

Ondiepe funderingen op slappe kleien.

door Prof. ir Jan Maertens, Jan Maertens BVBA en KU Leuven.

1. Probleemstelling.

Vroeger heeft men er altijd naar gestreefd om zo weinig mogelijk gebouwen op te richten in gebieden waar de bovenlagen uit slappe klei bestaan. Een voorbeeld daarvan is de kustvlakte waar nagenoeg alle dorpen zich op zandruggen bevinden. Wanneer er toch gebouwen werden opgericht in gebieden waar de bovenlagen uit slappe klei bestaan, werd ervoor gezorgd dat de aan de grond over te dragen belasting zo gelijkmatig mogelijk verdeeld was. Op deze wijze konden de te verwachten differentiële zettingen zoveel mogelijk beperkt worden.

Doordat de gebieden met gunstige funderingsomstandigheden (= waar de bovenlagen uit zand bestaan) meer en meer volgebouwd raken moet er nu alsmaar meer gebouwd worden in gebieden waar de bovenlagen uit slappe klei bestaan.

Bij het oprichten van zware constructies in gebieden waar de bovenlagen uit slappe klei bestaan, wordt in het algemeen een fundering op palen voorzien. Voor lichte en middelzware constructies is dat lang niet altijd het geval. In heel wat gevallen wordt voor dergelijke constructies een ondiepe fundering toegepast. Doordat de draagkracht van slappe kleien beperkt is en de samendrukbaarheid ervan groot, moet er in dergelijke gevallen zeer omzichtig worden tewerk gegaan.

Bedrijfsvloeren vormen een geval apart. In de meeste gevallen worden er geen speciale maatregelen getroffen wanneer bedrijfsvloeren worden aangelegd in gebieden waar de ondergrond uit slappe klei bestaat. Het is dan ook niet verwonderlijk dat er zich in dergelijke gevallen regelmatig problemen voordoen.

2. Funderingen op staal of strookfunderingen.

Voor lichte constructies kan een klassieke fundering op staal altijd in overweging worden genomen. Zoals voor iedere fundering dienen dan zowel het evenwichtsdragvermogen als het vormveranderingsdragvermogen te worden gecontroleerd.

- Evenwichtsdraagvermogen:

Bij de keuze van de in rekening te brengen schuifweerstandkarakteristieken moet rekening worden gehouden met de snelheid waarmee de belasting wordt aangebracht, d.w.z.:

- ° niet gedraineerde schuifweerstandkarakteristieken moeten worden toegepast wanneer de belasting zeer snel wordt aangebracht;
- ° gedraineerde schuifweerstandkarakteristieken mogen alleen maar in rekening worden gebracht wanneer de belasting zeer traag wordt aangebracht;
- ° meestal worden schuifweerstandkarakteristieken in rekening gebracht die rekening houden met partiële drainering.

In de meeste gevallen is het evenwichtsdraagvermogen niet bepalend voor de dimensionering van de fundering.

- Vormveranderingdraagvermogen:

In het algemeen zal de aan de klei overgedragen belasting moeten beperkt worden zodat de te verwachten zettingen kleiner zijn dan de normaal toegelaten waarde. Bij stookfunderingen wordt voor de toegelaten zetting meestal de waarde 2,5cm aangehouden.

Het berekenen van de te verwachten zettingen is geen eenvoudig probleem. Meer informatie daaromtrent is opgenomen als bijlage.

Omdat het al of niet ontstaan van schade niet bepaald wordt door de absolute waarde van de zettingen maar door de zettingverschillen (= differentiële zettingen) moet men er bij funderingen aangezet op slappe kleien altijd naar streven dat de op de klei aangrijpende spanningen zo gelijkmatig mogelijk verdeeld zijn.

- Nodige voorzorgen:

Bij funderingen die op slappe kleilagen worden aangezet is het van belang dat alle funderingen op dezelfde diepte worden aangezet. Belangrijke verschillen in het aanzetpeil van de fundering zullen immers altijd aanleiding geven tot verschillende zettingen. Indien om één of andere reden toch verschillende aanzetpeilen moeten worden aangehouden is het aangewezen om een zettingsvoeg te voorzien tussen de delen die op verschillende dieptes gefundeerd zijn.

Bij de berekening van de te verwachten zettingen dient niet alleen rekening te worden gehouden met de belastingen afkomstig van de constructie zelf, maar eveneens met mogelijke externe invloeden zoals:

- ° schommelingen en/of verlagingen van het grondwaterpeil;
- ° nevenbelastingen.

I.v.m. de wijze waarop deze invloeden moeten in rekening gebracht worden bestaan er evenwel geen algemeen aanvaarde regels.

- Mogelijke maatregelen:

Indien de te verwachten zettingen groter zijn dan de normaal toegelaten waarde zijn volgende maatregelen mogelijk:

- ° grondverbetering door middel van grindkernen of kalk/cementkolommen;

Door het aanbrengen van grindkernen of kalk/cement kolommen kunnen de te verwachten zettingen van de funderingen in een belangrijke mate beperkt worden. Bij het aanbrengen van grindkernen moet er wel op gelet worden of er geen veen of sterk veenhoudende lagen voorkomen in de ondergrond. Over de hoogte van deze veen of sterk veenhoudende lagen moeten de grindkernen worden uitgevoerd met beton i.p.v. grind, zodat ze ten allen tijde hun draagvermogen behouden.

- ° algemene funderingsplaat, cfr. par. 3.
- ° paalfundering.

3. Algemene funderingsplaat.

Een fundering op een algemene funderingsplaat heeft als groot voordeel dat de belasting over de volledige oppervlakte van de plaat verdeeld wordt. Het evenwichtsdragvermogen is daardoor in het algemeen zeer groot en niet bepalend.

De op de klei uitgeoefende spanning moet in die mate beperkt worden dat de te verwachten zettingen kleiner zijn dan de normaal toegelaten waarde. Bij algemene funderingsplaten wordt voor de toegelaten zetting meestal 5,0cm aangehouden.

Indien nodig kunnen de te verwachten zettingen beperkt worden door een gedeelte van de aanwezige grond af te graven en te vervangen door een kelderconstructie. Op deze wijze wordt dan

de spanningstoename op de ondergelegen grond beperkt. De te verwachten zettingen worden minimaal wanneer het gewicht van de weggegraven grond gelijk is aan het gewicht van de op te richten constructie. Men spreekt dan van compenserende funderingen (= compensated foundations).

Ook bij algemene funderingsplaten moet ervoor gezorgd worden dat de aan de klei overgedragen belastingen zo gelijkmatig mogelijk verdeeld zijn. Doordat de stijfheid van een algemene funderingsplaat altijd relatief beperkt is, kunnen er zich gemakkelijk ongelijkmatige zettingen voordoen. Herverdeling van de belastingen is immers slechts in een beperkte mate mogelijk.

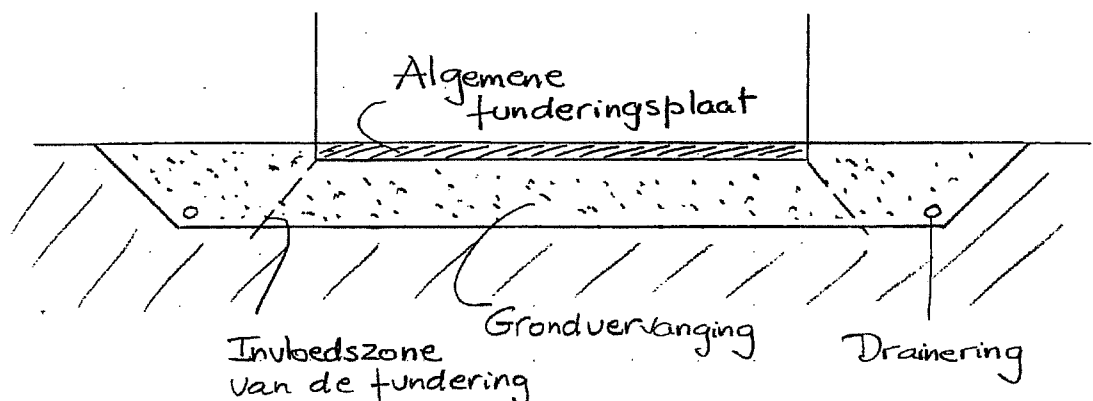
- Mogelijke maatregelen:

Indien de te verwachten zettingen groter zijn dan de normaal toegelaten waarde is het uiteraard mogelijk om een kelderconstructie te voorzien zoals hierboven is aangegeven. Verder zijn volgende maatregelen nog mogelijk:

- ° grondvervanging tot op een zekere diepte;

De aanwezige slappe lagen worden dan tot op een zekere diepte afgegraven en vervangen door goed verdicht zand. Doordat de samendrukking van de bovenste lagen altijd een belangrijke bijdrage levert tot de zettingen kan er op deze wijze een aanzienlijke vermindering van de te verwachten zettingen verkregen worden.

Het is dan wel aangewezen om de grondvervanging uit te voeren tot op een voldoende afstand buiten de rand van de op te richten constructie en om buiten de invloedszone van de funderingen een drainering aan te brengen, cfr. fig. 1. Op deze wijze wordt voorkomen dat er in het aangevuld zand een zeer hoge grondwaterstand kan ontstaan.



Figuur 1

- ° grondverbetering of kalk/cementkolommen, cfr. par. 2;
- ° voorbelasting van de grond al dan niet in combinatie met versnelde consolidatie;

Door de grond waarop de algemene funderingsplaat wordt aangelegd voor te belasten kunnen de zettingen die bij de aanleg van een algemene funderingsplaat te verwachten zijn in een belangrijke mate beperkt worden. De zettingen stemmen dan immers overeen met deze van een herbelasting. Voor het aanbrengen van de voorbelasting wordt in het algemeen grond gebruikt maar het is niet uitgesloten om daarvoor water of containers gevuld met zand of stenen te gebruiken.

Bij het aanbrengen van een voorbelasting is het van groot belang dat de belasting voldoende lang wordt aangehouden zodat de zettingen volledig kunnen plaatsvinden. Wanneer de slappe lagen een aanzienlijke dikte hebben is het aangewezen om versnelde consolidatie toe te passen ten einde de zettingen voldoende snel te laten plaatsvinden door het aanbrengen van de verticale drains. Via deze verticale drains kan het poriënwater dat bij de zetting t.g.v het aanbrengen van de aanvulling wordt uitgeperst veel sneller afstromen omdat de afstand waarover het poriënwater moet afstromen veel kleiner is en omdat de afstroming volgens de horizontale richting in het algemeen veel sneller verloopt dan volgens de verticale richting. Wegens de gelaagdheid van de grond is de horizontale doorlatendheid immers in het algemeen groter dan de verticale doorlatendheid.

- ° paalfundering.
- Nodige voorzorgen:

Zoals bij strookfunderingen is het van belang dat alle funderingen op dezelfde diepte worden aangezet. Indien dit om één of andere reden niet mogelijk is, is het aangewezen om een zettingsvoeg te voorzien tussen delen die op een verschillende diepte zijn aangezet.

Ook bij algemene funderingsplaten dient bij de berekening van de te verwachten zettingen rekening te worden gehouden met mogelijke externe invloeden zoals:

- ° schommelingen van het grondwaterpeil;
- ° nevenbelastingen (= aanvullingen naast de constructie).

4. Bedrijfsvloeren.

Bedrijfsvloeren worden meestal op volle grond aangelegd en vormen aldus een speciale vorm van ondiepe funderingen. Bij bedrijfsvloeren die bovenop slappe kleilagen worden aangebracht doen er zich nogal eens problemen voor doordat er ontoelaatbare zettingen en vooral zettingverschillen ontstaan. Dit is onder meer het geval wanneer:

- bedrijfsvloeren worden aangelegd op een ondergrond die nog niet volledig geconsolideerd is;
- de ondergrond heterogeen is;
- ongelijkmatige belastingen worden uitgeoefend.

a) Niet volledig geconsolideerde ondergrond:

Het komt regelmatig voor dat bedrijfsvloeren worden aangelegd op een ondergrond die nog niet volledig geconsolideerd is. Dit is vooral het geval wanneer er belangrijke ophogingen werden aangebracht om het terrein bouwrijp te maken (bvb. havengebieden, industriezones in laaggelegen gebieden) en de bedrijfsvloeren relatief snel na het aanbrengen van de ophoging wordt aangelegd.

Wanneer de consolidatie van de slappe kleilagen ingevolge het aanbrengen van de ophoging nog niet volledig beëindigd is op het ogenblik dat de bedrijfsvloer wordt aangelegd, dan zal deze de verdere zetting van de aanvulling volgen, ook wanneer op de bedrijfsvloer geen belasting wordt uitgeoefend. Bij gebouwen waarbij voor de structuur op palen gefundeerd is, kunnen er aldus belangrijke differentiële zettingen ontstaan, nog voor de bedrijfsvloer echt belast wordt.

In dergelijke gevallen is het aangewezen om de consolidatie van de slappe kleilagen te versnellen en/of onder de bedrijfsvloer een grondverbetering te voorzien.

Het versnellen van de consolidatie is mogelijk door het aanbrengen van verticale drains (= kunststofdrains of zandpalen). Wanneer verticale drains worden aangebracht is het wel nodig dat de volledige te realiseren aanvulling onmiddellijk na de plaatsing van de verticale drains wordt aangebracht. Daarbovenop wordt best een overhoogte aangebracht zodat de zettingen t.g.v. de later te verwachten vloerbelasting ook kunnen plaatsvinden.

b) Heterogene ondergrond:

Wanneer een bedrijfsvloer wordt aangelegd op een heterogene ondergrond zullen er zich differentiële zettingen voordoen, ook wanneer er op de bedrijfsvloer een gelijkmatig verdeelde belasting wordt aangebracht.

c) Ongelijkmatige belastingen:

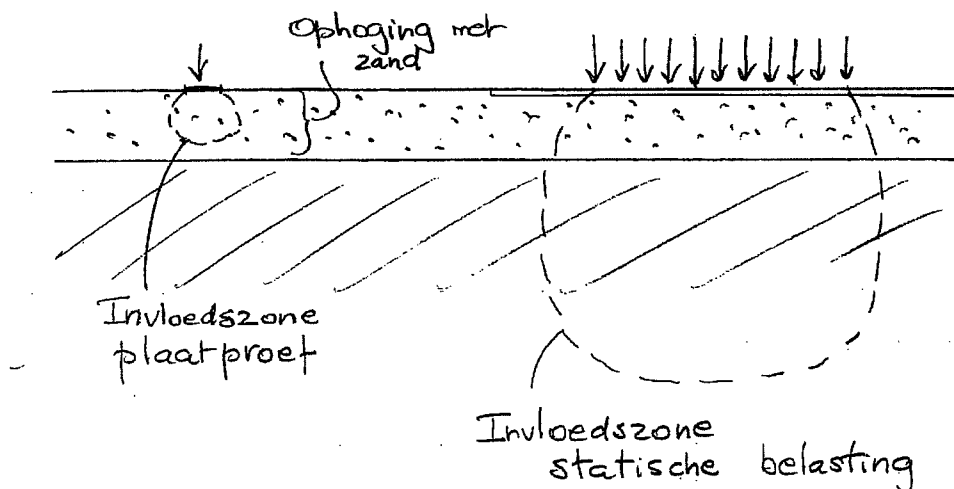
Wanneer op een bedrijfsvloer, aangelegd bovenop sterk samendrukbare kleilagen, een ongelijkmatige belasting wordt aangebracht, dan zullen er als gevolg daarvan ongelijkmatige zettingen ontstaan.

Om te kunnen nagaan welke risico's men loopt wanneer een bedrijfsvloer wordt aangelegd bovenop een slappe kleilaag is het van groot belang dat geweten is of:

- deze kleilaag reeds volledig geconsolideerd is onder de reeds eerder opgebrachte belastingen, bvb. ophogingen voor het bouwrijp maken van het terrein;
- deze kleilaag als homogeen kan worden aanzien;
- er op de bedrijfsvloer gelijkmatige dan wel ongelijkmatige belastingen zullen worden aangebracht.

Opmerking:

Voor de dimensionering van een bedrijfsvloer baseert men zich dikwijls op de resultaten van plaatproeven, bvb. plaatproeven uitgevoerd met de plaat van Westergaard. Men dient er evenwel terdege rekening mee te houden dat wanneer bovenop de slappe kleilagen een zandlaag werd aangebracht voor het bouwrijp maken van het terrein, de resultaten van de aldus uitgevoerde plaatproeven alleen maar kunnen worden aangewend voor het dimensioneren van een bedrijfsvloer waarop mobiele belastingen aangrijpen. De invloedsdiepte van de plaatproef is immers te beperkt, cfr. fig. 2. Voor het voorspellen van de door statische belastingen teweeggebrachte zettingen en vervormingen zijn de resultaten van plaatproeven totaal waardeloos. Informatie daaromtrent kan alleen worden verkregen door het uitvoeren van zettingsberekeningen.



Figuur 2

- Mogelijke maatregelen:

Ten einde bij bedrijfspvloeren het risico op schade zoveel mogelijk te beperken zijn volgende maatregelen mogelijk:

- ° aanbrengen van een voorbelasting, al of niet in combinatie met versnelde consolidatie;
- ° grondverbetering door middel van grindkernen of kalk/cement kolommen;
- ° paalfundering.

Het aanbrengen van een voorbelasting is een zeer geschikte methode om de zettingen van een bedrijfspvloer te beperken. Ten einde de duur van de periode tijdens dewelke de voorbelasting moet worden aangebracht zo kort mogelijk te houden, is het aangewezen om in een versnelde consolidatie d.m.v. verticale drains (= kunststofdrains of zandpalen) te voorzien. Verder is het aangewezen om een voorbelasting aan te brengen die duidelijk groter is dan de uiteindelijke aan te brengen belasting. Op deze wijze wordt voorkomen dat er nog belangrijke restzettingen ontstaan wanneer tijdens de voorbelasting geen volledige consolidatie heeft plaatsgevonden.

Onder bedrijfspvloeren wordt regelmatig een grondverbetering toegepast door middel van grindkernen. Door het aanbrengen van grindkernen wordt de stijfheid van de grond verhoogd en kunnen de te verwachten zettingen in een belangrijke mate beperkt worden. Een probleem i.v.m. het aanbrengen van grindkernen is wel dat het moet geweten zijn of er in de ondergrond veen voorkomt. Over de hoogte waar veen voorkomt kan de voor de goede werking van een grindkern nodige steundruk niet geleverd worden en moet er droge beton worden aangebracht.

Wanneer op de bedrijfspvloer zeer zware belasting en/of wanneer er slechts zeer beperkte zettingen of zettingverschillen worden toegelaten, is het bij bedrijfspvloeren aangebracht op slappe kleien meestal nodig om onder de bedrijfspvloer een paalfundering aan te brengen. Deze situatie komt de laatste jaren meer en meer voor.

5. De ultieme kick: aanleggen van een containerterminal op een slibstort.

Tijdens de afgelopen jaren werd er in de haven van Antwerpen reeds tweemaal een uitbreiding van een containerterminal aangelegd op een voormalig slibstort.

Het aanwezige slib werd daarbij tot op een zekere diepte afgegraven in stroken en bovenop het slib werd daarna een zandlaag met een dikte van 2m à 2,50m aangebracht. Bovenop dat zandpakket werd dan de uiteindelijke verharding aangebracht. Bij de maatvoering i.v.m. het aanbrengen van het zandpakket werden de nog te verwachten zettingen in rekening gebracht.

Ten einde dat ontstaan van differentiële zettingen zoveel mogelijk te beperken moet ernaar gestreefd worden dat de dikte van de opgebrachte zandlaag zo gelijkmatig mogelijk verloopt.

De opgedane ervaring geeft duidelijk aan dat een dikte van de zandlaag van 2m à 2,50m voldoende is om de vervormingen ingevolge de activiteiten op een containerterminal voldoende klein te houden.

Bijlage: Berekening van de te verwachten zetting.

Voor het berekenen van de zettingen die te verwachten zijn wanneer een belasting wordt aangebracht op een slappe kleilaag, wordt in het algemeen uitgegaan van de resultaten van diepsonderingen.

In veruit de meeste gevallen wordt daarbij gerekend met een waarde van de samendrukkingsconstante die afgeleid is met de formule

$$C = \frac{3}{2} \frac{q_c}{p_b}$$

met:

q_c = de conusweerstand

p_b = de verticale spanning (korrelspanning) op het peil waarop de conusweerstand werd opgemeten.

Vrij algemeen wordt de aldus verkregen waarde van de zettingen gedeeld door 2 om er rekening mee te houden dat de grond reeds in een zekere mate is voorbelast geworden.

I.v.m. deze berekeningsmethode kan worden gesteld dat ze gemiddeld genomen wel een vrij goede benadering zal opleveren (anders had men de methode allang niet meer toegepast), maar dat er lokaal toch wel grote verschillen kunnen worden vastgesteld tussen berekende en gemeten waarden.

Deze verschillen worden meestal veroorzaakt doordat:

- de grond reeds eerder werd belast (de gemeten zettingen zijn dan lokaal kleiner dan de berekende);
- de samenstelling van de grond niet goed werd ingeschat (bvb. veen heeft een grotere samendrukbaarheid).

In de literatuur is heel wat informatie terug te vinden i.v.m. de afleiding van de waarde van de samendrukkingsconstante uit de conusweerstand. De meeste gegevens dateren evenwel van de jaren 1960 - 1970 toen op verschillende plaatsen metingen werden uitgevoerd op een constructies en de berekende en gemeten zettingen daarna werden vergeleken. Daarbij wordt zeer dikwijls volgende meer algemene formule aangewend:

$$C = \alpha \frac{q_c}{p_b}$$

met α = een coëfficiënt die gekozen wordt rekening houdend met de grondsoort.

Een goed overzicht van de op dat vlak beschikbare informatie is opgenomen in de CUR publicatie 162 construeren met grond, waarvan hierna de tabellen A.4, A.5 en A.6 zijn overgenomen.

Tabel A.4. Coëfficiënt α voor een aantal grondsoorten volgens [A.5].

grondsoort	coëfficiënt α (-)
veen	0,75
zand	1 - 2
siltig zand	1 - 2,5
kleilig zand	3 - 6
zachte klei	3 - 8

Referentie A.5 = Bachelier, M. and L. Perez, Contribution to the study of soil compressibility by means of a cone penetrometer, Proc. 6th Int. Conf. SMFE, Montreal, 1965.

Tabel A.5. Coëfficiënt α voor een aantal grondsoorten en twee conustypen volgens [A.17] en [A.38].

conus- weerstand (MPa)	waterge- halte (%)	grondsoort	coëfficiënt α	
			mechanische mantelconus	elektrische conus
< 0,7 0,7 - 2 > 2		klei met lage plasticiteit	3 - 8 2 - 5 1 - 2,5	3,7 - 10 2,5 - 6,3 1,25 - 3,0
1,2 - 2 > 2		silt met lage plasticiteit	3 - 6 1 - 3	3,5 - 7,5 1,25 - 3,7
< 2		klei en silt met hoge plasticiteit	2 - 6	2,5 - 7,5
< 1,2		organisch silt	2 - 8	2,5 - 10
< 0,7	50 - 100 100 - 200 > 200	veen en organische klei	1,5 - 4 1 - 1,5 0,4 - 1	
2 - 3 > 3		grind	2 - 4 1,5 - 3	
< 5 > 10		zand	2 1,5	

Referentie A.17 = Gielly, J., e.a., Correlations between in situ penetrometer tests and the compressibility

characteristics of soils, Publ. Conf. In situ investigations in soils and rocks, Inst. Civ. Eng., London, 1969.

Referentie A.38 = Sanglerat, G., e.a., Le pénétrromètre statique et la compressibilité des sols, Sec. Europ. Symp. Pen. Testing, Amsterdam, 1982.

Tabel A.6. Coëfficiënt α voor diverse grondsoorten volgens [A.19]

conusweerstand (MPa)	grondsoort	coëfficiënt α elektrische conus
< 1	samenhangende grond (klei, venige klei)	4 *
> 1		2
< 2	samenhangende menggrond (zandige klei, kleilig zand)	4
> 2		2
< 5	niet- of weinig-samenhangende grond (kleilig of siltig zand of grind, zand, grind)	2,5
5-10		2
> 10		1,5
* voor zeer venige klei- of veengronden, waarin de conusweerstand bijna altijd kleiner is dan 1 MPa, geldt deze α -waarde niet; afhankelijk van het watergehalte kan α zelfs kleiner zijn dan 1		

Referentie A.19 = Grondmechanica Delft, Leidingen grondig besproken; geotechnische aspecten bij ontwerp en aanleg, 1987.

Opmerkelijk i.v.m. deze informatie is dat:

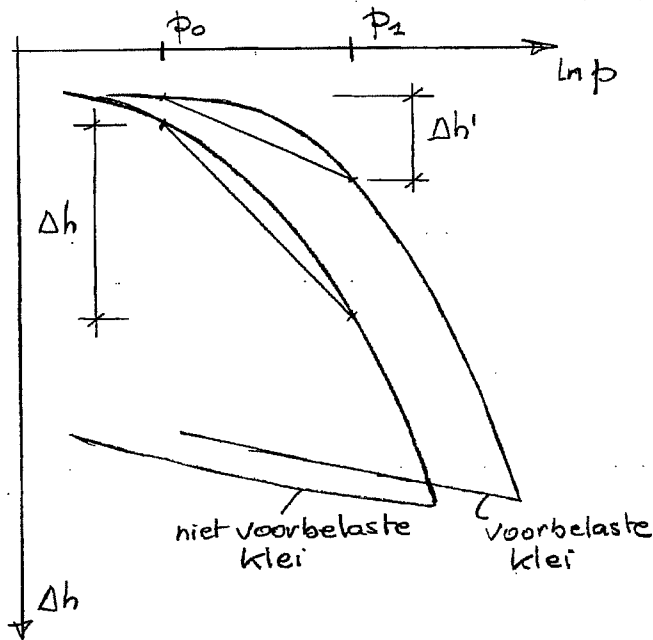
- voor veengronden de aangegeven waarde van α duidelijk kleiner is dan de in Vlaanderen normaal gebruikte waarde
- voor kleigronden de spreiding van de aangegeven waarden zeer groot is.

De grote spreiding van de voor kleigronden aangegeven waarden kan voor een groot gedeelte worden verklaard door het feit dat bij kleigronden de in rekening te brengen waarde van de samendrukkingsconstante in een belangrijke mate wordt beïnvloed door het al of niet bestaan van een voorbelasting en door de grootte van de spanningstoename.

Dat kan best worden verduidelijkt aan de hand van een samendrukkingsdiagramma, zoals afgeleid uit een oedometerproef.

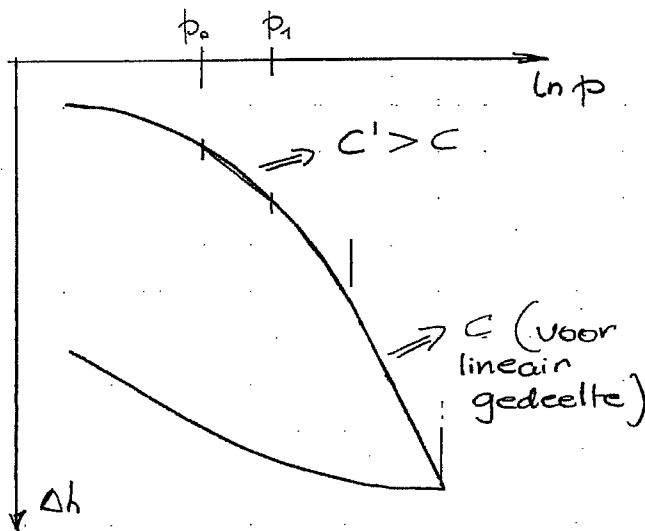
Wanneer de grond is voorbelast zal er eerst een zekere herbelasting plaatsvinden en pas daarna een maagdelijke

belasting. Als gevolg daarvan kan er een waarde van de samendrukkingsconstante worden in rekening gebracht die groter is dan die welke geldt voor een maagdelijke belasting, cfr. fig.3.



Figuur 3

Voor kleine spanningstoenames kan uit de resultaten van een oedometerproef meestal een waarde van de samendrukkingsconstante worden afgeleid welke aanzienlijk groter is dan deze overeenstemmend met het lineair gedeelte waarvoor de samendrukkingsconstante meestal wordt afgeleid, cfr. fig.4.



Figuur 4

Bij het uitvoeren van zettingsberekeningen moet men er rekening mee houden dat de samendrukkingsconstante die uit de resultaten van diepsonderingen wordt afgeleid, normaal gezien deze is die overeenstemt met het lineair gedeelte van het samendrukkingsdiagramma.

Omdat de resultaten van oedometerproeven in het algemeen een grote spreiding vertonen is het niet evident om voor gewone constructies dergelijke proeven te laten uitvoeren voor het voorspellen van de te verwachten zettingen. De kans is groot dat de onzekerheid i.v.m. de verkregen resultaten even groot blijft als voor zettingsberekeningen uitgevoerd uitgaande van de resultaten van diepsonderingen.

Bij de uitvoering van lineaire projecten (bvb. wegen, spoorwegen ---) wordt in het algemeen uitgegaan van de resultaten van samendrukkingsproeven om de te verwachten zettingen te voorspellen. Doordat er meestal een groot aantal proeven worden uitgevoerd en de spanningstoename vrij groot is, valt de overeenkomst tussen de gemeten en berekende zettingen in het algemeen nogal mee.