

Proefeiland IJburg; een consolidatie- en zettingsproef op ware schaal

ir. E.P.T. Smits, OMEGAM Geotechniek

Voor de toekomstige stadsuitbreiding van Amsterdam dient nieuw land te worden gewonnen voor de bouw van 18 000 woningen. Hiertoe zullen in het IJmeer een aantal eilanden worden aangelegd. De totale oppervlakte van het plan is 545 ha.

OMEGAM heeft in het plangebied een omvangrijk geotechnisch onderzoek uitgevoerd.

De uitvoering van een proef op ware schaal vormde een belangrijk onderdeel van het onderzoek naar het bodemgedrag.

Ter plaatse van het IJmeer bestaat het pakket holocene lagen uit veen, klei en silt. Direct onder bodemniveau wordt een zeer slappe kleilaag (slib) aangetroffen. De sliblaag bepaalt in hoge mate de consolidatiesnelheid en speelt eveneens een belangrijke rol bij de toelaatbare ophoogsnelheid, in relatie tot de standzekerheid van de waterkeringen.

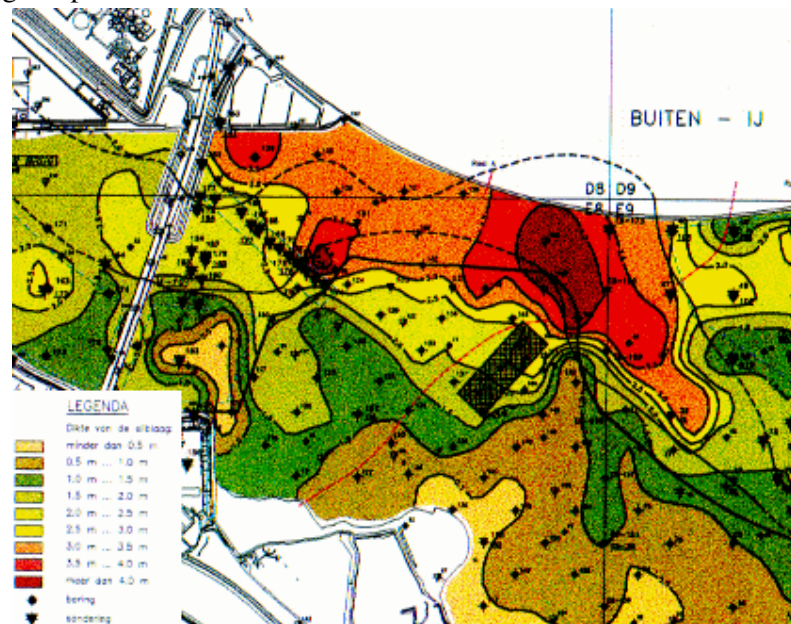
Omdat er weinig ervaring was met betrekking tot het vervormingsgedrag en de consolidatiesnelheid van de sliblaag, is besloten tot het uitvoeren van een proef op ware schaal, in aanvulling op het in situ- en laboratoriumonderzoek.

De proef moet inzicht verschaffen in de effectiviteit van zettingversnellende maatregelen. Met name het effect van verticale drainage is onderzocht. De proef moet verder aantonen of er geotextielen ter plaatse van de randen nodig zijn, moet de eindzetting nauwkeuriger voorspellen en moet zorgen voor de kalibratie van de grondparameters.

Het plangebied voor IJburg is gesitueerd in het zuid-westelijke gedeelte van het IJmeer. De waterdiepte ter plaatse van het proefeiland is gemiddeld 1,6 m.

Neerslag van zeer fijn sediment heeft de laatste 2000 jaar geleid tot een maximaal 4,0 m dikke sliblaag. Ter plaatse van het proefeiland loopt de dikte van de sliblaag uiteen van ongeveer 1,5 m tot 2,5 m.

Op circa 2,0 m à 3,0 m onder bodemniveau wordt een laag aangetroffen die bestaat uit slappe klei en veen. Meer



Sliblaagdiktekaart

zandhoudende kleien zijn aangetroffen op een diepte van 5,0 m onder bodemniveau. Deze zandhoudende klei gaat geleidelijk over in klei. Op een diepte van 10,0 m onder de bodem bevindt zich het basisveen dat tevens de scheiding tussen de slappe holocene lagen en de pleistocene zanden markeert.

Met name de eerste 5 m van het profiel zijn zeer slap en in hoge mate bepalend voor vervormings- en consolidatiegedrag van de grondmechanische constructie.

Op basis van de korrelverdeling kan de sliblaag worden omschreven als 'klei, zwak tot matig siltig'. De lutumfractie bedraagt circa 40% à 50%.

De volumieke massa van het slib is $1,30 \text{ t/m}^3$, het watergehalte is ongeveer 150% ten opzichte van de totale massa. De consistentiegrenzen van het slib bevinden zich tussen een watergehalte van gemiddeld 45 massa procent (uitrolgrens) en 115 massa procent (vloeigrens). De plasticiteitsindex bedraagt 70%.

Uit in-situ uitgevoerde vinproeven volgt dat de ongedraineerde schuifsterkte op 0,5 m onder bodemniveau 1,0 kPa bedraagt. Aan de basis van de sliblaag is 3,0 kPa gemeten. Opvallend is dat de ongedraineerde schuifsterkte van het slib aan de zuidzijde van het eiland beduidend hoger is, namelijk ongeveer 5,0 kPa tot 8,0 kPa.

De conusweerstand die in de sliblaag wordt gemeten is vrijwel nihil ($0,1 \text{ N/mm}^2$).

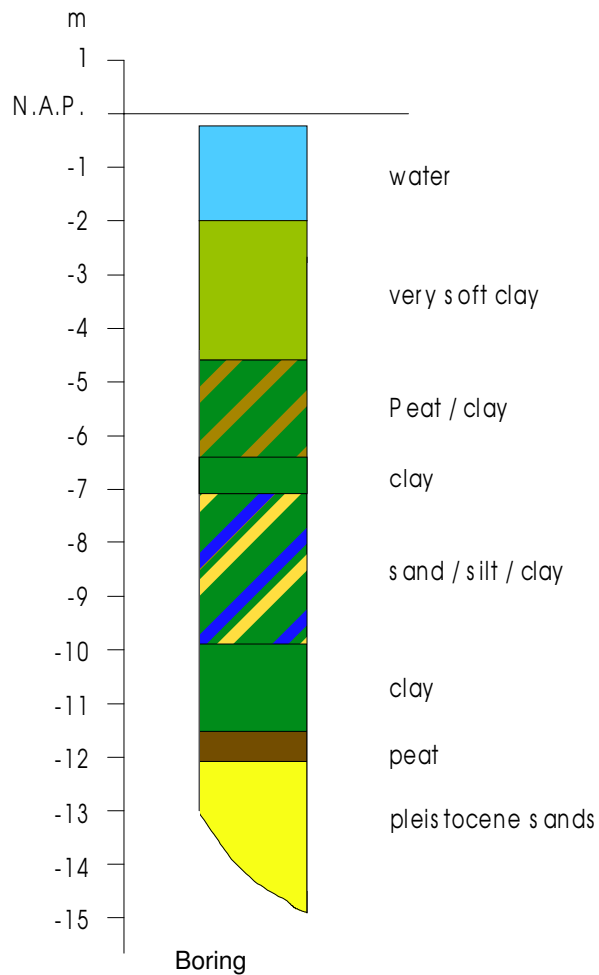
Het eiland meet 3 ha en is verdeeld in 3 proefvakken van ieder 1 ha. In 2 vakken zijn zettingversnellende maatregelen toegepast. Eén vak dient als referentie.

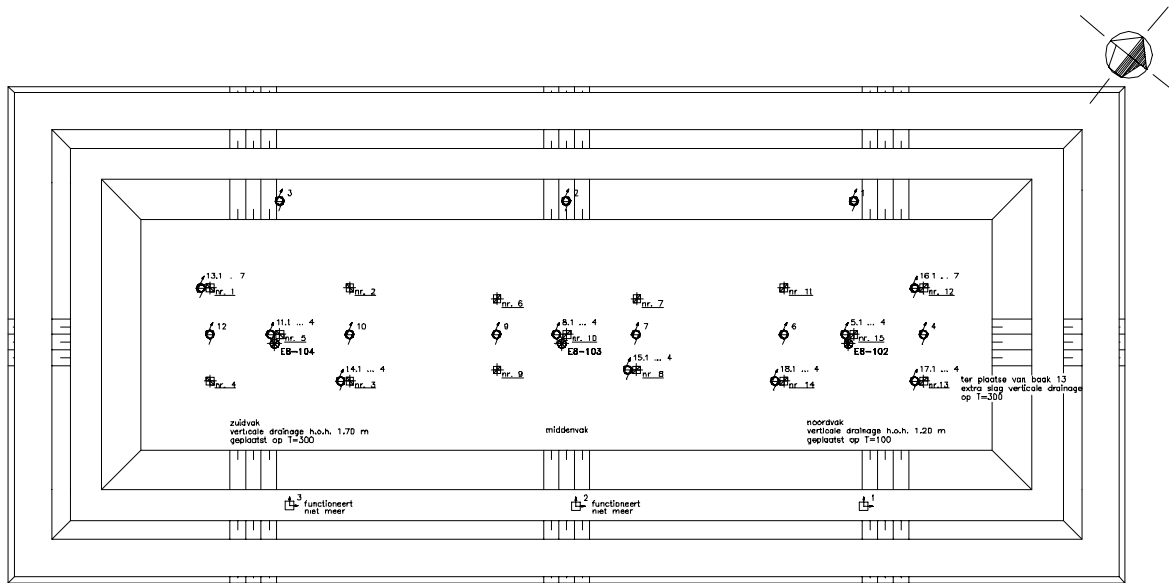
In het ophoogvak aan de noordzijde is, zodra de ophoging boven water was, verticale drainage geplaatst. De hart op hart afstand bedraagt 1,2 m. In het zuidelijke vak zijn in een later stadium (na de zesde en laatste slag) verticale drains geplaatst, echter nu met een hart op hart afstand van 1,7 m.

Aan de westzijde van het eiland is ter stabilisatie van de randen een onderwatertalud van ongeveer 1:20 aangebracht. Aan de oostzijde is over een beperkte afstand, onder water, een steunberm aangebracht. Voorafgaande aan de ophoging zijn geotextielen op de IJmeer bodem aangebracht die de door de ophoging gegenereerde horizontale spanningen opnemen.

Omdat in eerste instantie was voorzien in een dikkere zandlaag ter plaatse van het middenvak is daar een geotextiel aangebracht met een 2 x zo grote rekstijfheid als in de beide overige vakken. De totale aangebrachte zandlaagdikte in de 3 proefvakken is 5,2 m.

Soil Profile at Test Site





Inrichting van het eiland

LEGENDA:

- waterspanning opnemers, nieuw te plaatsen
- waterspanning opnemers, reeds geplaatst
- helling meetbuis
- zakbaak, sondeerlocatie
- boring, uitgevoerd voorafgaande aan de ophoging



Afrollen van een geotextielmat

De metingen richten zich op de krachtopname in het geotextiel, de ontwikkeling van de waterspanning in de samendrukbare lagen, zettingen van het maaiveld en horizontale deformaties in het holocene lagenpakket.

Rekstroken meten de krachtontwikkeling in het geotextiel. Drie matten zijn voorzien van ieder negen rekopnemers. Kabels voeren de meetwaarden naar een buiten de ophoging geplaatst meetplatform.

Met 51 waterspanningopnemers is de waterspanning gemeten. 3 Opnemers zijn voorafgaande aan het aanbrengen van het zandpakket aangebracht ter hoogte van de toekomstige taluds en dienden primair voor bewaking van de stabiliteit van de taluds. De overige opnemers zijn uit praktische overwegingen geplaatst na het boven water komen van de ophoging. Van de 51 opnemers zijn er in totaal 27 in de sliblaag geplaatst. De overige opnemers zijn aangebracht in 8 verticalen, in de veen- en kleilaag, in de zandhoudende kleilaag en in de daarop volgende

kleilaag. De zetting van het maaiveld wordt gemonitord door het periodiek waterpassen van 15 zakbaken.

Aan de oostzijde van de ophoging zijn 3 hellingmeetbuizen geplaatst, ter controle van de horizontale deformaties van het pakket slappe lagen. Het vaste punt van de hellingmeetbuis bevindt zich in het pleistocene zand, op een diepte van ongeveer NAP - 12,0 m.

Uitgangspunt bij het aanbrengen van de ophoging was om in geotechnisch opzicht tot de rand van het toelaatbare op te hogen. In principe zou niet worden afgeweken van het vooraf vastgestelde ophoogschema (een consolidatie periode van 3 à 4 weken tussen de verschillende slagen). Bovendien diende de ophoging in maximaal 6 slagen op hoogte te worden gebracht.

De eerste 3 slagen zijn onder water in dunne lagen gespreeid, ten einde een gelijkmatige belastingssituatie te verkrijgen. Op deze wijze is de opbouw van schuifspanningen voorkomen.

De volgende 3 slagen zijn boven water op een conventionele manier opgespoten.

Advies omtrent de dikte van de volgende aan te brengen slag werd gebaseerd op berekeningen met het eindige elementenprogramma PLAXIS.

Voorafgaande aan de ophoogwerkzaamheden is een model opgesteld dat aan de hand van de metingen voortdurend is gecalibreerd. De dikte van de volgende aan te brengen slag is bepaald door in het model de belasting op de ondergrond te laten toenemen. Aan de hand van de ontwikkeling van de plastische zône in de sli blaag onder het talud is de maximaal toelaatbare belasting bepaald. De ' veilig' aan te brengen belasting werd gedefinieerd als die belasting waarbij de plastische zône niet doorliep tot buiten het talud. Indien de bij deze belasting behorende zandlaagdikte niet voldeed aan het voorgestelde ophoogschema zou een langere consolidatietijd moeten worden ingelast dan wel een geringere zandlaagdikte worden aangebracht.

Omdat het uitgangspunt was om zoveel mogelijk vast te houden aan het vooraf vastgestelde ophoogschema dienden alternatieven te worden ontwikkeld. Deze zijn gevonden in het vergroten van de passieve gronddruk. Dit is gebeurd door de spuitkaden 5 m ' landinwaarts' te verschuiven, voo afgaande aan het aanbrengen van de vijfde slag en het verhogen van de steunberm aan de oostzijde van het eiland, voorafgaande aan de zesde slag. Op deze wijze kon is het oorspronkelijke ophoogschema gevolgd.

De eerste 3 slagen hadden een gemiddelde dikte van 0,6 m, terwijl de gemiddelde dikte van de 3 opgespoten lagen 1,1 m bedroeg.



aanbrengen van de verticale drainage

Ondanks deze maatregelen kon niet worden voorkomen dat tijdens het aanbrengen van de zesde slag in het middelste ophoogvak aanzienlijke verplaatsingen zijn opgetreden. Uit het ophoogschema bleek dat direct na elkaar twee zandschepen zijn gelost. Normaliter zat er een pauze van enkele uren tussen vertrek en aankomst van de zandschepen. De aangebrachte belasting veroorzaakte een dusdanig grote spanningsconcentratie dat het doek een forse rek moest vertonen ten einde de horizontale spanning te kunnen opnemen.

Aan de hand van de gemeten rek (2,0% tot 3,0% over een lengte van 45 m) in het doek is geschat dat de horizontale verplaatsing in de sliblaag circa 1,0 m heeft bedragen. Deze verplaatsing kon niet worden geverifi-



foto: scheuren in het zandpakket

eerd aan de hand van de hellingmeetbuis. Deze bleek niet bestand tegen dergelijke grote horizontale verplaatsingen.

Het opsputten van zand is na het optreden van forse horizontale verplaatsingen gestopt. Na een rustperiode van slechts één week is de rest van het zand verder gelijkmatig in den droge aangebracht. Door het gelijkmatig aanbrengen van het zand zijn spanningsconcentraties vermeden en doorgaande verplaatsingen uitgebleven.

Gedurende het aanbrengen van de tweede slag (gesproeid onder water) zijn de rekopnemers continu waargenomen, om te bepalen of de mat kracht opnam tijdens de passage van het sproeifront. De gemeten rekken waren dusdanig gering ($< 0,05\%$) dat een vertaling naar een krachtopname niet reeel is. Het geotextiel levert vrijwel geen bijdrage aan de stabiliteit van de eerste op het slib aan te brengen zandlagen. De onderwatertaluds zijn dusdanig flauw opgezet dat ook de optredende schuifspanningen nihil zijn.

De grootste krachtopname in het geotextiel is gemeten op de locatie waar de grootste spanningsverschillen optraden, aan de randen van de ophoging, onder de spuitkaden. Bij de verplaatsing van de spuitkade 5 m 'landiwaarts' werd ook op die locatie de grootste rek gemeten.

De gemeten rek onder de spuitkaden loopt uiteen van 1,7% ter plaatse van het noordelijke ophoogvak, 4,1% ter plaatse van het middenvak en 0,5% in het zuidelijke vak. Deze rekken zijn gemeten na het opwerpen van de spuitkaden ten behoeve van het aanbrengen van de zesde slag en komen overeen met een krachtopname van respectievelijk ongeveer 40, 170 en 10 kN per meter.

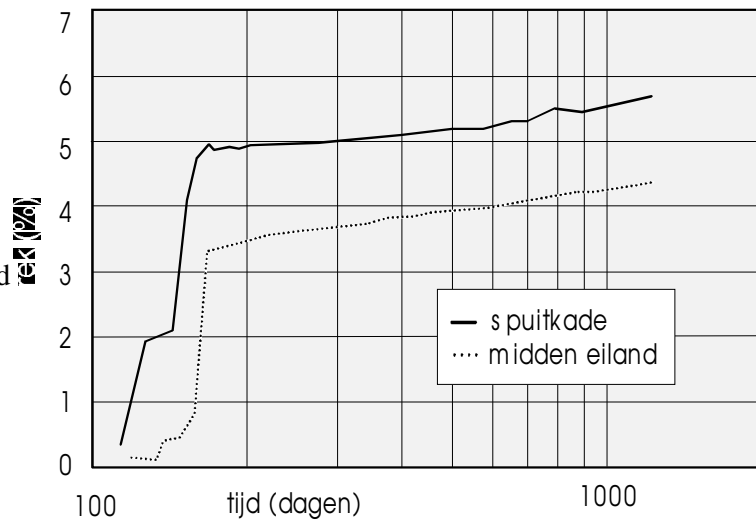
De rek van ongeveer 4,1% in het middenvak werd gemeten kort voordat de aanzienlijke verplaatsingen optraden. Na de constatering van de met de instabiliteit gepaard gaande scheurvorming en

horizontale verplaatsingen was de rek toegenomen tot de maximaal toelaatbare ontwerprek van 5,0% en werd ook ter plaatse van de overige rekopnemers in het middenvak een forse toename van de rek (en dus ook de krachtopname) gemeten, tot circa 2,0% à 3,0%. Inmiddels heeft kruip een toename van de rek onder het eiland tot 4,0% à 5,0% veroorzaakt. De maximale rek bedraagt bijna 6,0%. Het effect van de verticale drainage is duidelijk.

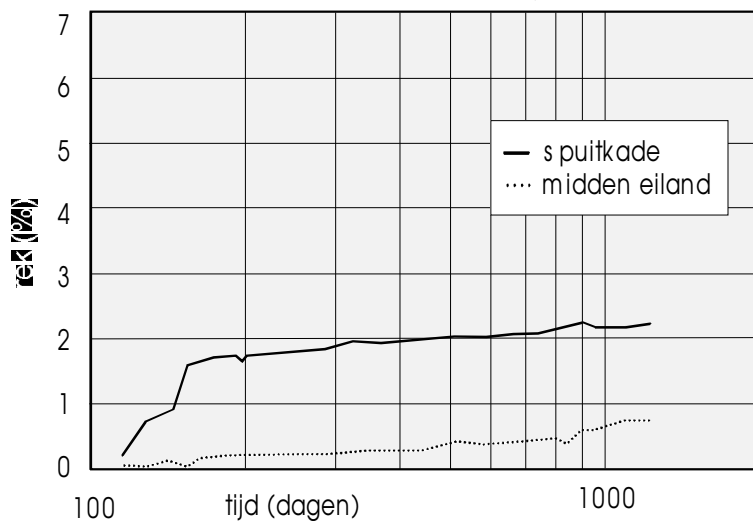
Door een snellere toename van de korrelspanning in het gedraineerde vak hoeft de geotextielmat minder spanning op te nemen. Het grootste gedeelte van de schuifspanningen wordt in het gedraineerde vak door de grond opgenomen, terwijl in het referentievak de schuifspanningen vrijwel geheel door de mat worden opgenomen.

Uit nacalculatie is gebleken dat ter plaatse van het midden vak de stabiliteitsbijdrage van het geotextiel groot is geweest. Er kan worden gesteld dat het zonder geotextiel niet mogelijk zou zijn geweest om het middenvak in het gewenste ophoogtempo op hoogte te brengen.

Proefvak zonder drains



Proefvak met drains 1,2 m

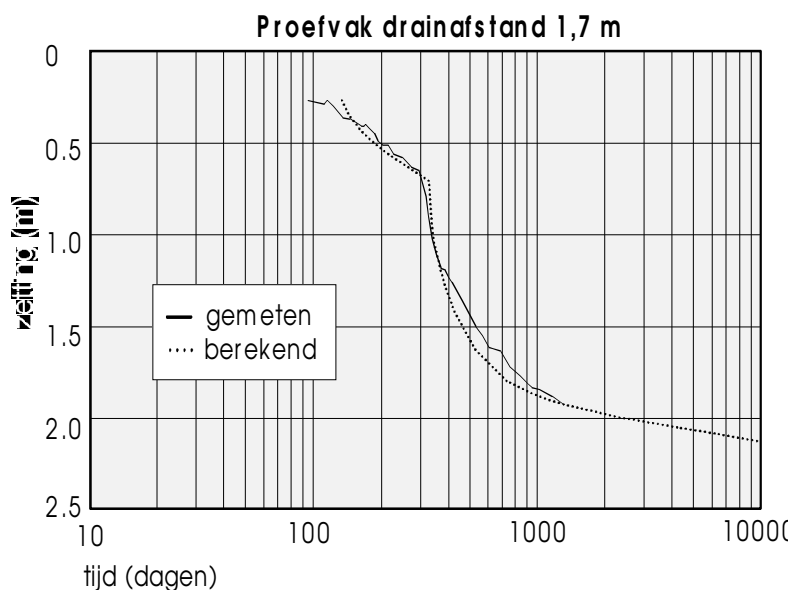
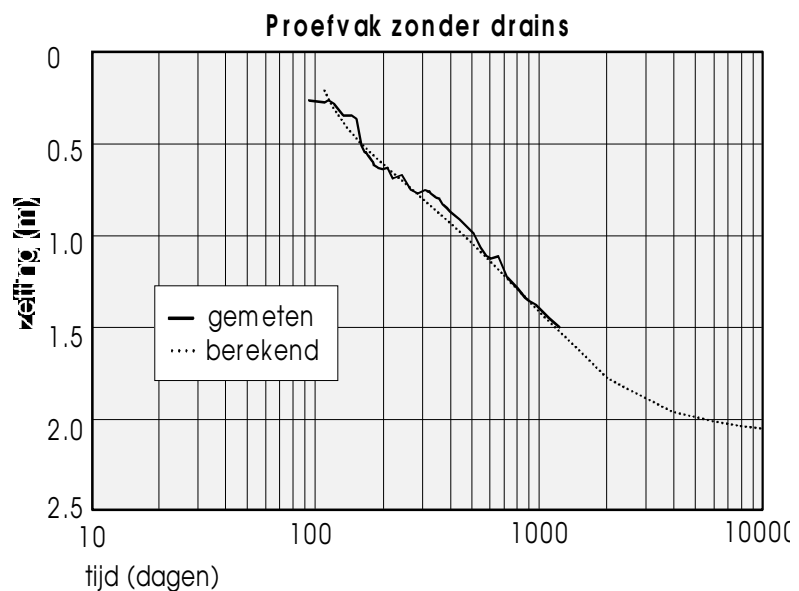


Met aanwezigheid van het geotextiel is een evenwichtsfactor van circa 0,89 berekend, op het moment dat de aanzienlijke verplaatsingen zijn opgetreden. Zonder het geotextiel resteert een evenwichtsfactor van slechts 0,52. Bij een evenwichtsfactor van 0,89 zou nog gesproken kunnen worden van een zeker evenwicht, gepaard gaande met grote verplaatsingen ten einde maximale krachtopname in het doek te kunnen mobiliseren. Een evenwichtsfactor van 0,52 duidt evenwel op totale instabiliteit. Ter plaatse van het vak voorzien van verticale drainage is een evenwichtsfactor van 1,17 berekend. Zonder geotextiel zou deze 1,06 zijn geweest.

De berekeningen zijn uitgevoerd uitgaande van een horizontaal schuifvlak op het grensvlak tussen de sliblaag en de veen- en kleilaag. De berekening betreft een evenwichtsbeschouwing waarbij passieve en actieve gronddrukken, de te mobiliseren schuifspanning over de lengte van het schuifvlak en de kracht in het geotextiel zijn betrokken.

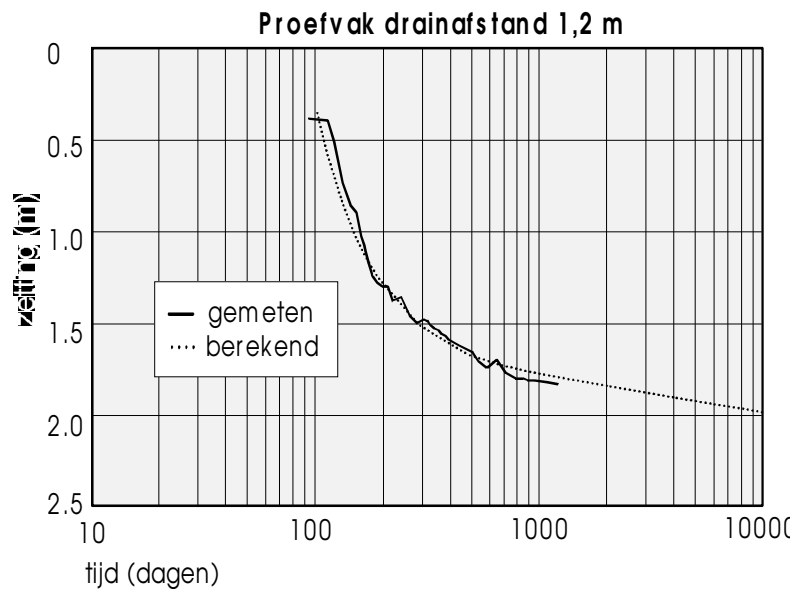
Nacalculaties op basis van een horizontaal evenwicht-beschouwing geven tevens aan dat het noordelijke en zuidelijke vak op hoogte gebracht zouden kunnen worden zonder de aanwezigheid van een geotextiel. Dit kan worden toegeschreven aan de relatief snelle toename van de korrelspanning in het noordelijke vak door de aanwezigheid van verticale drainage en door de relatief hoge ongedraineerde schuifsterkte in het zuidelijke vak.

Tijdens de ophoogwerkzaamheden is geconstateerd dat vrijwel de gehele belasting van de aangebrachte zandlaag direct werd omgezet in waterspanning. Ook gedurende de consolidatieperiodes is geen veelbetekenende afname van de waterspanningen gemeten. Dit met uitzondering van het ophoogvak waar verticale drains zijn geplaatst. In dit vak bedraagt de aanpassing - 550 dagen na aanvang van de ophoging - van de wateroverspanning in de sliblaag circa 90% terwijl dit percentage in de daaronder gelegen holocene lagen al na 200 dagen was bereikt.



In het middenvak, dat als referentie dienst doet, bedraagt de aanpassing in de sliblaag 40% en in de overige holocene lagen 50% op 1200 dagen na aanvang van de werkzaamheden.

In het zuidelijke vak zijn gedurende de eerste 300 dagen dezelfde waarden als in het referentievak gemeten. Circa 300 dagen na start ophoging is ook in dit vak verticale drainage aangebracht, hetgeen resulteerde in een snelle toename van de



aanpassing in de holocene lagen tot circa 90% ongeveer 250 dagen later. De consolidatie van de sliblaag verloopt aanmerkelijk langzamer dan in het noordelijke vak. Dit kan worden toegeschreven aan de grotere drainafstand.

In het middenvak verloopt de consolidatie langzamer dan op grond van berekeningen werd verwacht. De zeer lage doorlatendheid van de slappe kleilaag belemmert de consolidatie van de meer doorlatende overige holocene lagen en is zodoende bepalend voor de consolidatiesnelheid van het gehele profiel.

Uit het verloop van de waterspanning kan de periode worden afgeleid waarin volgens Terzaghi volledige consolidatie wordt bereikt. Zo is voor de sliblaag een consolidatieperiode van 800 dagen bepaald, althans bij toepassing van verticale drainage.

Voor de overige holocene lagen is, onder dezelfde voorwaarden een consolidatieperiode van 200 dagen bepaald.

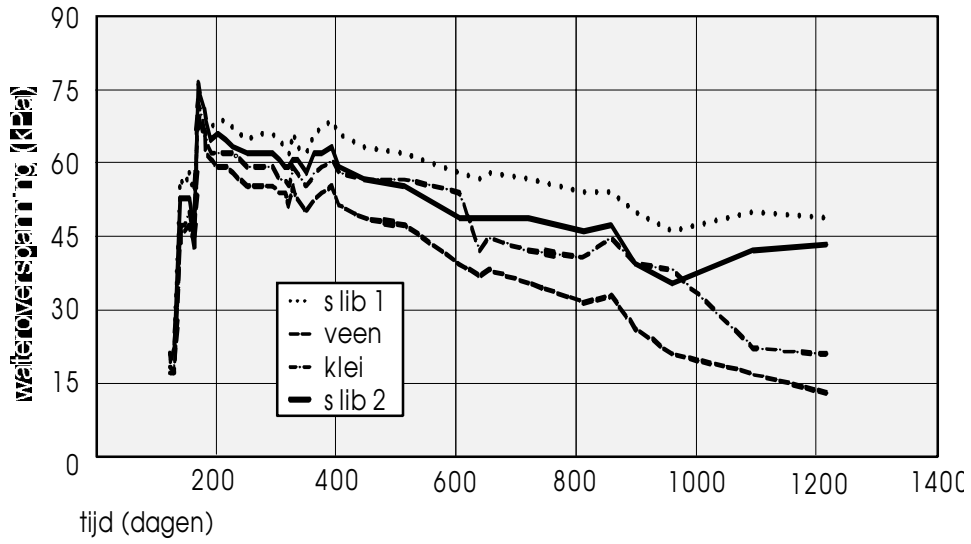
De consolidatieperiode in het middenvak is bepaald op grofweg 8 000 dagen, voor het hele profiel. Uit een vergelijking tussen de consolidatieperioden van het referentievak en de gedraineerde vakken blijkt dat verticale drainage uiterst effectief is. Verticale drainage verkort de hydrodynamische periode met grofweg een factor 10.

Voorafgaande aan de ophoogwerkzaamheden zijn zettingsberekeningen uitgevoerd. De berekende zettingen bedroegen ongeveer 2,30 m, uitgaande van een zandlaagdikte van 5,2 m.

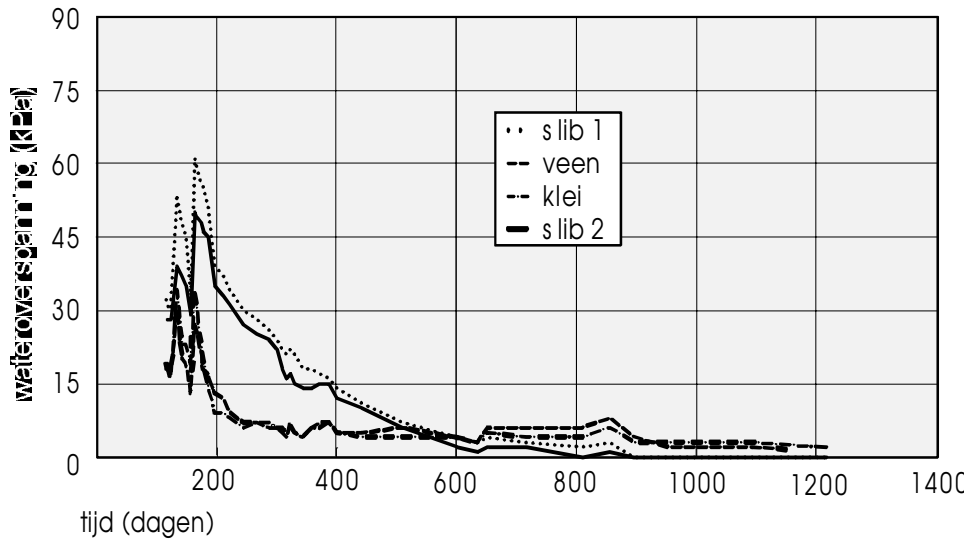
De zettingen zijn met een interval van ongeveer 1 à 2 weken gemeten. Gedurende de zettingsperiode is de meetfrequentie geleidelijk verlaagd tot de huidige frequentie van eens per 4 maanden.

De metingen zijn gebruikt om een predictie van de eindzetting te geven en om de grondparameters te kalibreren. De eindzetting is voorspeld met behulp van de methode Asaoka, de gecombineerde methode Asaoka en Matsuo en de hyperboole methode die is gebaseerd op de theorie volgens Terzaghi. Ook is geprobeerd om door variatie van de samendrukkingsconstanten en consolidatiecoëfficiënten van de grondlagen de theoretische zettingscurve de gemeten zettingscurve zo goed mogelijk te laten volgen. Dit wordt curve-fitting genoemd.

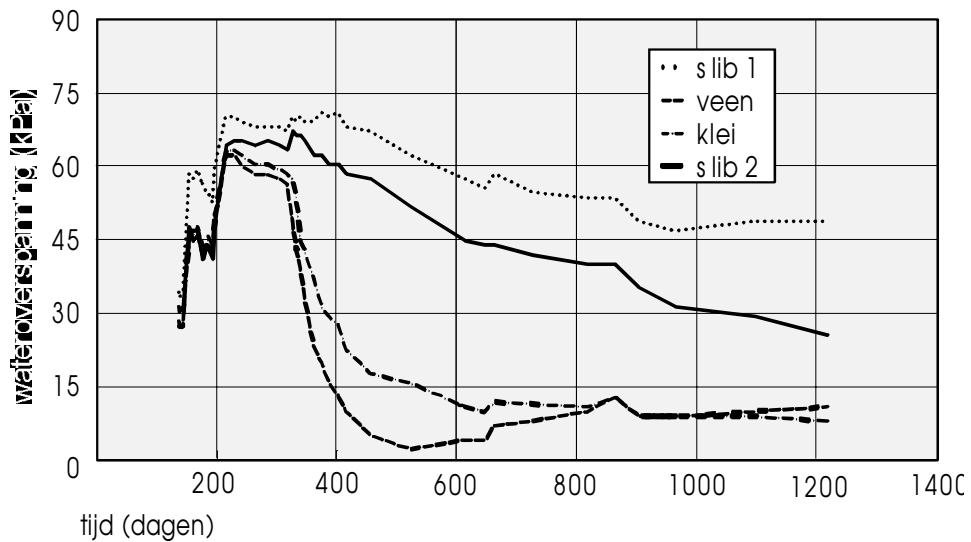
Wateroverspanning in proefvak zonder drains



Wateroverspanning in proefvak met 1,2 m drainafstand



Wateroverspanning in proefvak met 1,7 m drainafstand



De methode Asaoka is een simpele manier, die internationaal vaak wordt toegepast, om zowel primaire als secundaire zetting te bepalen. Asaoka neemt aan dat de toename van de zetting, gemeten over gelijke tijdsperioden, na verloop van tijd afneemt tot vrijwel nul. Wanneer nu een grafiek wordt getekend met op de x-as de hoeveelheid zetting opgetreden op tijdstip t_1 en op de y-as de hoeveelheid zetting op tijdstip t , dan is theoretisch de primaire eindzetting bereikt op het moment dat de zetting optredende in tijdstip t gelijk is aan die op tijdstip t_1 . Deze methode is grafisch makkelijk uit te voeren.

De gecombineerde methode van Asaoka en Matsuo gaat uit van het verloop van de primaire zetting volgens een S-curve verloopt. Bij de methode wordt een S-curve berekend die zo goed mogelijk de gemeten curve benadert. Door extrapolatie van de berekende curve kan de primaire eindzetting worden bepaald.

De hyperboolmethode maakt gebruik van de theorie van Terzaghi. Als de verhouding van de tijd-factor en de consolidatiegraad wordt uitgezet tegen de tijd-factor dan ontstaat een hyperbool. Het gedeelte van de hyperbool tussen de punten met een consolidatiegraad van 60% en 90% (tijd-factor 0,250 en 0,848) is vrijwel lineair.

De helling van het lineaire gedeelte van deze hyperbool wordt bepaald door de volgende parameters:

- de drainafstand verhouding ($n = \text{draindiameter/horizontaal drainpad}$)
- de drainpad verhouding ($H/D = \text{verticaal drainpad/horizontaal drainpad}$)
- de consolidatieverhouding ($C_h/C_v = \text{hor. consolidatiecoëfficiënt/ver. consolidatiecoëfficiënt}$)

Voor een groot aantal parametercombinaties is de theoretische helling van het lineaire gedeelte van de hyperbool bepaald.

Bij toepassing op praktijkgegevens worden in de grafiek in plaats van de tijd-factor en de consolidatiegraad de verhouding tussen de tijd en de zetting en de tijd weergegeven. De primaire zetting is de verhouding tussen de theoretische helling en de gemeten helling S_i van de veldgegevens.

De gecombineerde methode van Asaoka en Matsuo bleek zeer gevoelig voor kleine veranderingen in de invoer. Deze methode wordt daarom minder geschikt geacht voor zettingvoorspelling.

De hyperbool methode heeft als nadeel dat alleen de primaire zetting wordt voorspeld. Dit maakt de methode voor de Nederlandse bodem, met een groot aandeel secundaire zetting minder geschikt. De methode die Asaoka volgt is beter geschikt, omdat hiermee zowel primaire als secundaire zetting kan worden bepaald. Voorwaarde is wel dat de zetting al in een vrij ver gevorderd stadium is.

Omdat de zetting in het vak waar de verticale drains zijn geplaatst zich al op de secundaire tak bevindt worden inmiddels de beste voorspellingen verkregen met behulp van curve-fitting. De verwachte zetting bedraagt 1,9 m à 2,0 m en is daarmee circa 0,3 m à 0,4 m minder dan in eerste instantie werd verwacht. De zettingsvermindering is toe te schrijven aan:

- een stijver gedrag van de sliblaag en het optreden van aanmerkelijk minder secundaire zetting in de sliblaag;

- het achterwege blijven van de zetting van de diepe pleistocene kleilagen, die in eerste instantie wel bij de zettingen was betrokken.

Curve-fitting geeft bovendien aanleiding tot het volgen van een andere methode voor het bepalen van de consolidatiecurve. Het verloop van de zetting in de tijd dient te worden gesplitst in een consolidatiecurve voor de sliblaag en een curve voor de overige holocene lagen. Volgens het superpositiebeginsel worden de beide curves opgeteld. Er moet volgens het superpositiebeginsel worden gewerkt omdat de consolidatiesnelheid van beide bodemlagen grofweg een factor 10 verschilt. Het uitvoeren van de berekeningen met een gemiddelde consolidatiecoëfficiënt geeft een tijd-zettingscurve die met name tussen 400 en 800 dagen na aanvang van de werkzaamheden afwijkt van de gemeten curve. Het superpositiebeginsel is alleen van toepassing bij gebruik van verticale drainage.

Inmiddels (februari 1998) zijn de zettingen toegenomen tot gemiddeld 1,85 m in de beide gedraineerde vakken en 1,40 m in het vak zonder verticale drainage.

De proef wordt voortgezet zolang als de meetapparatuur functioneert. Circa 1200 dagen na de start van de werkzaamheden is de uitval van meetinstrumenten beperkt gebleven tot vier waterspanningsopnemers, één rekopnemer en de drie hellingmeetbuizen. Uitval van de hellingmeetbuizen is te wijten aan horizontale grondverplaatsingen die zo groot zijn dat de meetbuis deze niet meer kon volgen.

Tot dusver heeft de proef belangrijke resultaten opgeleverd. Zo is duidelijk geworden dat verticale drainage goed functioneert, een belangrijke versnelling van de zetting oplevert en bovendien een aanmerkelijke stabiliteitsverhogende werking heeft. De consolidatiecurve verloopt redelijk volgens de prognose. Bij de prognose van het verloop van de zetting in de tijd dient de consolidatie van het slib en de overige holocene lagen separaat worden beschouwd.

Geotextielen zijn in principe niet nodig mits de korrelspanning in het slappe lagen voldoende snel kan toenemen. Dit betekent dat verticale drainage in het slappe holocene pakket moet worden toegepast. Bovendien dient tijdens de ophoogwerkzaamheden het zandpakket zo gelijkmatig mogelijk te worden aangebracht en moeten spanningsconcentraties (steile spuitkaden) worden vermeden.

Uit de proef is verder gebleken dat geotextielen grote krachten kunnen opnemen en een belangrijke bijdrage leveren aan de stabiliteit in het geval dat verticale drainage niet wordt toegepast.

De eindzetting zal niet veelbetekenend afwijken van de berekende eindzetting. De huidige meetresultaten wijzen op een eindzetting die circa 10% à 20% minder is dan de berekende zetting.

Op basis van de meetresultaten tot dusver kan de proef als geslaagd worden beschouwd. De financiële en technische risico's voor de definitieve landaanwinning worden hierdoor verkleind. Hierbij heeft het proefiland IJburg zijn nut bewezen.

ir. E.P.T. Smits is projectleider bij de Onderzoeksdienst voor Milieu en Grondmechanica Amsterdam (OMEGAM)