemt, de overige onderzoekers maken geen melding van het mogelijke effect hiervan op de maaiveldzakking. Geen van deze modellen neemt de opbouw

en dissipatie van wateroverspanningen in beschouwing.
In dit artikel wordt een alternatief model voorgesteld dat de wel rekening houdt met het ingebrachte of verwijderde volume en met de opbouw en dissipatie van wateroverspanningen.

Karakterisering belasting

De maaiveldzakking bij in- en uittrillen is het gevolg van volumeveranderingen door verdichting van grond en door ingebracht of verwijderd damwandvolume. De laatste component is goed bekend.
De verdichting wordt bepaald door de relatieve dichtheid, de trillingsamplitude en het aantal belastingwisselingen. Als wordt gekeken naar de situatie bij het in- en uittrillen van damwandplanken zijn er voor de belastingkant een aantal aspecten welke specifieke aandacht verdienen:

- aantal belastingwisselingen
- dissipatie van wateroverspanningen
- veranderende lengte damwand in de grond

De grootte van de verdichting is een functie van het aantal belastingwisselingen. Bij het intrillen van een damwandplank ligt het aantal wisselingen in de orde van 10.000. Voor het verdichtingsmodel zijn drie benaderingen mogelijk.
De eenvoudigste benadering is te veronderstellen dat het aantal wisselingen dusdanig hoog is dat een maximale waarde voor de verdichting wordt bereikt. Deze maximale waarde van de verdichting is dan een functie van de begin dichtheid en de trillingsamplitude. In het model van R. Hergarden (Hergarden, Tol, 2001) wordt hiervan uitgegaan. Er is dan geen tijdsafhankelijke berekening nodig.

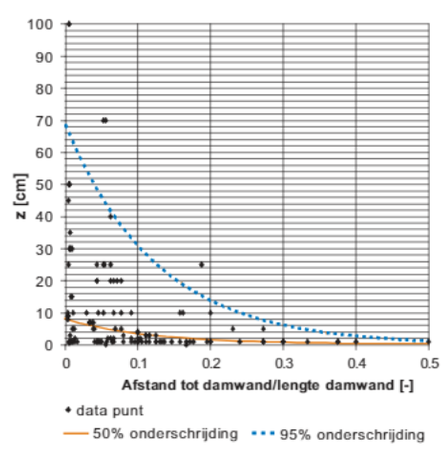
De andere kant van het spectrum is dat het gedrag tijdens iedere cyclus wordt doorgerekend. Hiervoor zijn geavanceerde modellen en veel tijdstappen nodig. Een kleine fout per tijdstap kan dan resulteren in een grote fout in het eindantwoord (Niemunis, Helm, 2001).
Een tussenvorm is om een eenvoudiger model te gebruiken dat de gemiddelde verdichting als functie van het aantal belastingwisselingen beschrijft. Het verloop van spanningen en rekken tijdens een belastingwisseling wordt dan niet beschouwd, het netto resultaat op de wateroverspanning en/of verdichting indirect wel.
Voor deze aanpak is door ons gekozen.

Tijdens het in- of uittrillen van damwand in waterverzadigd zand ontstaan wateroverspanningen. De duur van het intrillen van een damwand varieert van ongeveer 1 minuut (korte plank, los zand en zwaar trilblok) tot 20 minuten of meer (lange plank, dicht zand met een marginaal trilblok). Deze duur is zodanig dat enige dissipatie van wateroverspanningen tijdens het in- en uittrillen zal optreden. Anderzijds is de tijdsperiode dusdanig kort dat er geen volledige dissipatie zal optreden. De situatie is dus noch als gedraineerd, noch als volledig ongedraineerd te beschouwen.
Het rekenmodel zal dus rekening moeten houden met zowel de opbouw als de dissipatie van wateroverspanningen tijdens het intrillen van de damwandplanken.
Verder moet het model er rekening mee houden dat tijdens het in- en uittrillen de lengte van de damwand in de grond constant verandert. Daarmee verandert ook het gedeelte van de grond dat aan belastingwisselingen is onderworpen.

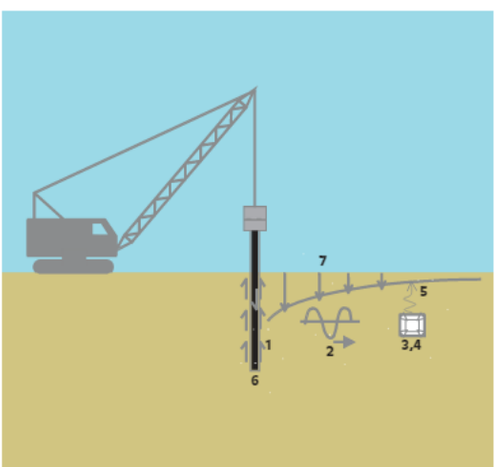
Globale beschrijving rekenmodel

Het model gaat uit van de zogenaamde 'bron-pad-object' benadering. Het proces dat uiteindelijk tot verdichting leidt kan worden opgedeeld in een aantal deelprocessen. Deze zijn (zie *figuur 3* voor de nummering):

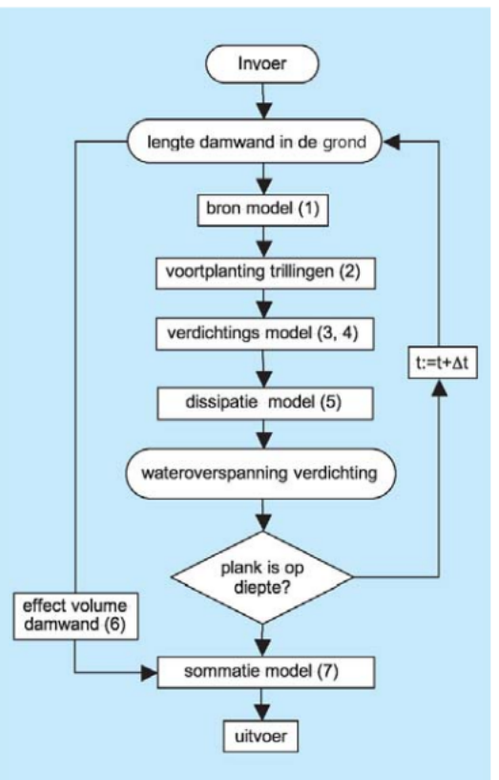
1. Overdracht van trillingen (cyclische schuifspanningen) vanuit de plank naar de omgeving, aangezien het de bedoeling is dat de plank in de grond zakt kan worden aangenomen dat op het grensvlak plank-grond de bezwijkschuifspanning wordt overschreden;
2. Voortplanting van de trillingen in de ondergrond;
3, 4. De trillingen veroorzaken een verdichting van het korrelskelet, onder de grondwaterstand zal in eerste instantie opbouw van wateroverspanning optreden;
5. Eventuele wateroverspanning dissipeert, waardoor het grondvolume afneemt;
6. Het volume van de damwand veroorzaakt ook een grondverplaatsing, bij het plaatsen van de damwand compenseert deze het volumeverlies door verdichting gedeeltelijk, bij het verwijderen van de damwand geeft dit een extra volume verlies;



Figuur 2 Gerapporteerde maaiveldzakking in Geobrain database.



Figuur 3 Schema met deelprocessen die maaiveldzakking geven, voor een verklaring van de nummers wordt naar de tekst verwezen.



Figuur 4 Basisstructuur rekenmodel, de nummers verwijzen naar de verschillende deelprocessen (zie hiervoor figuur 3).

7. De grond zal zakken om het volumeverlies te compenseren, met als gevolg een maaiveldzakking.

Uit deze beschrijving volgen de volgende deelprocessen:
- bronmodel, overdracht van trillingen vanuit de plank naar de grond;
- overdrachtsmodel, overdracht van trillingen van de grond direct naast de plank naar de omgeving;
- verdichtingsmodel/generatie van wateroverspanningen;
- dissipatie model;
- sommatie model.

Op basis van deze beschrijving is een rekenmodel opgezet (Meijers, 2007). In dit model zijn voor de verschillende subprocessen deelmodellen opgezet. In de rest van dit artikel wordt eerst een karakterisering van de belasting gegeven. Vervolgens wordt beschreven op welke wijze de verschillende deelprocessen zijn gemodelleerd en op welke wijze ze samenwerken.
Figuur 4 toont het globale rekenschema met het verband tussen de diverse deelmodellen.

Gebruikt bronmodel

In de eerste versie van het model wordt verondersteld dat het trilblok zwaar genoeg is om de plank in beweging te krijgen. Verder wordt in de huidige versie verondersteld dat de plank met een constante snelheid omhoog of omlaag beweegt. Met deze uitgangspunten is de slagkracht van het trilblok geen modelparameter. Een logische uitbreiding van het model is om dit model te combineren met een model om het intrillen van planken te voorspellen, zoals Hypervib (Holeyman e.a. 1998).

Het bronmodel beschrijft het gedrag op het grensvlak plank-grond. Aangenomen wordt dat tijdens het trillen op het grensvlak bezwijken optreedt. Om de plank in- of uit te trillen is dit een nodige voorwaarde. De amplitude van de schuifspanning op het grensvlak kan daarmee gelijk gesteld worden aan de deze bezwijkwaarde. De schuifsterkte hangt mede af van de waterspanning. Zolang de waterspanning niet te groot is kan met een eenvoudig bezwijkmodel worden volstaan.

$\tau_{max} = \sigma'_h \tan\delta$,

met:

τ_{max} bezwijkwaarde schuifweerstand plank-grond
σ'_h effectieve horizontale spanning
δ wandwrijvingshoek

Bij hoge wateroverspanningen wordt de horizontale spanning laag en zou volgens dit model de schuifspanningsamplitude naar nul gaan. In werkelijkheid gaat het gedrag van grond meer lijken op het gedrag van een vloeistof. Door de viscositeit van het verweekte zand-water mengsel kunnen nog steeds schuifspanningen vanuit de bewegende plank naar de grond worden overgedragen. Het gecompliceerde gedrag is pragmatisch in rekening gebracht door een ondergrens te stellen aan de schuifspanningsamplitude. Hiermee is de schuifspanningsamplitude bij de plank bekend.

Gebruikt overdrachtsmodel

Om het verloop van de schuifspanningsamplitude met de afstand tot de damwand te voorspellen zijn diverse opties getest. Voor het doel van het model blijkt de volgende eenvoudige uitdrukking voor de schuifspanningsamplitude als functie van de afstand te voldoen.

$$\Delta\tau(r) = \Delta\tau(r = r_0) * \left(\frac{r_0}{r}\right)^n$$

met

$\Delta\tau(r)$ schuifspanningsamplitude op afstand r
$\Delta\tau(r=r_0)$ schuifspanningsamplitude op afstand r_0

Deze uitdrukking beschrijft de afname van de schuifspanningsamplitude met de afstand.
Voor r_0 kan de straal van een cirkel met dezelfde omtrek als de damwandplank worden genomen. De schuifspanningsamplitude aldaar volgt uit het bronmodel. De parameter n beschrijft hoe snel de amplitude afneemt met de afstand. De grootte ligt tussen 0,5 en 1,0.

De afname van de trillingsamplitude wordt veroorzaakt door zowel de geometrische spreiding (ook wel geometrische demping genoemd) en de materiaal demping. Voor schuifgolven die zich zuiver cylindrisch uitbreiden is, bij verwaarlozing van de materiaaldemping, is de grootte van n theoretisch 0,5. Door materiaaldemping neemt de amplitude sneller af, en de grootte van n dus toe. Uit metingen is gebleken dat bij damwanden n = 1 een bruikbare waarde is.

Gebruikt verdichtingsmodel

Als verdichtingsmodel is het zogenaamde C/L model (compaction/liquefaction model) gekozen. Dit model wordt in diverse publicaties van beschreven o.a. in (Sawicki et al 1998). Het is een empirisch model, gebaseerd op de resultaten van cyclische schuifproeven op droog zand.
De uitdrukking voor de verdichting Φ luidt:

$$\Phi = C_1 \ln(1 + C_2 z)$$

Hierin is z een parameter waarin de schuifrekampltidue en het aantal wisselingen is verwerkt:

$$\Phi = -\frac{1 - n_0}{n_0} \varepsilon_{vol}^{pl}$$

met

Φ tweede invariant van de schuifrekamplitude
N aantal belastingwisselingen
γ_0 schuifrekamplitude
C_1, C_2 empirische parameters

Het verband tussen de verdichting Φ en de plastische volume rek ε_{vol}^{plas} is:

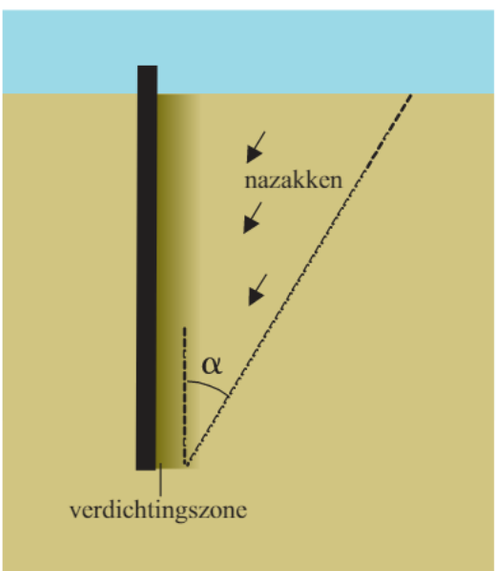
Hierin is n_0 de begin porositeit.

Het model heeft geen bovengrens voor de verdichting. Voor de situatie bij het in- en uittrillen van damwanden blijkt dit geen aanleiding te geven tot onrealistische resultaten.

De schuifrekamplitude varieert per plaats, maar ook in de tijd. In plaats van bovenstaande uitdrukking wordt voor de parameter J de volgende relatie gebruikt:

$$J = \sum_1^N \tfrac{1}{4}\gamma_0^2$$

De parameters C_1 en C_2 zijn empirische constanten. De grootte hangt af van het gebruikte zand en de dichtheid. Mogelijk hangen ze ook af van de schuifrekamplitude.
De parameters C_1 en C_2 kunnen worden bepaald uit gedraineerde cyclische proeven. Op basis van gepubliceerde resultaten is een correlatie tussen de parameters C_1 en C_2 met de relatieve dichtheid afgeleid (Meijers 2007).



Figuur 5 Vertaling lokale verdichting naar maaiveldzakking.

C_1 = 13,3 – 7,4*Re
C_2 = 0,13

Het gebruikte model is voor zand. Algemeen wordt aangenomen dat in klei en veen de verdichting tijdens het in- en uittrillen van damwanden verwaarloosbaar is. Modelmatig kan dit in rekening worden gebracht door C_1 = 0 te kiezen.

Bepaling wateroverspanning

In droog zand voldoet het in de vorige paragraaf beschreven model. Voor verzadigd zand zal in eerste instantie wateroverspanning optreden. Door dissipatie van de wateroverspanning zal de verdichting na enige tijd optreden.
Om vanuit de volumerek de wateroverspanning te berekenen wordt de volgende benadering gevolgd.
De totale volumerek kan worden gezien als de som van een elastische en een plastische volumerek. In een ongedraineerde situatie is de totale volumerek bij benadering nul. Dit geeft de volgende relatie:

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{vol}^{el} + \varepsilon_{vol}^{plas} = 0$$

met:

ε_{vol}	totale volume rek
ε_{vol}^{el}	elastische volume rek
ε_{vol}^{plas}	plastische volume rek

De plastische volume rek volgt uit de blijvende verdichting die wil optreden. De elastische volumerek volgt uit een ontspanning van het korrelskelet en kan als volgt worden uitgedrukt:

$$\varepsilon_{vol}^{el} = \frac{\Delta\sigma'_{iso}}{M} = \frac{\Delta u}{M}$$

met

$\Delta\sigma'_{iso}$	verandering effectieve isotrope spanning
M	oedometer modulus
Δu	verandering waterspanning

Door de voorgaande formules te combineren volgt als verband tussen de verandering van de waterspanning en de verdichting:

$$\Delta u = M * \varepsilon_{vol}^{el} = -M * \varepsilon_{vol}^{plas}$$

Door dissipatie van de wateroverspanning in de tijd treedt de verdichting alsnog op.

Vertaling volumeverandering naar maaiveldzakking

Van verdichting is in het algemeen sprake in een zone dicht bij de damwand. De zakkingstrog aan maaiveld is breder dan de verdichtingszone. Dit komt door het nazakken van grond naar de zone met volumeverlies door verdichting (figuur 5).
Voor de vertaling van volumeverandering naar maaiveldzakking wordt dezelfde aanpak als in (Hergarden, Tol, 2001) gebruikt.

Op dezelfde wijze wordt het effect van het ingebrachte of verwijderde damwandvolume op de maaiveldzakking in rekening gebracht.

Validatie rekenmodel met resultaten damwandproef raamsdonksveer

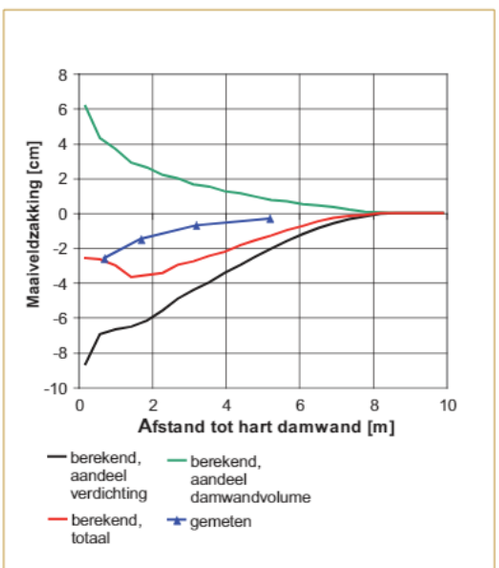
Het beschreven model is niet meer handmatig of met eenvoudige grafieken uit te werken. Om de berekeningen uit te voeren is een computermodel ontwikkeld. De eerste controle is uitgevoerd met de resultaten van de damwandproef in Raamsdonksveer (Meijers 2007), (Meijers, Tol 2009).

De gemeten maaiveldzakking wordt vergeleken met de resultaten van een berekening met het opgestelde nieuwe model. De grootte van de grondparameters is bepaald op basis van correlaties met de relatieve dichtheid. De laatste is weer bepaald uit een correlatie met de conusweerstand. De *figuren 6 en 7* tonen deze vergelijking.

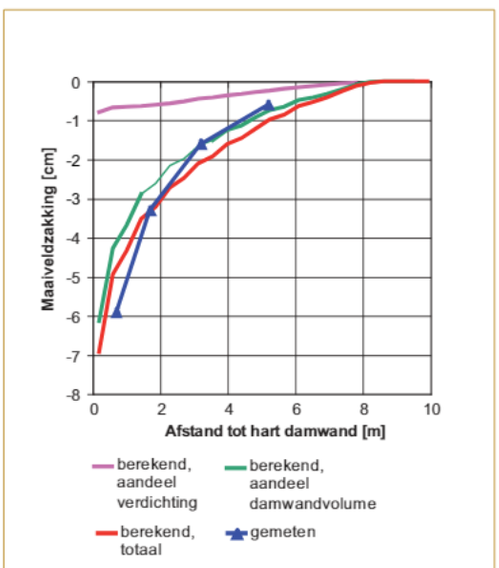
Bij het plaatsen van de damwand is de werkelijke zakking ongeveer de helft van de berekende zakking. Bij het verwijderen is er een goede overeenstemming. Er wordt gevonden dat de zakking dan voornamelijk wordt veroorzaakt door het verwijderde damwandvolume. Uit vergelijking van figuur 6 en 7 blijkt dat de bijdrage van de verdichting aan de maaiveldzakking tijdens verwijderen in dit geval ongeveer 10% is van de bijdrage tijdens plaatsen van de damwand.

Behalve deze vergelijking is het model vergeleken met een aantal andere cases waarvan de maaiveldzakking bekend is. Voor een overzicht van de diverse situaties wordt verwezen naar (Meijers 2007).

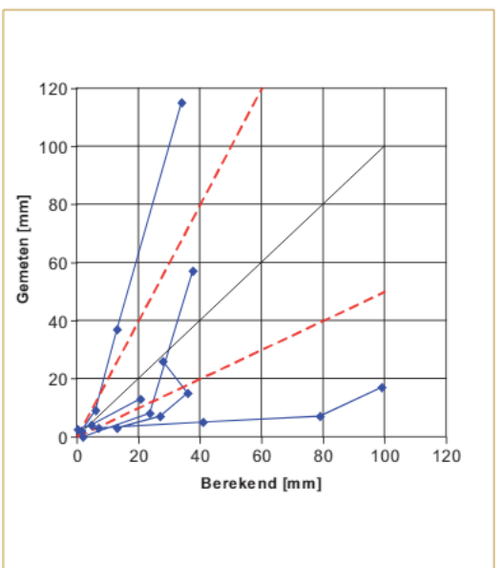
De totale maaiveldzakking kan worden geschreven als de som van een zakking door verdichting en een bijdrage door het volume van de damwand. Bij het plaatsen van de damwand compenseren



Figuur 6 Vergelijking gemeten en berekende maaiveldzakking bij plaatsen damwand.



Figuur 7 Vergelijking gemeten en berekende maaiveldzakking bij verwijderen damwand.



Figuur 8 Vergelijking gemeten en berekende maaiveldzakking door plaatsen damwand voor 5 cases.

deze twee componenten elkaar gedeeltelijk.

$\Delta z = \Delta z_{verdichting} - \Delta z_{volume}$

Hierdoor heeft een relatieve fout in de bijdrage door verdichting een veel grotere relatieve fout in de maaiveldzakking tot gevolg. Dit wordt geïllustreerd met een voorbeeld. Stel: de bijdrage van de verdichting aan de maaiveld zakking is 8 cm en de bijdrage van het ingebracht damwandvolume aan de maaiveldzakking is -5 cm. De werkelijke maaiveldzakking bij het intrillen van de damwand is dus:

$\Delta z = 8 - 5 = 3$ cm

Als de relatieve fout in zakking door verdichting een factor 0,5 à 2 is dan zijn de berekende grenzen voor de maaiveldzakking

$\Delta z = 8/2 - 5 = -1$ cm
$\Delta z = 2*8 - 5 = 11$ cm

Een beperkte relatieve fout in de bijdrage door verdichting kan een grote relatieve fout in het eindresultaat geven. Om de resultaten beter te vergelijken is een vergelijking gemaakt met alleen de zakking t.g.v. verdichting. In de berekening wordt dit bereikt door de bijdrage van het damwandvolume niet mee te nemen.
Voor de praktijkmetingen worden de gemeten maaiveldzakkingen gecorrigeerd met de (theoretische) bijdrage van het damwandvolume. De resulterende vergelijking is weergegeven in figuur 9. Nu blijkt dat de gemeten en berekende maaiveldzakking binnen een bandbreedte van 0,5 tot 2 liggen, op één uitzondering na.
Dit betreft een situatie waarbij een damwand is ingetrild in onverzadigd (en naar verwachting vochtig) zand in de kruin van een dijk. Dit suggereert dat het vochtgehalte en mogelijk ook het initiële spanningsniveau, van invloed is op de grootte van de verdichting.
Voor predictie doeleinden kan het model direct gebruikt worden voor het verkrijgen van een verwachtingswaarde van de maaiveldzakking. Voor een conservatieve schatting lijkt de keuze om het aandeel van de verdichting op de (maaiveld-) zakking met een factor 2 te vergroten een acceptabele keus, gezien de resultaten van de validatie.

Toepassing model

In deze paragraaf worden een aantal toepassingen van het model besproken.

Voorbeeld maaiveldzakking bij verkeersweg

Voor de aanleg van een nieuwe verkeersbrug naast een bestaande verkeersbrug is in het landhoofd een damwand geplaatst. Deze wil men weer verwijderen. De naastliggende weg is een belangrijke verkeersader die niet gestremd mag worden. Gevreesd wordt dat bij het verwijderen van de damwanden de zakkingen te groot worden en een noodreparatie nodig is. Met het opgestelde model is een voorspelling van de optredende maaiveldzakking gemaakt. De hiermee voorspelde verandering van de verkanting en langsonvlakheid is door een verkeerskundige gebruikt om te bepalen of verwijderen toelaatbaar is.

Voorbeeld zakking naast een damwandkuip

Een regelmatig voorkomende vraag is welke vervorming een leiding op korte afstand van een toekomstige bouwkuip tijdens de bouw zal ondergaan. Hierbij is niet de zakking aan maaiveld van belang maar die ter hoogte van de leiding.
De grondvervorming daarbij wordt veroorzaakt door de volgende processen:
- intrillen van de damwand;
- ontgraven bouwkuip;
- uittrillen van de damwand.

De eerste en derde component kunnen met het opgestelde model worden voorspeld. De tweede component kan worden bepaald met empirische methoden of een eindige elementen berekening.

Voor een bouwput in een stedelijk gebied moet een 4 m diepe bouwkuip worden gemaakt. De toplaag bestaat uit een 4 m dikke zandlaag, daaronder bevinden zich klei en veenlagen. Op 2m achter de damwand ligt, op mv -1,3 m, een waterleiding. Om te kunnen beoordelen of de waterleiding kan blijven liggen of veiligheidshalve moet worden verlegd wil men weten wat welke grondverplaatsing bij de leiding is te verwachten.

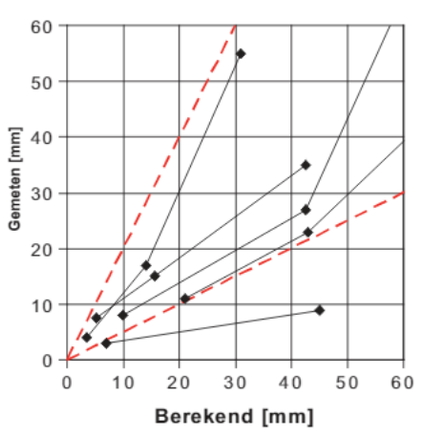
Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn de zakkingen bij het plaatsen en verwijderen bepaald met het nieuwe model. Het model voorspelt geen horizontale grondverplaatsingen.
Uit het waargenomen zakkingspatroon bij de damwandproef Raamsdonksveer wordt afgeleid dat de horizontal grondverplaatsing ongeveer de helft is van de verticale grondverplaatsing.
De verplaatsingen voor de overige bouwfasen zijn bepaald met PLAXIS.

In dit geval zijn de grondverplaatsingen door het plaatsen en verwijderen van de damwand ongeveer de helft van de totale grondverplaatsing bij de leiding.

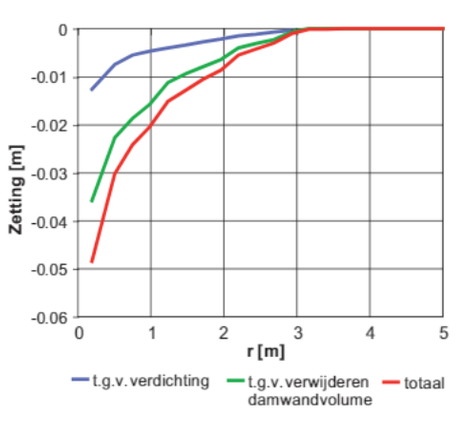
Fase	u_x *[mm]*	u_z *[mm]*	u_{tot} *[mm]*
1. Plaatsen damwand	10	21*	23
2. Ontgraven	27	66	71
3. Verwijderen damwand	16	31**	35
Totaal na ontgraven	37	87	94
Totaal na verwijderen	53	118	129

** T.g.v. verdichting 40 mm, t.g.v. ingebracht damwand volume -19 mm.*
*** T.g.v. verdichting 12 mm, t.g.v. verwijderen damwand volume +19 mm.*

Tabel 1 Berekende grondverplaatsingen.



Figuur 9 Vergelijking gemeten en berekende maaiveldzakking door plaatsen damwand voor 5 cases, alleen effect verdichting.



Figuur 10 Berekende zakking op leidingniveau, bij verwijderen van 1 damwandscherm.

Voorbeeld zakking in leidingsleuf

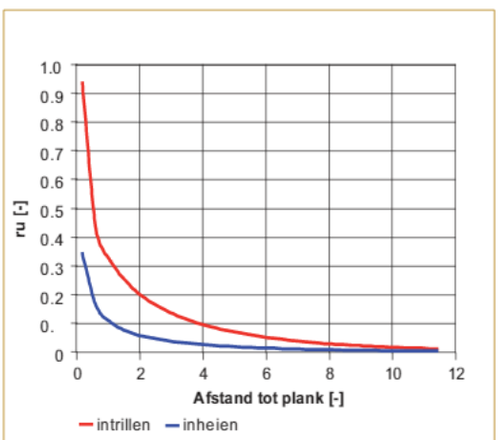
Voor de aanleg van een leiding wordt met twee damwandschermen een twee meter brede en 5,5 m diepe leidingsleuf gemaakt. De planklengte is 12 m. De grondslag is zand. Na de aanleg van de leiding wordt de damwand getrokken.

De vraag is nu wat dit betekent voor de ligging van de leiding. In deze situatie zijn de zakkingen bij het plaatsen van de damwand niet relevant. Volstaan kan worden met het beschouwen van de zakkingen op het niveau onderkant leiding bij het verwijderen van de damwanden. De zakking wordt veroorzaakt door het verwijderen van het damwandvolume en enige extra verdichting door het trillen bij het verwijderen van de damwand. De laatste component is bepaald uit het verschil in verdichting bij een triltijd van inbrengen plus verwijderen en de verdichting bij een triltijd voor inbrengen.

De voorspelde zakking op 1 m uit de damwand, bij het hart van de leiding, door het verwijderen van 1 wand is 2 cm, zie *figuur 10*. De zakking wordt grotendeels veroorzaakt doordat er damwand volume uit de grond wordt verwijderd. Omdat de zakkingstroggen van de twee damwanden elkaar overlappen moet de invloed ook worden opgeteld. Dit geeft dat in dit geval een zakking van de leiding door het verwijderen van de damwanden van 4 cm wordt voorspeld.

Voorbeeld wateroverspanning

Een bijproduct van het model is dat tevens wateroverspanningen rond de damwand bij het intrillen worden berekend. Bij het beschouwen van bijvoorbeeld de stabiliteit van een talud tijdens het plaatsen van een damwand is inzicht in deze wateroverspanningen gewenst.
Als de wateroverspanningen te groot worden is een alternatieve uitvoeringsmethode om de planken te heien in plaats van te trillen. Om de situatie van heien te modelleren zijn een aantal parameters (o.a. de frequentie en de triltijd) aangepast. In figuur 11 is een voorbeeld van de berekende relatieve wateroverspanningen gegeven. Voor de grondslag is uitgegaan van zand met een relatieve dichtheid van 50 %.
De relatieve wateroverspanning is de verhouding tussen de wateroverspanning en de effectieve verticale spanning voordat met het plaatsen van de damwand wordt begonnen. Een waarde van nul betekent geen wateroverspanning en een waarde van 1 betekent volledige verweking. Zoals verwacht geeft heien een lagere wateroverspanning dan intrillen.



Figuur 11 Berekende wateroverspanning bij intrillen en bij heien.

Overige mogelijke toepassingen

Het model is opgesteld en gevalideerd voor in- en uittrillen damwandplanken. Met een aangepaste keuze van diverse parameters is het model ook te gebruiken voor andere situaties zoals het intrillen van buispalen of het heien van planken. Daarbij moet wel worden bedacht dat het model voor die situaties nog niet is gevalideerd.

Conclusie

Er is een numeriek model ontwikkeld om de zakking bij het intrillen van damwanden te voorspellen. In dit model wordt de bron-pad-object benadering gevolgd. In het model wordt de opbouw en dissipatie van wateroverspanningen meegenomen. Het model is gevalideerd met beschikbare meetgegevens van 5 cases en blijkt daarbij bruikbare resultaten te geven.

Afsluiting

De in dit artikel beschreven rekenmodel is opgesteld als onderdeel van het Delft Cluster programma 'Delft Beheerst ondergronds'.
Het is de bedoeling dat het rekenmodel binnenkort voor de adviespraktijk beschikbaar komt.

De auteurs bedanken GeoDelft (nu Deltares), Delft Cluster, Rijkswaterstaat, Gemeentewerken Rotterdam, Volker Wessels Stevin en Ballast Nedam voor hun bijdragen die het ontwikkelen en valideren van dit model mogelijk heeft gemaakt.
Tevens bedanken de auteurs allen die meetdata voor de validatie van het model ter beschikking hebben gesteld.

Referenties

[1] Bement, R.A.P., Selby, A.R., *Compaction of granular soils by uniform vibration equivalent to vibrodriving of piles.* Geotechnical and Geological Engineering, 15, 1997, pagina 121-143.
[2] Drabkin, S., Lacy, H., Kim, D.S., *Estimating settlement of sand caused by construction vibration.* Journal of Geotechnical Engineering, November 1996, pagina 920 - 928.
[3] Bles, T.J., Korff, M., Guis, C., Schouten, C.P., *Uitvoeringscheck cruciaal bij funderingsontwerpen*, Geotechniek, december 2008.
[4] Hergarden, R.H., Tol, A.F. van, *Zakkingen tijdens het trillend trekken van damwanden.* Geotechniek, juli 2001, pagina 84 - 90.
[5] Holeyman, A.E., Legrand, C.L., Huybrechts, N., *Methode voor de voorspelling van de intrilbaarheid van palen.* Geotechniek, april 1998, pagina 18-22.
[6] Massarsch, K.R., *Static and dynamic soil displacements caused by pile driving.* Proceedings 4th Int. Conference Application of Stress-wave Theory to Piles, Den Haag 1992, pagina 15-24.
[7] Massarsch, K.R., *Vibrations caused by Pile Driving.* The Magazine of Deep Foundations Institute, najaar 2004, pagina 39-42.
[8] Meijers, P. Tol, A.F. van, *Densification of sand caused by vibratory sheetpiling* In Th. Triantafyllidis (ed.), Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena, Proceedings CBS04, Bochum 2004, pagina 523-532.
[9] Meijers, P., *Invloed inbrengen en verwijderen van damwanden op omgeving.* Geotechniek, oktober 2004, pagina 8-13.
[10] Meijers, P., *Settlement during vibratory sheet piling.* Dissertatie TU Delft, december 2007.
[11] Meijers, P. Tol, A.F. van, *Damwandproef Raamsdonksveer, observaties tijdens het in- en uittrillen van damwanden,* Geotechniek, april 2009, pagina 40-44.
[12] Niemunis, A., Helm, J., *Settlement of a strip foundation due to cyclic loading.* Centrifuge model and FE-calculations. Proc. XV ICSMFE, Istanbul, 2001, pp 761-764.
[13] Nijs, R.E.P. de, *Het trillen van damwanden in granulaire bodem.* Geotechniek, oktober 2003, pagina 56-64.
[14] Sawicki, A., Swidzinski, W., Zadroga, B., *Settlement of shallow foundation due to cyclic vertical force.* Soils and foundations Vol. 38. ■