



Proefterp geeft inzicht in restzetting

Onderzoek naar
mechanische
eigenschappen
van ondergrond

Over het effect van voorbelasten op restzettingen zijn weinig experimentele gegevens bekend. Bij een test op een proeflocatie in Pijnacker blijkt dat een aanzienlijke reductie van restzakkingen is te realiseren.

IR. W.F. ROSENBRAND / DR. IR. E.J. DEN HAAN

Voor het bouwrijp maken van terreinen en voor infrastructurele werken in gebieden met een samendrukbare ondergrond is een toenemende vraag ontstaan naar technieken, die in korte tijd de mechanische eigenschappen van deze ondergrond verbeteren. Belangrijk aspect is meestal dat de zettingen in de gebruiksfase aan zeer strenge eisen moeten voldoen. Boskalis heeft in samenwerking met GeoDelft de mogelijkheden onderzocht om aan deze vraag te voldoen.

Uit een eerste inventarisatie bleek een tekort te zijn aan experimentele gegevens voor het toetsen van de modellen, die het effect van voorbelasten op restzettingen kunnen voorspellen. Daarnaast waren er twijfels over de effectiviteit van het plaatsen van verticale drains op minder dan 1 meter van elkaar.

Als methode van grondverbetering is gekozen voor het versnellen van de consolidatie, door het plaatsen van een dicht net van verticale drains en het reduceren van restzettingen. Dit gebeurt door het aanbrengen van een extra belasting in de consolidatiefase. De oorspronkelijke grond wordt niet ontgraven, ter voorkoming van problemen bij de afvoer van grond

en bovendien blijft het bouwterrein schoon.

Om het effect van voorbelasten te onderzoeken zijn laboratoriumtests en een veldtest uitgevoerd. Het effect van drains op zeer korte afstand is bij de veldtest onderzocht.

Tests op proefterp en in laboratorium

Als proeflocatie is gekozen voor Tolhek in Pijnacker. Deze locatie moet woonrijp worden gemaakt. De bodemgesteldheid is een veen- en kleilagenpakket met een dikte van circa 9 m. De werkzaamheden bestaan uit het opspuiten van zand, als ophoging en voorbelasting, en het plaatsen van verticale kunststofdrains in een driehoekstramien van 2 m hart op hart, om de consolidatie te versnellen. De dikte van de opgespoten zandlaag is ongeveer 3 meter, om zo de gewenste ophoging te realiseren en te compenseren voor de optredende zettingen (naar verwachting circa 1,3 m) tijdens het woonrijp maken. De beschikbare tijd voor het woonrijp maken is één tot anderhalf jaar.

Voor de tests is een proefterp aangebracht van 30 x 75 m², die onderverdeeld is in drie gebieden van 30 x 25 m², waarbij de drainafstand in de gebieden verschillend is. Deze bedroeg 2 m, 1 m en 0,5 m hart op hart. In de proefterp is de zandlaagdikte verdubbeld, om een duidelijke

lijjk effect van de voorbelasting op de consolidatiesnelheid en restzettingen te krijgen.

De proefterp is gefaseerd opgehoogd tot een totale zandlaagdikte van circa 6 m. Op basis van stabiliteitsberekeningen is het volgende ophoogschema voorgesteld:

- opspuiten van 1 m zand;
- aanbrengen van verticale drains;
- opspuiten van zand in spuitvak tot een totale zandhoogte van 1,5 m;
- direct daarna maken van kades rond de proefterp en volspuiten van proefterp tot een totale zandhoogte van 3,25 m (zo snel mogelijk);
- opspuiten van zand in spuitvak tot een totale zandhoogte van 2 m;
- kades aanbrengen rond proefterpen en de proefterpen ophogen tot een totale zandhoogte van 6 m (zo snel mogelijk);
- daarna het spuitvak ophogen tot een totale zandhoogte van 3,25 m.

Door gebrek aan capaciteit was het gevolgde ophoogschema langzamer, dan het voorgestelde schema. De stabiliteit van de ondergrond was geen enkel moment de beperkende factor voor het tempo van ophogen. Dit uiteraard dankzij de stabiliserende werking van het zand in het spuitvak rondom de proefterp.

Op basis van de boringen onder de proefterp is de ondergrond in kaart gebracht met de volgende resultaten: klei (0-0,8 m), veen (0,8-2,3 m), humeuze klei/veen (2,3-3,2 m), fijn zand (3,2-5,3 m) en humeuze, ziltige klei (5,3-8,5 m).

Op de gestoken monsters zijn samendrukkingsproeven uitgevoerd. Onderzocht is het effect van voorbelasten op de vervormingsnelheden na de consolidatiefase. Gekeken is naar de invloed van de maximale dikte van de zandophoging (6 m en 4 m) en de relatieve grootte van de voorbelasting ten opzichte van de blijvende zanddikte (factoren van 2 en 1,5).

De ontlastfase van de samendrukkingsproeven duurde één maand. Steeds zijn ook

LRS-WAARDE

Bij de beoordeling van restzettingen is onlangs in het kader van het No Recess-project een handig begrip geïntroduceerd: de Logarithmic Rate of Settlement (LRS):

$$LRS = \frac{Zakking_{t1} - Zakking_{t2}}{\log(t2/t1)} \text{ [m]}$$

Hierbij zijn t_1 en t_2 twee opeenvolgende tijdstippen met de tijd uitgedrukt in dagen. De LRS is gelijk aan de zakking die optreedt bij een verhouding tussen t_2 en t_1 gelijk aan 10.

Afhankelijk van de drainafstand en de voorbelasting zijn de LRS-waarden en daarmee de restzettingen aanzienlijk te beïnvloeden, zoals blijkt uit de LRS-waarden op dag 300 voor de verschillende vakken op de proefterp:

Vak 2: drains 2 m hoh en voorbelasting	LRS: 0,369 m
Vak 3: drains 0,5 m hoh en voorbelasting	LRS: 0,025 m
Vak 4: drains 1 m hoh en voorbelasting	LRS: 0,195 m
Vak 5: drains 2 m hoh	LRS: 0,759 m

referentieproeven zonder voorbelasting uitgevoerd, die ook een maand duurden.

Resultaten

De laboratoriumtests tonen aan dat voorbelasten een groot effect heeft op de vervormingen na de consolidatiefase. Uit de tests blijkt dat het weer zakken na de zwelperiode langzamer gaat, naarmate de voorbelasting relatief groter is geweest. De zwelperiode duurt ook iets langer bij relatief grotere voorbelasting.

Op basis van deze testresultaten is met een isotachen-model, zoals bijvoorbeeld gebruikt wordt in MSettle van GeoDelft, een conservatieve schatting gemaakt van het effect van voorbelasten op de restzakkingen voor de praktijktest. De vervorming wordt berekend op basis van integratie van de vervormingsnelheden. Deze nemen sterk af als gevolg van de voorbelasting.

Gekozen is voor de ongunstigste extrapolatie van de resultaten van de samendrukkingsproeven naar de zakkingen tien jaar na de consolidatiefase. Voor de situatie van voorbelasten met 6 m zand en een eindbelasting van 4 m is de verwachting dat de zakkingen 2,5% bedragen van de samendrukbare laag. Zonder voorbelasten bedragen de zakkingen 9% van de samendrukbare laag; een reductie van de restzettingen over een periode van tien jaar met een factor 3.

Het isotachenmodel in MSettle kan overweg met het gedrag bij ontlasten en ook bij herbelasten. Daarnaast zijn de invloeden ervan op de waterspanningen meegenomen, bijvoorbeeld de relatieve onderspanning die ontstaat bij ontlasten. GeoDelft werkt nu aan de noodzakelijke verbeteringen.

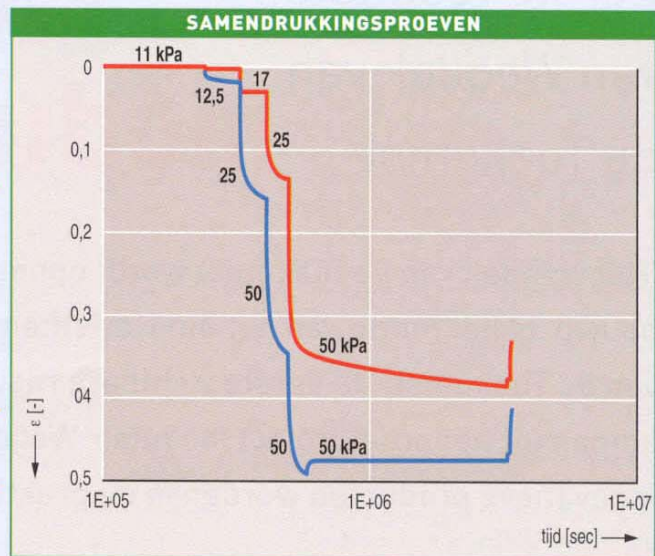
Aan de zakkingen van de proefterp is te zien dat de voorspelde zetting van 1,3 m, onder een voorbelasting van circa 3 m zand, redelijk overeenkomt met de zettingen die gemeten zijn in het spuitvak, direct naast de proefterp. Onder de belasting van 6 m zand wordt deze zetting al veel eerder bereikt: afhankelijk van de drainafstand na vijftig tot honderd dagen. Het effect van de drainafstand is duidelijk waarneembaar. De aanpassingen bij een drainafstand van 0,5 m verlopen duidelijk het snelst.

Na 150 dagen is de zandhoogte in de proefterp teruggebracht naar een hoogte van circa 4 m. De grond reageerde op deze ontlasting met een 'snelle' stijging van circa 0,10 m gevolgd door vooralsnog een periode van vrijwel stabiel bodemniveau.

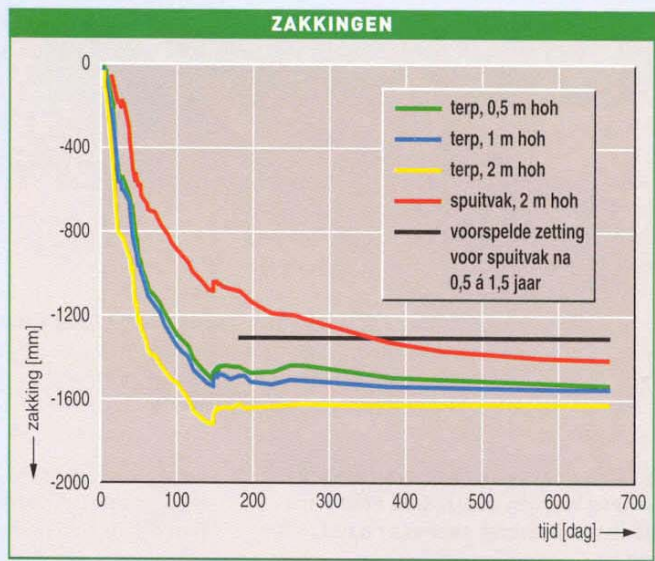
De periode na voorbelasten duurt meer dan vijfhonderd dagen. De verwachting dat de zwelperiode in orde van grootte gelijk is aan de voorbelastingsperiode, lijkt op te gaan voor de terpen met de drains op 1 m en 2 m hart op hart. De terp met de drains op 0,5 m hoh laat vooralsnog geen enkele zakking zien. ●

*Ir. W.F. Rosenbrand is werkzaam bij Baggermaatschappij Boskalis te Papendrecht.
Dr.ir. E.J. den Haan is werkzaam bij GeoDelft te Delft.*

Resultaten van twee samendrukkingsproeven op veen. Bij een referentietest is de bovenbelasting in vier stappen opgevoerd naar 50 kPa, waarna de zakkingen een maand gevolgd zijn. Bij de andere test is de bovenbelasting in vier stappen opgevoerd naar 100 kPa; na een dag consolideren onder deze belasting is de bovenbelasting teruggebracht naar 50 kPa en zijn de zakkingen weer een maand gevolgd. Duidelijk is te zien dat het voorbelaste monster na ontlasting naar 50 kPa omhoog komt en tijdens de totale testperiode van een maand nauwelijks verdere zakkingen vertoont.



Gemiddelde zakkingen in de proefterp en het spuitvak. De voorspelde zetting van 1,3 m onder een voorbelasting van circa 3 m zand komt redelijk overeen met de gemeten zettingen in het spuitvak naast de proefterp. Onder de belasting van 6 m zand wordt deze zetting veel eerder bereikt; ook het effect van drainafstand is duidelijk waarneembaar.



RESTZAKKING

- Op basis van laboratoriumonderzoek zijn de restzakkingen, betrokken op een periode van tien jaar na de consolidatiefase, met behulp van een voorbelasting met 6 m. zand voor een gebruiksbelasting van 4 m zand met ten minste een factor 3 te reduceren.
- Bij de test in Pijnacker is in een periode voor woonrijp maken van 150 dagen door gebruikmaking van verticale drains en een tijdelijke overhoogte van zand een aanzienlijke reductie van de restzakkingen gerealiseerd.
- Verkleining van de drainafstand naar 0,5 m hoh heeft een duidelijk effect op de consolidatiesnelheid.
- Na wegnemen van de overhoogte van de proefterp heeft de ondergrond gereageerd met een snelle stijging van 0,10 m. Daarna is gedurende meer dan vijfhonderd dagen het bodemniveau, met name in het vak met een drainafstand van 0,5 m hoh, stabiel.