

Een dijk te testen met 150 keer de zwaartekracht met de nieuwe Deltares GeoCentrifuge

Suzanne van Eekelen, Adam Bezuijen, Rob Zwaan, Dirk de Lange, Harm Aantjes

Deltares, Delft

Samenvatting

Modelonderzoek in de geotechniek wordt regelmatig uitgevoerd in een centrifuge, met een versnelling veel hoger dan de zwaartekrachtsversnelling. Onlangs heeft Deltares een nieuwe centrifuge voor dit onderzoek in gebruik genomen. Dit artikel beschrijft waarom die hogere versnelling nodig is, hoe die wordt gerealiseerd en welke zogenaamde schaalregels van belang zijn. Het artikel sluit af met twee voorbeelden.

Inleiding

In de geotechniek worden regelmatig grote constructies op, of in, de grond geplaatst. Er zijn rekenmodellen ontwikkeld om te bepalen of deze constructies voldoende sterk en stabiel zullen zijn en welke vervormingen kunnen optreden. Soms is het nodig om de resultaten van die rekenmodellen te verifiëren met een modelonderzoek. Wanneer het om grote constructies gaat, is het nuttig en goedkoper als dat onderzoek op een model kan worden uitgevoerd dat kleiner is dan het werkelijke object. Echter, het spannings-rek gedrag van grond is niet-lineair afhankelijk van de spanning in de grond. Een proef in een schaalmodel zou dus bij dezelfde grondspanningen moeten worden uitgevoerd als in werkelijkheid. Normaal lukt dat niet. Want als we bijvoorbeeld een schaalmodel 1:10 maken, zijn de afmetingen 10 keer kleiner, maar de massa van elk onderdeel is 10^3 keer kleiner. Het oppervlak 10^2 keer kleiner en de spanningen, kracht gedeeld door oppervlak, zijn 10 keer kleiner. Wanneer nu de versnelling van het 1:10 schaalmodel 10 keer hoger wordt, geeft de 1000 keer kleinere massa een 100 keer kleinere gewichtskraft en kloppen de spanningen wel.

De nieuwe GeoCentrifuge van Deltares kan een versnelling tot 150g opwekken en daarmee kunnen dus modellen tot op een schaal 1:150 worden onderzocht. Die 150g is niet veel voor een centrifuge. Een wasmachine haalt bij centrifugeren al 700g. Het bijzondere van de GeoCentrifuge is dat deze een model van een paar ton kan versnellen tot 150g. Met deze combinatie behoort de GeoCentrifuge van Deltares tot de top drie van Europa.

De GeoCentrifuge heeft dus als hoofddoel om een geschaald model te testen zonder afbreuk te doen aan het gedrag van grond. Om dat te realiseren moet wel aan de schaalregels worden voldaan. Echter, het is niet altijd mogelijk om aan alle schaalregels te voldoen omdat deze leiden tot conflicterende eisen.

Zwaartekracht verhogen met centrifugale krachten

Om een model, bijvoorbeeld een klein dijkje, te testen wordt het in de basket van de centrifuge gezet, rechts in Figuur 1a. Deze basket hangt via een scharnier aan de arm van de centrifuge. Vervolgens gaat de centrifuge draaien. De basket gaat dan kantelen om het scharnier, net als bij een stoeltje in een zweefmolen. Als de centrifuge op topsnelheid draait hangt de basket bijna horizontaal (Figuur 1(b)). Wat gebeurt er dan?

Figuur 2 geeft een bovenaanzicht tijdens een proef. We zien een model van een dijkje op een laag zand in de basket. Door de rotatie van het model neemt de versnelling a en dus het gewicht F van het model toe. In en onder het kleine dijkje is de spanning nu even groot als bij de echte dijk buiten. De straal R van de arm van de centrifuge is $R = 5$ m. Het toerental (frequentie) f is maximaal 2.73 rotaties/s, de hoeksnelheid ω is $2\pi \times f$ in rad/s. De snelheid v van het model is dan:

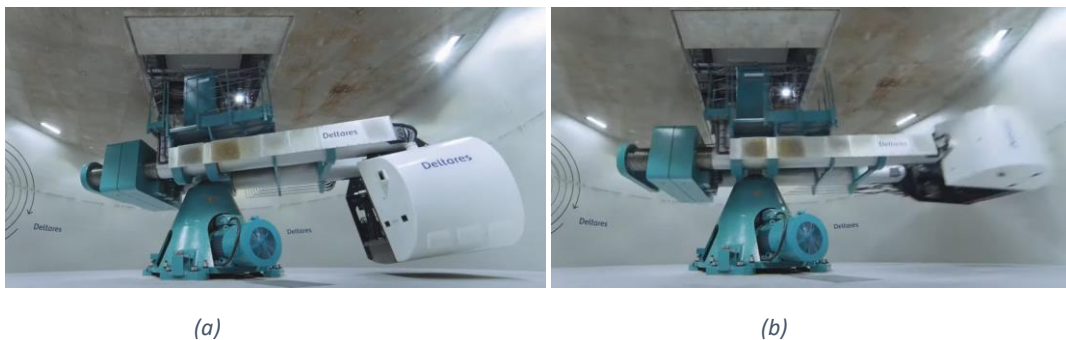
$$v = \omega \times R = 2.73 \times 2\pi \times R \text{ m/s} = 2.73 \times 2 \times \pi \times 5 \text{ m/s} \approx 86 \text{ m/s} = 309 \text{ km/uur.}$$

De opgelegde versnelling a is:

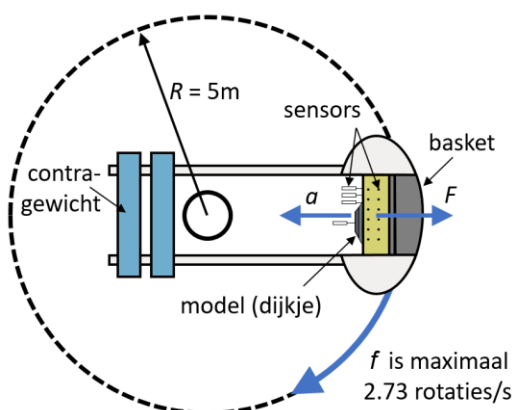
$$a = R \times \omega^2 = 5 \times (2.73 \times 2\pi)^2 \text{ m/s}^2 = 1471 \text{ m/s}^2$$

De aardse zwaartekrachtsversnelling g is 9.81 m/s^2 . De GeoCentrifuge kan dus een versnelling opwekken die $1471 / 9.81 = 150$ keer zo hoog ligt als de zwaartekrachtsversnelling. Dus $150g$. Deze versnelling wordt bereikt op de bodem van het model. Hoger in het model is de versnelling kleiner, omdat de afstand R tot het rotatiepunt kleiner is. Het voordeel van de relatief lange arm van de GeoCentrifuge is dat de gradiënt van g over de hoogte van het monster beperkt blijft. Ook de kromming van het zwaartekrachtsveld over de breedte van het model blijft hierdoor beperkt.

De centrifuge draait meestal niet op topsnelheid. Als de schaalfactor gelijk is aan n , dan is de benodigde zwaartekrachtversnelling n maal g .



Figuur 1 De Deltares GeoCentrifuge vlak na het begin (a) en tijdens een proef (b): de basket met daarin het model is dan gekanteld en hangt tijdens de proef bijna horizontaal.



Figuur 2 Boven-aanzicht van de Deltares GeoCentrifuge tijdens een proef. Een modeldijkje is te zien in de basket.

Een contragewicht (de stalen blokken tegenover de basket) is nodig om onbalans tijdens de 'vlucht' te voorkomen. Van tevoren wordt de juiste positie van de contragewichten uitgerekend en ingesteld. Tijdens de vlucht kantelt de basket als het toerental wordt verhoogd, en daarmee verandert het zwaartepunt. Het zwaartepunt kan ook snel veranderen, bijvoorbeeld als het model dat wordt getest bezwijkt. De GeoCentrifuge heeft daarom een automatisch balanceersysteem, dat de fijne onbalans regelt. Dit gebeurt door de onbalans te meten en ervoor te corrigeren door de contragewichten in de arm van de centrifuge te verschuiven.

Schaalregels

Tijdens een modelonderzoek in een centrifuge is, zoals eerder beschreven, de lengte in het model $1/n$ maal de lengte van het object in de werkelijkheid (ook wel het prototype genoemd) en de versnelling n maal de versnelling in het prototype. Door dimensieanalyse zijn de schaalregels voor de overige parameters van het model eenvoudig af te leiden. De versnelling heeft als dimensie $[L]/[T]^2$. Met $[L]$ de dimensie lengte en $[T]$ de tijd. In het model geldt dus voor versnelling:

$$a_m = [L_m]/[T_m]^2$$

$$\text{Met } a_m = n \cdot a_p = [L_p/n] / [T_m]^2,$$

is eenvoudig af te leiden dat $T_p = n T_m$,

omdat eveneens geldt: $a_p = [L_p]/[T_p]^2$.

Hierbij staat subscript m voor model, en subscript p voor prototype. Op deze manier is ook af te leiden dat de snelheid ($[L]/[T]$) in het model en prototype hetzelfde is en frequenties ($1/[T]$) n maal hoger zijn in het model. In de centrifuge worden vaak dezelfde materialen gebruikt als in de werkelijkheid. De eigenschappen van die materialen, weergegeven in materiaalparameters zoals elasticiteitsmodulus, viscositeit etc., zijn dan ook hetzelfde in het model als in de werkelijkheid.

Wanneer echter grondwaterstroming een rol speelt, wordt dat anders. Het probleem is hier dat in grondwaterstromingsberekeningen vaak gerekend wordt met de gradiënt van de stijghoogte, maar het drukverschil belangrijk is. Zo wordt de wet van Darcy geschreven als:

$$q = -k \cdot i$$

Met q het specifiek debiet $[L/T]$, k de doorlatendheid voor water in $[L/T]$ en i het verhang (de gradiënt in de stijghoogte, dh/dx , met h $[L]$ de stijghoogte van het water en x $[L]$ de horizontale afstand tussen de twee beschouwde punten). Echter, hier is k geen materiaalparameter, maar wordt k bepaald door drie andere materiaalparameters: intrinsieke doorlatendheid (κ , $[L^2]$), de viscositeit van water (μ , $[M / L \cdot T]$) met M massa, en de dichtheid van water (ρ_w , $[M / L^3]$) volgens de formule:

$$k = \frac{\kappa \rho_w g}{\mu}$$

In deze formule staat, behalve de drie materiaalparameters die hetzelfde zijn in het model en het prototype, ook nog de versnelling g van de zwaartekracht en dus blijkt de doorlatendheid k , zoals gebruikt in de wet van Darcy, toe te nemen bij toenemend g -niveau. Het is uit bovenstaande formule ook direct duidelijk hoe dit op te lossen: een vloeistof met een hogere viscositeit gebruiken. Wanneer μ evenveel wordt verhoogd als g , is de doorlatendheid weer constant. Nu is het mogelijk een viskeuze vloeistof samen te stellen die bruikbaar is voor proeven met zand. Maar voor klei is dit vrijwel onmogelijk door de lage doorlatendheid van klei en omdat de elektrische relatieve

permittiviteit van de vloeistof gelijk moet blijven aan die van water, aangezien de mechanische eigenschappen van klei hier ook van afhangen. Omdat ook voor zand het werken met een vloeistof met een hogere viscositeit de nodige extra handelingen vergt, wordt vaak eerst nagegaan of het model en het prototype niet allebei gedraineerd (er ontstaan dan geen waterspanningen) of ongedraineerd (de stroming is verwaarloosbaar) gedrag vertonen, om alleen als het echt nodig is de viscositeit te veranderen.

Samendrukking van klei onder bijvoorbeeld een weglichaam is een heel langzaam proces. Hierbij wordt grondwater uit de klei geperst. Dit proces heet consolidatie, en dat gaat bij klei zo langzaam omdat klei een lage doorlatendheid heeft. Om dit te simuleren in een centrifuge is het juist wenselijk dat het sneller gaat. Uit de eisen voor versnelling en lengte was al af te leiden dat processen n keer sneller gaan in het model dan in de werkelijkheid. Omdat, zoals boven beschreven ook de doorlatendheid nog een keer met een factor n toeneemt in het model, gaat de consolidatie n^2 sneller in het model. Bij 100g kan een 30 jaar durend consolidatieproces in 30 jaar x 365 dagen / 100² = ruim 1 dag in de centrifuge worden gesimuleerd. Dit levert dan de schaalregels op voor onderzoek in centrifuges zoals weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Schalingsfactoren voor onderzoek in centrifuge bij een versnelling van ng (n keer de zwaartekracht).

parameter	factor model/prototype	dimensie
versnelling	n	m/s^2
lengte	$1/n$	m
snelheid	-	m/s
massa	$1/n^3$	kg
kracht	$1/n^2$	N
druk	-	N/m^2
doorlatendheid (k)	n	m/s
tijd (dynamisch)	$1/n$	s
tijd (consolidatie)	$1/n^2$	s

Een interessante consequentie van deze schaalregels zien we bij onderzoek ([1][2][3]) zoals dat een aantal jaren geleden is uitgevoerd voor voertuigen op Mars waar een zwaartekracht heerst van 0.38 maal die van de aarde. Dit onderzoek bij 1g kan het beste worden uitgevoerd met schaalmodellen op een schaal $n=1/0.38=2.63$. Op die schaal zijn de spanningen op de aarde gelijk aan die op Mars. Het is de auteurs niet bekend of deze schaalregel ook is toegepast.

Voorbeelden van toepassingen in de Geocentrifuge

Windturbines op de Noordzee



Figuur 3 Experiment windturbine. (a) drie monopiles in de proefbak, (b) de opstelling met activators en sensoren in de basket van de GeoCentrifuge.

De groeiende vraag naar hernieuwbare energie maakt dat windturbines steeds groter worden. Op de Noordzee zullen deze naar alle verwachting binnen enkele jaren zo'n 300 m hoog zijn. Deze afmetingen zijn daar nog nooit gebouwd, en dit heeft effect op het ontwerp en de uitvoering. Er gelden strenge eisen. De fundering van zo'n offshore windturbine bestaat vaak uit één grote holle stalen buispaal, de zogenaamde 'monopile'. Deze buis heeft een doorsnede van wel 8 m en een lengte van bijvoorbeeld 80 m die verticaal de grond in wordt gebracht. Deltares test deze funderingen met modelbuizen met een doorsnede van 8 cm (1:100). Deze buizen zijn geplaatst in een bak met zand. In de centrifugeproef zijn de spanningen in en om de monopile bij benadering dezelfde als bij de monopile in de Noordzee. Gedurende de 'vlucht' in de centrifuge worden deze kleine monopiles belast met cyclische horizontale belastingen. In werkelijkheid komen deze belastingen door golven, wind en het draaien van de wieken. Doordat de verplaatsingen van de paal worden gemeten tijdens de centrifugeproef, kan het ontwerp voor de fundering in de Noordzee worden geoptimaliseerd en getest vóór plaatsing.

Dijken

Dijken moeten veilig zijn. In de GeoCentrifuge kunnen deze worden blootgesteld aan extreme condities die in het echt vrijwel nooit optreden, zoals hoge waterstanden of droogte. Momenteel voert Deltares onderzoek uit voor de waterveiligheid in de directe versterkingsopgave voor het Hoogwaterbeschermingsprogramma voor de komende jaren. Hierbij modelleren we het mechanisme 'opbarsten'. Opbarsten kan optreden als de waterdruk in een diepe grondlaag oploopt terwijl de relatief ondoorlatende deklaag erboven relatief licht is. Dus als de deklaag bestaat uit organische klei of veen. De grond wordt dan door de hoge waterdruk omhoog gedrukt. Wanneer dit optreedt nabij een dijk, dan kan dit de stabiliteit van de dijk negatief beïnvloeden. De dijk kan dan instabiel worden en doorbreken. Hiervoor zal naast centrifugeonderzoek ook allerlei ander onderzoek plaatsvinden, zoals veldproeven. Met de nieuwe centrifuge kunnen de in de toekomst noodzakelijke versterkingen worden geoptimaliseerd.

Kader: Specificaties van de GeoCentrifuge van Deltares

- Type centrifuge: beam centrifuge (Actidyn C72-3);
- Operationeel sinds 2021;
- Platform radius: 5 m;
- Maximale model afmeting: 1,2 m bij 1,2 m bij 1,8 m (lxbxh);
- Capaciteit: 260 g-ton;

- Maximum g-niveau: 150 g;
- Maximale snelheid: 309 km/u;
- Maximum rotaties: 2.73 /sec;
- Aandrijving: 2 elektromotoren van ieder 135 kW;
- High Definition and high-speed video registratie;
- High-speed data-acquisitie;
- Testen in een geklimatiseerde ruimte;
- Een diverse sensor-set voor monitoring;
- Een 4D-robot voor operaties tijdens de vlucht;
- Hydraulica om tijdens de vlucht belastingen uit te oefenen of grondonderzoek te doen, zoals sonderingen;
- Mogelijkheid om tijdens de vlucht water toe- of af te voeren;
- Werkplaats voor het ontwerpen, maken en beproeven van testbenodigdheden (denk hierbij aan metaalbewerking en 3D-printing);
- Apparatuur voor de preparatie van grondmodellen voor zand en klei;

Bronnen

- [1] https://youtu.be/KLpCrFBO_e4
- [2] <https://www.businessinsider.nl/mars-vernielt-banden-en-dus-heeft-nasa-het-wiel-opnieuw-uitgevonden>
- [3] Wang, Z., Yang, H., Ding, L., Yuan, B., Lv, F., Gao, H., Deng, Z., 2020. Wheels' performance of Mars exploration rovers: Experimental study from the perspective of terramechanics and structural mechanics, Journal of Terramechanics, 92, 23-42, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.09.003>

Auteurs

De auteurs werken bij Deltares. Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werkt Deltares aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. Suzanne van Eekelen en Dirk de Lange zijn geotechnisch adviseur en onderzoeker. Dirk de Lange werkt momenteel aan een PhD over funderingspalen, waarvoor hij experimenten uitvoert in de GeoCentrifuge. Adam Bezuijen is emeritus professor grondmechanica en funderingstechniek in Gent, en specialist experimenteel onderzoek. Rob Zwaan is technicus en tevens operator van de GeoCentrifuge. Harm Aantjes is het afdelingshoofd van de groep die geotechnische experimenten uitvoert. In een breder teamverband droegen ze samen actief bij aan de totstandkoming van de GeoCentrifuge.