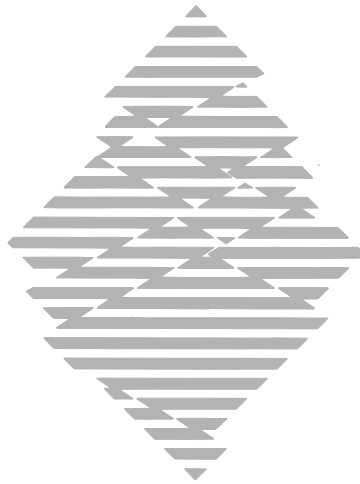


# GRONDMECHANICA

A. Verruijt & W. Broere



VSSD, 2012

©2012

Eerste druk 1983

Negende druk 2012

Uitgegeven door

Vereniging voor Studie- en Studentenbelangen te Delft

Leeghwaterstraat 42, 2628 CA Delft, The Netherlands

tel. +31 15 27 82124, telefax +31 15 27 87585, e-mail: [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

internet: <http://www.vssd.nl/hlf>

URL over dit boek: <http://www.vssd.nl/hlf/f046.htm>

Voor docenten die dit boek in cursusverband gebruiken zijn de illustraties en/of een elektronische versie van het boek digitaal beschikbaar. Men kan de collectie aanvragen bij [hlf@vssd.nl](mailto:hlf@vssd.nl)

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photo-copying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

Printed in the Netherlands.

NUR 956

Trefw.: grondmechanica

ISBN: 978-90-6562-274-7

# Inhoud

Symbolenlijst .....	ix
<b>1. Inleiding .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Classificatie .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Korrels, water, lucht .....</b>	<b>15</b>
<b>4. Spanningen in de grond .....</b>	<b>21</b>
<b>5. Spanningen in een laag .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Darcy .....</b>	<b>33</b>
<b>7. Doorlatendheid .....</b>	<b>41</b>
<b>8. Grondwaterstroming .....</b>	<b>45</b>
<b>9. Opdrijven .....</b>	<b>53</b>
<b>10. Vierkantennet .....</b>	<b>59</b>
<b>11. Bronbemaling .....</b>	<b>65</b>
<b>12. Spanning-rek-relaties .....</b>	<b>69</b>
<b>13. Tangent-moduli .....</b>	<b>77</b>
<b>14. Eendimensionale samendrukking .....</b>	<b>83</b>
<b>15. Consolidatie .....</b>	<b>89</b>
<b>16. Analytische oplossing .....</b>	<b>95</b>
<b>17. Numerieke oplossing .....</b>	<b>103</b>
<b>18. Bepaling consolidatiecoëfficiënt .....</b>	<b>109</b>
<b>19. Seculair effect .....</b>	<b>113</b>
<b>20. Schuifsterkte .....</b>	<b>119</b>
<b>21. Triaxiaalproef .....</b>	<b>127</b>
<b>22. Schuifproef .....</b>	<b>133</b>
<b>23. Celproef .....</b>	<b>139</b>
<b>24. Waterspanningen .....</b>	<b>143</b>
<b>25. Ongedraineerd gedrag van grond .....</b>	<b>151</b>
<b>26. Spanningspaden .....</b>	<b>157</b>
<b>27. Elastische berekeningen .....</b>	<b>163</b>
<b>28. Boussinesq .....</b>	<b>167</b>

29. Newmark .....	171
30. Flamant .....	175
31. Zettingsberekeningen .....	179
32. Horizontale gronddruk .....	183
33. Rankine .....	189
34. Coulomb .....	197
35. Tabellen voor horizontale gronddruk .....	203
36. Damwanden .....	211
37. Blum .....	219
38. Damwand in gelaagde grond .....	225
39. Grenstoestanden .....	231
40. Strokenfundering .....	235
41. Prandtl .....	241
42. Wrijvingsmaterialen en grenstheorema's .....	245
43. Brinch Hansen .....	249
44. Verticale ingraving in cohesief materiaal .....	255
45. Stabiliteit van oneindig talud .....	259
46. Glijvlakberekeningen .....	265
47. Terreinonderzoek .....	269
48. Modelonderzoek .....	277
49. Paalfunderingen .....	283
<b>Appendix A.</b> Spanningsleer .....	289
<b>Appendix B.</b> Elasticiteitstheorie .....	293
<b>Appendix C.</b> Plasticiteitstheorie .....	303
Antwoorden van opgaven .....	315
Literatuur .....	319
Index .....	320

# Voorwoord

Dit boek is de handleiding bij de colleges in de Grondmechanica van de Studierichting Civiele Techniek aan de Technische Universiteit Delft, zoals ik die gegeven heb van 1980 tot mijn pensionering in 2002. Het bevat een inleiding tot de belangrijkste begrippen en technieken van de grondmechanica, zoals de berekening van spanningen, vervormingen, en stabiliteit. Ook de meest gebruikte methoden voor de bepaling van grondeigenschappen passeren de revue. In een drietal appendices worden enige basisprincipes uit de mechanica behandeld. De hoofdstukindeling is zo dat elk hoofdstuk zo ongeveer in één uur behandeld kan worden.

In eerdere uitgaven van dit boek is met vrucht gebruik gemaakt van opmerkingen van gebruikers (vooral studenten), en is steeds een aantal fouten verbeterd. Op verschillende plaatsen zijn ook onder invloed van de nationale en internationale normalisatie notaties, of zelfs hele formules, veranderd. Door normalisatie kan de mechanica natuurlijk niet veranderen, maar bepaalde benaderingsformules of correlaties kunnen door discussies wel enigszins veranderen. De wetenschap staat overigens ook niet stil, en zo zijn diverse hoofdstukken aan actuele ontwikkelingen of voortschrijdend begrip aangepast. En onderdelen die bij studenten op moeilijkheden blijken te stuiten kunnen soms iets helderder worden uitgelegd.

Een belangrijke bijdrage in de productie van dit boek is geleverd door het programma  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ , van Donald Knuth, in de versie  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  van Leslie Lamport, dat een voortdurende bron van vreugde is geweest bij het tot stand komen en het onderhouden van het manuscript. Alle figuren zijn ook in  $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  vervaardigd, met de macro's  $\text{P}_{\text{T}}\text{C}_{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$ .

Het logo met de in twee richtingen afschuivende grond is ontworpen door Prof. dr. ir. G. de Josselin de Jong, die een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de ontwikkeling van de grondmechanica als tak van wetenschap, en van wie ik het vak heb geleerd.

Sinds 2001 is ook een versie van dit boek op internet beschikbaar, als de file GrondMech-Boek.pdf, op de website <<http://geo.verruijt.net>>. In de laatste versies is, met behulp van versie 6 van het programma  $\text{P}_{\text{T}}\text{C}_{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$ , de presentatie nog verbeterd, door de tekst soms om een figuur heen te laten lopen, en door gebruik te maken van kleuren.

Papendrecht, april 2010

A. Verruijt  
a.verruijt@verruijt.net

Naast de elektronische versie van “GrondMechBoek.pdf” die al jaren op de website van prof. Verruijt beschikbaar is, en geregeld geactualiseerd wordt, bestaat een duidelijke behoefte aan een gedrukte uitgave. Deze bewerking van de schermversie van 2010 probeert in die behoefte te voorzien en sluit aan bij de actuele stand van de colleges Grondmechanica.

Ten opzichte van de schermversie zijn een aantal hoofdstukken beperkt uitgebreid, onder meer met een uitgebreidere beschouwing van kruip en van dilatant grondgedrag. Verder is getracht om de gebruikte notatie in de verschillende hoofdstukken consistentier en meer in lijn met de internationaal gebruikelijke symbolen te krijgen. Deze twee eisen zijn echter strijdig, waardoor het dubbel gebruik van symbolen niet overal te vermijden is.

Deze uitgave is gemaakt op basis van de  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  broncode van prof. Verruijt. Om de oorspronkelijke  $\text{\PCTEX}$  figuren te zetten is gebruik gemaakt van de `pictexwd` macro's van Andreas Schrell. Nieuwe figuren zijn evenwel opge maakt met `METAPOST` van John Hobby en de `emp` macro's van Thorsten Ohl.

Voor het ter beschikking stellen van de  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  broncode en de vele waardevolle adviezen tijdens het totstandkomen van dit boek, ben ik dank verschuldigd aan prof. Verruijt. In de grondmechanica blijft hij de *leermeester* van wie ik het vak heb geleerd.

Delft, maart 2012

W. Broere

# Symbolenlijst

$A, B$	Skempton parameters
$C, C_{10}$	samendrukkingsconstante
$C_c, C_\alpha$	samendrukkingsindex
$C_u$	uniformiteitscoëfficiënt
$c$	cohesie
$c_v$	consolidatiecoëfficiënt
$D_{10}, D_{60}$	karacteristieke korreldiameter
$E$	elasticiteitsmodulus
$E_{\text{oed}}$	modulus bij zijdelingse opsluiting, oedometer modulus
$e$	poriëngetal
$F$	kracht
$G$	glijdingsmodulus
$h$	stijghoogte
$h_c$	capillaire stijghoogte
$i$	hydraulische gradiënt
$i_c, i_q, i_\gamma$	reductiefactoren voor belastinginclinatie
$j$	stromingsdruk
$K$	compressiemodulus
	coëfficiënt van horizontale gronddruk
$K_a, K_0, K_p$	actieve, neutrale en passieve gronddrukcoëfficiënt
$k$	doorlatendheid
$m_v$	samendrukbaarheid
$N_c, N_q, N_\gamma$	belastingconstante
$n$	porositeit
PI	plasticiteitsindex
$p$	waterspanning
$\tilde{p}$	isotrope spanning
$Q$	debiet
$q$	specifiek debiet
	verdeelde belasting
$RD$	relatieve dichtheid
$S$	verzadigingsgraad
	correctiefactoren voor de vorm van de belasting
$s_c, s_q, s_\gamma$	ongedraineerde schuifspanning
$s_u$	
$U$	consolidatiegraad

$W$	gewicht
$w$	watergehalte
$w_L$	vloei grens
$w_P$	plasticiteitsgrens
$\beta$	samendrukbaarheid van water
$\gamma$	volumegewicht
$\delta$	interface-wrijvingshoek
$\varepsilon$	rek
$\varepsilon_p$	primaire rek
$\varepsilon_s$	secundaire rek
$\varepsilon_{vol}$	volumerek
$\kappa$	intrinsieke doorlatendheid
$\mu$	(dynamische) viscositeit
$\nu$	dwarscontractiecoëfficiënt
$\rho$	dichtheid
$\sigma$	spanning, spanningstensor
	totaalspanning
$\sigma_c$	celdruk
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hoofdspanningen
$\sigma'$	effectieve spanning
$\tau$	schuifspanning
	deviatorspanning
$\tau_f$	kritische schuifspanning
$\Phi$	potentiaal
$\phi$	hoek van inwendige wrijving
$\Psi$	stroomfunctie
$\times_d$	van de droge of onverzadigde grond
$\times_g$	van de grond
$\times_k$	van het korrelmateriaal
$\times_n$	van de verzadigde grond
$\times_p$	van de poriën
$\times_w$	van de vloeistof
$\times_0$	in de begin- of referentietoestand, op $t = 0$



# Hoofdstuk 1

## Inleiding

### 1.1 Het vakgebied

*Grondmechanica* is de wetenschap van het evenwicht en de beweging van lichamen die bestaan uit grond. Onder grond wordt daarbij verstaan het verweerde materiaal waaruit de bovenste lagen van de aardkorst bestaan. Het niet-verweerde materiaal in de aardkorst noemt men rots, en de mechanica daarvan wordt bestudeerd in het vakgebied *rotsmechanica* of *gesteentemechanica*. Grofweg gesproken is het onderscheid tussen grond en rots dat men in grond met eenvoudige hulpmiddelen, zoals een spade, met de hand een kuil kan graven, en dat dat in rots niet lukt. Rots moet eerst met grof geweld, met een beitel en een hamer, of machinaal, verbrijzeld worden. Het natuurlijke verweringsproces van rots bestaat er uit dat rotsachtig materiaal door de eeuwenlange inwerking van zon, regenwater en wind verweert tot stenen. Daarbij speelt vaak ook een rol dat water hier en daar in spleten in de rots achterblijft, en dan bij bevriezing of dooi tot breuken leidt. De tamelijk grove stenen die in bergland ontstaan worden door de zwaartekracht, en vaak samen met water in de vorm van rivieren, afgevoerd naar beneden. Door onderlinge wrijving slijten de stenen geleidelijk af, waardoor het materiaal steeds ronder en fijner wordt: grind, zand en tenslotte slib. In stromende rivieren kan het meegevoerde materiaal bezinken, het meest grove materiaal al bij hoge snelheden, het meest fijne materiaal alleen bij heel lage snelheden. In de bedding van een rivier vindt men derhalve grof materiaal (grind) in de bovenrivier, en fijn materiaal als fijn zand en slib in het benedenstroomse gebied.

In het in de benedenstroom van Rijn en Maas gelegen Nederland wordt op vele plaatsen verweerd, en derhalve weinig samenhangend, materiaal aangetroffen, vooral zand en klei. Dat materiaal is veelal in vroeger tijden door Rijn en Maas afgezet in het toenmalige deltagebied. Ook is veel fijn materiaal afgezet bij overstromingen van het toen bestaande land door de zee of door rivieren. De Nijl zet ook thans nog regelmatig vruchtbaar slib af bij overstromingen. Nederlandse rivieren deden dat vroeger ook, maar door bedijking van de rivieren gebeurt dat nu niet meer. Het land wordt niet meer langs natuurlijke weg opgehoogd bij overstromingen, maar zakt nog wel, door langzame tektonische bewegingen. En de dijken worden steeds hoger en zwaarder om de zakking van het land te compenseren en om hogere waterstanden, die een gevolg zijn van zeespiegelrijzing, te keren. Dat proces zal eeuwig doorgaan, als Nederland bewoond wil blijven.

Op en in de zo ontstane grond wordt door mensen gebouwd, en het is de taak van de geotechnisch ingenieur om te voorspellen hoe de grond zich daarbij zal gedragen. Vragen die aan de orde kunnen komen zijn bijvoorbeeld : hoeveel een ophoging of een weglichaam zakt onder invloed van zijn eigen gewicht en door de nuttige belasting, wat de zekerheid tegen bezwijken is van een kerende constructie (een dijk, een kademuur, een damwand), hoe groot de belasting van de grond is op een constructie (een tunnel, een sluiswand), of hoe groot de

zijn. Daarmee kan dan redelijk geschat worden wat de grondopbouw is. Een ervaren ingenieur of geoloog kan daarmee vaak ook wel een eerste globale schatting geven van de mechanische eigenschappen van de grond. Ook andere kennis van de geologische geschiedenis kan van grote waarde zijn. Zo kunnen in delen van West-Europa die in een vroegere ijstijd door dikke lagen ijs bedekt zijn geweest lagen slappe klei sterk zijn samengedrukt, waardoor die lagen veel stijver en sterker zijn geworden dan soortgelijke lagen die nooit zijn voorbelast.

Het met enige nauwkeurigheid bepalen van de mechanische eigenschappen van de ondergrond is echter alleen goed mogelijk door onderzoek ter plaatse. Dat kan door de grond in het terrein (*in situ*) te onderzoeken, of door een monster te steken, en dat in het laboratorium te beproeven. Dat zal in dit boek uitgebreid aan de orde komen.

### Opgaven

**Opgave 1.1.** Bij hoog water in de Nederlandse rivieren, waarbij door zeer grote afvoer van de rivier het water bijna tot de kruin van de dijk stijgt, neemt men soms zijn toevlucht tot maatregelen als het leggen van zandzakken boven op de dijk. Is dat zinvol?

**Opgave 1.2.** Bij dreigende overstroming van een rivierdijk legt men ook wel grote lappen plastic op het talud van de dijk. Aan welke kant?

**Opgave 1.3.** Zal in de nabijheid van een diepe rivier de horizontale spanning in de grond klein zijn of juist groot?

**Opgave 1.4.** De bodem van de Noordzee is in het Noordelijke gedeelte vaak veel steviger dan in het Zuidelijke gedeelte. Hoe zou dat komen?

**Opgave 1.5.** Een mogelijke verklaring voor de scheefstand van de toren van Pisa is dat er in de ondergrond een laag slappe klei zit van variabele dikte. Aan welke kant zou die laag dan het dikst zijn?

**Opgave 1.6.** Een andere verklaring voor de scheefstand van de toren van Pisa is dat er in vroeger tijden (voor de aanvang van de bouw van deze toren in 1400) een ander zwaar bouwwerk heeft gestaan, met een bodemoppervlak dat niet precies samenvalt met dat van de nieuwe toren. Aan welke kant zou dat bouwwerk dan vermoedelijk gestaan hebben?

**Opgave 1.7.** De toren van de Oude Kerk in Delft, langs de Oude Delft, staat ook behoorlijk scheef. Hoe zou dat komen, en hoe zou men verdere scheefzakking technisch kunnen voorkomen?



Figuur 1.7: Pisa.



Figuur 1.8: Delft.

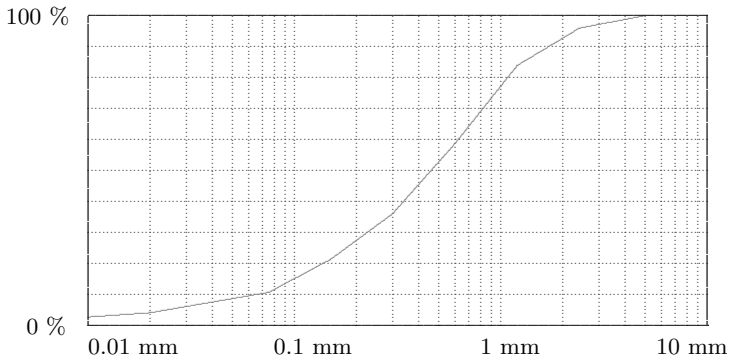
gedraagt dan zand bestaande uit afgesletten, meer ronde, deeltjes. Ook kan een mengsel van diverse korrelgroottes slecht doorlatend zijn doordat de kleinere deeltjes net in de poriën van de grotere passen.

Het globale karakter van de indeling naar korrelgrootte komt goed tot uiting in de in Duitsland wel gebruikte indeling, waarbij men zegt dat grind bestaat uit deeltjes kleiner dan een kippenei en groter dan een luciferkop, en dat de deeltjes van zand kleiner zijn dan een luciferkop, maar nog wel met het blote oog zichtbaar.

## 2.2 Korrelverdelingsdiagram

De grootte van de deeltjes in een bepaalde grond kan worden weergegeven in een zogenaamd *korrelverdelingsdiagram*, zie figuur 2.1. In een dergelijk diagram wordt aangegeven welk deel (uitgedrukt in gewichtsprocenten) kleiner is dan een bepaalde diameter.

Een steile kromme hoort bij een gelijkmatige grondsoort. Als de kromme flauw is betekent dit dat de grond deeltjes van sterk verschillende diameter bevat. Voor grove korrels, zeg groter dan 0.05 mm, kan men de korrelverdeling bepalen door te zeven. De gebruikelijke procedure is



Figuur 2.1: Korrelverdelingsdiagram.

om een aantal zeven van verschillende maaswijdten boven elkaar te plaatsen, met de zeef met de grootste openingen boven, en de fijnste zeef onder, zie figuur 2.2. Men vindt dan na enige tijd goed schudden met de hand of trillen met een trilmachine op elke zeef alleen nog de deeltjes die net groter zijn dan de mazen van die zeef en kleiner dan de mazen van alle zeven erboven. Op die manier kan men dan het korrelverdelingsdiagram bepalen. Er zijn voor die bepaling zeefmachines in de handel, en standaardzeven. Het voorbeeld van figuur 2.1 toont een normaal zand. Er zijn blijkbaar geen korrels groter dan 5 mm.

Om de korrelverdeling te beschrijven gebruikt men vaak de grootheden  $D_{60}$  en  $D_{10}$ . Die waarden geven aan dat 60 %, respectievelijk 10 % van de korrels (in gewichtshoeveelheden gemeten) kleiner is dan die waarde. In het geval van figuur 2.1 volgt uit de figuur dat  $D_{60} \approx 0.6$  mm, en  $D_{10} \approx 0.07$  mm. Het quotient van die twee waarden noemt men wel de *uniformiteitscoëfficiënt*  $C_u$ ,

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}. \quad (2.1)$$

In het geval van figuur 2.1 is dat ongeveer 8.5. Dat geeft aan dat de grond korrels van nogal verschillende grootte bevat. Men noemt dat een *goed gegradeerde* grond. Bij een *slecht gegradeerde* grond zijn de korrels bijna allemaal even groot. De uniformiteitscoëfficiënt is dan maar weinig groter dan 1, bijvoorbeeld  $C_u = 2$ .

Voor deeltjes kleiner dan ongeveer 0.05 mm kan men de korrelverdeling niet goed door zeven bepalen, omdat de gaatjes van de zeef dan wel erg onpraktisch klein worden, en omdat bij flink schudden de fijne deeltjes als stof in de lucht vliegen. Men kan dan het gehalte