

# Bepaling van de componenten van de zakking na grondwaterstandsdeling

C. J. SCHOTHORST

*Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), Wageningen*

# Bepaling van de componenten van de zakking na grondwaterstands daling

C. J. SCHOTHORST

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding (ICW), Wageningen

In de veenweidegebieden doet zich algemeen het probleem voor van onvoldoende draagkracht van de grond in natte periodes. Dit vormt een belangrijke beperkende factor ten aanzien van de mechanisering en intensivering van de weidebedrijven. Verbetering in deze situatie is voor het grootste deel van het veenweidegebied slechts mogelijk via een diepere ontwatering. Hierbij wordt gedacht aan een verlaging van de gemiddelde grondwaterstand van 0,40 m tot 0,70 m en een slootpeil van 0,70 tot 1,00 m beneden maaiveld in plaats van het algemeen toegepast peil van 0,40 m. Tegenover het voordeel van diepe ontwatering, nl. een goede draagkracht, staat het gevaar van zakking. In het algemeen kan bij veengronden, ook bij reeds eeuwenlang in gebruik zijnde gronden, na verlaging van de grondwaterstand een daling van het maaiveld worden verwacht. De vraag is echter, in welke mate deze daling zich voor zal doen en uit welke componenten zij is opgebouwd. Gepoogd is in een concreet geval hierop een gefundeerd antwoord te geven.

## Gegevens uit de literatuur

Wat het onderwerp zakking in het algemeen betreft, wordt door Kroodsmā (1962) een literatuuroverzicht gegeven. Voor ontgonnen woeste veengronden worden in de Amerikaanse literatuur zakkingcijfers vermeld in de orde van 3 tot 7 cm per jaar. De zakking wordt hoofdzakelijk toegeschreven aan oxydatie van organische stof en slechts in geringe mate aan verdichting door klink en krimp (Broadbent, 1960; Stephens, 1956).

Volgens uitvoerig onderzoek in Zweden (Agerberg, 1961) varieert de zakking daar van 1 tot 3 cm per jaar.

In de Engelse literatuur is slechts een onderzoek van Darby (1940) bekend. Hij vermeldt een zakking van 4 cm per jaar in de Fens.

In tegenstelling met de zakking van kleigronden (Zuur, 1958) zijn ook in Nederland weinig exacte gegevens aanwezig wat de zakking van veengronden betreft.

Aanzienlijk meer is bekend uit de Duitse literatuur, vooral door het werk van het Moorversuchstation te Bremen. Volgens deze onderzoeken treedt zakking in de sterkste mate op in de eerste 5 jaren na ontwatering. Zij kan dan variëren van 4 cm per jaar bij een gemiddelde veendikte van 1,70 m tot 12 cm per jaar bij een dikte van 3,60 m. In de periode van 10 tot 40 jaar na ontwatering bedraagt de zakking gemiddeld 0,8 cm per jaar, ongeacht de veendikte (Eggelsman, 1960).

Algemeen blijkt de zakking af te nemen naarmate de dichtheid van het veenpakket (volume-gewicht) toeneemt. Hierop berust de formule van Halakorpi-Segeberg om de klink bij ontwateringsplannen vooruit te berekenen (Segeberg, 1960).

De hoge cijfers voor de zakking, zoals die in het voorgaande werden vermeld, hebben betrekking op ontwatering van ontgonnen woeste grond. Volgens de Duitse onderzoeken zal men dergelijke cijfers niet behoeven te verwachten bij diepere

Tabel 1 Nomenclatuur te gebruiken bij de beschrijving van verlagingen in bodempeil / *Nomenclature to be used for the description of a lowering of a soil surface*

Oorzaak verlaging bodempeil / <i>Cause of lowering of soil surface</i>	Nomenclatuur / <i>Nomenclature</i>
1. Totaal, door 1 of meer oorzaken / <i>Total, as a result of 1 or more causes</i>	zakking/ <i>subsidence</i>
2. Door eigen gewicht, ook als dit een gevolg is van grondwaterstands daling / <i>By own weight, also when this is a result of lowering the phreatic surface</i>	klink (of inklinking) / <i>settlement</i>
3. Door belasting van buitenaf (door opgebrachte grond, gebouwen, enz. / <i>By load on the surface (by fills, buildings, etc.)</i>	zetting/ <i>consolidation</i>
4. Door indroging / <i>By desiccation</i>	krimp/ <i>shrinkage</i>
5. Door oxydatie van organische stof / <i>By oxydation of organic matter</i>	zakking door oxydatie/ <i>subsidence by oxydation</i>

ontwatering van reeds eeuwen in cultuur zijnde gronden, omdat deze reeds in zekere mate zijn gezakt en verdicht, tenminste wat de bovengrond betreft.

### Doel en methode van onderzoek

Op enkele plaatsen in ons land bestaat de mogelijkheid om door vergelijkend onderzoek van in verschillende mate gezakte veenprofielen het probleem 'zakking als gevolg van grondwaterstands-daling' nader te bestuderen. Deze situatie doet zich onder andere voor in de polder Mastenbroek ten oosten van Kampen. De optredende zakking is een resultante van verschillende processen, nl.:

- *zetting*, een grondmechanisch proces waarbij verdichting in het veenpakket optreedt als gevolg van een opgebrachte bovenbelasting.
- *klink*, eveneens een grondmechanisch proces van verdichting, echter tengevolge van het eigen gewicht van het pakket, hetgeen onder andere ingeleid kan worden door verlaging van de grondwaterstand, die immers een verlaging van de opwaartse druk in het pakket betekent.
- *oxydatie* van organische stof, een biologisch proces waardoor in de bovengrond organische stof verdwijnt.
- *krimp*, een fysisch indrogingsproces dat verdichting van de bovengrond ten gevolge heeft door vochtonttrekking.

Voor een makkelijk naslaan van de hier gedefinieerde termen is tabel 1 opgenomen.

De situatie in de polder Mastenbroek maakte het door de sterke daling van het grondwater, de aanwezigheid van aaneengrenzende gezakte en niet gezakte profielen mogelijk de onderscheiden componenten van de zakking afzonderlijk te berekenen. In dit geval was geen zetting door opbrengen van grond aanwezig en zal de plaatselijke zetting door belasting van het pakket met gebouwen, etc. buiten beschouwing blijven.

Door vergelijking van sterk en weinig gezakte veenprofielen is de klink af te leiden uit de verdichting van het veen beneden het nieuwe grondwaterniveau. De formules voor zakkingsberekening van Terzaghi en Halakorpi-Segberg werden toegepast om de berekende klink te vergelijken met de uitkomsten van deze formules. De zakking door oxydatie kan berekend worden door middel van een organische stofbalans, hetgeen berust op de gedachte dat door oxydatie de hoeveelheid organische stof vermindert, terwijl de hoeveelheid minerale delen onveranderd blijft. De krimp kan tenslotte als sluitpost worden berekend uit: totale gemeten zakking min klink min zakking door oxydatie.

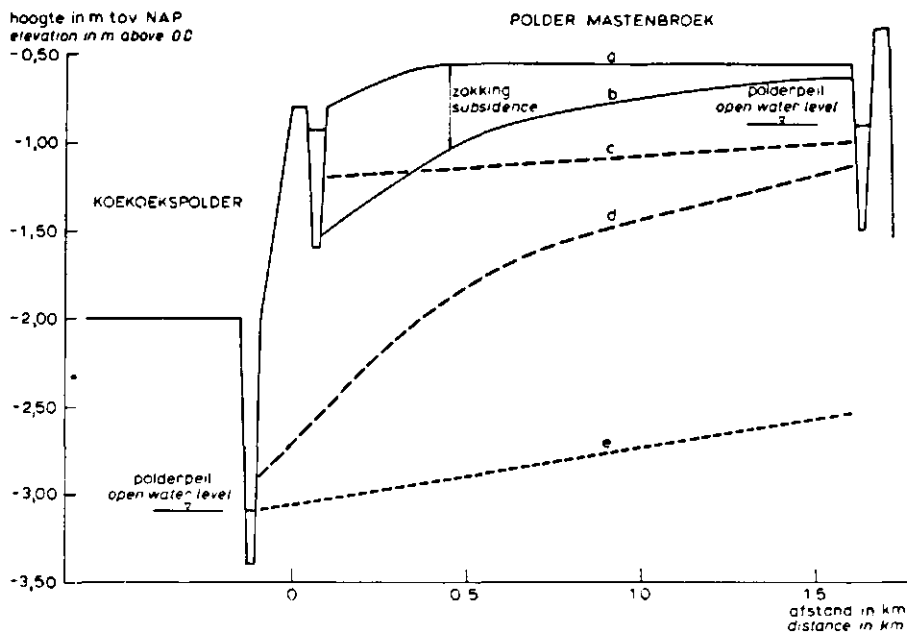


Fig. 1 De zakking in de polder Mastenbroek verloopt parallel met de grondwaterstand. Zij bedraagt ca. 0,10 m op 1500 m afstand van de Koekoekspolder en neemt toe tot 0,65 m op 100 m afstand. a = maaiveldhoogte op 3 à 4 m afstand van een sloot; b = idem op > 15 m van een sloot; c = freatisch oppervlak op 3 à 4 m afstand van een sloot; d = idem op > 15 m van een sloot; e = top zandondergrond

Fig. 1 The subsidence in the polder Mastenbroek runs parallel to the groundwater level, amounting to about 0.10 m at a distance of 1500 m and increasing to 0.65 m at a distance of 100 m from the reclaimed Koekoekspolder. a = soil surface at 3 to 4 m from a ditch; b = the same at > 15 m from a ditch; c = phreatic surface at 3 to 4 m from a ditch; d = the same at > 15 m from a ditch; e = top of sand basis



Fig. 2 De wal langs de sloot is geen dijk, maar de oorspronkelijke maaiveldhoogte. De lage ligging van het maaiveld op grotere afstand is het gevolg van zakking / The bank along the ditch is not a spoil pile, but the original height of the soil surface. The lower elevation of the surface at a larger distance is due to subsidence

**Onderzoek naar de zakking in de polder Mastenbroek**

In het jaar 1913 werd in de polder Mastenbroek ten oosten van Kampen een uitgeveend gedeelte drooggelegd en ontgonnen, de zgn. Koekoekspolder. Bij deze drooglegging werd het polderpeil in de Koekoekspolder 2,60 m verlaagd, namelijk van 0,60 m —NAP tot 3,20 m —NAP.

Het bodemprofiel van de polder Mastenbroek, gelegen naast de Koekoekspolder, bestaat uit 30 cm venige klei op zeggeveen. Op ca. 2,20 m beneden maaiveld bevindt zich de zandondergrond. In verband met de sterke doorlatendheid van deze zandondergrond en de rigoreuze peilverlaging in de Koekoekspolder treedt in sterke mate wegzijging

op van de polder Mastenbroek naar de Koekoekspolder. Hierdoor daalde de grondwaterstand in evenredigheid met de afstand tot de Koekoekspolder, evenals het maaiveld (fig. 1). Het gaat hierbij om veengrond die uitsluitend voor blijvend grasland wordt gebruikt.

Omdat in de sloten van de polder Mastenbroek het normale polderpeil bleef gehandhaafd, vond weinig of geen zakking plaats tot op ca. 3 m afstand van de sloten (fig. 2 en 3). Dit is een gevolg van infiltratie vanuit de sloten. De percelen kregen hierdoor een zeer holle ligging (pannigheid). Op 100 m afstand van de Koekoekspolder daalde het maaiveld tot circa 0,40 m beneden het polderpeil. Het verschil in maaiveldhoogte bij de sloot en in het midden van het perceel bedraagt daar ca. 0,65 m. Het verschil neemt geleidelijk af, naarmate de afstand tot de Koekoekspolder groter wordt. Op 1500 m afstand bedraagt het verschil nog ongeveer 0,10 m (fig. 1).

De beschreven situatie is uitermate geschikt om op korte afstand van elkaar, slechts een tiental meters, wel en niet gezakte veenprofielen met elkaar te vergelijken.

Een drietal plekken op 70 tot 100 m van de Koekoekspolder gelegen en een vierde plek op 1500 m afstand, werden laagsgewijs per 10 cm bemonsterd tot de zandondergrond. Hiervan werd het organische stofgehalte bepaald en het volumegewicht bepaald of afgeleid van het vochtgehalte, voor zover het monsters beneden het grondwater-niveau betrof. Het resultaat is in een zogenaamd zakkingsdiagram weergegeven, op NAP-niveau. Figuren 4 en 5 geven hiervan een voorbeeld.

Men kan verwachten dat verschil in zakking tot uiting moet komen in het gemiddeld volume-

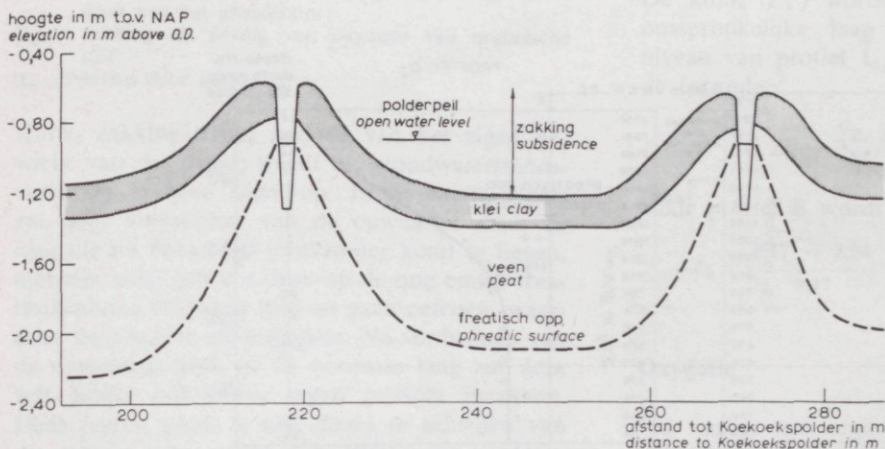


Fig. 3 Doorsnede door een perceel. Het midden is sterk gezakt als gevolg van diepe grondwaterstanden door wegzijging naar de droogmakerij Koekoekspolder. De slootkanten hebben hun oorspronkelijke hoogte behouden door infiltratie vanuit de sloot

Fig. 3 Cross section of a parcel. In the middle the soil surface has subsided as a result of a deep groundwater level due to seepage to the reclaimed Koekoekspolder. The banks along a ditch have retained the original elevation due to sub-infiltration from the ditch

gewicht ( $\bar{g}$ ), terwijl het gesommeerd volume-gewicht ( $\Sigma g$ ) van het wel en niet gezakte profiel aan elkaar gelijk zal zijn, mits geen oxydatieverlies is opgetreden.

Zakking, zowel indien deze wordt veroorzaakt door krimp als door klink, heeft verdichting tot gevolg, dus hogere volume-gewichten. Indien er sprake is van oxydatie, dan zal de totale hoeveelheid organische stof ( $\Sigma n$ ) bij het gezakte veen-

profiel lager zijn dan bij het niet gezakte profiel, waarbij de hoeveelheid minerale delen onveranderd zal zijn gebleven. De sommatie van de gewichten werd vanaf de zandondergrond berekend op een oppervlakte-eenheid van 1 cm<sup>2</sup>. Tabel 2 geeft een overzicht van de diverse gegevens.

Blijkens tabel 2 komt de zakking als gevolg van verdichting tot uiting in de verschillen in  $\bar{g}_v$  tussen beide A-, B- en C-profielen, het verschil bij

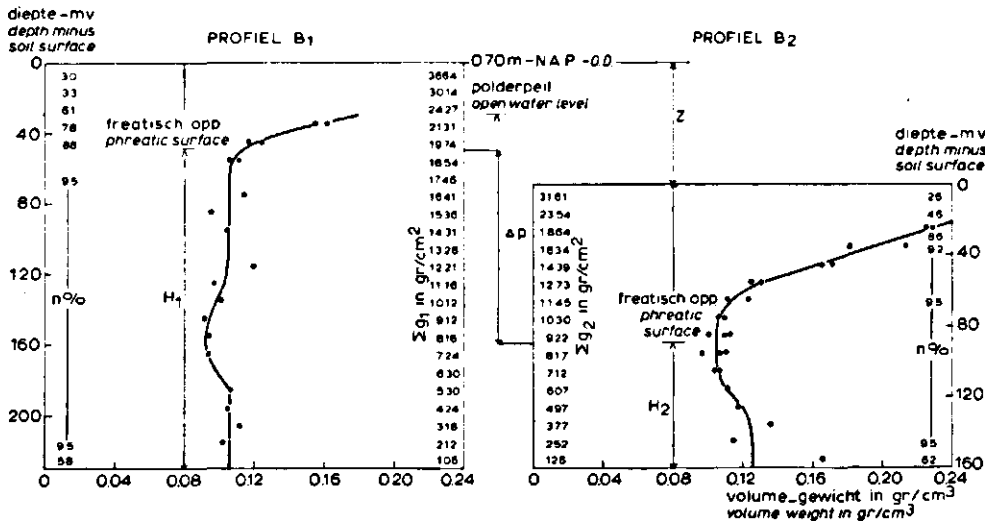


Fig. 4 Het verloop van de dichtheid, in afhankelijkheid van de diepte beneden maaiveld en het freatisch oppervlak, in het profiel B (profiel B<sub>1</sub>, niet gezakt; profiel B<sub>2</sub>, 0,70 m gezakt = Z;  $\Sigma g$  = gesommeerd volume gewicht; n% = percentage organische stof;  $\Delta p$  = daling van freatisch oppervlak);  $\Sigma g_1$  varieert van 1,06 tot 36,64 g/cm<sup>2</sup>,  $\Sigma g_2$  van 1,26 tot 31,61 g/cm<sup>2</sup>

Fig. 4 The course of bulk density, in dependence of depth below soil surface and groundwater level, in profile B (profile B<sub>1</sub>, not subsided; profile B<sub>2</sub>, 0.70 m subsidence = Z;  $\Sigma g$  = summed volume weight; n% = percentage organic matter;  $\Delta p$  = lowering of groundwater level);  $\Sigma g_1$  varies from 1.06 to 36.64 g/cm<sup>2</sup>,  $\Sigma g_2$  from 1.26 to 31.61 g/cm<sup>2</sup>

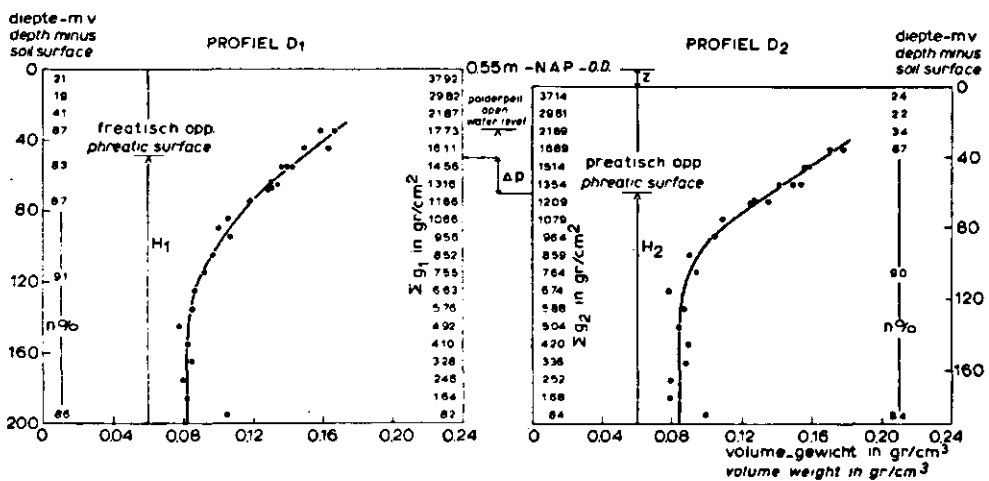


Fig. 5 Als fig. 4, voor profiel D (profiel D<sub>1</sub>, niet gezakt; profiel D<sub>2</sub>, 0,10 m gezakt);  $\Sigma g_1$  en  $\Sigma g_2$  variëren resp. van 0,82 tot 37,92 en van 0,84 tot 37,14

Fig. 5 As fig. 4, for profile D (profile D<sub>1</sub>, not subsided; profile D<sub>2</sub>, 0.10 m subsidence);  $\Sigma g_1$  and  $\Sigma g_2$  vary resp. from 0.82 to 37.92 and from 0.84 to 37.14

Tabel 2 Overzicht van gegevens van de niet gezakte profielen (index 1) en de bijbehorende gezakte profielen (index 2) / *Summary of data of non-subsided profiles (index 1) and adjacent subsided profiles (index 2)*

Profiel/ Profile	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>
a	100		70		70		1500	
Δp	1,00		1,10		1,10		0,20	
Z	0,70		0,70		0,70		0,10	
D	2,40	1,70	2,30	1,60	2,30	1,60	1,70	1,60
$\bar{g}_v$	0,103	0,117	0,106	0,133	0,098	0,117	0,105	0,106
Σn	25,06	21,89	25,25	21,86	22,94	19,44	20,42	20,07
Σm	11,21	12,21	11,34	9,78	12,85	9,29	17,35	16,88

a = afstand tot Koekoekspolder in m / distance to reclaimed Koekoekspolder in m

Δp = H<sub>1</sub> - H<sub>2</sub> = verschil in hoogte van grondwater-niveau in m / H<sub>1</sub> - H<sub>2</sub> difference in height groundwater level in m

Z = zakking, verschil in maaiveldhoogte in m (afgerond) / subsidence, difference in soil surface elevation in m

D = dikte van veenlaag inclusief kleidek van 0,20 à 0,30 m, in m / thickness of peat layer inclusive clay cover of 0.20 or 0.30 m, in m

$\bar{g}_v$  = gemiddeld volume-gewicht van de veenlaag exclusief kleidek in g/cm<sup>3</sup> / mean bulk density of the peat layer exclusive clay cover in g/cm<sup>3</sup>

Σn = gesommeerd gewicht van organische stof in g/cm<sup>2</sup> / summed weight of organic matter in g/cm<sup>2</sup>

Σm = gesommeerd gewicht van minerale delen in g/cm<sup>2</sup> / summed weight of mineral parts in g/cm<sup>2</sup>

het weinig gezakte profiel D is niet noemenswaard. Dat ook oxydatie belangrijk zou kunnen zijn, blijkt uit het verschil Σn<sub>1</sub> - Σn<sub>2</sub>.

In het volgende zal worden nagegaan in welke mate de verschillende componenten van invloed zijn geweest op de totale zakking.

### Klink

De totale zakking Z is:

$$Z = Z_k + Z_o + Z_i \quad (1)$$

waarin

Z<sub>k</sub> = klink als gevolg van verlaging van de opwaartse druk van het grondwater;

Z<sub>o</sub> = zakking als gevolg van oxydatie van organische stof;

Z<sub>i</sub> = krimp door indroging.

Klink, zakking onder invloed van het eigen gewicht van de grond, treedt na grondwaterstandsverlaging in twee lagen op. In de eerste plaats zal door verdwijnen van de opwaartse druk de laag die nu boven het grondwater komt te liggen, met zijn volle gewicht druk op de nog onder freatische niveau blijvende laag uit gaan oefenen, waardoor deze laatste zal inklinken. Na verdwijnen van de opwaartse druk in de bovenste laag zal deze zelf echter ook onder eigen gewicht inzakken. Deze laatste klink is niet direct te scheiden van de zakking als gevolg van krimp en oxydatie. Aangenomen is dat dezelfde mate van klink over het gehele profiel beneden het oorspronkelijke freatische niveau heeft plaatsgevonden.

De klink Z<sub>k</sub> is dan af te leiden uit de dichtheid

beneden het grondwater-niveau van het gezakte veenprofiel (profiel 2) in vergelijking met de dichtheid van het veenpakket op gelijk niveau van het niet gezakte profiel (profiel 1). Dit is voor profiel 2 de laag H<sub>2</sub> en voor profiel 1 de laag H<sub>1</sub> min Δp (zie de figuren 4 en 5).

De dichtheid kan in dit geval worden uitgedrukt in het volume-gewicht in gram per cm<sup>3</sup> en worden gesommeerd voor de betreffende laagdikte, zodat:

Σg<sub>z.1</sub> = gesommeerd volume-gewicht van de laag H<sub>1</sub> min Δp in g/cm<sup>3</sup>

Σg<sub>z.2</sub> = gesommeerd volume-gewicht van de laag H<sub>2</sub> in g/cm<sup>3</sup>.

De klink (Z<sub>k</sub>) wordt in cm berekend over de oorspronkelijke laag beneden het grondwater-niveau van profiel 1, dat is de laag H<sub>1</sub>, volgens de formule

$$Z_k = \frac{\Sigma g_{z.2} - \Sigma g_{z.1}}{\Sigma g_{z.2}} \times H_1 \quad (2)$$

Voor profiel B wordt dit bijv.:

$$Z_k = \frac{8,17 - 7,24}{8,17} \times (230 - 50) = 20,5 \text{ cm}$$

### Oxydatie

Het verlies aan organische stof kan worden berekend uit het verschil van het totale gewicht organische stof van het niet en wel gezakte profiel, nl. Σn<sub>1</sub> - Σn<sub>2</sub> (zie fig. 6 of 7).

Men mag aannemen dat klink, oxydatie noch krimp van invloed is geweest op de totale hoe-

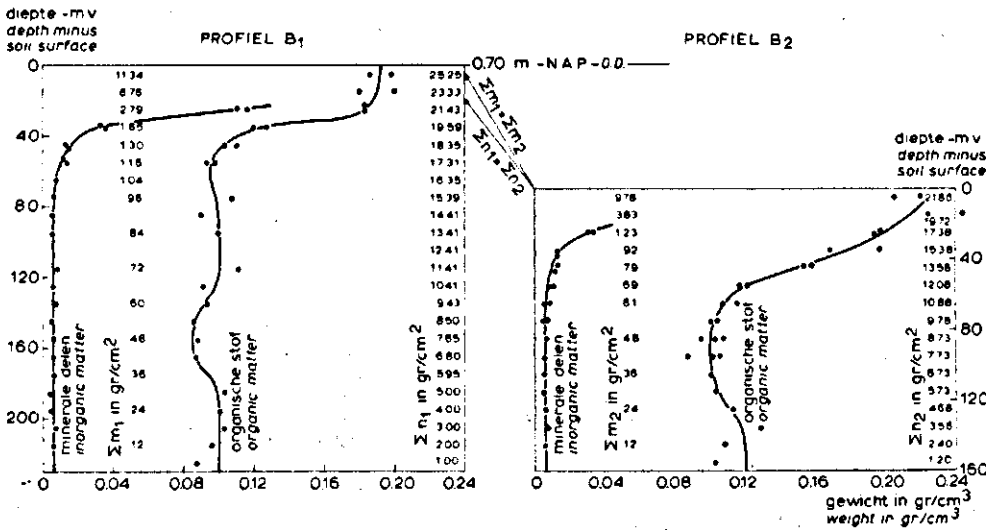


Fig. 6 Het verloop van de organische stof en de minerale delen, in afhankelijkheid van de diepte beneden maai-veld, in profiel B (profiel B<sub>1</sub>, niet gezakt; profiel B<sub>2</sub> 0,70 m gezakt;  $\Sigma m$  = gesommeerd gewicht van minerale delen;  $\Sigma n$  = gesommeerd gewicht van organische stof);  $\Sigma m_1$  en  $\Sigma m_2$  variëren resp. van 0,12 tot 11,34 en van 0,12 tot 9,78;  $\Sigma n_1$  en  $\Sigma n_2$  variëren resp. van 1,00 tot 25,25 en van 1,20 tot 21,86

Fig. 6 The course of organic matter and mineral parts, in dependence of depth below soil surface, in profile B (profile B<sub>1</sub>, not subsided; profile B<sub>2</sub> 0,70 m subsidence;  $\Sigma m$  = summed weight mineral parts;  $\Sigma n$  = summed weight organic matter);  $\Sigma m_1$  and  $\Sigma m_2$  vary resp. from 0.12 to 11.34 and from 0.12 to 9.78;  $\Sigma n_1$  and  $\Sigma n_2$  vary resp. from 1.00 to 25.25 and from 1.20 to 21.86

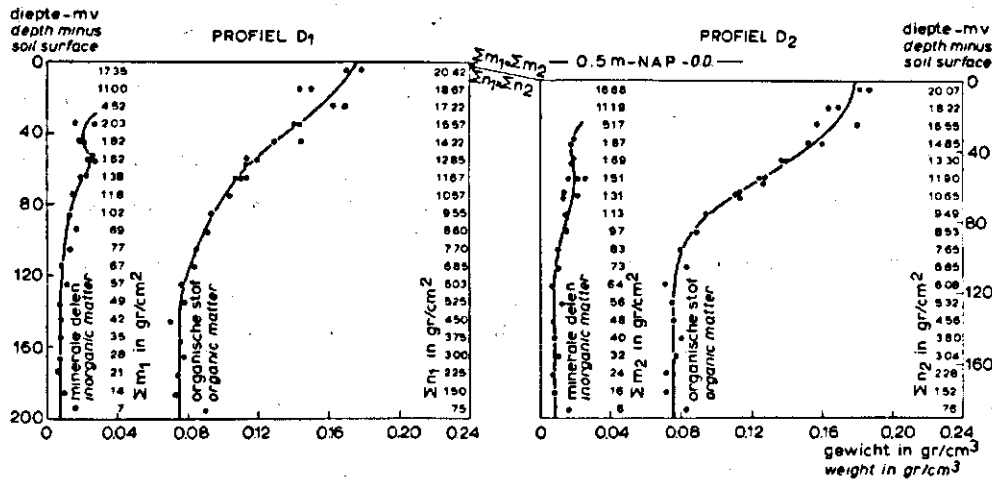


Fig. 7 Als fig. 6, voor profiel D (profiel D<sub>1</sub>, niet gezakt; profiel D<sub>2</sub> 0,10 m gezakt);  $\Sigma m_1$  en  $\Sigma m_2$  variëren resp. van 0,07 tot 17,35 en van 0,08 tot 16,88;  $\Sigma n_1$  en  $\Sigma n_2$  variëren resp. van 0,75 tot 20,42 en van 0,76 tot 20,07

Fig. 7 As fig. 6, for profile D (profile D<sub>1</sub>, not subsided; profile D<sub>2</sub> 0,10 m subsidence);  $\Sigma m_1$  and  $\Sigma m_2$  vary resp. from 0.07 to 17.35 and from 0.08 to 16.88;  $\Sigma n_1$  and  $\Sigma n_2$  vary resp. from 0.75 to 20.42 and from 0.76 to 20.07

veelheid minerale delen, zodat  $\Sigma m_1$  gelijk zou moeten zijn aan  $\Sigma m_2$ . De hoeveelheid minerale delen wordt echter voornamelijk bepaald door het kleidek. De dikte hiervan varieert van ca. 20 cm bij het gezakte tot 30 cm bij het niet gezakte profiel. De overgang naar het veen is in het eerste

geval zeer scherp begrensd in tegenstelling met het andere profiel. Hier vormt de laag van 20 tot 30 cm een geleidelijke overgang (dit wijst erop, dat oxydatie en indroging sterke veranderingen hebben veroorzaakt in de oorspronkelijke overgangslaag van klei naar veen). Door de bemonste-

ring van de lagen per 10 cm zal dus de toevalsfout van belangrijke invloed zijn op de berekende hoeveelheid minerale delen en organische stof van het kleidek. Om deze toevalsfout te elimineren is het noodzakelijk een correctie uit te voeren, en wel zodanig, dat de hoeveelheid minerale delen van de twee profielen aan elkaar gelijk zijn. Het is daartoe noodzakelijk een correctie aan te brengen op de dikte van het kleidek, zodanig, dat:

$$\Sigma m_1 = \Sigma m_2 \quad (3)$$

Hiermee in overeenstemming dient ook de hoeveelheid organische stof gecorrigeerd te worden. De correctie ( $w$ ) is berekend over het kleidek exclusief overgangslaag ( $d_k$ ).

De berekening van  $w$  is als volgt:

$$w = \frac{\Sigma m_1 - \Sigma m_2}{\Sigma m_{k,1}} \times d_{k,1} \quad (4)$$

waarin

$\Sigma m_{k,1}$  = gesommeerde hoeveelheid minerale delen in g per cm<sup>2</sup> van kleidek van profiel 1, dat is de laag  $d_{k,1}$ .

Zo wordt bijv. voor profiel B de correctie  $w$

$$w = \frac{11,34 - 9,78}{8,55} \times 20 = 2,7 \text{ cm (afgerond 3 cm)}$$

De gecorrigeerde dikte van het kleidek van profiel B<sub>1</sub> bedraagt dus:

$$D_{k,1} = d_{k,1} - w \Rightarrow 20 - 3 = 17 \text{ cm} \quad (5)$$

Bij een dikte van het kleidek van 17 cm is nu bij profiel B<sub>1</sub> de gesommeerde hoeveelheid minerale delen per cm<sup>2</sup> ( $\Sigma M_1$ ) over de totale laagdikte van het veen plus kleidek gelijk aan dat van profiel B<sub>2</sub>:

$$\Sigma M_1 = \Sigma m_1 - (\Sigma m_1 - \Sigma m_2) = \Sigma m_2 = 9,78 \text{ g} \quad (6)$$

De correctie  $w$  op het kleidek omvat niet alleen een hoeveelheid mineralen, maar ook een hoeveelheid organische stof, zodat ook  $\Sigma n_1$  zich wijzigt. Uit de verhouding van de hoeveelheid organische stof en de hoeveelheid minerale delen in het oorspronkelijke kleidek van 20 cm, kan de hoeveelheid organische stof berekend worden voor een laag van 17 cm ( $\Sigma N_{k,1}$ ).

$$\Sigma N_{k,1} = \frac{\Sigma n_{k,1}}{\Sigma m_{k,1}} \times \Sigma M_{k,1} \quad (7)$$

$$\Sigma M_{k,1} = \Sigma m_{k,1} - (\Sigma m_1 - \Sigma m_2) \quad (8)$$

De totale hoeveelheid organische stof per cm<sup>2</sup> bedraagt dan voor bijv. profiel B<sub>1</sub> na wijziging

$$\begin{aligned} \Sigma N_1 &= \Sigma n_1 - \Sigma n_{k,1} + \frac{\Sigma n_{k,1}}{\Sigma m_{k,1}} \times \Sigma M_{k,1} = \\ &= 25,25 - 3,82 + \frac{3,82}{8,55} \times 6,99 = 24,55 \text{ g} \quad (9) \end{aligned}$$

Bij een gelijke hoeveelheid minerale delen bedraagt het verlies aan organische stof in profiel B<sub>1</sub>

$$\Sigma N_1 - \Sigma n_2 = 24,55 - 21,86 = 2,69 \text{ g} \quad (10)$$

Om nu het verlies in cm te vinden wordt gebruik gemaakt van de figuren 6 en 7. Op de verticale as van profiel B<sub>1</sub>, die de gesommeerde hoeveelheid organische stof weergeeft, zoekt men door interpolatie het punt, dat overeenkomt met de totale hoeveelheid organische stof van profiel 2. Dit blijkt voor het gegeven voorbeeld, profiel B<sub>1</sub>, 18 cm beneden maaiveld te liggen. De correctie voor het kleidek bedroeg 3 cm, zodat het verlies aan organische stof (dat in grammen uitgedrukt 2,69 bedraagt) overeenkomt met een laagdikte van  $18 - 3 = 15$  cm.  $Z_0$  is dus 15 cm. Het theoretisch volume-gewicht van de verdwenen organische stof bedraagt dan  $2,69/15 = 0,18$  g. Dit is een zeer aanvaardbaar bedrag voor veen in geoxydeerde toestand.

### Krimp

De uitkomst van 'totale zakking — zakking door oxydatie — correctie voor dikte van kleidek — klink' kan beschouwd worden als de zakking door indroging ofwel krimp.

$$Z_1 = Z - Z_0 - w - Z_k \quad (11)$$

Voor profiel B wordt dit:  $Z_1 = 70 - 15 - 3 - 21 = 31$  cm.

Het is niet mogelijk op een eenvoudige wijze deze component onafhankelijk van de andere componenten direct en exact te berekenen. Het vormt hier een sluitpost. Krimp is een vorm van verdichting die boven het freatisch oppervlak optreedt. Zij zal in evenredigheid met de afstand tot het freatisch oppervlak in grootte afnemen. Bovendien wordt de mate van deze verdichting beïnvloed door de grootte van de andere componenten, oxydatie en klink.

Dat de krimp een orde van grootte heeft van circa 30 cm bij een grondwaterstandsvaling van 1,10 m, is duidelijk af te leiden uit figuur 4. Het volume-gewicht van veen (90% organische stof) bedraagt bij profiel B<sub>1</sub> op 0,50 tot 0,60 m beneden maaiveld, nabij het freatisch oppervlak, 0,108 g. Hetzelfde veen vindt men terug op 0,20 tot 0,30 m beneden maaiveld bij profiel B<sub>2</sub>, het gezakte profiel (figuur 4). Het volume-gewicht bedraagt nu 0,227 g. Dit betekent een verdichting ten opzichte van het oorspronkelijk volume-gewicht van  $0,108/0,227 = 48\%$ . De krimp bedraagt voor deze laag dus  $100 - 48 = 52\%$ . Dit kan in dit geval als een maximum-bedrag beschouwd worden, wegens de geringe diepte beneden maaiveld van deze laag.



Zoals reeds gezegd neemt met toenemende diepte de krimp geleidelijk af, zoals de figuren 4 en 5 aantonen.

### Overzicht der resultaten

Op gelijke wijze als in het voorbeeld van profiel B, werden de zakkingscomponenten berekend voor de andere profielen. Tabel 3 geeft hiervan een overzicht.

Tabel 3 Overzicht van de correctie op de dikte van het kleidek ( $w$ ), klink ( $Z_k$ ), zakking door oxydatie ( $Z_o$ ), krimp ( $Z_i$ ), totale zakking ( $Z$ ) en grondwaterstands daling ( $\Delta p$ ), alles in cm / *Conspectus of correction on thickness of clay cover ( $w$ ), settlement ( $Z_k$ ), subsidence by oxydation ( $Z_o$ ), shrinkage ( $Z_i$ ), total subsidence ( $Z$ ) and drawdown of the groundwater level ( $\Delta p$ ), all in cm*

Profiel/ Profile	w	$Z_k$	$Z_o$	$Z_i$	Z	$\Delta p$
A	+ 2	14	19	29	62	100
B	— 3	21	15	31	67	110
C	— 7	19	11	33	63	110
D	— 1	3	1	5	9	20

Volgens dit onderzoek heeft daling van de grondwaterstand van 1,10 m een zakking van maaiveld tot gevolg gehad van gemiddeld 0,65 m. Dat is circa 60% van de grondwaterstands daling. Volgens de gemiddelde waarde van profiel B en C wordt ongeveer 30% van de totale zakking veroorzaakt door klink, 20% door zakking als gevolg van oxydatie en 50% door krimp.

De klink beneden het grondwater niveau van het gezakte profiel die slechts een gedeelte vormt van de totale klink, bedraagt voor de profielen: A 7 cm; B 9 cm; C 8 cm; D 4 cm. Het gemiddelde van de profielen A, B en C bedraagt 8 cm. Dit betekent dat slechts ongeveer 12% van de totale klink wordt teruggevonden als klink in de ondergrond beneden het nieuwe grondwater niveau. Verreweg het belangrijkste deel van de zakking (85 tot 90%) is dus te verklaren door veranderingen in de laag boven het nieuwe grondwater niveau.

### Vergelijking van de bepaalde klink met de berekende klink

In verband met de bovenstaande afleiding van de componenten waaruit de zakking bestaat, leek het interessant na te gaan hoe de bepaalde klink overeenkomt met die berekend volgens enige klinkformules. Voor deze formules zelf zij voor de formule van Terzaghi verwezen naar Willet (1964)

Tabel 4 Totale zakking ( $Z$ ) en vergelijking van klink ( $Z_k$ ) in cm, bepaald uit het bodemprofiel en volgens de formules van Terzaghi en Halakorpi-Segeberg / *Total subdetermined from the profile and according the formulae sidence ( $Z$ ) and comparison of the settlement ( $Z_k$ ) in cm, of Terzaghi and Halakorpi-Segeberg*

	Profiel / Profile			
	A	B	C	D
Totale zakking volgens profiel / <i>Total subsidence according profile</i>	62	67	63	9
Klink volgens / <i>Settlement according:</i>				
profiel / <i>profile</i>	14	21	19	3
Terzaghi	22	22	22	5
Halakorpi-Segeberg	23	24	28	4

en voor de formule van Halakorpi-Segeberg naar Segeberg (1960). Voor een vergelijking van deze methoden zie Schothorst (1966). Het resultaat is gegeven in tabel 4.

De overeenkomst laat weinig te wensen over. Slechts profiel A wijkt enigszins af wat betreft de klink afgeleid uit de verdichting in het profiel. Volgens Terzaghi wordt geen verschil gevonden tussen de profielen A, B en C. Dit zal samenhangen met de c-waarde (samendrukbaarheidsconstante) die voor deze profielen gelijk is aangehouden.

Duidelijk blijkt dat de klink slechts een relatief gering aandeel in de opgetreden zakking heeft gehad.

### Nabeschuwing

In het voorgaande is getracht een inzicht te krijgen in de mate waarin de componenten klink, zakking door oxydatie en krimp invloed uitoefenen op de totale zakking van veengronden optredende na een grondwaterstands daling.

Het gebied rondom de Koekoekspolder gelegen in de polder Mastenbroek ten oosten van Kampen vormt een uniek natuurlijk proefobject voor een dergelijk onderzoek. Het gebied is in gebruik als blijvend grasland. Bij een daling van het grondwater niveau van 1,10 m wordt hier een zakking geconstateerd van ca. 0,65 m; dat is dus ongeveer 60% van de daling van het grondwater niveau. De daling van het maaiveld heeft zich voorgedaan in een periode van ruim 50 jaar. Het is zeer wel mogelijk dat het grootste deel van de klink in bijv. 10 jaar tot stand is gekomen, hetgeen met de ter beschikking staande gegevens echter niet is vast te stellen. Door de omstandigheid dat weinig of geen zakking optrad binnen

2 à 4 m vanaf de sloten (die op polderpeil werden gehouden), was het mogelijk de verschillende componenten van de zakking te bepalen.

De daling van het maaiveld was hier een gevolg van klink, zakking door oxydatie en krimp. Volgens het onderzoek bedraagt het aandeel van de klink ongeveer 30% van de totale zakking. De zakking door oxydatie had een aandeel van 20% en de krimp van 50%.

De krimp met zakking door oxydatie was dus veel belangrijker dan de klink. De veranderingen in het bodemprofiel traden voor 85 à 90% op in de laag die na grondwaterstandsverlaging boven het freatisch niveau is komen te liggen.

Alhoewel zekere indicaties zijn verkregen ten aanzien van de relatieve grootte van de componenten waaruit een zakking is opgebouwd, is deze kennis zonder verder onderzoek niet zonder meer overdraagbaar op andere veengebieden met dikkere veen pakketten of andere veensoorten. In verband hiermee wordt onder andere onderzoek in de Zaanstreek verricht, met name in de polder Assendelft en de Twiskepolder.

Bij vergelijking van de component klink, zoals deze is afgeleid uit de verdichting van het profiel en zoals berekend met de formule van Terzaghi en van Halakorpi-Segeberg, blijkt de overeenkomst zeer goed te zijn.

Ten aanzien van een verlaging van de grondwaterstand bij veengraslandgronden, met het doel de draagkracht te vergroten, kan worden geconcludeerd dat een daling van de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld ongeveer wordt gehalveerd door de optredende zakking. Dit gaat gepaard met verdichting in de bovengrond als gevolg van oxydatie en krimp en enige klink, waardoor — naast de verminderde vochthoeveelheid in de bovenlaag als gevolg van de grotere ontwateringsdiepte — de draagkracht zal worden vergroot.

## Summary

### *Determination of the components of the subsidence of a peat soil after lowering the phreatic surface*

The present study was carried out in connection with the research of enlarging the bearing power of peaty grassland soils. It was thought that a lowering of the groundwater table would influence the bearing power to such an extent that trampling of the sod could be eliminated. Lowering a groundwater table in a peaty region will also result, however, in a subsidence of the soil surface.

To obtain an idea of the amount of a future subsidence, it was necessary to gain an insight in the value of the various components constituting the total subsidence and their relative importance. This proved to be possible in the polder Mastenbroek, East of Kampen (province Overijssel, Netherlands). The area is used as permanent pasture. In part of that polder the peat was cut-over and the then existing lake was in 1913 reclaimed to a new polder, the Koekoekspolder (see Fig. 1). The open water level in the new polder was put at 2.60 m below the level in the polder Mastenbroek. Due to seepage from the

polder Mastenbroek to the Koekoekspolder, the groundwater level in the polder Mastenbroek dropped between the ditches (line d in Fig. 1). Close to the ditches (up to 3 or 4 m) no drawdown took place (Fig. 1, line c), since the water in them was kept at the old level. Subsidence took therefore only place between the ditches (Fig. 1, line b), leaving banks at the original surface along them (Fig. 1, line a), see Fig. 2 and 3. The subsidence is positively correlated with the distance from the Koekoekspolder; near that polder the subsidence after 50 years is some 0.65 m, at a distance of 1500 m it amounts to 0.10 m (see Fig. 1).

Since the object was to determine separately the various components of the total subsidence, a strict nomenclature was defined (see Table 1).

Soil profiles, as well in the subsided as in the not subsided areas, were sampled at each 10 cm down to the sand basis (Fig. 1, line e). A summary of the data is given in Table 2.

The total subsidence ( $Z$ ) is in our case composed of settlement ( $Z_k$ ), subsidence by oxydation ( $Z_o$ ) and shrinkage ( $Z_i$ ), see Equation (1).

The settlement ( $Z_k$ ) was determined from the bulk densities of the subsided and not subsided profiles, see Equation (2), where  $\Sigma g_{z,1}$  is the summed volume weight of layer  $H_1$  —  $\Delta p$  in grams per  $cm^3$  and  $\Sigma g_{z,2}$  that of layer  $H_2$  (see Fig. 4 and 5).

The subsidence by oxydation was determined by means of an 'organic matter balance'. The loss in organic matter can be computed as the difference between the total weight of organic matter in the not subsided and subsided profile ( $\Sigma n_1 - \Sigma n_2$ ), using the data from Fig. 6 or 7. It can be assumed that the total weight of mineral parts in both profiles (index 1 and 2) has not been influenced and that therefore Equation (3) holds. It is necessary, however, to make a correction ( $w$ ) in the thickness of the clay cover (index  $k$ ), due to sampling at each 10 cm instead of the whole layer. This correction is calculated according Equation (4), where  $\Sigma m_{k,1}$  is the summed weight of mineral parts (in grams per  $cm^3$ ) of the clay cover of profile 1, having a thickness  $d_{k,1}$ . The corrected thickness of the clay cover is then  $D_{k,1}$  (Equation (5)) and the total weight of mineral parts  $\Sigma M_1$  (Equation (6)). Correcting the clay cover means that also the weight of the organic matter content in the clay cover  $\Sigma n_{k,1}$  must be corrected according Equation (7); the corrected weight of mineral parts in the clay cover  $\Sigma M_{k,1}$  can be calculated with Equation (8). The corrected total weight of organic matter in the profile  $\Sigma n_1$  is calculated with Equation (9). The loss in organic matter can then be calculated with Equation (10). To get the loss in centimeters, use is made of figures like fig. 6 and 7. By interpolation one seeks the point on the vertical axis of profile 1 (for example in Fig. 6) where the total weight of organic matter in profile 2 is equaled. For profile  $B_1$  this occurs at 18 cm below surface. The correction  $w$  in clay cover for this profile was 3 cm, so  $Z_o$  was 15 cm for profile B. Shrinkage is determined as a residual term in Equation (11).

The results of the investigation are given in Table 3. It seemed to be appropriate to see whether the settlement determined from the profiles was in accordance with the values that can be calculated with the formulae of Terzaghi and of Halakorpi-Segeberg. Table 4 shows that in general there is a good agreement, but also that settlement is only a relatively small part of the total subsidence.

Of the total subsidence, settlement amounts to 30%, subsidence by oxydation 20% and shrinkage 50%. The subsidence occurs for 85 to 90% in the layer that, after lowering of the water table, lies above the new phreatic surface. Further research on profiles with thicker peat layers and other peat types is in progress.

**Literatuur**

- Agerberg, A. Larss : Några studier av nivåförändringar på myrjord. *Grundförbättring* 14 (1961) 3.
- Bennema, J., Geuze, E. C. W. A., Smits, H. & Wiggers, A. J. : Inlinkingsdag van de Nederlandse Bodemkundige Vereniging. *Landbouwk. Tijdschr.* 66 (1954) 7.
- Broadbent, F. E. : Factors influencing the decomposition of organic soils of the California delta. *Hilgardia* 29 (1960) 3.
- Darby, H. C. : *The drainage of the Fens*. Cambr. Univ. Press, 1940.
- Eggelsman, R. : Untersuchungen über Dränsackungen im Moor. *Z. Kulturtechn.* (1960) 1.
- Kroodsma, H. : Klink en irreversibele indroging. *Landbouwdoc.* 18 (1962) 34.
- Lambregts, C. P. : Onderzoek naar de klink op het eiland Tholen. *Landbouwk. Tijdschr.* 69 (1957) 9.
- Schothorst, C. J. : Klink van veengrond na diepere ontwatering. *Cultuurtechn. Tijdschr.* 6 (1966) 1.
- Segeberg, H. : Moorsackungen durch Grundwasserabsenkung und deren Vorausberechnung mit Hilfe empirischer Formeln. *Kulturtechn.* (1960) 1.
- Stephens, J. C. : Subsidence of organic soils in the Florida everglades. *Soil Sci. Proc.* 20 (1956).
- Willet, J. R. : Zettingsberekening in de cultuurtechniek. *Tijdschr. Kon. Ned. Heidemij.* 75 (1964) 6.
- Zuur, A. J. : Bodemkunde der Ned. bedijkingen en droogmakerijen. Syll. Landb. Hogeschool, Wageningen 1958, deel c.