



Koninklijke Landmacht

# Bodem- begaanbaarheid

Een onderzoek naar een  
mogelijkheid om de methodes  
voor het bepalen van de  
bezwijkspanning van de grond  
voor Defensie te standaardiseren

Cadet-Vaandrig M. Michielen

Studentnummer UT:

s1242784

Registratienummer (peoplesoft):

325836

Begeleider FMW (1e begeleider):

ing. D. Krabbenborg

Scriptiebegeleider KCG (2e begeleider):

Majoor Ing. N.A. de Haan

Datum:

Mei, 2014

Versie:

Definitief





# Voorwoord

Voor het afstuderen van de studie Civiele Techniek aan de Universiteit Twente en Nederlandse Defensie Academie dient een onderzoek te worden gedaan. In dit geval is het onderzoek uitgevoerd voor het Kenniscentrum Genie dat bij de Nederlandse Defensie Academie een vraag had openstaan over de verschillende methodes om de bezwijkspanning van de bodem te bepalen. Zou het, voor alle betrokken Defensie onderdelen, mogelijk zijn om naar één methode over te stappen en welke consequenties zijn hier dan aan verbonden?

Voor de beantwoording van deze vragen heb ik tijdens mijn onderzoek heb ik gebruik kunnen maken van alle beschikbare middelen van het Kenniscentrum. Ik ben de medewerkers van het Kenniscentrum daarvoor zeer dankbaar, evenals voor de gastvrijheid waarmee ik ben ontvangen. Tevens wil ik adjudant E.H. Slingerland en sergeant-majoor F.C. Groenewegen bedanken voor hun hulp en enthousiasme. Bij elke vraag en onduidelijkheid van mijn kant, waren zij altijd bereid mij zo goed en zo snel als mogelijk te helpen.

Mijn speciale dank gaat uit naar mijn begeleiders D. Krabbenborg en majoor N.H. de Haan.

Naast de hulp van mijn begeleiders wil ik ook nog mijn maatjes van 7kl bedanken voor de morele steun tijdens deze lange scriptieperiode.

Rest mij u nog veel leesplezier te wensen bij het lezen van mijn onderzoeksrapport.

Breda, mei 2014

M. Michielen  
Cadet-Vaandrig van het Wapen der Genie





# Samenvatting

## Aanleiding

Binnen Defensie worden verschillende methodes gebruikt om de bodem, en meer specifiek de draagkracht hiervan, tijdens een terreinverkenning te onderzoeken. Dit kan verschillende problemen opleveren. Er wordt inefficiënt gewerkt en de verschillende legereenheden kunnen elkaar mogelijk niet meer "verstaan" tijdens het uitwisselen van gegevens en het wordt lastig om de eenheid voor bodembegaanbaarheid te digitaliseren voor de toepassing in computermodellen. Om deze problemen te voorkomen is er een onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden van standaardisatie van het meten van de bezwijkspanning van de bodem. Het doel van het onderzoek is Defensie een advies geven over de methode voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem, waarbij Defensie, in de vorm van het Kenniscentrum Genie, als voorkeur heeft dat dit één enkele methode is.

## Aanbevolen wordt

- De bodem te classificeren volgens het unified soil classification system (USCS).
- De bezwijkspanning van de grond op twee manieren te bepalen. Eén methode om de opneembare dynamische belastingen te meten en één methode om de opneembare statische belasting te meten.
  - o De opneembare dynamische belasting aan de hand van de California Bearing Ratio (CBR) methode te meten.
  - o Wanneer één meetmethode gewenst is, de opneembare statische belasting aan de hand van de beddingsconstante afgeleid van de California Bearing Ratio te definiëren.
  - o Wanneer een nauwkeurige methode gewenst is, de opneembare statische belasting door middel van een (hand)sondering te meten.

## Motivatie

De USCS classificeert de bodem aan de hand van de plasticiteit en de korrelgrootte van de bodem. Dit maakt de USCS de meest nuttige en meest toegepaste manier om de bodem te classificeren. Een goede bodemclassificatie zorgt ervoor dat in een vroeg stadium enkele eigenschappen van de grond al bekend zijn. Defensie werkt al met deze methode en het advies is om hiermee door te gaan. Bovendien maken alle actoren waar Defensie mee samenwerkt, gebruik van de USCS.

Doordat er om uiteenlopende redenen gebruik wordt gemaakt van de bodem is het niet mogelijk om alles te meten met één methode. De bodem kan voor dynamisch gebruik, zoals voor wegen, vliegvelden of terreinrijden, niet op betrouwbare en nauwkeurige wijze op basis van metingen voor statisch belaste constructies bepaald worden en vice versa. De CBR-methode is voor Defensie een goede methode om de dynamische belastbaarheid van de grond te definiëren. Actoren waar Defensie veel mee samenwerkt, waaronder alle



luchtmachten binnen de NAVO, maken gebruik van deze methode. Verder is deze methode breed geaccepteerd in de civiele bouwsector.

Er worden twee mogelijkheden opgehouden om de opneembare statische belasting te bepalen. Door de opneembare statische belasting uit te drukken in de beddingsconstante is in de praktijk slechts één meting nodig, de CBR-meting. De beddingsconstante kan van deze waarde worden afgeleid. De opneembare statische belasting kan ook bepaald worden aan de hand van een (hand)sondering. Deze meting geeft een compleet beeld van de draagkracht van de bodem. De civiele bouwsector maakt veelvuldig gebruik van deze methode om de opneembare statische belasting van de bodem te bepalen.

### Consequenties

Door de opneembare statische belasting in de vorm van de beddingsconstante af te leiden van de CBR waarde hoeft slechts één meetmethode te worden toegepast. Met de CBR-methode kan op elk type grond metingen worden verricht naar de draagkracht hiervan. De CBR-methode heeft als nadeel dat de resultaten bij grondsoorten die een grotere korreldiameter hebben dan twee millimeter, minder nauwkeurig worden. Door de metingen op deze gronden minimaal drie keer te herhalen, blijft de nauwkeurigheid gegarandeerd.

De opneembare statische belasting kan vervolgens worden afgeleid uit de CBR-waarde in de vorm van de beddingsconstante. Het nadeel hiervan is dat er een mogelijke afwijking in de omrekenstabellen zit. Daarbij werkt elke meetfout in de CBR-proef ook door op de beddingsconstante. Dit kan tot gevolg hebben dat de afgeleide waardes niet overeenkomen met de werkelijkheid.

Daarnaast heeft de beddingsconstante als grote beperking het meetbereik. Dit gaat slechts tot één meter onder het maaiveld, mogelijke zwakkere grondlagen kunnen hierdoor gemist worden. Het gebruik van een (hand)sondering geeft voldoende informatie over de opbouw en draagkrachtige lagen van de grond, mits er diep genoeg gemeten wordt. Nadeel is wel dat dit een extra meting is en dus extra tijd kost ten opzichte van een afgeleide beddingsconstante.





# Inhoudsopgave

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Voorwoord                                                   | 1  |
| Samenvatting                                                | 2  |
| Inhoudsopgave                                               | 4  |
| 1. Aanleiding en probleemanalyse                            | 6  |
| 1.1 Doelstelling                                            | 8  |
| 2. Onderzoeksmodel                                          | 9  |
| 2.1 Onderzoeksvragen                                        | 10 |
| 2.2 Afbakening                                              | 11 |
| 3. Theorie grondeigenschappen                               | 12 |
| 3.1 Bodemclassificatie                                      | 13 |
| 3.1.1 Unified soil classification system                    | 14 |
| 3.2 Bodembegaanbaarheid                                     | 16 |
| 3.2.1 Bezwijkspanning van de bodem                          | 16 |
| 3.2.2 Elasticiteitsmodulus                                  | 23 |
| 3.3 Vergelijking meetmethodes                               | 26 |
| 3.3.1 Vergelijking meetmethodes voor dynamische belastingen | 26 |
| 3.3.2 Vergelijking meetmethodes voor statische belastingen  | 26 |
| 4. Actoren                                                  | 28 |
| 4.1 Landmacht                                               | 29 |
| 4.2 Luchtmacht                                              | 29 |
| 4.3 Internationale partners                                 | 30 |
| 4.4 Civiele instanties                                      | 30 |
| 4.4.1 Infrastructuur                                        | 30 |
| 4.4.2 Constructies                                          | 31 |
| 4.5 Eisen                                                   | 31 |
| 4.6 Deelconclusie                                           | 32 |
| 4.7 Consequenties                                           | 34 |
| 4.7.1 Dynamische belastingen                                | 34 |
| 4.7.2 Statische belastingen                                 | 35 |
| 5. Conclusie                                                | 36 |
| 5.1 Eerste onderzoeksvraag                                  | 37 |
| 5.2 Tweede onderzoeksvraag                                  | 37 |
| 5.3 Derde onderzoeksvraag                                   | 38 |



|                   |    |
|-------------------|----|
| 6. Aanbeveling    | 41 |
| 6.1 Aanbeveling 1 | 42 |
| 6.2 Aanbeveling 2 | 42 |
| 6.3 Aanbeveling 3 | 42 |
| Bibliografie      | 43 |





Koninklijke Landmacht

# 1. Aanleiding & Probleemanalyse

## 1.1 Doelstelling



# 1. Aanleiding en probleemanalyse

Om het werk van militairen eenvoudiger te maken zijn er binnen Defensie instructiekaarten (IK's). Sommige IK's, waaronder de IK voor terreinverkenningen, bestaan al lang en de achterliggende rekenmethoden zijn vaak niet meer helder. Het gevolg hiervan is dat er discussies ontstaan over de betrouwbaarheid in relatie tot moderne middelen, veranderde werkwijzen en nieuwe ontwikkelingen op het gebied van de grondmechanica. Omdat de IK voor terreinverkenning nog veelvuldig gebruikt wordt, maar sterk verouderd is en er allerlei ontwikkelingen zijn op het gebied van terreinverkenningen, is het door het Kenniscentrum Genie noodzakelijk geacht de gegevens van de IK te herzien.

Een van de aanzetten om tot dit besluit te komen, is dat Defensie zes jaar geleden is begonnen met het digitaliseren van alle (verkennings-)rapportages en IK's. Het doel hiervan is om in ieder voertuig een systeem te plaatsen dat precies berekent of het voertuig zich over de gegeven locatie kan verplaatsen. Voordat dit mogelijk is moeten er veel parameters gestandaardiseerd worden. Eén van die parameters is de eenheid waarmee de gronddruk, of de bezwijkspanning van de grond, wordt uitgedrukt (Cinicioglu, 2012).

Een onderdeel van de terreinverkenning is het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem. Op dit moment maakt Defensie gebruik van verschillende methoden om de begaanbaarheid van een terrein te kwalificeren. De Defensie Materieel Organisatie (DMO) maakt gebruik van de vehicle cone index (VCI). De luchtmobiele brigade en de luchtmacht maken gebruik van het unified soil classification system (USCS) en Bureau Geniewerken (GNW) werkt met standaard constructies zodat men weinig rekening hoeft te houden met verschillende grondsoorten. Met andere woorden; om een bepaald terrein te verkennen zijn nu meerdere onderzoeksmethoden nodig voordat alle legereenheden weten of het terrein voor hun materieel geschikt is. Een bijkomend nadeel van de drie verschillende werkwijzen is dat de legereenheden elkaar niet meer "verstaan". Dit probleem kan zich voordoen als er tussen de verschillende legereenheden gegevensuitwisselingen plaats vindt. Behalve interne samenwerking, vindt er ook samenwerking met buitenlandse legereenheden plaats. Het is door bezuinigingen en een veranderde wereld, voor een kleine defensieorganisatie, zoals die van Nederland, vrijwel niet meer mogelijk om alleen op te treden. Wanneer een standaardisatie van bodemverkenning binnen de Nederlandse krijgsmacht wordt doorgevoerd, is het daarmee ook wenselijk dat dit aansluit op de mogelijk aanwezige militaire internationale standaard.



Tegelijk wordt er binnen de civiele bouwwereld ook veel gewerkt met de bezwijkspanning van de bodem en bepaling van verschillende grondsoorten. Voor deze bedrijven is de kennis van de grond nodig voor de constructie van onder andere infrastructuur en gebouwen. Daar Defensie steeds meer samenwerking aangaat met civiele instanties is het ook van belang dat er bij voorkeur “één taal” gesproken wordt. Gebruik van dezelfde onderzoeksmethoden is ook hier dus wenselijk.

Er zijn verschillende methoden voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem, en dit kan, zoals hierboven beschreven, voor problemen zorgen. Wanneer, en indien mogelijk, binnen Defensie wordt gekozen voor één methode voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem kan er wellicht efficiënter gewerkt worden. Dit resulteert onder andere in tijdwinst en minder communicatieproblemen tussen de verschillende betrokken partijen.

Wanneer dit niet wordt gedaan, gaat het ten koste van de efficiëntie en de betrouwbaarheid van de bodemverkenning. Als Defensie in de toekomst een systeem ontwikkelt dat bepaalt of een voertuig wel of niet over een bepaald terrein kan rijden en er geen standaardisatie van eenheden heeft plaatsgevonden, zal dit extra ongemakken opleveren.

In deze scriptie wordt onderzocht of het mogelijk is om één methode te gebruiken die voor elk inzetgebied van Defensie bruikbaar is om de bezwijkspanning van de gronddruk en bijbehorende grondsoort te bepalen.

## 1.1 Doelstelling

De doelstelling van het onderzoek luidt:

Een wetenschappelijk onderbouwd advies uitbrengen over welke methode voor defensie het meest geschikt is om de bezwijksoanning van de bodem te bepalen, door middel van een analyse van de verschillende militaire en civiele methode.





Koninklijke Landmacht

# 2. Onderzoeks model

**2.1 Onderzoeksvragen**  
**2.2 Afbakening**



## 2. Onderzoeksmodel

In de eerste kolom van figuur 1 wordt weergegeven op basis waarvan het theoretisch raamwerk wordt ontwikkeld. Dit wordt gedaan door middel van literatuurstudies over de theorieën die betrekking hebben op methoden voor de bepaling van de bezwijkspanning van de bodem. In deze fase wordt ook een vooronderzoek gedaan. Hierin worden gesprekken gevoerd met personen binnen en buiten Defensie die betrokken zijn bij bodemverkenningen. De literatuurstudie en het vooronderzoek leiden tot beoordelingscriteria ten aanzien van het bepalen van de bodembegaanbaarheid.



Figuur 1: Onderzoeksmodel Terreinverkenningen.

Na het verkrijgen van theoretische kennis in de eerste kolom, wordt in de tweede kolom geëvalueerd welke methode met betrekking tot het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem het meest geschikt is voor de gestelde beoordelingscriteria. In de derde kolom wordt een conclusie en aanbeveling gegeven op basis van de in kolom twee gevonden bevindingen.

### 2.1 Onderzoeksvragen

Aan de hand van het onderzoeksmodel worden onderzoeksvragen opgesteld. Door deze vragen te beantwoorden zal de doelstelling van het onderzoek, die eerder is behandeld, geprobeerd worden te behalen.

Om de doelstelling van het onderzoek te behalen worden drie centrale vragen opgesteld die vervolgens worden opgesplitst in deelvragen.



- I. Welke actoren hebben baat bij het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem?
  - a. Wat is het nut van het bepalen van de bodemspanning voor deze actoren?
- II. Welke criteria kunnen worden geformuleerd voor de beoordeling van een goede bepaling van de bezwijkspanning tijdens een terreinverkenning?
  - a. Welke criteria stellen deze actoren aan het bepalen van de bezwijkspanning?
  - b. Wat zijn de belangrijkste criteria van deze actoren?
- III. Wat zijn de voor- en nadelen van de verschillende methoden voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem in het licht van de gestelde beoordelingscriteria?
  - a. Welke methoden voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem hanteren de actoren?
  - b. In hoeverre voldoen deze methoden aan de gestelde beoordelingscriteria?

## 2.2 Afbakening

Vanwege de beperkte tijd die beschikbaar is voor het uitvoeren van een onderzoek voor een bachelor scriptie worden in deze paragraaf enkele afbakeningen gemaakt om het onderzoek uitvoerbaar te houden.

In het onderzoek worden de verschillende gangbare methodes om de bezwijkspanning van de bodem te bepalen met elkaar vergeleken. Dit zijn methodes die al ontwikkeld zijn en op het moment van schrijven worden gebruikt om de bezwijkspanning van de bodem te bepalen. Deze keuze is gemaakt omdat er in dit onderzoek geen nieuwe methodes worden ontwikkeld. De gekozen methode moet zich in de praktijk al hebben bewezen.

De actoren die in dit onderzoek worden betrokken zijn actoren binnen en buiten Defensie. De actoren zullen binnen Defensie beperkt worden tot de luchtmacht, manoeuvre-eenheden, constructie-eenheden en (genie-)inlichtingen-eenheden.

De actoren buiten Defensie zijn internationale partners zoals de NAVO of, meer specifiek, het Amerikaanse leger. Er is gekozen omwille van de beperkte tijd van het onderzoek alleen naar deze partners gekeken. De individuele NAVO-partners worden buiten beschouwing gelaten. Enkel de geldende NAVO-doctrines worden bestudeerd. Dit is gedaan vanwege de omvang van deze actoren. Defensie zal, naar verwachting, bij (bijna) elk optreden met deze actoren te maken hebben.

Als laatste actor wordt de civiele (bouw)sector meegenomen. Deze actor wordt ingedeeld op werkgebied te weten infrastructuur en constructies. Er is voor deze twee werkgebieden gekozen omdat Defensie bij de bouw van compounds, basis op uitzendgebied, ook gebruik maakt van deze twee werkgebieden. De infrastructuur wordt opgedeeld in, en tegelijk beperkt tot, wegen en start- en landingsbanen. De constructies beperken zich tot constructies die door Defensie gebruikt worden. Dit zijn 20-voetscontainers, woonchalets, Hescowallen en aardewallen.



Koninklijke Landmacht

# 3 Theorie grondeigenschappen

## **3.1 Bodemclassificatie**

### **3.1.1 Unified Soil Classification system**

## **3.2 Bodembegaanbaarheid**

### **3.2.1 Bezwijkspanning van de bodem**

### **3.2.2 Elasticiteitsmodules**

## **3.3 Vergelijking meetmethodes**

### **3.3.1 Vergelijking meetmethodes voor dynamische belastingen**

### **3.3.2 Vergelijking meetmethodes voor statische belastingen**





# 3. Theorie grondeigenschappen

Kennis over de eigenschappen van de bodem heeft een wezenlijk belang voor het optreden van de militair. Het terrein bepaalt de mate waarin de legereenheden zich kunnen verplaatsen. De toestand van de bodem kan een grote invloed hebben op de mobiliteit van legereenheden. Voor deze eenheden is het van belang dat zij weten welk terrein wel en welk terrein niet geschikt is voor hun voertuigen. De terreinbegaanbaarheid van de legereenheden is essentieel. Bij terreinbegaanbaarheid wordt uitgegaan van verplaatsingen door het terrein waarbij elementen als waterlopen, vegetatie, reliëf en dergelijke worden meegenomen. Daarnaast spelen de eigenschappen van de bodem een belangrijke rol. Om deze eigenschappen inzichtelijk te maken, wordt de grond geclassificeerd. Hierdoor kan het gedrag van de grond onder verschillende belastingen worden voorspeld. Dit is noodzakelijk om een accurate inschatting te kunnen maken van de bodemeigenschappen. Dit wordt behandeld in de paragraaf bodemclassificatie.

Een onderdeel van terreinbegaanbaarheid is bodembegaanbaarheid. Bij bodembegaanbaarheid moet worden vastgesteld of de bodem draagkrachtig genoeg is om het voertuig te kunnen dragen en om manoeuvres met voertuigen uit te voeren zoals draaien en keren (OTC Genie, 2013).

In de paragraaf bodembegaanbaarheid wordt ingegaan op de bezwijkspanning van de bodem en hoe deze bepaald kan worden.

## 3.1 Bodemclassificatie

De bodem bestaat uit verschillende fasen: een vaste fase (de minerale deeltjes en organische stoffen), een vloeistoffase (bodewater) en een gasfase (bodemplucht). De verdeling van deze fasen kan zeer verschillend zijn. De rangschikking van bodemdeeltjes wordt de structuur van de bodem genoemd. De structuur wordt in stand gehouden door kitstoffen zoals klei, organische stof, ijzeroxide en water. Met de diepte wordt de bodem meer compact en verdwijnt de structuur in een dichte pakking van bodemdeeltjes (Augustijn, 2013). De fases, stoffen en korrelgrootteverdeling in de bodem bepalen de eigenschappen van de grond zoals de draagkracht, zwel- en krimpvermogen, doorlatendheid en bewerkbaarheid.

De bodem kan door middel van een bodemclassificatiesysteem op verschillende manieren in grondsoorten ingedeeld worden. De hoofddoelstelling van een bodemclassificatiesysteem is het voorspellen van de grond mechanische eigenschappen en het gedrag van de bodem op basis van een paar laboratorium of veldproeven (US Army, 1997). Er zijn verschillende methoden om de bodem te classificeren. De drie meest voorkomende methoden zijn de U.S. Department of Agriculture (USDA) Textural system, de unified soil classification system



(USCS) en het American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) classification system. De USCS is de meest handige en nuttige methode voor het gebruik van bodemclassificatie, daarom wordt niet verder ingegaan op de USDA en AASHTO methodes (Rollings & Rollings, 1996). Wanneer de bodemclassificatie goed is toegepast, kan zonder het uitvoeren van een daadwerkelijke meting, al een grove uitspraak over de draagkracht van de grond worden gedaan.

### 3.1.1 Unified soil classification system

De USCS methode is oorspronkelijk ontwikkeld voor de constructie van militaire vliegvelden en is gebaseerd op het gedrag van de bodem. Er wordt onderscheid gemaakt in drie hoofdcategorieën (US Army, 1997).

- |    |                |         |                |
|----|----------------|---------|----------------|
| 1. | Coarse-grained | oftewel | grofkorrelig   |
| 2. | Fine-grained   | oftewel | fijnkorrelig   |
| 3. | Highly organic | oftewel | zeer organisch |

Deze hoofdcategorieën zijn in vervolgens onderverdeeld in een twee lettersysteem (zie figuur 2) (Verruijt, 2001). Hierin zijn G (grind) en S (zand) grof korrelig, M (silt) en C (klei) fijn korrelig en O (organisch) en Pt (veen) organisch. De tweede kolom geeft grofweg de eigenschappen van de grond weer. Als voorbeeld kan grond van het type SM worden genomen. Dit is silt-houdend zand, dat is een zandsoort die een behoorlijke hoeveelheid niet-organische zeer fijne deeltjes bevat.

| Eerste letter |         | Tweede letter |                 |
|---------------|---------|---------------|-----------------|
| G             | gravel  | W             | well graded     |
| S             | sand    | P             | poorly graded   |
| M             | silt    | M             | silty           |
| C             | clay    | C             | clayey          |
| O             | organic | L             | low plasticity  |
| Pt            | peat    | H             | high plasticity |

Figuur 2: Indeling USCS Systeem.



In tabel 1 is een voorbeeld gegeven van de eigenschappen van enkele USCS geclassificeerde gronden.

Tabel 1: Grondeigenschappen enkele USCS gronden

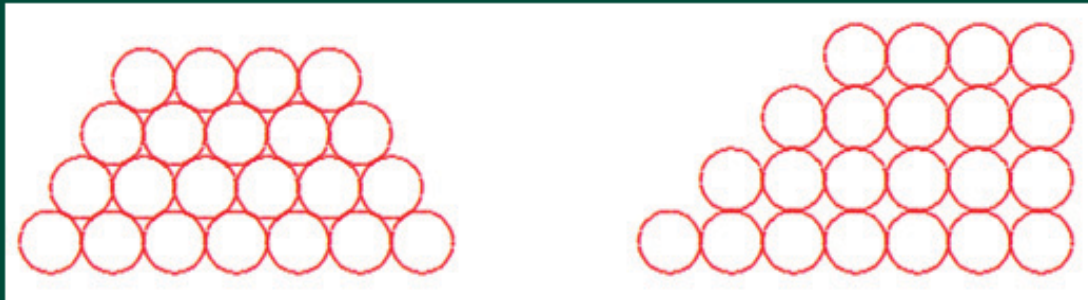
| USCS symbol | Typical names                    | Distinguishing characteristics for visual identification                                                          | Typical range of laboratory test results                                                                                                                  |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PT          | Fibrous peat (woody, mats, etc.) | Light weight and spongy. Shrinks considerably on air drying. Much water squeezes from sample.                     | $w = 500$ to $1200\%$<br>$\gamma_t = 9.4$ to $11 \text{ kN/m}^3$ (60 to 70 pcf)<br>$G = 1.2$ to $1.8$<br>$C_c/(1 + e_0) \geq 0.40$                        |
| PT          | Fine-grained peat (amorphous)    | Light weight and spongy. Shrinks considerably on air drying. Much water squeezes from sample.                     | $w = 400$ to $800\%$ $PI = 200$ to $500$<br>$\gamma_t = 9.4$ to $11 \text{ kN/m}^3$ (60 to 70 pcf)<br>$G = 1.2$ to $1.8$<br>$C_c/(1 + e_0) \geq 0.35$     |
| PT          | Silty peat                       | Relatively light weight, spongy. Shrinks on air drying. Usually can readily squeeze water from sample.            | $w = 250$ to $500\%$ $PI = 150$ to $350$<br>$\gamma_t = 10$ to $14 \text{ kN/m}^3$ (65 to 90 pcf)<br>$G = 1.8$ to $2.3$<br>$C_c/(1 + e_0) = 0.3$ to $0.4$ |
| PT          | Sandy peat                       | Sand fraction visible. Shrinks on air drying. Often a "gritty" texture. Usually can squeeze water from sample.    | $w = 100$ to $400\%$ $PI = 50$ to $150$<br>$\gamma_t = 11$ to $16 \text{ kN/m}^3$ (70 to 100 pcf)<br>$G = 1.8$ to $2.4$<br>$C_c/(1 + e_0) = 0.2$ to $0.3$ |
| OH          | Clayey organic Silt              | Often has strong hydrogen sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) odor. Medium dry strength and slow dilatency.          | $w = 65$ to $200\%$ $PI = 50$ to $150$<br>$\gamma_t = 11$ to $16 \text{ kN/m}^3$ (70 to 100 pcf)<br>$G = 2.3$ to $2.6$<br>$C_c/(1 + e_0) = 0.2$ to $0.35$ |
| OL          | Organic sand or Silt             | Threads weak and friable near plastic limit, or will not roll at all. Low dry strength, medium to high dilatency. | $w = 30$ to $125\%$ $PI = NP$ to $40$<br>$\gamma_t = 14$ to $17 \text{ kN/m}^3$ (90 to 110 pcf)<br>$G = 2.4$ to $2.6$<br>$C_c/(1 + e_0) = 0.1$ to $0.25$  |

Om de bodem te kwalificeren kunnen verschillende veldtesten en laboratoriumtesten worden uitgevoerd. Er wordt daarbij getest op dilatantie, droge sterkte en taaheid van de grond. Dilatantie is een volumevergroting ten gevolge van afschuiving en dit gaat vaak gepaard met ongewilde of onverwachte hoekvervormingen van grond. Los zand heeft de tendens om dichter te worden, en vast gepakt zand kan eigenlijk alleen maar vervormen als het tegelijk wat losser wordt. Een dichte stapeling van korrels zal bij afschuiving van de ene laag over de andere in volume uitzetten, zie figuur 3. De ruimte tussen de korrels neemt daarbij toe (Verruijt, 2001).

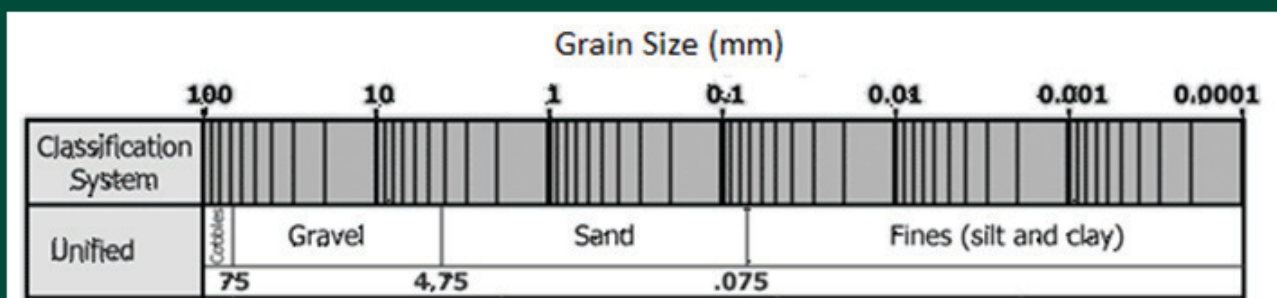
Droge sterkte is de weerstand tegen verkrumeling of verpulvering als de stof watervrij is. Taaheid zegt iets over de manier waarop materiaal onder mechanische belasting bezwijkt. Taai materiaal zal onder toenemende belasting plastisch vervormen. De belasting op het materiaal kan nog toenemen zonder dat het materiaal bezwijkt. Bros materiaal, het tegenovergestelde van taai, zal niet plastisch vervormen, maar direct bezwijken.



Behalve op basis van deze eigenschappen wordt de grond ook gecategoriseerd op basis van korreldiameters (Verruijt, 2001). In figuur 4 is een indeling op basis van de korreldiameter weergegeven.



Figuur 3: Dilatantie.



Figuur 4: Indeling op basis van korreldiameter.

Omdat de USCS onderscheid maakt in zowel de korreldiameter als de plasticiteitskarakteristieken van grond is deze manier zeer goed voor het kwalificeren van de grond. Uit verschillende testen blijkt dat USCS de meest nuttige en bruikbare resultaten geeft voor het voorspellen van het gedrag van de grond ten opzichte van andere methodes (Rollings & Rollings, 1996).

### 3.2 Bodembegaanbaarheid

Een onderdeel van terreinbegaanbaarheid is bodembegaanbaarheid. Bij bodembegaanbaarheid moet worden vastgesteld of de bodem draagkrachtig genoeg is om het voertuig te kunnen dragen en om manoeuvres met voertuigen uit te voeren zoals draaien en keren (OTC Genie, 2013).

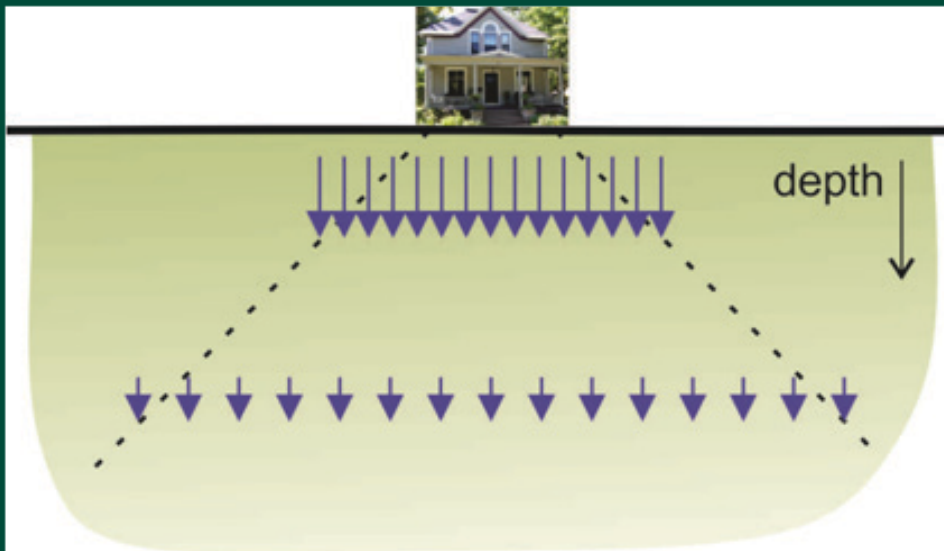
#### 3.2.1 Bezwijkspanning van de bodem

De draagkracht kan op verschillende manieren bepaald worden. Een methode om dit te bepalen is het uitvoeren van een sondering. Tijdens een sondering wordt de indringingsweerstand van de bodem gemeten. Door een staaf de grond in te drukken wordt de weerstand van de grond op de punt en langs het oppervlak van de staaf gemeten (Verruijt, 2001).



Een andere methode is de Standard Penetration Test (SPT). Tijdens een SPT wordt een monsterbus in een boorgat de grond in geslagen met behulp van een standaard valgewicht. Gemeten wordt het aantal slagen dat nodig is om de steekbus een bepaalde diepte de grond in te drijven. Aan de hand van het aantal gemeten slagen, de blow count, wordt de draagkracht van de grond bepaald (Verruijt, 2001).

De (statische) belasting van objecten oefenen tot een bepaalde diepte invloed uit op de diepere grondlagen. Deze krachten- en spanningsafdracht vinden plaats onder een hoek van 45 tot 60° en is afhankelijk van de grondsoort (Hack, 2012), zie figuur 5. Wanneer de grond niet draagkrachtig genoeg is om de krachten en spanningen af te dragen zal de bodem bezwijken. In de grondmechanica wordt uitgegaan dat een druk van 200 kPa door iedere grondlaag afgedragen kan worden (TU Delft, 2004). Wanneer een object 200 kPa of minder op de grond levert zal dit object blijven staan en bezwijkt de grond niet.



Figuur 5: Krachten en spanningsafdracht door de grond.

In de volgende subparagrafen worden de voor- en nadelen van de methodes behandeld.

### California bearing ratio

Een voorbeeld van de SPT is de California bearing ratio (CBR). CBR is in de jaren 20 van de vorige eeuw ontwikkeld voor the California Highway Department en is oorspronkelijk ontwikkeld om de opneembare dynamische belasting van de bodem te bepalen ten behoeve van de constructie van wegen. De CBR wordt in procenten uitgedrukt ten opzichte van kalkzandsteen dat een CBR-waarde van 100% heeft.

In tabel 2 zijn per grondsoort de karakteristieke CBR-waardes weergegeven. De grondsoorten zijn weergegeven volgens het USCS-classificatiesysteem en andere grondeigenschappen aangevuld met enkele specifieke karakteristieken (Rollings & Rollings, 1996).





Tabel 2: Karakteristieke CBR-waardes uitgezet tegen USCS.

| Description of material                                   | CBR, % |
|-----------------------------------------------------------|--------|
| Wet clay soil where thumb penetration into the soil is    |        |
| Easy                                                      | <1     |
| Possible                                                  | 1      |
| Difficult                                                 | 2      |
| Impossible                                                | 3+     |
| A trace of a footprint is left by a walking man           | 1      |
| Typical base and subbase materials                        |        |
| Well-graded crushed aggregates                            | 100    |
| Dry-bound and water-bound macadam                         | 100    |
| Well-graded natural gravels                               | 80     |
| Limerock                                                  | 80     |
| Shell and sand mixtures                                   | 50–80  |
| Coral                                                     | 80     |
| Shell rock (marine deposit of hard, cemented shells)      | 80     |
| Gravelly sands (predominately sand)                       | 20–50  |
| Silty or clayey sands                                     | 10–40  |
| Fine clean sands                                          | 10–20  |
| Classification by Unified Soil Classification             |        |
| GW: gravel or sandy gravel                                | 60–80  |
| GP: gravel or sandy gravel                                | 35–60  |
| GM: silty gravel or silty, sandy gravel                   | 40–80  |
| GC: clayey gravel or sandy, clayey gravel                 | 20–40  |
| SW: sand or gravelly sand                                 | 20–50  |
| SP: sand or gravelly sand                                 | 10–25  |
| SM: silty sand                                            | 20–40  |
| SC: clayey sand                                           | 10–20  |
| CL: lean clays, sandy clays, gravelly clays               | 5–15   |
| ML: silts, sandy silts, diatomaceous soils                | 5–15   |
| OL: organic silts, lean organic clays                     | 4–8    |
| CH: fat clays                                             | 3–5    |
| MH: plastic silts, micaceous clays, or diatomaceous soils | 4–8    |
| OH: fat organic clays                                     | 3–5    |
| Pt: peat and highly organic soils                         | <1     |

De CBR-methode kan gebruikt worden voor korte termijn en lange termijn toepassingen. Als een CBR-test voor de lange termijn wordt uitgevoerd, moet de test aan één van de volgende drie voorwaarden voldoen (ASTM International, 2004).

1. De verzadigingsgraad van de grond moet minimaal 80% zijn.
2. De grond moet grofkorrelig en niet-cohesief zijn.
3. De afgelopen twee jaar is geen grondverbetering uitgevoerd op de bodem.

De CBR-methode geeft de meest nauwkeurige meetresultaten als de korreldiameter niet groter is dan twee millimeter. Wanneer grond met een grote korreldiameter wordt getest aan de hand van de CBR-methode, zijn de resultaten van de proef over het algemeen slecht reproduceerbaar en daardoor minder betrouwbaar (Rollings & Rollings, 1996). Dit geldt vooral voor gronden waar weinig tot geen cohesie aanwezig is. Om een beter beeld van de grond te krijgen dient de test minimaal drie keer herhaald te worden.

Grind is hier een goed voorbeeld van een dergelijke grond. De waardes zitten tussen waardes van minimaal 20% (grondsoort GC) tot maximaal 80% (grondsoort GW). Is in het geval van een CBR-waarde van 20% mogelijk slechts één beladen F-16 landen te laten landen, kan bij een CBR-waarde van 80% een beladen Boeing 747 landen (NATO Standardization Agency,



2008). Bij deze grondsoorten is het van belang om extra metingen uit te voeren om een beter beeld van de bodem te krijgen.

De CBR-test kan zowel in een laboratorium als in het veld worden uitgevoerd. Als laboratoriummonsters getest worden gaat het vrijwel altijd over één, met water verzadigde, grondsoort. Wanneer in het veld wordt getest zal snel een mix van verschillende materialen worden gemeten. Hierdoor is een veldmeting realistischer en geeft de meting daardoor de meer bruikbare informatie dan een laboratoriumtest (Rollings & Rollings, 1996).

Hoewel de CBR-methode een sterkte-index van de grond geeft, is het eigenlijk geen sterktemeting. De CBR-test meet de weerstand van de grond wanneer de grond wordt ingedrukt. Deze resultaten worden vervolgens vergeleken met een standaard waarde. Uit deze vergelijking volgt de sterkte voor de gemeten grond (Rollings & Rollings, 1996) (TIC Service Group, 2011).

De grootste voordelen van de CBR-methode zijn:

- De methode resulteert in snelle en bruikbare resultaten voor het ontwerp van airstrips en wegen.
- De test is gemakkelijk uit te voeren door personeel met weinig ervaring en training.
- De test is ontworpen voor in-situ testen.

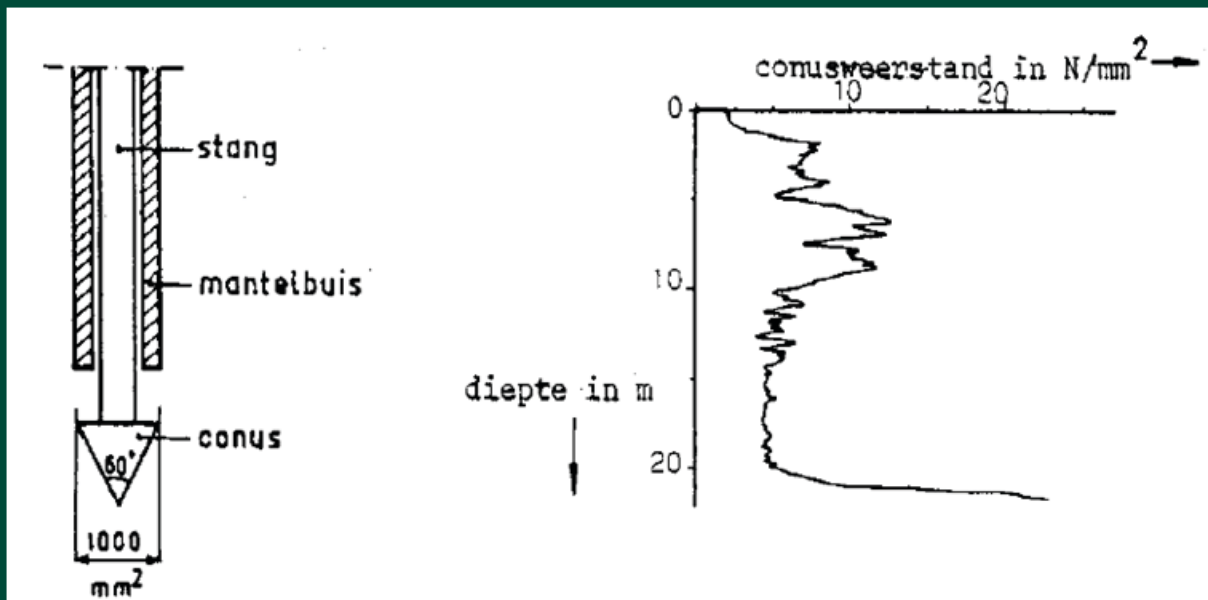
Belangrijke nadelen aan de CBR-methode zijn:

- De laboratoriumtest en veldtest geven niet dezelfde waardes. Dit gaat ten koste van de nauwkeurigheid.
- Wanneer een grond, met grotere korreldiameters dan twee millimeter, wordt beproeft, zijn de meetresultaten slecht reproduceerbaar. Dit gaat ten koste van de betrouwbaarheid. Door de meting vaker uit te voeren, zal de betrouwbaarheid toenemen. Het minimum aantal herhalingen is drie.

### **Conusweerstand**

Een sondering is een methode om de draagkracht van de grond te bepalen. Er zijn twee manieren om een sondering uit te voeren, machinaal of met de hand. Naast sondering wordt vaak de term penetrometrie gebruikt.

Penetrometrie is een snelle en eenvoudige methode waarin een staaf de grond in wordt gedrukt. De kracht waarmee de staaf de grond in wordt gedrukt, wordt uitgezet tegen de diepte. Die kracht bestaat uit de weerstand van de grond aan de punt (conus) en, bij machinale sonderingen, langs het oppervlak van de staaf. De methode meet de maximale statische belasting op de bodem. In figuur 6 is weergegeven hoe een staaf er in essentie uitziet. Afwisselend worden de stang en mantelbuis de grond in gedrukt. Bij het drukken op de stang wordt alleen de conus een bepaalde afstand de grond in gedrukt. De mantelbuis verplaatst zich niet. De kracht die wordt gemeten is puur de conusweerstand. Wanneer de conus nog verder de grond in wordt gedrukt, zal ook de mantelbuis verder de grond in worden gedrukt. Nu worden zowel de conusweerstand als de mantelwrijving gemeten. De eenheid van de conusweerstand wordt normaliter uitgedrukt in N/mm<sup>2</sup> of MegaPascal (MPa) (Verruijt, 2001). Een veel gebruikt synoniem voor de conusweerstand is de conus index (CI). De CI wordt onder andere gebruikt voor de vehicle cone index (VCI) (Herrick & Jones, 2002).



Figuur 6: Detail staaf voor het bepalen van de conusweerstand.

Wanneer een sondering machinaal wordt uitgevoerd met bijvoorbeeld een sondeerwagen, wordt er, behalve dieper, ook meer gemeten dan de conusweerstand en mantelwrijving. Zo kan de waterspanning worden gemeten evenals de schuifsterkte, horizontale korrelspanningen de relatieve dichtheid van de bodem. Hoewel machinaal sonderen met een sondeerwagen een stuk betrouwbaarder en informatiever is dan een handsondering, is deze manier van meten niet geschikt voor militaire toepassingen.

Het, op handmatige wijze, bepalen van de conusweerstand heeft een aantal voor- en nadelen (Herrick & Jones, 2002). Hieronder worden de belangrijkste kort opgesomd.

#### Voordelen:

- Afhankelijk van de methode en meetmiddelen is de test gemakkelijk uit te voeren door personeel met weinig ervaring en training.
- De test is snel uit te voeren en het resultaat kan direct gebruikt worden.
- Afhankelijk van de meetmiddelen kunnen metingen tot zeer diep de grond in gaan.

#### Nadelen:

- De staaf moet met een constante snelheid de grond in worden gedrukt. Als dit niet gebeurt, kunnen er onjuiste grote waarden uit de meting komen. Dit is alleen een nadeel wanneer de meting met de hand wordt uitgevoerd.
- Het is met de hand geen nauwkeurige meetmethode. Wanneer de test juist wordt uitgevoerd, is er een onnauwkeurigheid van 11% (Herrick & Jones, 2002).

#### Vehicle cone index

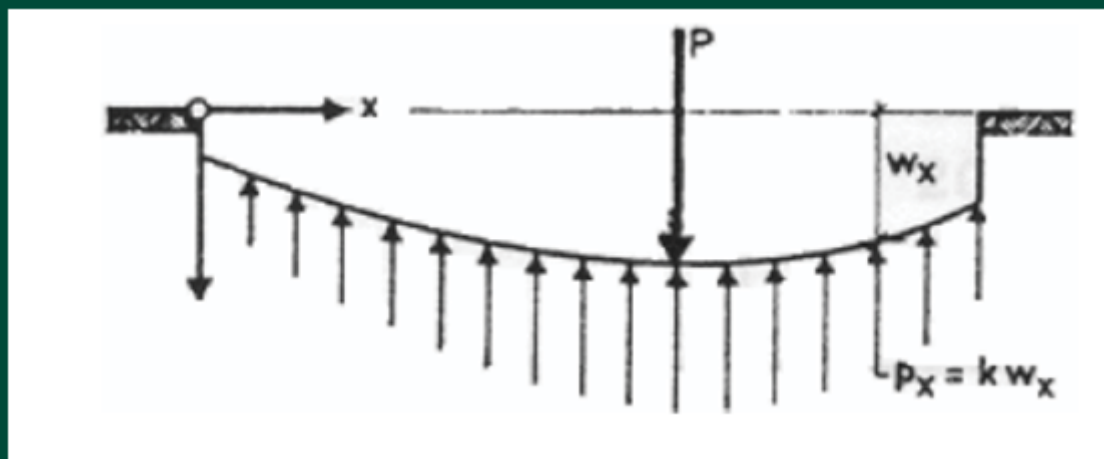
Aan de hand van de eigenschappen van een voertuig en de draagkracht van de grond kan bepaald worden of het terrein begaanbaar is. Een onderdeel van deze voertuigeigenschappen is de vehicle cone index (VCI). Deze index is ontwikkeld vanuit de CI en geeft aan hoe sterk de gronddruk moet zijn om een bepaald voertuig 1 of 50 keer, door één spoor, te



laten passeren zonder dat het voertuig vast komt te zitten in de grond (Ciobotaru, 2009). Wanneer de CI groter is dan de VCI, is de bodem voor dat voertuig begaanbaar. De  $VCI_1$  en  $VCI_{50}$  zijn voor de voertuigen van tevoren vastgesteld. Andere waarden mogen geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd worden. De VCI is empirisch bepaald en gebaseerd op de mobility index (MI). De MI is gebaseerd op verschillende parameters die invloed hebben op de terreinbegaanbaarheid van een voertuig zoals; massa, aandrijving, contact oppervlak met de grond, aantal wielen of tracks etc. De VCI wordt gebruikt als een parameter zonder eenheden, maar in werkelijkheid is de eenheid in pounds per square inch [psi] (Priddy, 2004). Dit betekent dat de VCI eenvoudig is om te rekenen naar het SI stelsel

### Beddingsconstante

De beddingsconstante is een maat voor de zakking van een funderingselement ten gevolge van de kracht die op het funderingselement wordt uitgeoefend. Wanneer betonverharding wordt toegepast, wordt de onderbouw veelal gekarakteriseerd als een zware vloeistof. Dit betekent dat in de onderbouw geen schuifspanningen kunnen optreden. De draagkracht wordt uitgedrukt in de beddingsconstante  $k$ , die gedefinieerd is als een evenredigheidscoëfficiënt tussen de door de onderbouw geleverde tegendruk ( $p$ ) en zakking ( $w$ ) van een elastische plaat onder een verticale belasting (zie figuur 7) (TU Delft, 2004). De beddingsconstante wordt uitgedrukt in  $\text{kN/m}^3$  (Bakker & Boesenkool, 2006).



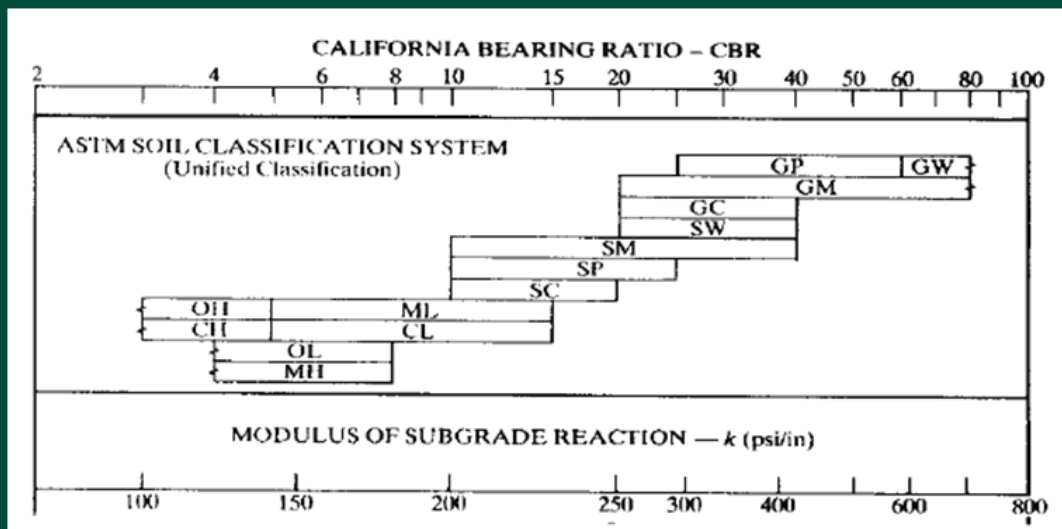
Figuur 7: Definitie van de beddingsconstante  $k$ .

De beddingsconstante moet in principe in-situ bepaald worden met behulp van statische plaatbelastingsproeven. De resultaten van een plaatbelastingsproef en daarmee de beddingsconstante zijn alleen bruikbaar als de belasting waarmee de test is uitgevoerd, overeenkomt met de werkelijke belasting (Eilander, 2006). Omdat plaatbelastingsproeven tijdrovend zijn, wordt de beddingsconstante vaak op indirecte wijze bepaald. Dat de meting tijdrovend is, heeft te maken met de zware materialen en contragewichten die benodigd zijn voor een dergelijke meting. Daarbij geven deze proeven informatie over de grond tot slechts één meter diepte (VNC, 1993). Voor veel constructies die Defensie gebruikt, zoals woonchalets, is dit voldoende. Het bereik van de meting is voor constructies als een aardenwal of een Hescowall echter onvoldoende (Aarssen, 2007). Er is echter weinig reverentie materiaal beschikbaar over de beddingsconstante en de toepassing van constructies.

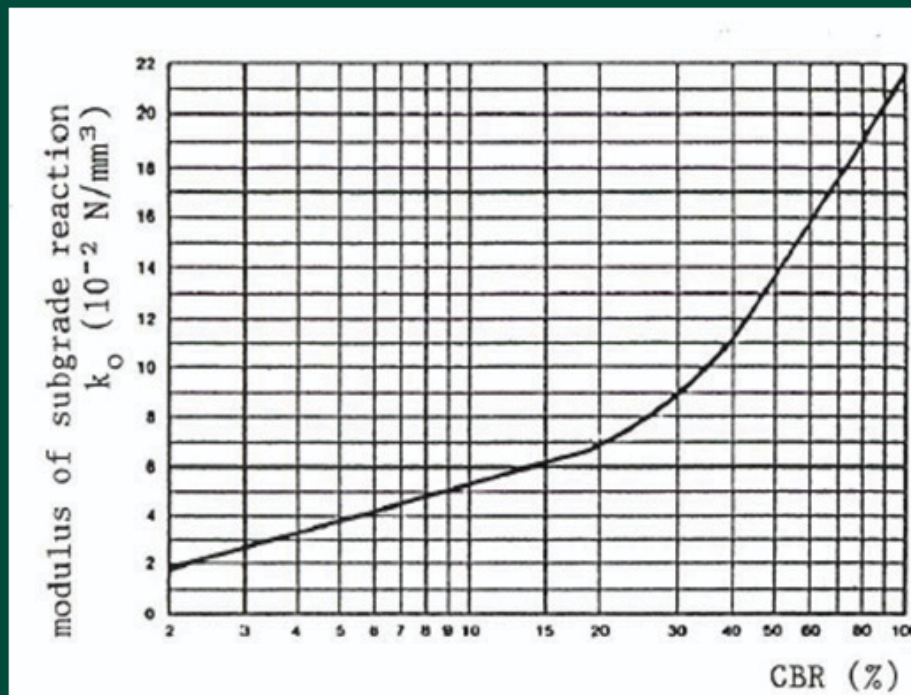




Een veel toegepaste methode om de beddingconstante op indirecte wijze te bepalen is op basis van de grondsoort (zie figuur 8). Een andere mogelijkheid is om de beddingconstante te bepalen aan de hand van de CBR waarde. In figuur 8 en 9 zijn een relatie tussen de CBR en beddingconstante weergegeven (TU Delft, 2004).



Figuur 8: Relatie tussen CBR, USCS en beddingconstante k. (TU Delft, 2004)



Figuur 9: Relatie tussen CBR en beddingconstante. (TU Delft, 2004)





Het voordeel van het gebruik van de beddingsconstante is:

- Beddingsconstante is eenvoudig te bepalen aan de hand van de CBR-waarde.

De belangrijkste nadelen zijn:

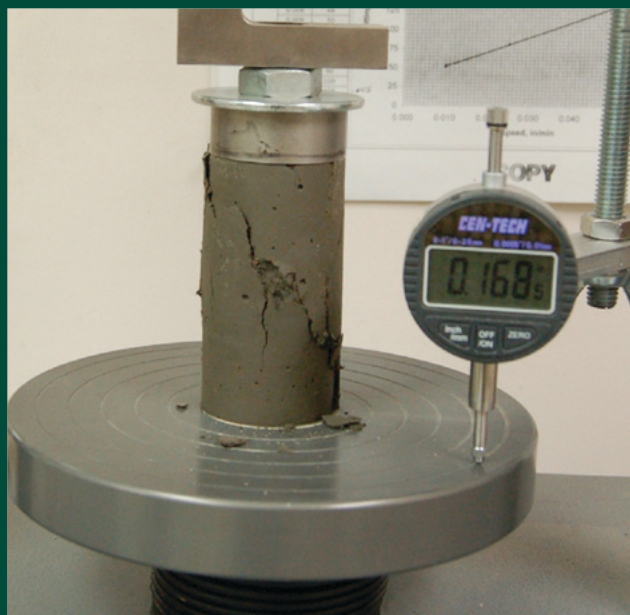
- Goede metingen zijn tijdrovend.
- Metingen geven informatie tot slechts één meter in de grond.

### 3.2.2 Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus is een materiaalkundige eigenschap van materiaal die een maat is voor de stijfheid en starheid van het materiaal. De elasticiteitsmodulus van een materiaal karakteriseert de spanningstoestand die in dit materiaal gegenereerd wordt, afhankelijk van de uitgeoefende belasting en is een maat voor de stijfheid van het materiaal (Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, 2013). Omdat materiaal verschillend reageert onder dynamische en statische belastingen is er ook in de elasticiteitsmodulus een verschil. In de volgende subparagrafen worden de statische en dynamische elasticiteitsmodulus behandeld. Hierin worden methodes en de daar bijbehorende voor- en nadelen besproken.

#### Statische elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus kan worden berekend met vervormingsmetingen tijdens een belastingproef. In dit geval is er sprake van statische elasticiteitsmodulus. Deze wordt gemeten in door middel van een Unified Compressive Strength (UCS) test. Tijdens deze test wordt een grondmonster onder een gecontroleerde kracht samengedrukt totdat het monster bezwijkt. In figuur 10 is weergegeven hoe deze test eruit ziet. Omdat deze proef in-situ niet uitgevoerd kan worden, moet dit in een laboratorium gebeuren. De statische elasticiteitsmodulus is relevant voor langdurige eenzijdige belastingen zoals constructies en wordt uitgedrukt in  $\text{N/mm}^2$ .



Figuur 10: U.C.S. test op een grondmonster.



Het grootste nadeel van het gebruik van de statische elasticiteitsmodulus is de proef zelf. Deze moet in een laboratorium worden uitgevoerd. Als voordeel geldt dat bij deze proef de belasting op het monster geleidelijk toeneemt. Hierdoor kan het monster tot op de rand van bezwijken worden gebracht. De bezwijkspanning van de grond kan hierdoor eenvoudig worden bepaald (Veruijt, 2009).

### Dynamische elasticiteitsmodulus

De dynamische elasticiteitsmodulus ( $E_{dyn}$ ) heeft, zoals de term al aangeeft, betrekking op dynamische belastingen. Dynamische belastingen veroorzaken spanningswisselingen in het materiaal. Deze spanningswisselingen kunnen voor vermoeiingen in het materiaal veroorzaken en daardoor resulteren in het bezwijken van het materiaal. De dynamische elasticiteitsmodulus is relevant voor de aanleg van bijvoorbeeld wegen of vliegvelden en wordt uitgedrukt in N/mm<sup>2</sup> of MPa. In tabel 3 zijn typische waarden van de  $E_{dyn}$  weergegeven voor kenmerkende ondergronden (Egyed & Visser, 2006). De dynamische elasticiteitsmodulus geeft uiteindelijk niet de bezwijkspanning weer, maar is een andere waarde om de begaanbaarheid van de bodem uit te drukken.

Tabel 3: Dynamische elasticiteitsmodulus en type ondergrond.

| $E_{dyn}$ | Type ondergrond                                                                                                                                |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 MPa    | Veen en slappe klei; de draagkracht van de granulaire lagen ligt op 50% van de theoretische waarden vanwege ontbreken van een goede klankbodem |
| 50 MPa    | Nieuwe constructie op bestaand zandbed met een resterende dikte van 0,40 tot 0,60 m                                                            |
| 80 MPa    | Nieuwe constructie op bestaand zandbed met een resterende dikte van 1,00 m                                                                     |
| 150 MPa   | Op bestaand verhardingsmateriaal (traditioneel ophogen = referentie)                                                                           |

Er bestaat voor (Nederlandse) zandgronden een grove relatie tussen de dynamische elasticiteitsmodulus:  $E_{dyn} = 10 \text{ CBR}$  (TU Delft, 2004).  $E_{dyn}$  uitgedrukt in MPa en CBR in %. Het gebruik van deze relaties is discutabel omdat de CBR-waarde in feite de kracht weergeeft die voor een bepaalde vervorming nodig is. Deze vervorming is voornamelijk opgebouwd uit blijvende vervorming. Echter, geeft de CBR-proef de relatie tussen kracht en verplaatsing en zegt daarmee wel degelijk iets over het elastisch vervormingsgedrag.

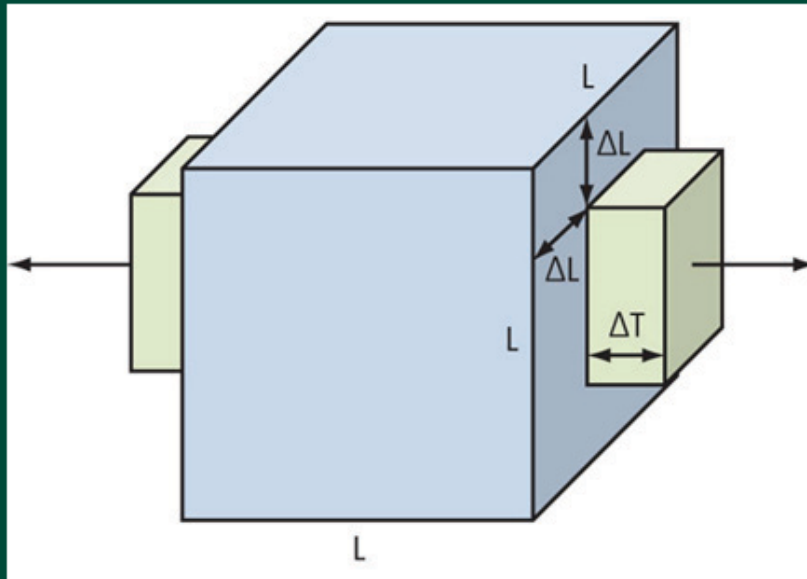
Een methode om de  $E_{dyn}$  te bepalen is met behulp van de ultrasoon-meting. De snelheid waarmee een ultrasoon geluid zich door het materiaal voortplant is een maat voor de  $E_{dyn}$ . De meting wordt uitgevoerd doormiddel van een zender en een ontvanger. De zender produceert een hoogfrequente trilling die zich via het materiaal voortplant tot in de ontvanger. Het tijdsverschil tussen het versturen en ontvangen van dit signaal wordt gemeten. Met dit tijdsverschil en de bekende weglengte kan de snelheid worden berekend (Vandecasteele, 2013). Vervolgens moet met de onderstaande formule de  $E_{dyn}$  worden berekend:

$$E_{dyn} = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

Waarin:  $v$  = voortplantingssnelheid in [m/s]  
 $\rho$  = soortelijke massa materiaal [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\mu$  = dwarscontractiecoëfficiënt van Poisson



De dwarscontractiecoëfficiënt is een effect dat optreedt onder invloed van een normaalkracht op een lichaam. Onder deze belasting zal het lichaam verlengen of verkorten. Bovendien zal, bij verlenging, dit lichaam dunner worden en bij verkorting dikker. In figuur 11 is de dwarscontractie schematisch weergegeven.



Figuur 11: schematisering dwarscontractie

Het nadeel van deze methode is de berekening die na elke meting uitgevoerd moet worden. Een andere methode om de  $E_{\text{dyn}}$  te bepalen, is aan de hand van de resonantiefrequentie van het materiaal. In dit geval wordt een monster in cilindervorm vastgeklemd. Aan de ene zijde van de cilinder wordt de versnellingsmeter geplaatst. Met behulp van een stalen bolletje wordt aan de andere zijde van de cilinder getikt. De trilling verplaatst zich door de cilinder en wordt geregistreerd door de versnellingsmeter. Het meetinstrument, een Emodometer, bepaalt vervolgens de resonantiefrequentie van het (grond)monster. In figuur 12 is de meetopstelling weergegeven (Vandecasteele, 2013).



Figuur 12: Opstelling van een Emodometer.



De belangrijkste voordelen van beide methodes zijn het niet-destructieve karakter en de eenvoud van de methode (Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf, 2013).

### 3.3 Vergelijking meetmethodes

In deze paragraaf worden de verschillende meetmethodes met elkaar vergeleken. Eerst wordt er gekeken of er een relatie is tussen de verschillende meetmethodes. Vervolgens worden de meetmethodes vergeleken op basis van betrouwbaarheid en bruikbaarheid.

De belasting op de bodem komt in twee verschillende vormen voor; dynamische belasting en statische belasting. De dynamische belastingen worden uitgedrukt als CBR en  $E_{\text{dyn}}$ . De conusweerstand, beddingsconstante en de statische elasticiteitsmodulus worden gebruikt om de opneembare statische belasting uit te drukken.

#### 3.3.1 Vergelijking meetmethodes voor dynamische belastingen

Tussen de twee methodes om de opneembare dynamische belasting te bepalen bestaat een globale relatie. Deze relatie kan worden geschreven als:  $E_{\text{dyn}} = 10 \text{ CBR}$ . Deze relatie geldt alleen voor (Nederlandse) zandgronden en is discutabel omdat  $E_{\text{dyn}}$  niet exact hetzelfde is als de CBR. De CBR-waarde geeft de kracht weer die voor een bepaalde vervorming nodig is. Deze vervorming is voornamelijk opgebouwd uit blijvende vervorming.

Op het gebied van betrouwbaarheid is de CBR-methode minder betrouwbaar als de korreldiameter van de grond toeneemt. Bij een korreldiameter van twee of meer millimeter moeten er minimaal drie extra metingen uitgevoerd worden om de nauwkeurigheid van de meting te garanderen. De  $E_{\text{dyn}}$  daarentegen heeft dit nadeel niet.

Voor in-situ metingen is de CBR-methode handiger in gebruik omdat, in tegenstelling tot de  $E_{\text{dyn}}$ , voor deze methode geen (grond)monsters nodig zijn. De metingen vinden direct op de grond plaats. Om metingen in  $E_{\text{dyn}}$  uit te drukken, zijn wel grondmonsters nodig.

#### 3.3.2 Vergelijking meetmethodes voor statische belastingen

Tussen de drie verschillende meetmethodes om de opneembare statische belasting te bepalen is geen globale relatie, zoals bij de opneembare dynamische belasting wel het geval is. Van de drie methodes valt de methode statische elasticiteitsmodulus meteen af. De  $E_{\text{stat}}$  kan alleen in een laboratorium worden bepaald en is daarom niet praktisch in gebruik.

De overige twee meetmethodes, de conusweerstand (uitgedrukt in  $\text{N/mm}^2$  of  $\text{MPa}$ ) en de beddingsconstante ( $\text{kN/m}^3$ ), zijn niet even betrouwbaar. De conusweerstand kan in elke situatie gebruikt worden en, mits de materialen beschikbaar zijn, tot meerdere meters in de grond meetresultaten geven. De beddingsconstante kan dit niet. De meting, de plaatbelastingsproef, heeft een bereik tot slechts één meter diepte en de meting zelf vergt veel tijd. Dit heeft te maken met de zware meetapparatuur en het benodigde contragewicht dat voor de meting nodig is.



Het laatstgenoemde punt is tevens een nadeel voor de beschikbaarheid van de beddingsconstante. Toch hoeft dit doorslaggevend te zijn. Er bestaat een verband tussen de CBR-methode en de beddingsconstante. Via een tabel of grafiek, zoals weergegeven in figuur 8 en 9 kan de beddingsconstante eenvoudig worden afgeleid. Dit betekent dat er in feite maar één meting nodig is om zowel de dynamische als de statische opneembare belasting van de grond te bepalen. Er bestaat tevens een verband tussen de CBR-waarde en de conusweerstand. Echter geldt dit verband alleen voor Nederlandse zandgronden. Vanwege het internationale optreden van de Nederlandse krijgsmacht is het praktisch niet mogelijk om de conusweerstand af te leiden uit de CBR-waarde (TU Delft, 2004).





Koninklijke Landmacht

# 4. Actoren

**4.1 Landmacht**

**4.2 Luchtmacht**

**4.3 Internationale partners**

**4.4 Civiele instanties**

**4.4.1 Infrastructuur**

**4.4.2 Constructies**

**4.5 Eisen**

**4.6 Deelconclusie**

**4.7 Consequenties**

**4.7.1 Dynamische belastingen**

**4.7.2 Statische belastingen**



# 4. Actoren

Zoals in de aanleiding is aangehaald zijn er verschillende actoren die te maken hebben met het bepalen van draagkracht en eigenschappen van de grond. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de actoren en waarvoor de actoren deze gegevens gebruiken.

## 4.1 Landmacht

Binnen de Koninklijke Landmacht zijn er meerdere legereenheden die om verschillende redenen behoefte hebben aan informatie betreffende, onder andere, de gronddruk en bodemeigenschappen van de grond. Dit zijn (1) manoeuvre-eenheden, (2) constructie-eenheden en (3) (genie-)inlichtingen.

- 1) Manoeuvre-eenheden hebben te maken met het begrip terreinbegaanbaarheid en dus met bodembegaanbaarheid. Het is voor deze eenheden van belang om te weten of hun voertuigen zich in een bepaald terrein kunnen manoeuvreren. Op dit moment wordt er door deze eenheden gebruik gemaakt van de VCI. Om de grondsoort te classificeren wordt gebruik gemaakt van de USCS methode.
- 2) De constructie eenheden, waaronder bureau Geniewerken (GNW), hebben met verschillende soorten constructies te maken. Deze constructies variëren van bruggen en wegen tot de bouw van compounds, basissen in uitzendgebied, en vliegvelden. Het gevolg hiervan is dat de constructie-eenheden met verschillende methodes werken om de draagkracht van de grond te bepalen. Dit geldt zowel voor dynamische als statische belastingen van de grond. Er wordt vooral gewerkt met de CBR-methode voor de aanleg van vliegvelden. Voor de constructie van wegen wordt gebruik gemaakt van CBR en de  $E_{dyn}$ . Om de bezwijkspanning van de grond te bepalen voor een fundering van gebouwen voor een compound, wordt gebruik gemaakt van de CI. De terreinbegaanbaarheid van de voertuigen op de bouwplaats wordt bepaald aan de hand van de VCI. De grondsoorten worden gecategoriseerd aan de hand van het USCS systeem.
- 3) De (genie-)inlichtingen werken niet met de draagkracht van de bodem. De bodem wordt alleen verkend op grondsoort. Dit wordt gedaan aan de hand van satellietgegevens en het categoriseren van de grond wordt gedaan aan de hand van het USCS systeem. De informatie die hieruit voorkomt wordt doorgespeeld aan GNW.

## 4.2 Luchtmacht

In tegenstelling tot de Koninklijke Landmacht heeft de Koninklijke Luchtmacht het systeem waarmee de grond op draagkracht en eigenschappen wordt bepaald teruggebracht tot één methode (NATO Standardization Agency, 2008). Voor de dynamische belasting op start- en landingsbanen worden CBR waardes aangehouden. De draagkracht van de grond voor de (heli)platforms wordt weergegeven in  $N/mm^3$ , oftewel de beddingsconstante. Deze eenheden zijn voor alle luchtmachten binnen de NAVO de standaard.



### 4.3 Internationale partners

In het buitenland wordt net als bij de Koninklijke Landmacht met verschillende methoden gewerkt om de draagkracht van de grond te bepalen (Eilander, 2006). Het Amerikaanse leger, met name de United States Army Corps of Engineers (USACE), werkt voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem voor de constructie van wegen en airstrips met de CBR-methode (USACE, 1984). Opvallend is dat de CBR-methode door de Amerikanen niet als enige methode wordt gebruikt voor de constructie van airstrips. De airfield index (AI) wordt ook gebruikt om de draagkracht van de grond te bepalen. De AI is te vergelijken, maar mag niet verward worden met, de VCI en CI voor voertuigen. Van de twee methodes, AI en CBR, wordt de CBR-methode het meest toegepast. Dit komt omdat de meetinstrument van de AI, een penetrometer, voor veel ondergronden ongeschikt is (US Army, 1995). De penetrometer komt niet door verschillende zandlagen heen die mogelijk op een niet-draagkrachtige laag liggen. De CBR-methode heeft dit probleem niet.

De toelaatbare statische belasting op vliegvelden wordt bepaald aan de hand van de beddingsconstante. De draagkracht van de grond voor bijvoorbeeld de constructie van een base wordt daarentegen bepaald aan de hand van de CI en uitgedrukt in kilopoundforce per square inch (ksf), wat in SI eenheden omgerekend kan worden naar N/mm<sup>2</sup> of MPa.

Voor het gebruik van terreinbegaanbaarheid maakt het Amerikaanse leger gebruik van de VCI. Hetzelfde geldt voor de manoeuvre-eenheden (Grogan, 2009) en de overige NAVO-partners.

### 4.4 Civiele instanties

Voor civiele instanties wordt onderscheid gemaakt in twee categorieën; infrastructuur en constructies. Binnen de infrastructuur wordt onderscheid gemaakt tussen wegen en start- en landingsbanen. Terreinbegaanbaarheid is nauwelijks van toepassing voor civiele instanties. De (bouw)voertuigen worden doorgaans toegepast bij grote, statische projecten. Het aanleggen van bouwwegen is daarom een kleine investering die gedaan wordt voor de begaanbaarheid van de bouwlocatie.

#### 4.4.1 Infrastructuur

In het algemeen wordt met infrastructuur het totaal van onroerende voorzieningen zoals (spoor)wegen, vliegvelden, bekabeling, riolering et cetera bedoeld. In deze sub-paragraaf wordt alleen ingegaan op de wegen en start- en landingsbanen van vliegvelden.

##### Wegen

In de breedste zin van het woord is de weg een primaire infrastructuur voor bepaalde transportmiddelen. Dit geldt zowel voor voertuigen als schepen (waterwegen) en treinen (spoorwegen).



Voor de constructie van wegen worden verschillende materiaalkarakteristieken van de bodem in kaart gebracht (Egyed & Visser, 2006):

- I. Dynamische elasticiteitsmodulus van het materiaal;
- II. Viscositeit;
- III. Hoek van inwendige wrijving;
- IV. Cohesie;
- V. Volumieke massa (droog en nat);
- VI. Verbrijzelingsweerstand;
- VII. Toelaatbare rekniveau.

Door de bodem te classificeren kunnen de punten II t/m VII worden bepaald, zie tabel 1. De dynamische elasticiteitsmodulus van het materiaal wordt bepaald aan de hand van metingen. De draagkracht van de bodem wordt in sommige gevallen ook weergegeven in CBR-waardes. Dit is een geaccepteerde, maar minder gebruikte waarde, dan de dynamische elasticiteitsmodulus (Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw, 2011).

### **Start- en landingsbanen**

Een start- en landingsbaan, wordt door civiel constructeurs niet anders gezien dan een zwaarbelaste weg (Ooms Construction, 2013). Hoewel de belasting op de ondergrond doorgaans hoger is dan op een weg, zijn geen andere grondgegevens nodig.

#### **4.4.2. Constructies**

Om een goede fundering voor een constructie te bouwen, moet er kennis zijn over de bodem. Daarom vindt in de civiele bouw vrijwel altijd een grondonderzoek plaats. Het grondonderzoek bestaat voornamelijk uit grondboringen en sonderingen. Tijdens sonderingen wordt de draagkracht van de bodem en de kleef gemeten. Hieruit kan de opbouw van de grond, zoals grondsoorten per laag, eigenschappen per laag etc. worden bepaald (Fugro, 2013). De grond wordt vervolgens gecategoriseerd volgens de USCS standaard (Fugro, 2013). De draagkracht van de grond wordt weergegeven in MPa. De verzakking of zetting van de grond wordt uitgedrukt als beddingsconstante in  $\text{kN/m}^3$ .

#### **4.5 Eisen**

Zoals in de voorgaande paragrafen naar voren is gekomen, vinden er om allerlei uiteenlopende redenen, en in meer of mindere mate bodemonderzoek plaats. Hierdoor worden er verschillende eisen aan de methode van grondonderzoek gesteld. Waar het voor de manoeuvre-eenheden alleen interessant is om te weten of het terrein geschikt is voor één of meerdere passages van hun voertuigen, is het voor constructie-eenheden van belang om te weten of de ondergrond geschikt is om op te bouwen, zowel op de korte als de lange termijn. Door de verschillende doelen die de legereenheden en overige actoren hebben, zijn de eisen voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem zeer uiteenlopend. Hieronder zijn de eisen opgesteld waaraan de metingen moeten voldoen. De eisen zijn voortgekomen uit de verschillende doelen die de actoren beogen.



- De metingen zijn in-situ uit te voeren;
  - o Manoeuvre-eenheden moeten direct weten of het terrein begaanbaar is. Het is onwenselijk dat de metingen in een laboratorium moeten plaatsvinden en de legereenheden daardoor niet direct weten of zij met hun manoeuvre door kunnen gaan.
- Metingen moeten representatief zijn voor de lange termijn;
  - o Voor de lange termijn, bijvoorbeeld de bouw van een compound die tussen de twee en vijf jaar moet staan, is het van belang dat als de meting eenmaal is uitgevoerd de resultaten voor langere tijd geldig zijn. De meting moet representatief zijn voor de constructie die de bodem belast. Daarnaast moet het resultaat van de meting en de interpretatie daarvan een goed beeld geven van het gedrag van de bodem op de lange termijn.
- Metingen moeten representatief zijn voor de korte termijn;
  - o In het kader van mobiliteit moet de meting die op dat moment wordt gedaan ook gelden voor dat moment. De gedane meting is op de korte termijn bruikbaar, maar de levensduur van de resultaten is beperkt als gevolg van veranderende omstandigheden.
- Opneembare dynamische belasting moet te meten zijn;
  - o Door kennis van het gedrag van dynamische belasting op de grond te hebben, kunnen voorspellingen gedaan worden over bodembegaanbaarheid.
- Opneembare statische belasting moet te meten zijn.
  - o Door kennis van het gedrag van statische belasting op de grond te hebben, kunnen voorspellingen gedaan worden over de mogelijkheid tot bebouwing.

Een extra eis die door het Kenniscentrum Genie is gesteld heeft betrekking op de toepassing van de methode. Wanneer er één methode is die door iedereen wordt gebruikt, zal deze ook door de Nederlandse Krijgsmacht moeten worden toegepast. Dit in het kader van uniformiteit en gegevens uitwisseling met andere partners

#### 4.6 Deelconclusie

Er worden op dit moment door de actoren verschillende meetmethodes en parameters toegepast. In tabel 4 staat weergegeven welke methode door de actoren wordt gebruikt.

Tabel 4: Overzicht meetmethodes en actoren.

|             |                   | Actoren |                 |       |        |
|-------------|-------------------|---------|-----------------|-------|--------|
|             |                   | KL      | KL <sub>u</sub> | USACE | Civiel |
| Meetmethode | CI/VCI            | X       |                 | X     | X      |
|             | CBR               | X       | X               | X     | X      |
|             | E <sub>dyn</sub>  | X       |                 |       | X      |
|             | E <sub>stat</sub> |         |                 |       | X      |
|             | Beddingsconstante |         | X               | X     | X      |





Uit deze tabel zijn de enkele conclusies te trekken. Elke actor maakt gebruik van de CBR-methode en de statische elasticiteitsmodulus wordt door slechts één actor toegepast.

De CI/VCI worden door de Koninklijke Landmacht gebruikt om de terreinbegaanbaarheid van voertuigen te bepalen. Dit is opvallend aangezien de CI de opneembare statische belasting van de grond meet. Het doel van de meting is echter om te bepalen of een terreindeel begaanbaar is voor het voertuig. Dit is juist een dynamische belasting.

Een methode die zowel de statische als dynamische opneembare belasting van de grond kan bepalen is enkel op basis van de methoden die de actoren gebruiken niet mogelijk. Om beide opneembare belastingen te bepalen zullen daarom in basis twee methodes gebruikt moeten worden.

**Tabel 5: Theoretische toepasbaarheid meetmethode voor toepassing.**

|             |                   | Toepassing |                     |                          |                       |
|-------------|-------------------|------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
|             |                   | Wegen      | Start- Landingsbaan | (statische) Constructies | Terreinbegaanbaarheid |
| Meetmethode | CI/VCI            |            |                     | X                        |                       |
|             | CBR               | X          | X                   |                          | X                     |
|             | E <sub>dyn</sub>  | X          | X                   |                          | X                     |
|             | E <sub>stat</sub> |            |                     | X                        |                       |
|             | Beddingsconstante |            |                     | X                        |                       |

In tabel 5 is een overzicht gegeven van de toepasbaarheid van de verschillende meetmethodes op basis van de toepassing. Hierin is duidelijk te zien dat de toepassingen die bloot worden gesteld aan dynamische belasting niet gemeten kunnen worden met meetmethodes voor de statische belasting. Wanneer puur de theorie wordt gehanteerd, is de terreinbegaanbaarheid niet te definiëren met de CI/VCI. De praktijk wijst echter uit dat de CI in combinatie met VCI wel een bruikbare indicatie geeft van de terreinbegaanbaarheid van een voertuig.

In tabel 3 is een overzicht gegeven van de methodes die door de verschillende actoren worden toegepast. Door deze tabel met tabel 5 te combineren ontstaat een overzicht waar welke actor de meetmethode voor gebruikt. Dit overzicht is te vinden in tabel 6. Tevens maken alle actoren gebruik van het USCS bodemclassificatiesysteem.



Tabel 6: Overzicht actoren, toepassing, meetmethoden

|                 |                   | Toepassing |                     |                          |                       |
|-----------------|-------------------|------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
|                 |                   | Wegen      | Start- Landingsbaan | (statische) Constructies | Terreinbegaanbaarheid |
| Meetmethode     | CI/VCI            |            |                     | X X X                    | X X                   |
|                 | CBR               | X X X      | X X X X             |                          |                       |
|                 | E <sub>dyn</sub>  | X X        | X                   |                          |                       |
|                 | E <sub>stat</sub> |            |                     | X                        |                       |
|                 | Beddingsconstante |            |                     | X X X                    |                       |
| KL              | X                 |            |                     |                          |                       |
| KL <sub>u</sub> | X                 |            |                     |                          |                       |
| USACE           | X                 |            |                     |                          |                       |
| Civiel          | X                 |            |                     |                          |                       |

De meest voor de hand liggende methode om te gebruiken is de CBR-methode. Deze methode wordt door alle actoren gebruikt, is ontworpen voor in-situ metingen en kan eenvoudig omgerekend worden naar de beddingsconstante, zie paragraaf 3.3.2.

## 4.7 Consequenties

De voorkeur van het Kenniscentrum Genie voor het gebruik van één type meting, zie paragraaf 4.5, leidt tot een voorlopige conclusie dat de CBR-methode samen met de beddingsconstante gebruikt kan worden om de opneembare dynamische en statische belasting van de bodem te definiëren.

Een algemene consequentie is dat ongeacht de keuze verschillende IK's, eventueel met nieuwe waardes, moeten worden herschreven. Daarnaast zal het personeel omgeschoold moeten worden.

### 4.7.1 Dynamische belastingen

Zoals eerder aangehaald is de CBR-methode een geschikte methode om in alle werkvelden van Defensie toe te passen. De methode is echter niet in elke situatie even nauwkeurig. Hiervoor moeten verschillende maatregelen genomen worden.

Een CBR-waarde kan zowel in het laboratorium als in-situ worden bepaald. De resultaten tussen deze metingen kunnen verschillen. Een in-situ meting is een momentopname, dit betekent dat de verzadigingsgraad van de grond per keer verschilt. Een laboratoriumtest daarentegen wordt elke keer uitgevoerd op een verzadigd stuk grond (Rollings & Rollings, 1996). Er is hiervoor gekozen omdat een verzadigde bodem de meest negatieve meetresultaten oplevert. Wanneer het mogelijk is om in-situ ook een stuk verzadigde grond te meten, moet hier altijd voor worden gekozen. Deze manier levert conservatievere, en daarmee veiligere, resultaten. Bij kleigronden kan het resultaat van de meting op droge grond een factor acht groter zijn dan eenzelfde meting op een verzadigde grond (Nugroho, Hendri, & Ningsih, 2012). Het is daarom van belang een meting op een verzadigde grond uit te voeren. Voor manoeuvre-eenheden is dit overigens geen probleem, voor hen is de



werkelijke waarde van dat moment en niet de meest negatieve van belang. Het is echter wel zo dat een CBR-meting enkele minuten duurt en een meting met een penetrometer enkele seconden. Voor manoeuvre-eenheden kan dit nadelig zijn.

Een ander bekend nadeel van de CBR-methode is de standaardafwijking op gronden met een maximale korreldiameter die meer is dan twee millimeter. De methode is weldegelijk bruikbaar op grote korreldiameters, de meetgegevens hebben echter een grotere afwijking. Wanneer er meer herhalingen worden toegepast, zal de afwijking in het resultaat afnemen. Er moeten minimaal drie metingen uitgevoerd worden om bij deze grondsoorten een betrouwbaar resultaat te verkrijgen (Rollings & Rollings, 1996).

#### **4.7.2 Statische belastingen**

Omdat de CBR-meting via verschillende grafieken en tabellen omgezet kan worden in een beddingsconstante kan die meting indirect gebruikt worden voor statische belastingen. Dit is meteen een nadeel, de meting is indirect. Naast een standaard meetfout in de meting zelf, zal er ook een extra onzekerheid in de omrekening zitten, deze onzekerheid is helaas niet direct uit de literatuur af te leiden. Daarbij is er ook een kans op afleesfouten uit de grafiek of tabel.

Om deze onzekerheden tegen te gaan zal de beddingsconstante via een plaatbelastingsproef bepaald moeten worden. Dit doet het voordeel van slechts "één meting" weer teniet.



Koninklijke Landmacht

# 5. Conclusie

- 5.1 Eerste onderzoeksvraag**
- 5.2 Tweede onderzoeksvraag**
- 5.3 Derde onderzoeksvraag**



# 5. Conclusie

De doelstelling van het onderzoek is een advies uitbrengen over de meest geschikte methode voor Defensie om de bezwijkspanning van de bodem te bepalen. Door in dit hoofdstuk de onderzoeksvragen te beantwoorden, kan de doelstelling, zoals gesteld in paragraaf 1.1 worden behaald.

## 5.1 Eerste onderzoeksvraag

### I. Welke actoren hebben baat bij het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem?

Binnen Defensie hebben de Koninklijke Landmacht en Koninklijke Luchtmacht baat bij het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem. Binnen de Koninklijke Landmacht is dit relevant voor manoeuvre- en constructie-eenheden. Verder hebben internationale militaire partners van Defensie en civiele (bouw)bedrijven hiermee te maken.

#### a. Wat is het nut van het bepalen van de bodemspanning voor deze actoren?

Voor de legereenheden zijn er verschillende redenen om de bezwijkspanning te willen weten. Voor de manoeuvre-eenheden is van belang om de terreinbegaanbaarheid van het voertuig in het terrein te weten.

De constructie-eenheden hebben te maken met de constructie van wegen, compounds en vliegvelden.

De Koninklijke Luchtmacht kan aan de hand van de bezwijkspanning van de bodem bepalen of de grond draagkrachtig genoeg is om met hun vliegtuigen op te stijgen en te landen. Verder is het van belang voor de (heli)platforms van de vliegtuigen.

De internationale militaire partners hebben om de bovengenoemde reden kennis nodig van de bezwijkspanning van de bodem.

Civiele (bouw)bedrijven moet voor de constructie van gebouwen en infrastructuur, met de daar bijbehorende kunstwerken, kennis van de bodem hebben.

## 5.2 Tweede onderzoeksvraag

### II. Welke criteria kunnen worden geformuleerd voor de beoordeling van een goede bepaling van de bezwijkspanning tijdens een terreinverkenning?

De methodes die op dit moment gebruikt worden om de bezwijkspanning van de bodem te bepalen zijn allemaal goede en bewezen methodes. Bij voorkeur moet een methode die is ontwikkeld voor het meten van de statische belastingen, niet ingezet worden om dynamische belastingen te bepalen.





**a. Welke criteria stellen deze actoren aan het bepalen van de bezwijkspanning**

Een meetmethode die geschikt is voor elke actor moet aan de volgende eisen voldoen:

- De metingen zijn in-situ uit te voeren.
- Metingen en geïnterpreteerde resultaten moeten representatief zijn voor de lange termijn.
- Metingen en geïnterpreteerde resultaten moeten representatief zijn voor de korte termijn.
- Opneembare dynamische belasting moet bepaald kunnen worden.
- Opneembare statische belasting moet bepaald kunnen worden.

Een extra wens die door het Kenniscentrum Genie is gesteld heeft betrekking op de toepassing van de methode. Wanneer er één methode is die door iedereen wordt gebruikt, zal deze door de Nederlandse Krijgsmacht ook worden toegepast. Dit in verband met uniformiteit en de samenwerking met andere (NAVO) partners.

**b. Wat zijn de belangrijkste criteria van deze actoren?**

Het leveren van juiste en bruikbare informatie voorzieningen is het belangrijkste. Alle actoren dienen per slot van rekening op afdoende wijze bediend te worden met de gewenste gegevens. Het is echter wenselijk dat deze informatie via één methode bepaald kan worden.

### 5.3 Derde onderzoeksvraag

**III. Wat is de kwaliteit van de verschillende methoden voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem in het licht van de gestelde beoordelingscriteria?**

In tabel 7 is een overzicht gegeven van de toepasbaarheid van de verschillende meetmethodes en toepassingen. Hierin is duidelijk te zien dat de toepassingen die gericht zijn op dynamische belasting niet gemeten kunnen worden met meetmethodes voor de statische belasting. Wanneer puur de theorie wordt gehanteerd, is de terreinbegaanbaarheid niet te definiëren met de CI/VCI. De praktijk wijst echter uit dat de CI in combinatie met VCI wel een geschikte methode is om de terreinbegaanbaarheid van een voertuig te bepalen.

Tabel 7: Theoretische toepasbaarheid meetmethode voor toepassing.

|             |                   | Toepassing |                     |                          |                       |
|-------------|-------------------|------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|
|             |                   | Wegen      | Start- Landingsbaan | (statische) Constructies | Terreinbegaanbaarheid |
| Meetmethode | CI/VCI            |            |                     | X                        |                       |
|             | CBR               | X          | X                   |                          | X                     |
|             | E <sub>dyn</sub>  | X          | X                   |                          | X                     |
|             | E <sub>stat</sub> |            |                     | X                        |                       |
|             | Beddingsconstante |            |                     | X                        |                       |



Om zowel de opneembare dynamische als wel de statische belasting te bepalen zijn in de regel twee methodes nodig. Het is echter mogelijk om de beddingsconstante uit de CBR-waarde af te leiden.

**a. Welke methoden voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem hanteren de actoren?**

In tabel 8 is een overzicht gegeven van de verschillende actoren en de door hen gebruikte meetmethodes

Tabel 8: Overzicht meetmethodes en actoren.

|             |                   | Actoren |                 |       |        |
|-------------|-------------------|---------|-----------------|-------|--------|
|             |                   | KL      | KL <sub>u</sub> | USACE | Civiel |
| Meetmethode | CI/VCI            | X       |                 | X     | X      |
|             | CBR               | X       | X               | X     | X      |
|             | E <sub>dyn</sub>  | X       |                 |       | X      |
|             | E <sub>stat</sub> |         |                 |       | X      |
|             | Beddingsconstante |         | X               | X     | X      |

**b. In hoeverre voldoen deze methoden aan de gestelde beoordelingscriteria?**

Zoals eerder in deze paragraaf is aangehaald, is het niet mogelijk om met één methode aan alle eisen te voldoen. Er moet een onderscheid gemaakt worden tussen meetmethodes om de effecten van dynamische belasting en de effecten van statische belastingen op de grond inzichtelijk te maken.

**Dynamische belastingen:**

Momenteel worden twee methodes gebruikt die de opneembare dynamische belasting van de bodem bepalen, te weten de CBR-methode en de Edyn. Vanuit theoretisch perspectief zijn beide methodes even bruikbaar. De CBR-methode is ontwikkeld voor in-situ metingen en in de praktijk is het gemakkelijker om met de methode te werken. Daarbij wordt deze methode al door elke actor gebruikt. Hierdoor is de CBR-methode voor Defensie de meest geschikte om opneembare dynamische belastingen van de bodem te bepalen. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat deze methode beperkingen heeft. Wanneer met gronden met een grotere korreldiameter dan twee millimeter wordt gewerkt, is de methode niet meer nauwkeurig en moeten er extra metingen uitgevoerd worden om de nauwkeurigheid te garanderen.

**Statische belastingen:**

De drie meetmethodes om effecten van statische belasting op de draagkracht van de bodem te bepalen zijn; sonderingen of penetrometrie om de



conusweerstand te bepalen, de UCS test om  $E_{stat}$  te bepalen en de bepaling van de beddingsconstante via een plaatbelastingsproef of afleiding via de CBR-waarde. De  $E_{stat}$  is voor Defensie een ongeschikte methode om te gebruiken, omdat deze niet in-situ bepaald kan worden. De conusweerstand en beddingsconstante daarentegen kunnen wel in-situ worden bepaald. Van deze twee gegevens is de conusweerstand de meest nauwkeurige en betrouwbare methode om toe te passen. De conusweerstand heeft als voordelen ten opzichte van de beddingsconstante dat deze eenvoudiger en tot op grotere diepte kan worden bepaald, waardoor een completer beeld van de bodem ontstaat. Dit komt de voorspellingen over het gedrag van de grond op de lange termijn ten goede.

Het grote voordeel van de beddingsconstante blijft dat deze vanuit de CBR waarde is af te leiden. Door slechts één meting uit te voeren, kan er tijdens een verkenning veel tijd worden bespaard.



Koninklijke Landmacht

# 6 Aanbeveling

- 6.1 Aanbeveling 1**
- 6.2 Aanbeveling 2**
- 6.3 Aanbeveling 3**



# 6. Aanbeveling

In dit onderzoek is de conclusie getrokken dat het niet mogelijk is om één methode of parameter, voor het bepalen van de bezwijkspanning van de bodem, toe te passen. Echter de diversiteit van de verschillende meetmethodes hoeft niet zo groot te zijn als het nu is. Twee verschillende methodes, te weten één methode om de statische belasting te meten en één methode om de dynamische belasting te meten, moeten voldoende zijn om in elk terrein te werken. Er zijn hiervoor verschillende mogelijkheden die hieronder worden toegelicht.

## 6.1 Aanbeveling 1

In het onderzoek is verder naar voren gekomen dat de USCS de beste en meest gebruikte methode is om de bodem te classificeren. Door de bodem via deze methode te classificeren kan al in een vroeg stadium van het bodemonderzoek geconcludeerd worden of de bodem mogelijk geschikt is voor het gewenste doel. Uit de USCS kunnen, naast de bezwijkspanning, nog andere grondparameters worden afgeleid. Door Defensie wordt deze methode veelvuldig toegepast en de aanbeveling is om dit te blijven doen.

## 6.2 Aanbeveling 2

In het geval dat het gewenst is om de opneembare dynamische en opneembare statische belasting van de grond met één meetmethode te bepalen, zal dit moeten gebeuren aan de hand van de CBR-methode en de (afgeleide) beddingsconstante. Deze methode levert niet de meest bruikbare resultaten op, maar omdat de waardes van de CBR-methode worden afgeleid, is er slechts één meting nodig. Daarbij sluit het gebruik van deze twee methodes direct aan op de NAVO-standaard die voor alle luchtmachten geldt.

In dit kader wordt de volgende vervolgstap aanbevolen:

- Verder onderzoek naar de relatie tussen de CBR-waardes en de beddingsconstante. Zijn de bestaande grafiek en tabellen bruikbaar en nauwkeurig genoeg?

## 6.3 Aanbeveling 3

Omdat er enkele nadelen aan het gebruik van de CBR-methode in combinatie met de beddingsconstante kleven, kan er voor gekozen worden om toch twee meetmethodes te gebruiken. Dit kan zijn om verschillende redenen. Zo kan een CBR-meting te lang duren voor manoeuvre-eenheden. Ook kunnen zich situaties voordoen waarbij kennis over diepe grondlagen gewenst is. In dit geval is de conusweerstand bruikbaar. Er wordt daarom aanbevolen verder onderzoek naar de relatie tussen de CBR-waarde en de conusweerstand te doen. Er bestaat een zeer grove relatie, maar deze is zeer beperkt en geldt alleen voor Nederlandse zandgronden.



# Bibliografie

- Aarssen, J. (2007). Grondonderzoek in out of area gebieden. Breda: NLDA.
- ASTM International. (2004). Standard Test Method for CBR of Soils in Place.
- Augustijn, D. (2013). Samenstelling van de bodem. In *Civieltechnische Milieukunde* (p. 120). Universiteit Twente.
- Bakker, G., & Boesenkool, R. (2006). Funderen op Celbeton. Universiteit van Tilburg.
- Ciobotaru, T. (2009). *Semi-Empiric Algorithm for Assessment of Vehicle Mobility*. Boekarest: Military Technical Academy.
- Egyed, C., & Visser, H. (2006). Bepaling standaard wegconstructies t.b.v. afweegmodel DOS. Delft: Delft Cluster.
- Eilander. (2006). Grondonderzoek bij de bouw van compounds en wegen. Vaassen: Koninklijke Militaire Academie.
- Fugro. (2013, 11 26). Grondonderzoek: Fugro Nederland. Opgehaald van Fugro Nederland: <http://www.fugro.nl/markten/bouw/bouwputten/grondonderzoek/>
- Fugro. (2013). Landaanwinning voor bruggenhoofden Sint Maarten. Fugro INFO.
- Grogan, A. (2009). Creating a spatial analysis model for generating composite cost surfaces to depict cross country mobility in natural terrain. Tucson: Pennsylvania State University.
- Hack, h. (2012, 11 12). Ground Mechanics Spreading of Stress. Enschede, Overijssel, Nederland.
- Herrick, J., & Jones, T. (2002). A Dynamic Cone Penetrometer for measuring soil penetration resistance. 1320-1324.
- Kerkdijk, H. (2013). *Cross Country Mobility Voorspellingen*. Breda: Ministerie van Defensie.
- NATO Standardization Agency. (2008). NATO Aircraft Classification Numbers (ACN)/ Pavement Classification Number (PCN).
- Nugroho, S. A., Hendri, A., & Ningsih, S. R. (2012). Correlation between index properties and california bearing ratio test of pekanbaru soils with and without soaked. Pekanbaru: Canadian Journal on Enviromental, Construction and Civil Engineering.





- Ooms Construction. (2013, 11 26). Wegenbouw & Waterbouw van Ooms Construction . Opgehaald van Ooms Civiel: [http://www.ooms.nl/nl/3/50/wegenbouw\\_en\\_grondbouw.aspx](http://www.ooms.nl/nl/3/50/wegenbouw_en_grondbouw.aspx)
- Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw. (2011). Handleiding voor industriële buitenverharding in beton. Brussel.
- OTC Genie. (2013). Cursus Boek Terrein Evaluatie. Ministerie van Defensie.
- Priddy, J. (2004). Clarification of vehicle cone index with reference to mean maximum pressure. Terramechanics.
- Rollings, M., & Rollings, R. (1996). Geotechnical Materials in Construction. Vicksburg: McGraw-Hill.
- TIC Service Group. (2011). Light Weight Deflectometer-Measuring Dynamic Modulus and CBR on-site Immediately. Melbourne.
- TU Delft. (2004). Betonverhardingen. Delft.
- TU Delft. (2004). Mechanische eigenschappen van wegenbouwmaterialen. Delft: Technische Universiteit Delft.
- US Army. (1997). FM 5-410. Washington: Department of the Army.
- US Army. (1995). FM 5-430-00-2. US Army.
- US Army. (2012). TM 3-34.64 Military Soils Engineering . Washington D.C.: US Army.
- USACE. (1984). Rigid Pavements for roads, streets, walks and open storage areas. Mobilization construction .
- Vandecasteele, M. (2013). Beoordeling van E-modulus van recyclagebeton met verschillende vervangingsgraad. Oostende: KHBO.
- Verruijt, A. (2001). Grondmechanica. Delft : Technische Universiteit Delft.
- Verruijt, A. (2009). Prof. Ir. A.S. Keverling Buisman Grondlegger van de grondmechanica in Nederland. GEOTECHNIEK, 22-26.
- VNC. (1993). Handleiding Betonwegen. 'S Hertogenbosch.
- Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf. (2013, 11 14). Karakteriseringsproeven WTCB. Opgehaald van [www.wtcb.be](http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&art=4&niv01=4.3): <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=tv-nit&pag=228&art=4&niv01=4.3>