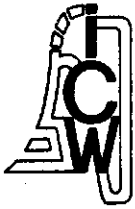


NN31545.1729

ICW nota 1729

september 1986



nota

instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen

SOCOMO: EEN MODEL VOOR DE BEREKENING VAN DE SPANNINGSVERDELING
EN DE DAARUIT VOLGENDE VERDICHTING VAN DE GROND ONDER WIELEN

Deel 1: De spanningsverdeling in de grond

ir. J.J.H. van den Akker

254521



0000 0386 3202

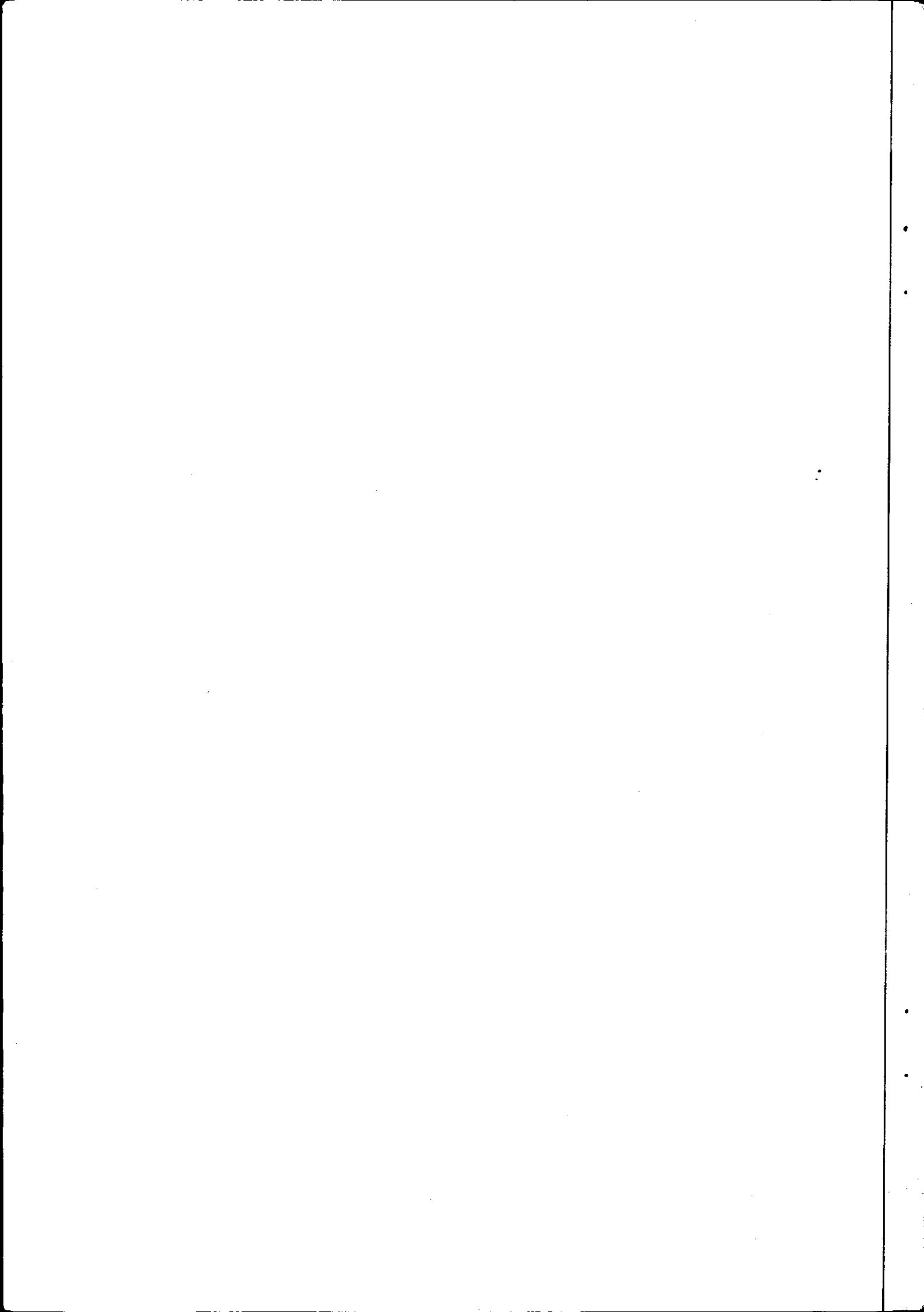
Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

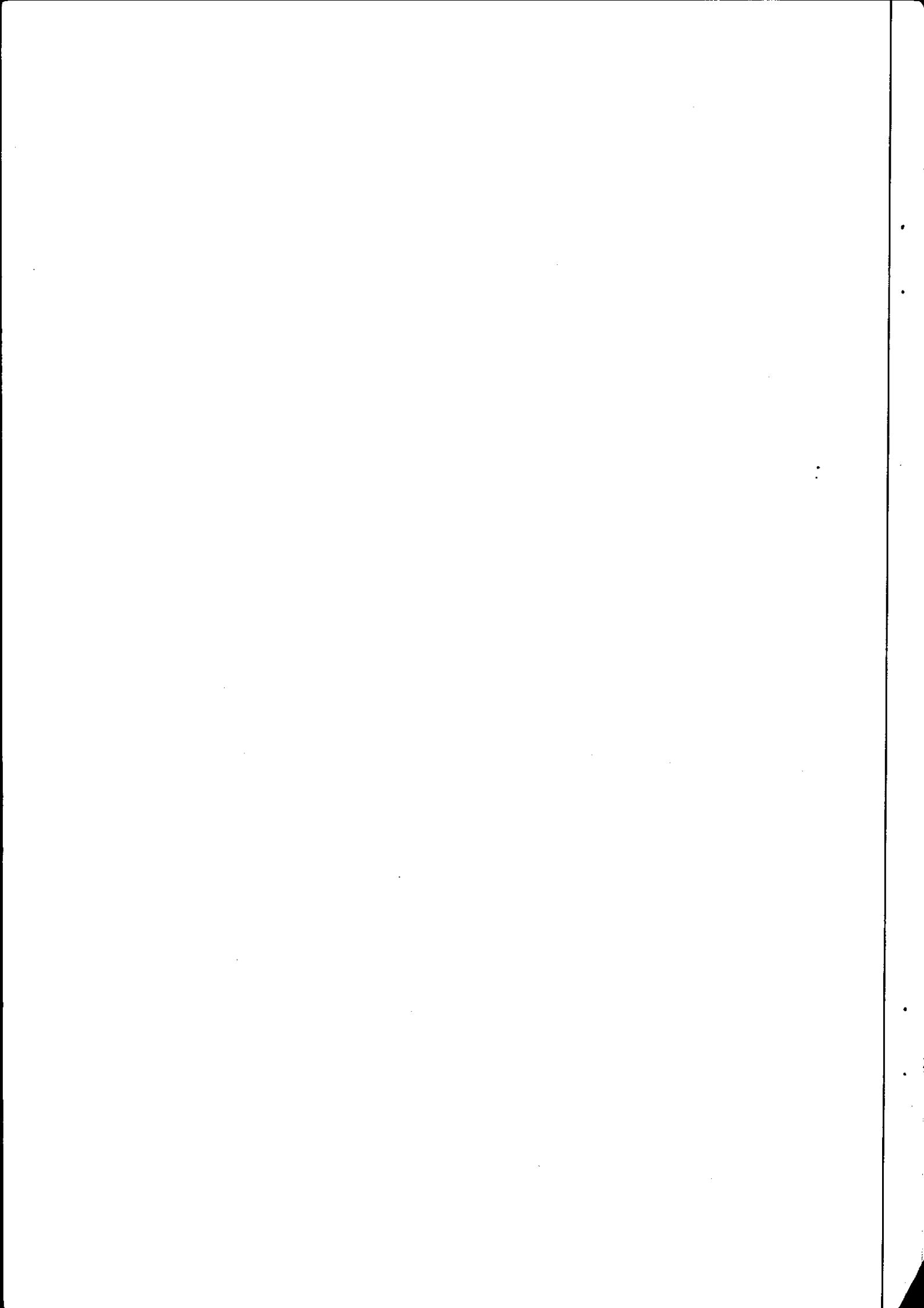
20 NOV. 1986

JSh 254521*



I N H O U D

	blz.
1. INLEIDING	1
2. DE THEORETISCHE ONDERGROND VAN HET MODEL	2
2.1. Basisprincipe	2
2.2. Berekening van spanningen ten gevolge van verticale belasting	6
2.3. Berekening van spanningen ten gevolge van horizontale belasting	9
2.4. Berekening van hoofdspinningen	11
2.5. Enige kanttekeningen	12
3. HET PROGRAMMA SOCOMO	13
3.1. Algemeen	13
3.2. De subroutine LEES	16
3.3. De subroutine RASTER	18
3.4. De subroutine SIGMA	19
3.5. De subroutine PRINT	20
3.6. Grafische uitvoer	20
LITERATUUR	21



1. INLEIDING

Na de tweede wereldoorlog is de Nederlandse landbouw sterk gemechaniseerd. Zoals blijkt uit figuur 1 wordt de grond de laatste jaren steeds zwaarder belast. Een tweede aspect is dat het deel van het bouw-

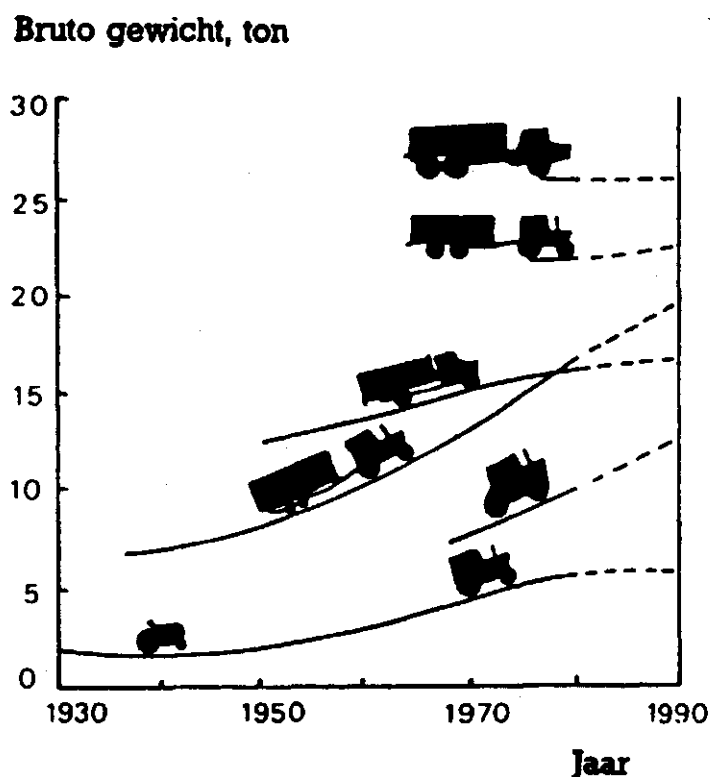


Fig. 1. Stijging van het brutogewicht van trekkers, wagens en zelfrijdende voertuigen

landareaal dat wordt ingenomen door aardappelen, suikerbieten en snijmais sterk is toegenomen. In 1960 was het aandeel van deze gewassen 27%, in 1983 was dit gestegen tot 62% van het oppervlakte bouwland. De teelt van aardappelen en suikerbieten is bewerkelijk, waarbij grote hoeveelheden product in de herfst onder min of meer natte omstandigheden worden gerooid en afgevoerd. De kans op bodemverdichting wordt

hierdoor groot. In 1985 werd ± 177 000 ha snijmais verbouwd, wat ongeveer 25% van het bouwlandareaal beslaat. Hiervan ligt tweederde deel op voormalig grasland. Vooral in de in hoofdzaak op zandgelegen veehouderijgebieden komt veel continueteelt van mais voor. Eén van de redenen om dit voedergewas te verbouwen is dat mais grote hoeveelheden drijfmest verdraagt. Dit wordt met gliertanks met steeds grotere capaciteit uitgereden. In verband met de vaak beperkte opslagcapaciteit gebeurt het uitrijden op tijdstippen in de winter en het voorjaar waarop de bodemomstandigheden minder gunstig zijn.

Bij de oogst moet 50 tot 60 ton vers produkt onder overwegend natte bodemomstandigheden worden geoogst en van het land worden afgevoerd. Een groot deel van de mais wordt geteeld op zandgronden, die als het organisch stofgehalte laag is, gemakkelijk kunnen worden verdicht. Bij niet te zware belasting van de grond onder redelijke omstandigheden, dat wil zeggen niet te nat, blijft de verdichting beperkt tot de bovengrond, die bij de jaarlijkse grondbewerking weer wordt losgemaakt. In vele gevallen wordt de grond te zwaar belast onder natte omstandigheden. Dit heeft tot gevolg dat de verdichting zich tot in de ondergrond voortzet en niet meer elk jaar wordt opgeheven.

De mate waarin de grond verdicht door berijding is afhankelijk van veel factoren. De druk die door het wiel op de grond wordt uitgeoefend is onder andere afhankelijk van de wiellast en de wieleigenschappen (dimensies, soort band, bandspanning), maar ook van de mate waarin de grond een tegendruk op de band kan uitoefenen. De sterkte- en verdichtingseigenschappen van de grond zijn onder andere afhankelijk van de soort grond, de dichtheid, de bodemtextuur, de spanningsverdeling in de grond en het vochtgehalte. Het grote aantal parameters dat de verdichting bepaald maakt het ondoenlijk om al de mogelijke combinaties van factoren in het veld te bestuderen. Daarom is het noodzakelijk om naast veldstudies modellen te ontwikkelen waarmee de verdichting ten gevolge van een breed scala van wielbelastingen en grondcondities kan worden berekend.

Het model dat hiertoe is ontwikkeld is SOCOMO. SOCOMO staat voor Soil Compaction Model. Voor het berekenen van de verdichting moet eerst de spanningsverdeling in de grond worden bepaald. In deel 1 zal

worden aangegeven hoe met behulp van SOCOMO de spanningsverdeling wordt berekend.

In deel 2 zal worden aangegeven hoe uit deze spanningsverdeling de verdichting wordt berekend.

2. DE THEORETISCHE ONDERGROND VAN HET MODEL

2.1. Basisprincipe

Het model is gebaseerd op de theorie van BOUSSINESQ (1885), die de verdeling van spanningen in een homogene isotrope halfruimte geeft, veroorzaakt door een puntlast loodrecht op het oppervlak van die halfruimte. Op elk volume-element in de halfruimte werken verticale, horizontale en tangentiale normaal- en schuifspanningen (zie fig. 2).

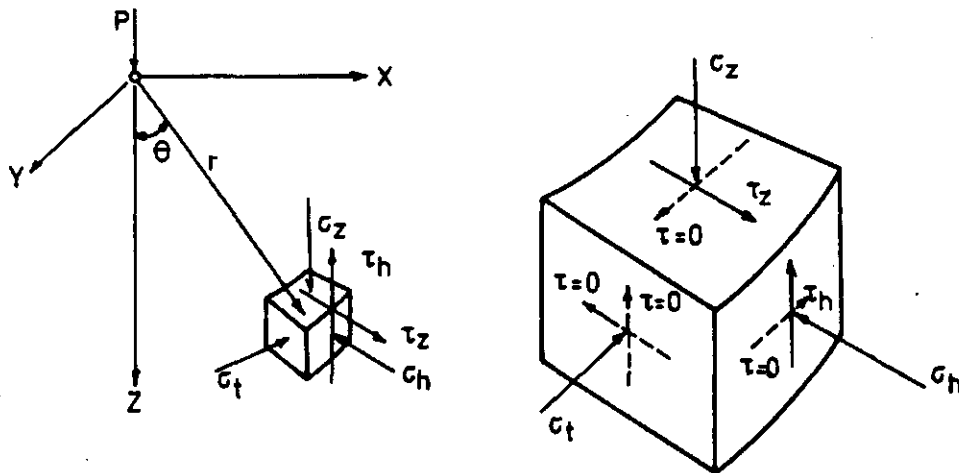


Fig. 2. Spanningen op een volume-elementje in een halfruimte, waarop een puntlast wordt uitgeoefend

Voor de verschillende spanningen kan worden geschreven:

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^3 \theta$$

$$\sigma_h = \frac{P}{2\pi r^2} \left(3 \cos \theta \sin^2 \theta - \frac{m-2}{m} \frac{1}{1 + \cos \theta} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_t = - \frac{m-2}{m} \frac{P}{2\pi r^2} \left(\cos \theta - \frac{1}{1 + \cos \theta} \right)$$

$$\tau_z = \frac{3P}{2\pi r^2} \cos^2 \theta \sin \theta = \tau_h$$

waarin:

- $\sigma_z, \sigma_h, \sigma_t$ = vertikale, horizontale en tangentiale normaalspanningen
- τ_z, τ_h = vertikale en horizontale schuifspanningen
- P = vertikale puntlast
- r en θ = poolcoördinaten
- m = inverse van de dwarscontractiecoëfficiënt (Poissoncoëfficiënt)

De spanningsverdeling in de halfruimte ten gevolge van de puntlast is axiaalsymmetrisch. Hieruit volgt dat de schuifspanningen in het vlak loodrecht op de tangentiaal nul zijn. Dit geldt ook voor de schuifspanningen met de richting evenwijdig aan de tangentiaal in het horizontale vlak en het vlak loodrecht aan de tangentiaal. Wat betreft de schuifspanningen in het vlak loodrecht op de tangentiaal valt in te zien dat deze nul moeten zijn door te bedenken dat ten gevolge van de axiaalsymmetrie al de volume-elementen met dezelfde poolcoördinaten r en θ dezelfde vertikale en radiale verplaatsingen hebben. De contactvlakken tussen deze volume-elementen verschuiven niet ten opzichte van elkaar, zodat er geen schuifspanningen kunnen optreden. Wat betreft de schuifspanningen in tangentiaalrichting moet worden bedacht dat bij axiaalsymmetrie de volume-elementen niet in de tangentiaalrichting

worden verplaatst. Er zijn dan ook geen onderlinge verschuivingen in deze richting tussen de volume-elementen. De betreffende schuifspanningen moeten dan nul zijn. Dat de schuifspanningen τ_z en τ_h aan elkaar gelijk zijn volgt uit het momentevenwicht van een volume-element (zie figuur 3).

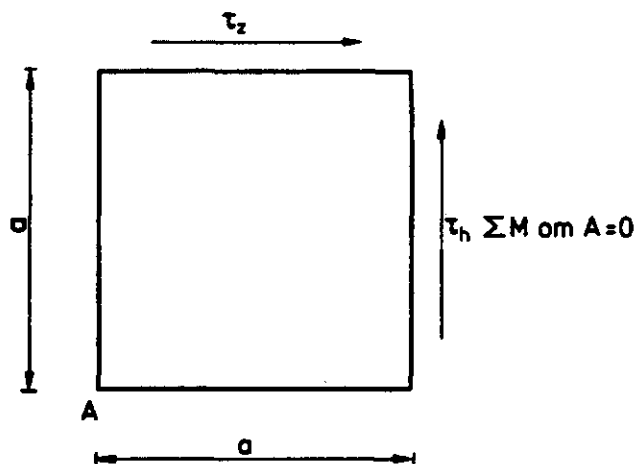


Fig. 3. Momentevenwicht volume-element

Het moment om punt A moet nul zijn, omdat anders het volume-element begint te draaien.

$$\Sigma M \text{ om } A = a * \tau_z - a * \tau_h = 0 \Rightarrow$$

$$\tau_z = \tau_h$$

De factor m geeft de verhouding tussen de vervorming evenwijdig aan (ϵ_1) en loodrecht op (ϵ_2) de richting van de eenassige belasting van een element, zodat:

$$m = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \tag{2}$$

m heeft een waarde tussen 2 en 3. De volumeverandering van de grond is nul in het geval $m=2$.

Omdat de invloed van m op de resultaten klein is, stelt FRÖHLICH (1934) voor om in de vergelijkingen (1) $m=2$ te nemen. Bovendien introduceert hij een concentratiefactor ν in de formules van Boussinesq, waardoor rekening wordt gehouden met het niet-elastisch gedrag van grond. In de grond spreidt de spanning zich in het algemeen niet zo sterk als in een elastisch isotroop materiaal, waardoor de spanningen zich als het ware rond de belastingsas concentreren. Dit gedrag wordt sterker als de grond door een grotere vochtigheid plastischer is. De concentratiefactor geeft de verdeling van de belasting rond de belastingsas. Invullen van $m=2$ en ν in de vergelijking (1) geeft:

$$\sigma_z = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \cos^\nu \theta$$

$$\sigma_h = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \cos^{\nu-2} \theta \sin^2 \theta \quad (3)$$

$$\sigma_t = 0$$

$$\tau = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \cos^{\nu-1} \theta \sin \theta$$

Door het invullen van $m=2$ wordt $\sigma_t=0$ en wordt de vergelijking voor σ_h sterk vereenvoudigd. Voor $\nu=3$ worden de formules van Boussinesq met $m=2$ verkregen. Hoe slapper c.q. natter de grond, hoe groter ν wordt. KOOLEN en KUIPER (1983) geven waarden van ν van 3, 4 en 5 voor respectievelijk een harde, normale en zachte grond.

2.2. Berekening van spanningen ten gevolge van verticale belasting

Bovenstaande theorie (vergelijking 3) beschrijft de spanningen die in de grond onder een verticale puntlast optreden. De wiellast wordt echter niet in één punt aan de grond overgedragen, maar over het gehele band-grond contactvlak. Bovendien kan de wiellast worden ontbonden in een verticale en een horizontale belasting op de grond. Als eerste zal de verticale belasting worden beschouwd.

SÖHNE (1953) heeft een numerieke procedure ontworpen om de verticale spanningen σ_z , die door een wiellast in de grond worden opgewekt, te berekenen. Het wielgrond contactvlak wordt door Söhne opgedeeld in een aantal elementen. In het centrum van elk van de elementen werkt een puntlast (zie figuur 4).

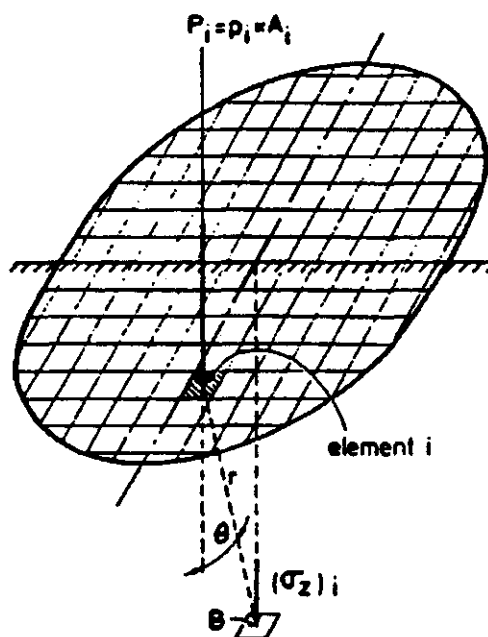


Fig. 4. Sommatieprocedure van de spanningen σ_{zi} opgewekt door de puntlasten P_i , die over het wiel-grond contactvlak zijn verdeeld (SÖHNE, 1953)

De verticale spanning σ_z in een bepaald punt B onder het contactvlak wordt verkregen door al de verschillende verticale spanningen, die door de puntlasten in de elementen van het contactvlak worden uitgeoefend, bij elkaar op te tellen. Deze procedure is echter niet geschikt om de horizontale spanningen σ_h en de schuifspanningen τ_z te berekenen. De richting van deze spanningen, die op een bepaald punt in de grond werken, wordt namelijk bepaald door de plaats van de puntlast ten opzichte van het beschouwde punt in de grond. Omdat de richting van deze spanningen per puntlast verschillend is, kunnen de spanningen

niet zonder meer bij elkaar worden opgeteld om de totale σ_h en τ_z in het beschouwde punt te berekenen. De horizontale spanningen en de schuifspanningen kunnen wel worden gesommeerd indien ze worden ontbonden in de x- en y-componenten. Dit is aangegeven in figuur 5.

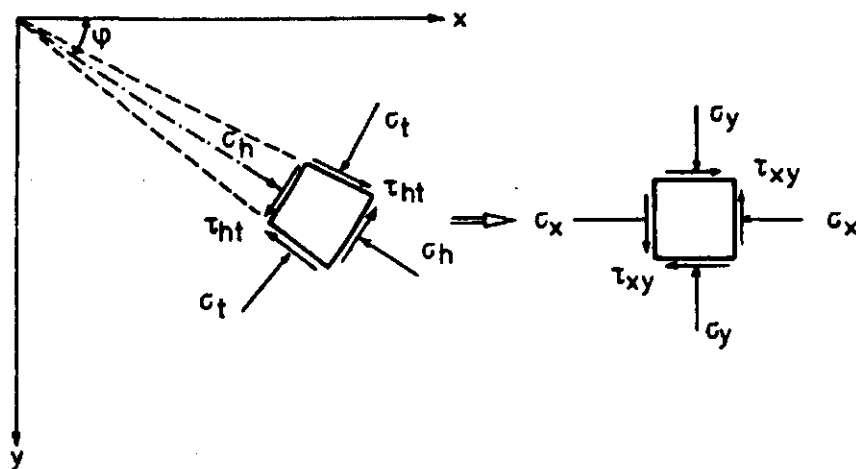


Fig. 5. Ontbinding van de horizontale en schuifspanningen in x- en y-componenten ter verkrijging van de totale horizontale en schuifspanningen werkend in een bepaald punt in de grond

TIMOSHENKO en GOODIER (1980) geven de volgende algemene oplossing voor deze ontbinding:

$$\sigma_x = \sigma_h \cos^2 \phi + \sigma_t \sin^2 \phi - 2\tau_{ht} \sin \phi \cos \phi$$

$$\sigma_y = \sigma_h \sin^2 \phi + \sigma_t \cos^2 \phi + 2\tau_{ht} \sin \phi \cos \phi \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = (\sigma_h - \sigma_t) \sin \phi \cos \phi + \tau_{ht} (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi)$$

Zoals eerder is aangegeven is in verband met de axiaalsymmetrie $\tau_{ht}=0$. Omdat de inverse van de dwarscontractiecoëfficiënt μ op 2 is gesteld, is ook $\sigma_t=0$. De vergelijkingen (4) kunnen hiermee worden vereenvoudigd tot:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_h \cos^2 \phi \\ \sigma_y &= \sigma_h \sin^2 \phi \\ \tau_{xy} &= \sigma_h \sin \phi \cos \phi\end{aligned}\tag{5}$$

De schuifspanning τ_z in het z-vlak kan worden ontbonden in:

$$\begin{aligned}\tau_{zx} = \tau_{xz} &= \tau_z \cos \phi \\ \tau_{zy} = \tau_{yz} &= \tau_z \sin \phi\end{aligned}\tag{6}$$

De symbolen in de vergelijkingen 4, 5 en 6 worden verklaard in figuur 5.

2.3. Berekening van spanningen ten gevolge van horizontale belasting

Naast verticale werken er ook horizontale spanningen in het wiel-grond contactvlak.

FRÖLICH (1934) geeft aan hoe de spanningen in de grond ten gevolge van een horizontale puntlast kunnen worden berekend.

De vergelijkingen die hij geeft zijn echter alleen geldig in het vlak waarin de kracht werkt. In figuur 6 is dit het xz-vlak. De afleiding van het algemene geval is als volgt:

$$\sigma_z = \frac{\nu P}{2\pi r^2} \left(\frac{x}{r}\right)^{\nu-2}\tag{7}$$

Uit figuur 6 volgt dat:

$$x = r_{hor} \cos \phi = r \sin \theta \cos \phi\tag{8}$$

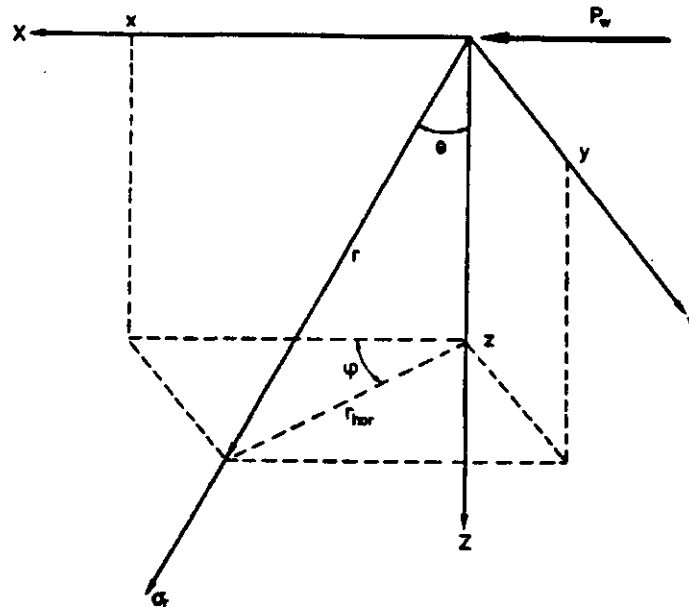


Fig. 6. σ_r op punt (x,y,z) door een horizontale puntlast veroorzaakt

Combinatie van vergelijking (7) en (8) levert:

$$\sigma_r = \frac{\nu P_w}{2\pi r^2} \sin^{\nu-2} \theta \cos^{\nu-2} \phi$$

De spanningen σ_z , σ_h en τ , zoals aangegeven in figuur 2, maar nu veroorzaakt door een horizontale puntlast zijn:

$$\sigma_z = \sigma_r \cos^2 \theta$$

$$\sigma_h = \sigma_r \sin^2 \theta$$

$$\tau_z = \sigma_r \sin \theta \cos \theta$$

Invulling van vergelijking (9) in (10) levert:

$$\sigma_z = \frac{\nu P_w}{2\pi r^2} \sin^{\nu-2} \theta \cos^2 \theta \cos^{\nu-2} \phi$$

$$\sigma_h = \frac{\nu P_w}{2\pi r^2} \sin^{\nu} \theta \cos^{\nu-2} \phi$$

$$\tau_z = \frac{\nu P_w}{2\pi r^2} \sin^{\nu-1} \theta \cos \theta \cos^{\nu-2} \phi$$

Met behulp van de vergelijkingen (5) en (6) kunnen de spanningen σ_z , σ_h en σ_z in x- en y-componenten worden ontbonden.

Voor de berekening van de spanningen in de grond door een wiel-last, waarbij de kracht via het band-grond contactvlak op de grond wordt overgebracht, kan op dezelfde manier als bij de verticale last de procedure van Söhne worden toegepast voor berekening van spanningen ten gevolge van een horizontale last. Door voor de horizontale puntlasten dezelfde aangrijppunten te nemen als bij de verticale puntlasten, kunnen de spanningen σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{xz} en τ_{yz} , die door een horizontale en verticale belasting in het wiel-grond contactvlak in een bepaald punt in de grond worden opgewekt, bij elkaar worden opgeteld.

2.4. Berekening van hoofdspanningen

Het is mogelijk een volume-element zodanig te draaien, dat als de schuifspanningen op de vlakken van het element nul worden. Dit is aangegeven in figuur 7.

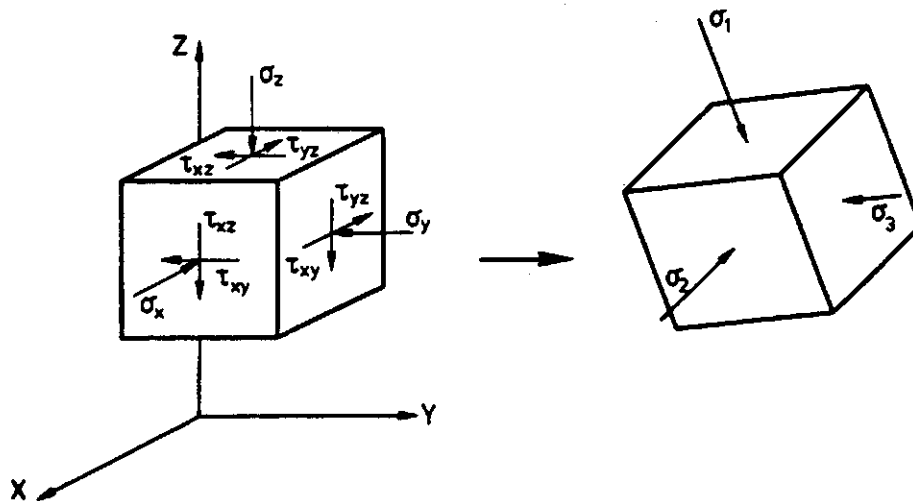


Fig. 7. Verdraaiing van het volume-element tot dat al de schuifspanningen nul worden

De overblijvende spanningen loodrecht op de vlakken worden de hoofdspansingen σ_1 , σ_2 en σ_3 genoemd. Hierin is σ_1 de grootste en σ_3 de kleinste hoofdspansing. De drie hoofdspansingen in een bepaald punt beschrijven in zijn geheel de spanningstoestand in dat punt. Volgens TIMOSHENKO en GOODIER (1980) zijn deze hoofdspansingen de wortels van de vergelijking:

$$S^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)S^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2)S - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \quad (12)$$

Het zal duidelijk zijn dat deze talloze berekeningen alleen met behulp van een computer kunnen worden uitgevoerd. Het op bovenstaande theorie gebaseerde bodemverdichtingsmodel SOCOMO (Soil Compaction Model) kan alle spanningen in elke willekeurige doorsnede loodrecht op of in de rijrichting berekenen.

2.5. Enige kanttekeningen

De theorie waarop het model is gebaseerd staat in principe geen plastische deformaties en grote volumeveranderingen toe. De vervormingen in de ondergrond zijn in het algemeen zo klein dat aan deze voorwaarden wordt voldaan. Dit geldt echter niet voor de bovengrond. Door voor de bovengrond uit te gaan van de vervormde toestand, kan dit probleem worden omzeild. Dit houdt in dat bij de berekening de belasting in het spoor, dus enkele centimeters onder het maaiveld, aangrijpt en dat voor de bepaling van de concentratiefactor ν wordt uitgegaan van een verdichte bovengrond.

Een tweede mogelijkheid is om uit te gaan van de belasting die door de bovengrond op de ondergrond wordt uitgeoefend. De mogelijkheid bestaat om deze belasting met behulp van drukopnemers in de praktijk te meten. Volgens CARPENTER e.a. (1985) wijken de spanningen die met

behulp van de formules van Fröhlich en Söhne zijn berekend maar weinig af van de werkelijke waarden. Het model zal daarom in ieder geval voor de ondergrond redelijk voldoen. Omdat vooral de verdichting van de ondergrond wegens het moeilijke herstel ervan een probleem vormt, is er in dit stadium het meeste behoefte aan een model dat in ieder geval de verdichting van de ondergrond redelijk kan voorspellen.

3. HET PROGRAMMA SOCOMO

3.1. Algemeen

De naam SOCOMO staat voor Soil Compaction Model. Er zijn twee versies van het programma ontwikkeld, namelijk SOCOMOL en SOCOMOD, waarmee voor respectievelijk een bepaalde langsdoorsnede of een bepaalde dwarsdoorsnede de grootste hoofdspansingen S_1 , de kleinste hoofdspansingen S_3 , de verticale spanningen σ_v , de horizontale spanningen σ_x en σ_y , de schuifspanningen τ_x , τ_y en τ_{xy} en de gemiddelde hoofdspansingen σ_m , worden berekend.

Figuur 8 geeft het coördinatenstelsel.

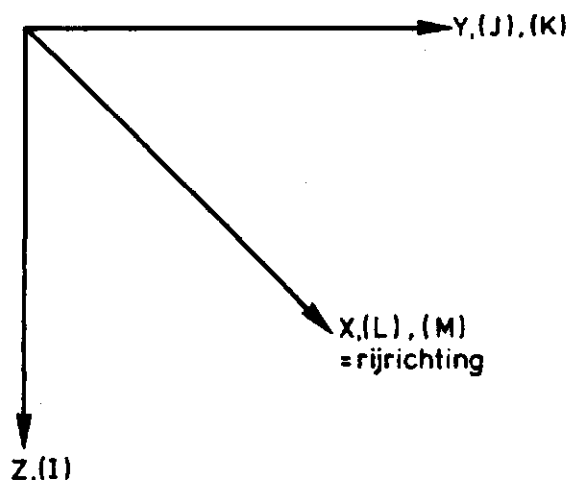


Fig. 8. Het coördinatenstelsel, toegepast in SOCOMO

Hierin komt de x-as overeen met de rijrichting, staat de y-as loodrecht daarop en geeft de z-as de diepte aan. Bij elke as staan tussen haakjes de tellers die in SOCOMO worden gebruikt bij die richtingen. In figuur 9 zijn de spanningen op een volume-element gegeven.

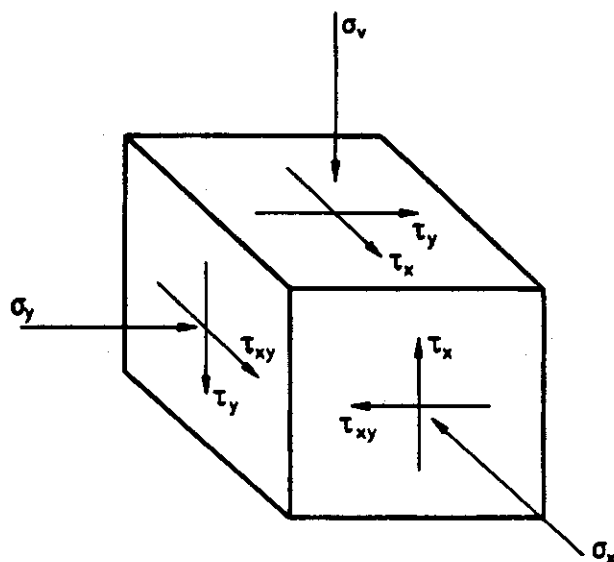


Fig. 9. De spanningen op een volume-element.

Uit deze spanningen kunnen de hoofdspanningen S_1 , S_2 en S_3 worden berekend. In het programma is de benaming van deze spanningen als volgt:

- σ_v = SIGMAV
- σ_x = SIGMAX
- σ_y = SIGMAY
- τ_x = TAUX
- τ_y = TAUY
- τ_{xy} = TAUXY

Figuur 10 geeft de rasteropbouw met benamingen, zoals die in SOCOMO voorkomen.

Op elk van de rasterpunten in het bovenvlak staat een puntlast. Deze puntlast vertegenwoordigt de belasting op een vlakje met de afmetingen RASTBR* RASTLEN rondom het rasterpunt. Dit is aangegeven in figuur 11.

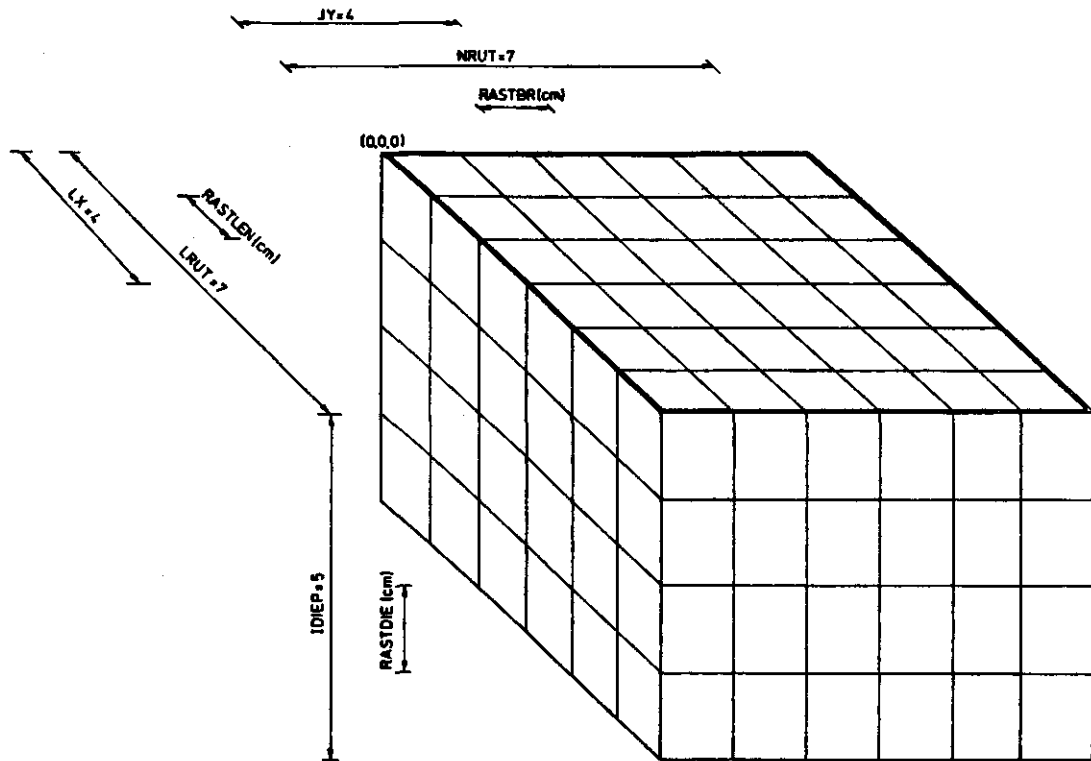


Fig. 10. De rasteropbouw met benamingen, zoals die in SOCOMO voorkomen

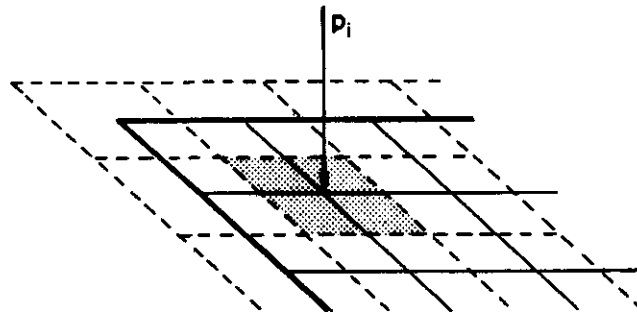


Fig. 11. De belasting op het gearceerde vlak wordt geconcentreerd in de puntlast p_i op het rasterpunt

Bij de beschrijving van het programma zullen de benamingen in figuur 10 worden verduidelijkt. Het programma SOCOMO bestaat uit vier subroutines, namelijk LEES, RASTER, SIGMA en PRINT. Deze vier subroutines zullen achtereenvolgend worden beschreven.

3.2. De subroutine LEES

In LEES wordt eerst een invoerfile geopend. Bij interactieve verwerking wordt de naam van deze file gevraagd. Bij batchverwerking is dit bij berekening van een dwarsdoorsnede standaard SOCOMODB.DAT, in het geval van een langsdoorsnede standaard SOCOMOLB.DAT.

Uit de invoerfile wordt achtereenvolgend gelezen:

- De beschouwde doorsnede: LX bij SOCOMOD
JY bij SOCOMOL.

LX en JY zijn de coördinaatnummers waarvoor de doorsnede moet worden berekend. De coördinaten zijn respectievelijk $X = (L-1) * RASTLEN$ en $Y = (JY-1) * RASTBR$.

- Bij SOCOMOD: het rasterpunt waar de zijkant van de wiellast begint: NRUTØ.

Bij SOCOMOL: het rasterpunt waar de achterkant van de wiellast begint. Een en ander wordt verduidelijkt in figuur 12.

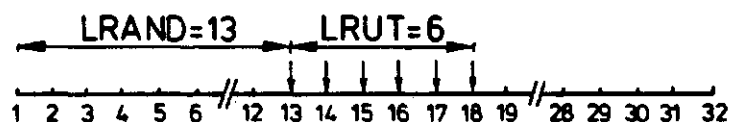


Fig. 12. Situering wiellast in een langsdoorsnede

Standaard is een doorsnede 32 rasterpunten lang. NRUTØ respectievelijk LRAND geven aan waar de belaste punten gesitueerd zijn.

- Het aantal rasterpunten in de diepte: IDIEP.
Idem loodrecht op de rijrichting: NRUT.
Idem in de rijrichting: LRUT.

- De afmetingen van een rastelement in cm, breedte * lengte * diepte: RASTBR * RASTLEN * RASTDIE.
De wiellast: LOAD in kgf.
De concentratiefactor MU.
- De gelijkmatig verdeelde bovenbelasting: BOVENBEL in kgf/cm².
- Het volumegewicht RHONUL in g/cm³ in de diepte, het volumegewicht van een element wordt toegekend aan het onderste knooppunt van dat element, het volumegewicht voor de bovenste rasterpunten is nul.
- Een matrix met de verticale belasting per rasterpunt in kgf, de rijen lopen evenwijdig met de rijrichting, de kolommen loodrecht daarop: RUTFORCE(NRUT,LRUT).
- Idem voor de horizontale belasting: HRRUT(NRUT,LRUT).
- De naam van de output-file.
Al de inputgegevens worden ook weggeschreven naar de output-file.

Een inputfile ziet er dan als volgt uit:

Inputfile SOCOMOL:

JY

LRAND

IDIEP,NRUT,LRUT

RASTBR,RASTLEN,RASTDIE,LOAD,MU

BOVENBEL

RHONUL(1),RHONUL(2),.....,RHONUL(1),.....,RHONUL(IDIEP)

RUTFORCE(1,1).....RUTFORCE(1,LRUT)

.
. .
. .

RUTFORCE(NRUT,1).....RUTFORCE(NRUT,LRUT)

HRRUT(1,1).....HRRUT(1,LRUT)

.
. .
. .

HRRUT(NRUT,1).....HRRUT(NRUT,LRUT)

FILE.OUT

Een voorbeeld van zo'n inputfile:

```
5
10
24 9 9 3250 4
5.0 5.0 5.0
0.0
0.0 1.48 1.48 1.53 1.58 1.52 1.51 1.50 1.50 1.50 1.50 1.50 1.48 1.48 1.50 1.54
1.60 1.60 1.60 1.60 1.60 1.60 1.60 1.60
12.70 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 12.70
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
25.39 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 50.78 25.39
12.70 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 25.39 12.70
1.80 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 1.80
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
3.61 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 7.21 3.61
1.80 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 3.61 1.80
WEST2310A.LA2
```

3.3. De subroutine RASTER

In RASTER wordt voor een oppervlak met een bepaalde breedte en lengte van de wielafdruk tot een bepaalde diepte een raster van knooppunten bepaald. De verticale en horizontale spanningen ten gevolge van de gelijkmatig verdeelde bovenbelasting en het eigen gewicht worden berekend en aangebracht.

De verticale spanning SIGMAV van de bovenste rasterpunten is gelijk aan de bovenbelasting. De verticale spanning in een rasterpunt daaronder is in formulevorm: $SIGMAV(I,J,L) = SIGMAV(I-1,J,L) + RHONUL(I) * 0.001 * RASTDIE$. De horizontale spanningen zijn volgens TSCHEBOTARIOFF (1951) 0,5 maal de verticale spanningen. Hieruit volgt dat: $SIGMAX(I,J,L) = SIGMAY(I,J,L) = 0,5 * SIGMAV(I,J,L)$. Deze spanningen zijn in dit stadium ook de hoofdspinningen. Dit wil zeggen dat de schuifspanningen nul zijn.

3.4. De subroutine SIGMA

In SIGMA worden de spanningsverdelingen onder een opgelegde last berekend. De spanningen zijn afhankelijk van de opgelegde puntlasten aan het oppervlak, de afstand van de puntlast tot het rasterpunt in de grond en de hoek tussen de normaal en de verbindinglijn tussen de puntlast en het desbetreffende rasterpunt in de grond.

SIGMA bestaat uit drie delen.

In het eerste deel worden de horizontale en verticale belastingen op de door LRAND respectievelijk NRUTØ bepaalde plaats op het raster aangebracht. Daarbij worden de verticale spanningen SIGMAV en de schuifspanningen TAUZ ten gevolge van deze belastingen in de bovenste rasterpunten berekend.

In het tweede deel worden voor elk van de rasterpunten de door elk van de horizontale en verticale puntlasten opgewekte normaalspanningen SIGMAV, SIGMAX en SIGMAY en schuifspanningen TAUZ, TAUY en TAUZY berekend en gesommeerd. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de vergelijkingen (3), (5) en (11).

Uit symmetrie-overwegingen zijn bij een langsdorsnede over het hart van de belasting de schuifspanningen TAUZ en TAUZY gelijk aan nul. Door deze schuifspanningen in de vergelijkingen in SOCOMOL buiten beschouwing te laten, kan een aanzienlijke verkorting van de rekentijd worden verkregen.

In het derde deel worden uit deze spanningen de hoofdspanningen S_1 , S_2 en S_3 berekend met behulp van vergelijking (12). Hierbij wordt de eerste wortel bepaald met de Newton-Raphsonmethode, waarbij als beginschatting $S = \text{SIGMAV}$ wordt gebruikt. De nauwkeurigheid waarmee deze bepaling wordt uitgevoerd is $\text{EPS} = 0.0001$. Er volgt een foutmelding indien deze nauwkeurigheid niet binnen de 50 stappen wordt bereikt. De twee resterende wortels worden berekend uit de gereduceerde vergelijking, die wordt verkregen door vergelijking (12) te delen door $(S - S_1)$. De gereduceerde vergelijking wordt dan:

$$S^2 + (E+S_1)S + (F+ES_1 + S_1^2) = 0 \quad (13)$$

waarin: $E = -(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$

$$F = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_x^2 - \tau_y^2 - \tau_{xy}^2$$

De wortels hieruit zijn:

$$S_{2,3} = -\frac{1}{2}(E+S_1) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(E+S_1)^2 - (F+ES_1+S_1^2)} \quad (14)$$

Er wordt een foutmelding gegeven indien de vergelijking onder de wortel negatief blijkt te zijn. Om daarna toch nog te kunnen doorrekenen wordt het deel onder de wortel op nul gesteld. De drie berekende wortels worden op volgorde van groot naar klein gezet en gelijkgesteld met S_1 , S_2 en S_3 .

3.5. De subroutine PRINT

In de subroutine PRINT wordt de uitvoer naar de terminal en de outputfile verzorgd. Er wordt in aparte tabellen de hoofdspanningen S_1 en S_3 , de gemiddelde hoofdspanning SM, de verticale spanningen SIGMAV, de horizontale spanningen SIGMAX en SIGMAY en de schuifspanningen TAUX, TAUY en TAUXY in een bepaalde langs- c.q. dwarsdoorsnede gegeven.

3.6. Grafische uitvoer

Met behulp van de programma's PLOTSPAND en PLOTSPANL kunnen de contourlijnen van de spanningen in respectievelijk een dwarsdoorsnede of een lengtedoorsnede worden getekend. In de invoerfile moet achter-eenvolgend staan:

- De tekst onder de plot.
- Het aantal contourlijnen KH, de onderlinge horizontale afstanden DX tussen de punten en idem voor de verticale afstanden DY, de schaal-factor S.
- De spanningen H(K) waarvoor de contourlijnen moeten worden getekend.
- De matrix XY(IX, JX) met de spanningen. Deze matrix komt uit de uitvoerfile van SOCOMO.
- De tekst bij de contourlijnen.

Een voorbeeld van zo'n invoerfile is gegeven op de volgende bladzijde.

PLOTSPANL en PLOTSPAND zijn interactieve programma's. Na het opstarten van de programma's wordt de naam van de inputfile gevraagd.

LITERATUUR

- BOUSSINESQ, J. 1885. Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastique. Gauthier-Villais, Paris, geciteerd door Fröhlich.
- CARPENTER, T.G., N.R. FAUSSEY and R.C. REEDER, 1985. Theoretical Effect of Wheel Loads on Subsoil Stresses. Soil & Tillage Research, 6 (1985), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- FRÖLICH, O.K. 1934. Druckverteilung im Baugrunde. Verlag von Julius Springer, Wien.
- KOOLEN, A.J. and H. KUIPERS, 1983. Agricultural Soil Mechanics. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo.
- SÖHNE, W., 1953. Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. Grundlagen Landtechnik.
- TIMOSHENKO, S. and J.N. GOODIER, 1980. Theory of Elasticity, third edition. McGraw-Hill Book Company, New York, London.
- TSCHEBOTARIOFF, G.P., 1951. Soil mechanics, foundation and earth structures. McGraw-Hill Book Company, New York, London.

