

1 December 2005

## BURO STUDIE NAAR DE DRAAGKRACHT VAN DE ONDERGROND

**Ir. M.F.C. van de Ven**  
TU Delft

Opdrachtgever:

Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat  
Dienst Weg- en Waterbouwkunde  
Van der Burghweg 1  
2628 CS Delft

Contact persoon	Ing. C.C. Montauban
Projectnaam	STUURBOORD/GA3
Verplichtingen nummer	
Datum en nummer offerte	20-07-05/JB/059/05
opdrachtnummer	31520951 (AK)



**K-waarde wordt bepaald via de dynamische elasticiteitsmodulus van de ondergrond, bepaald met het VGD**

## INHOUDSOPGAVE

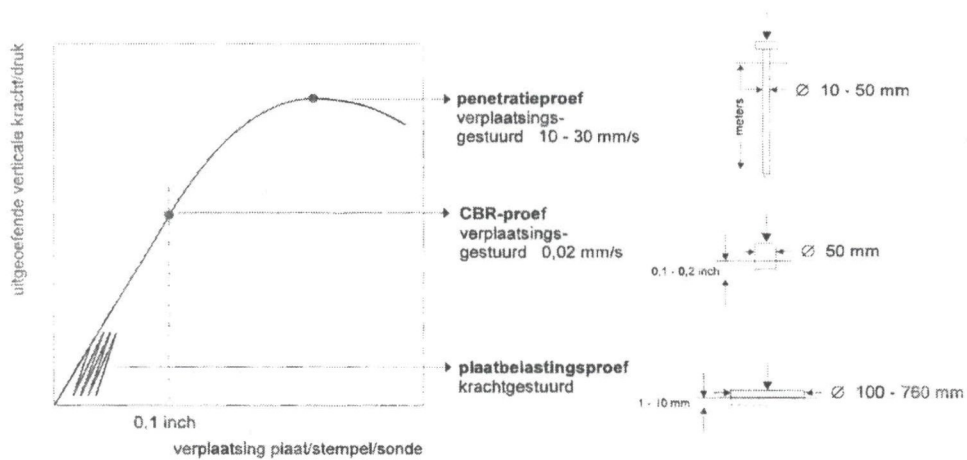
1. Inleiding
2. Principe berekening met GOLFKLAP
3. Literatuur
4. Voorstel procedure beddingsconstante uit literatuur en expert opinion
5. Rapporten NPC en bestaande procedure.
6. Vergelijking voorstel met bestaande procedure.
7. Conclusies en aanbevelingen

### Literatuurlijst

BIJLAGE 1. Globale analyse beddingsconstante uit [2]

BIJLAGE 2. Gevoeligheidsanalyse GOLFKLAP

BIJLAGE 3. DCP proef: korte impressie



## 1. INLEIDING

De beoordeling op het mechanisme golfklap volgt in principe het schema in figuur 8-3.6 van rapport [4]:

### **Veiligheidsbeoordeling van Asfaltdijkbekledingen Achtergrond rapport bij het toetsen van asfaltdijkbekledingen volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid VTV-2002**

In het rapport wordt onderscheid gemaakt tussen de zogenaamde eenvoudige methode en de berekening met GOLFKLAP. Een belangrijke parameter in de berekeningen is de beddingsconstante. Hierbij wordt een elastische ondergrond geschematiseerd door oneindig veel elkaar niet beïnvloedende elastische veren volgens het zogenaamde Winklermodel, waarbij als ondergrondparameter de veerconstante of beddingsconstante wordt gehanteerd.

Bij het ontwerp en voor de eenvoudige toetsing van asfaltbekledingen worden voor de beddingsconstante waarden gehanteerd uit tabellen. Deze waarden betreffen algemeen geaccepteerde gemiddelde waarden.

Voor het uitvoeren van een gedetailleerde beoordeling van een asfaltbekleding op golfklappen wordt gebruik gemaakt van NDO technieken (laagdikte, stijfheid asfalt, stijfheid ondergrond) en materiaalonderzoek om de benodigde informatie over het toetsvak te verzamelen ten behoeve van berekeningen in GOLFKLAP.

Zo wordt op basis van analyse van VGD metingen (waarbij dmv radarmetingen de asfaltlaagdikte is bepaald) de stijfheid voor de ondergrond en het asfalt bepaald. Om de GOLFKLAP berekeningen te kunnen uitvoeren moet de ondergrond stijfheid worden omgerekend naar een beddingsconstante.

Bij het bepalen van een realistische beddingsconstante door middel van de VGD analyse zijn dus twee belangrijke stadia te onderscheiden:

- Bepaling ondergrondstijfheid uit VGD analyse: welke aannames worden gedaan bij het omrekenen van de deflecties naar asfalt- en ondergrond stijfheid en welke invloed heeft dat op de uitkomst.
- Omrekening stijfheid ondergrond naar beddingsconstante: hoe wordt de uit VGD analyses bepaalde ondergrond stijfheid omgerekend naar een beddingsconstante en is dat toegestaan (hoe vergelijkt de spreiding door de VGD met de spreiding door een golfklap).

### Probleemstelling

De beddingsconstante is een invoerparameter voor het computer model GOLFKLAP. Met de beddingsconstante wordt de veerstijfheid van de ondergrond gekarakteriseerd. De beddingsconstante bepaalt dus mede de doorbuiging van en de trekspanning in de asfaltplaat ten gevolge de golfbelasting.

Beddingsconstantes bepaald via VGD analyses en beddingsconstantes zoals gegeven in de huidige ontwerpgrafieken lijken niet met elkaar overeen te komen, waarbij de beddingsconstante uit de VGD metingen volgens KOAC-NPC in de meeste gevallen significant lager zijn dan de waardes voor de huidige ontwerpgrafieken. Dit zou

kunnen betekenen dat de ontwerpgrafieken gebaseerd zijn op te gunstige beddingsconstanten.

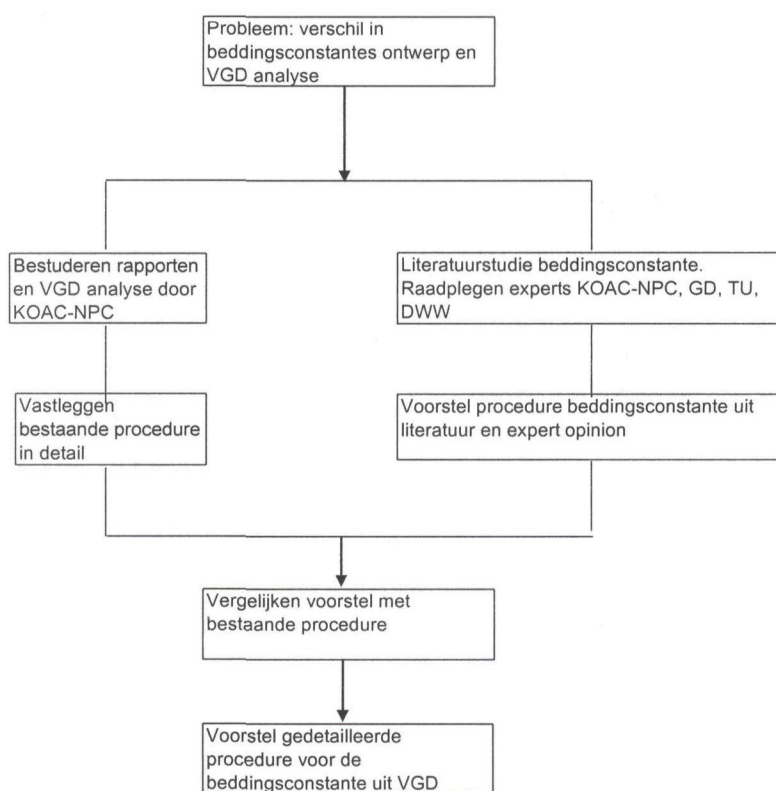
## Aanpak

Analyse van de rapporten van KOAC-NPC over de resultaten van de Waddenzeedijken hebben geen duidelijk inzicht gegeven in de procedure hoe de ondergrond stijfheid (geen data beschikbaar) wordt bepaald en de omrekening van deze stijfheid naar een beddingsconstante. In feite is er geen gedetailleerde procedure beschrijving beschikbaar.

Het is duidelijk dat de aannames voor het omrekenen van de deflecties naar stijfheden een belangrijke rol kunnen spelen. Ook is het natuurlijk de vraag of de in de ontwerpgrafieken gemiddelde waarden wel direct vergeleken kunnen worden met de karakteristieke (dus relatief veilig lage) waarden, zoals per toetsvak op basis van VGD analyses na statische verwerking is gedaan.

Via een bureau-studie zal worden nagegaan of de geconstateerde problematiek kan worden opgelost. Hierbij zal onder meer de kennis van KOAC-NPC, GD en TUD worden gemobiliseerd.

De opzet van de aanpak is hieronder in een stroomschema aangegeven.





Voor het ontwerpen en toetsen van bekledingen met het GOLFKLAP-model wordt de ondergrond gekarakteriseerd door de beddingsconstante. Voorheen werden algemeen geaccepteerde waarden uit handboeken gebruikt, nu worden steeds meer de uit VGD-metingen afgeleide waarden gebruikt. Het blijkt dat deze slecht overeenkomen. Het is daarom de bedoeling om met een bureau-studie na te gaan of hier enige verklaring voor is te vinden.

Voor het uitvoeren van de bureau-studie zijn de volgende werkzaamheden uitgevoerd:

- Het opstellen van gedetailleerd onderzoekplan, waarin een lijst met relevante stukken is opgenomen (dit betreft zowel meetrapporten van KOAC-NPC als openbare literatuur).
- Uit de rapporten van KOAC-NPC moet duidelijk blijken of er een probleem is en hoe groot het probleem is.
- Kan via de literatuur dit probleem worden opgelost.

In hoofdstuk 2 wordt kort de formule van GOLFKLAP beschreven en het belang aangegeven van het gebruik van de juiste beddingsconstante.

Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 een samenvatting gegeven uit de literatuur.

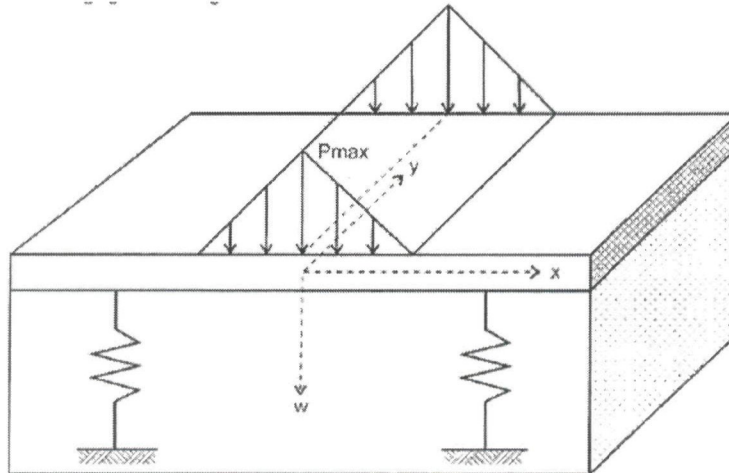
Hieruit volgt een voorstel dat is samengevat in hoofdstuk 4.

In hoofdstuk 5 worden de resultaten van KOAC-NPC nader beschouwd en de gevolgde procedure vastgelegd. Het voorstel uit de literatuur en de benadering van KOAC-NPC worden in hoofdstuk 6 met elkaar vergeleken, waarna er in hoofdstuk 7 wordt afgesloten met conclusies en aanbevelingen.

## 2. PRINCIPE BEREKENING MET GOLFKLAP

Het principe van de berekening is als volgt:

Uitgangspunt is dat golfklappen buiging in een plaat veroorzaken en dat de optredende spanning tengevolge van het buigend moment de bezwijkspanning van de asfaltplaat niet mag overschrijden. De bekleding en de ondergrond zijn geschematiseerd tot een elastisch ondersteunde ligger. De GOLFKLAP is geschematiseerd tot een driehoeksbelasting, zoals weergegeven in figuur 1.



**Figuur 1. Schematisatie van het GOLFKLAP model.**

De optredende maximale trekspanning aan de onderzijde van het asfalt bedraagt midden onder de belasting ( $x = 0$ ):

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{4\beta^2 \beta z} \left[ 1 - e^{(-\beta z)} (\cos(\beta z) + \sin(\beta z)) \right] \frac{6}{h^2}$$

met

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3c(1-\nu^2)}{Sh^3}}$$

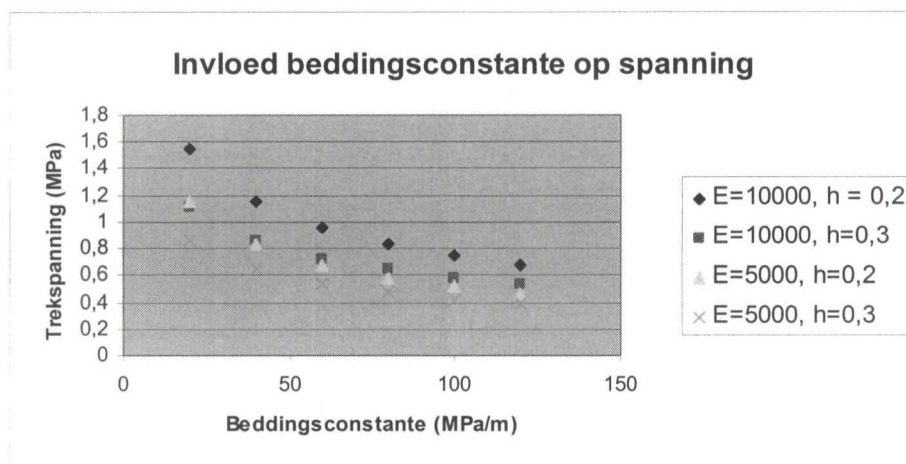
$\sigma$	Optredende trekspanning aan de onderzijde van de bekleding (MPa)
$P_{\max}$	Maximale drukstoot (MPa)
$h$	Laagdikte (m)
$z$	Halve breedte driehoeksbelasting ( $=0,5H$ )
$c$	Beddingsconstante van de ondergrond (MPa/m)
$s$	Stijfheidsmodulus van het asfalt (MPa)
$\nu$	Constante van Poisson van het asfalt (-)

Zoals kan worden gezien in de twee formules is de beddingsconstante onderdeel van de formule voor  $\beta$ . De term  $\beta$  komt uitgebreid voor in de formule voor de berekening van de maximaal optredende trekspanning, zoals gegeven in de eerste formule.

Met behulp van deze formules kan ook alvast een gevoeligheids analyse worden uitgevoerd welke invloed de beddingsconstante überhaupt kan uitoefenen op het resultaat.

In figuur 2 is een eenvoudig voorbeeld gegeven, waaruit blijkt dat de invloed van de beddingsconstante op de te berekenen trekspanning volgens het GOLFKLAP model heel groot kan zijn.

In dit voorbeeld zijn realistische waarden voor de golfhoogte H ( 2 m), de stootfactor q (3,5) en de maximale drukstoot (0,07 MPa) aangehouden.



**Figuur 2. Verandering van trekspanning tengevolge van variatie in de beddingsconstante.**

Het blijkt dat toename van de beddingsconstante van ongeveer 20 MPa/m naar 120 MPa/m een halvering van de trekspanning onder in het asfalt teweeg brengt.

In bijlage 2 is een uitgebreide gevoeligheidsanalyse samengevat in een aantal grafieken.

Momenteel worden voor het uitvoeren van een gedetailleerde beoordeling valgewicht-deflectie (VGD) metingen ingezet om de stijfheid van de asfaltbekleding en de ondergrond te bepalen.

Zoals in de hierboven gegeven formules is aangegeven, moet voor het berekenen van de maximale spanning ook de beddingsconstante worden ingevoerd. Met de deflectiemetingen worden de asfaltstijfheid en de stijfheid van de ondergrond bepaald. De beddingsconstante wordt vervolgens door een omrekenformule uit de stijfheid van de ondergrond bepaald volgens de volgende formule:

$$c = \frac{E}{2a(1-\nu^2)}$$

- c        Beddingsconstante (MPa/m)
- E        Elasticiteitsmodulus van de ondergrond (MPa)
- a        Straal van de belaste plaat (m)
- $\nu$        Dwarscontractiecoëfficiënt (0.35 voor zand)

Het is niet duidelijk of de gehanteerde formule juist is. Ook is niet duidelijk welke waarde moet worden ingevoerd voor de straal van de belaste plaat.

In het algemeen moet worden nagegaan of het mogelijk is om de dynamische elasticiteitsmodulus van de ondergrond en de beddingsconstante uit elkaar te berekenen.

Daarnaast zal worden bekeken of de huidige ontwerpgrafieken die zijn opgenomen in de Veiligheidsbeoordeling [3] en het Technisch rapport [4] juist zijn.

### 3. LITERATUUR

In [2, van de Ven] is aangegeven dat er een discrepantie lijkt te bestaan tussen de gebruikte formule en de ondergrond modulus zoals bepaald uit zogenaamde surface modulus plots (een gebruikelijke techniek bij het analyseren van VGD metingen) op basis van deflectiemetingen voor de Waddenzee.

De gevolgde procedure is hierbij geweest:

- bepaal een zogenaamde oppervlakte modulus plot op basis van de VGD metingen
- Schat een ondergrond modulus op basis van het verloop van de oppervlakte modulus in de verst verwijderde meetpunten
- Gebruik deze modulus om de beddingsconstante te berekenen

Het probleem bij deze oefening is, dat de straal van het belasting oppervlak moet worden gegeven. Indien het belasting oppervlak ter plekke van de overgang asfalt-ondergrond moet worden bepaald, wordt dit een lastige zaak. In bijlage 1 is gegeven wat de beddingsconstante wordt op basis van een spreidingshoek van 45 graden. In tabel 1 is aangegeven hoe de waardes worden voor een spreidingshoek van 60 graden.

**Tabel 1. Relatie tussen c en E voor een aangenomen spreiding van 60 graden en dwarscontractie van 0.35**

	D = 0.2 m	d = 0.3 m	d = 0.4 m
A	0.50	0.67	0.84
$2a(1 - \nu^2)$	0.87	1.17	1.48
c =	E/0.87	E/1.17	E/1.48

Interessant is hier te zien dat, in vergelijking met de analyse in bijlage 1, het nu wel mogelijk is dat c kleiner wordt dan E en wel bij hogere diktes van de asfaltlaag.

**Tabel 2. Geschatte waardes van minimale beddingsconstante c voor verschillende laagdiktes voor de boven- en onderlijn voor een spreiding van 60 graden. [2]**

Eondergrond (MPa)	Beddingsconstante (MPa/m) bij minimale Eondergrond en verschillende laagdikte		
	D = 0.2 m	D = 0.3 m	D = 0.4 m
102.2 (min. Bovenlijn)	117.5	87.4	69.1
87.1 (min. Onderlijn)	100.1	74.4	59.1



Vergelijking van deze waarden met de waarden in bijlage 1 geven aan dat veranderingen in laagdikte en spreiding (stijfheid asfalt) tot de ondergrond aanzienlijke verschillen in de beddingsconstante kunnen geven. Ook blijkt dat bij eenzelfde ondergrond modulus, maar met verschillende asfalt laagdiktes, verschillende beddingsconstantes worden gevonden. De beddingsconstante is niet constant.

In [5, Huurman] wordt op basis van probabilistische berekeningen aangegeven wat het belang is van de beddingsconstante voor het bepalen van de Miner som. Gemiddeld over de dijkvakken wordt de variantie in de Miner som in [5] als volgt verklaard:

Variantie in logk	85%
Variantie in log beddingsconstante	8%
Variantie in log bekleding	7%
Variantie in laagdikte	1%

Hieruit blijkt dat de beddingsconstante de tweede plek inneemt in het verklaren van de variantie in de Miner som. Het benadrukt nogmaals het belang van een goede procedure voor het bepalen van de beddingsconstante uit de VGD metingen.

In [3, TAW] wordt aangegeven (bijlage 6. Achtergronden bij de grafieken voor het dimensioneren op golfklappen) dat de bekleding en ondergrond zijn geschematiseerd tot een elastisch ondersteunde ligger en dat de golfklap is geschematiseerd tot een driehoeksbelasting. De theorie van de elastisch ondersteunde ligger wordt uitgebreid behandeld in [6, Verruijt]. De theorie van de over de gehele lengte elastisch ondersteunde ligger is oorspronkelijk (einde 19<sup>e</sup> eeuw door Winkler en Zimmermann) ontwikkeld voor de berekening van de spoorwegbovenbouw. Voor de afleiding van de differentiaal vergelijking is uitgegaan van de bekende elementaire balktheorie. De bekende basisvergelijking van de elementaire balktheorie is:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = f$$

E	Elasticiteitsmodulus asfalt
I	Traagheidsmoment balk
w	Verticale verplaatsing(van de neutrale lijn)
f(x)	Belasting (in N/m)

Gesteld wordt dat de belasting op de balk niet alleen bestaat uit de uitwendige lijnbelasting  $f(x)$ , maar ook uit een reactie van de ondergrond. Deze reactie wordt aangegeven met  $g(x)$ , uitgedrukt in (N/m) en is positief in negatieve z-richting. De vergelijking wordt dan:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = f(x) - g(x)$$

De reactie van de ondergrond  $g(x)$  hangt af van:

- de eigenschappen van de grond,

- de geometrie van de fundering en het grondlichaam
- de verticale verplaatsing  $w$

Het eenvoudigste verband tussen  $g$  en  $w$  is een lineair verband:

$$g = k \cdot w$$

In dat geval wordt de differentiaalvergelijking:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = f(x)$$

Deze differentiaalvergelijking kan voor diverse gevallen worden opgelost. Deze oplossingen worden beschreven in [6].

De reactie van de ondergrond is een lijnlast. De tegendruk van de ondergrond is:

$$p = g/b$$

met  $b$  de breedte van de balk. Omdat  $g = k \cdot w$  kan dit ook geschreven worden als:

$$p = \frac{k}{b} w = cw$$

De grootte  $c$  wordt de beddingsconstante genoemd.

Het invoeren van de beddingsconstante betekent een sterke simplificatie van het gedrag van de ondergrond. Gemakkelijk kan worden gezien dat zelfs bij een ondergrond bestaande uit een lineair elastisch materiaal de beddingsconstante afhankelijk is van de breedte van de balk. Dit komt omdat het materiaal ter weerszijden van de balk ook enigszins wordt ingedrukt.

De differentiaalvergelijking kan ook geschreven worden als:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{f}{EI}$$

waarin:

$$4\beta^4 = \frac{k}{EI}$$

of:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{cb}{4EI}}$$

Deze parameter is identiek aan die gebruikt voor golfklap in aanmerking nemende dat voor  $I = 1/12 bh^3$  geldt en met in achtname van plaatwerking  $(1-\nu^2)$ .

In [7, CROW] wordt de beddingsconstante gekoppeld aan moduli bepaald uit plaatbelastingsproeven. Voor de interpretatie van plaatbelastingsproeven wordt in het algemeen de volgende formule gehanteerd:

$$E_v = f \frac{P}{z} (1 - \nu^2)$$

f	Factor die afhangt van de plaatstijfheid en positionering zakkingsopnemers
p	Plaatbelasting in kPa
z	Plaatzakking in m
r	Straal van de plaat in m
$\nu$	Dwarscontractiecoëfficiënt

De factor  $f$  kan theoretisch variëren tussen 1,27 en 2,0.

In de praktijk wordt vaak als gemiddelde de volgende formule toegepast:

$$E_v = 0,75 \frac{P}{z} d$$

Hierbij wordt de elasticiteitsmodulus van de ondergrond in verticale richting constant verondersteld.

Vergelijken we dit met het Winler model, waarbij voor de ondergrond de veerconstante of beddingsconstante  $c = p/z$  wordt gehanteerd, dan wordt gevonden:

$$c = \frac{E_v}{f(1 - \nu^2)}$$

Hoewel uit de formule voor de beddingsconstante ( $c=p/z$ ) wordt aangenomen dat de plaatszakking onafhankelijk is van de plaatdiameter, blijkt in de praktijk dat bij een in verticale richting constante elasticiteitsmodulus de beddingsconstante geen constante is maar afhangt van de plaatdiameter. Dit blijkt ook uit de formule en is in overeenstemming met [6].

In [7] wordt wel gemeld dat indien de elasticiteitsmodulus met de diepte toeneemt, zoals bij normaal geconsolideerde klei meestal het geval is, het Winkler model wel voldoet en  $c$  inderdaad constant is.

Ook wordt in [7] gemeld dat in de praktijk voor de beddingsconstante van de ondergrond de waarde wordt aangehouden die is verkregen uit plaatbelasting proeven met een diameter van 0,76 m. Indien kleinere diameters worden toegepast dient een reductiefactor te worden gebruikt.

Volgens [7] kan in het algemeen worden aangenomen dat de stijfheid of de weerstand tegen (relatief kleine) vervormingen groter is naarmate:

- de korrelmassa beter is gegradeerd
- de gemiddelde korreldiameter groter is
- de korrels hoekiger zijn, het korreloppervlak ruwer is en de materiaalsterkte groter
- de verdichtingsgraad hoger is

- het spanningsniveau hoger ligt.

Interessant zijn de tabellen die in [7] worden gegeven als richtwaarden. Ze zijn gegeven in tabel 3 en 4.

**Tabel 3. Richtwaarden voor de beddingsconstante volgens Scott (c in MN/m<sup>3</sup> voor plaat met afmeting van 1 ft). uit [7]**

Materiaal	verdichtingsgraad		
	Los	middelmatig	vast
Droog of vochtig zand	10-30	30-150	150-500
Verzadigd zand	12	45	150

**Tabel 4 . Richtwaarden voor de beddingsconstante als functie van de grondsoort volgens CROW, gebaseerd op plaatbelastingsproeven met diameter 0,76 m [7].**

Materiaal	C <sub>0,76</sub> in MN/m <sup>3</sup>
Goed-gegradeerd grind en grindzand mengsels, weinig of geen fijn	80-130
Slecht-gegradeerd grind, weinig of geen fijn	80-130
Grind-zand-klei mengsels	50-130
Goed-gegradeerd zand en grindig zand, weinig of geen fijn	50-100
Slecht-gegradeerd zand, weinig of geen fijn	40-100
Zand-klei mengsels	30-80
Zeer fijn zand, leemhoudend zand	30-50

Een uitstekend overzicht van de literatuur wordt gegeven in [8]. Het Handboek Zandboek, CROW [8] behandelt de problematiek van diverse kanten. Kort wordt hier ingegaan op de relatie tussen plaatbelastingsproef en de beddingsconstante.

Indien de plaat oneindig stijf is ten opzichte van de ondergrond, bedraagt de zakking zowel in het midden als de randen:

$$z = \frac{\pi}{2} \frac{pr(1-\nu^2)}{E} = 1,57 \frac{pr(1-\nu^2)}{E}$$

Indien de plaat slap of flexibel is ten opzichte van de ondergrond, is de zakking in het midden (z<sub>m</sub>) groter dan die aan de randen (z<sub>r</sub>).

$$z_m = 2 \frac{pr(1-\nu^2)}{E}$$

respectievelijk



$$z_r = \frac{4}{\pi} \frac{pr(1-\nu^2)}{E} = 1,27 \frac{pr(1-\nu^2)}{E}$$

De gemiddelde zakking van een flexibele plaat bedraagt, afhankelijk van de wijze van de middeling:

$$z_g = (1,64 - 1,70) \frac{pr(1-\nu^2)}{E}$$

De plaatzakking bedraagt dus in algemene zin:

$$z = f \cdot p \cdot r \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E}$$

De waarde van f varieert dus tussen 1,27 en 2,0. De dwarscontractie coefficient varieert tussen 0,25 (zand, grindzand) en 0,5 (cohesief materiaal, klei). De factor  $f(1-\nu^2)$  varieert dus tussen 1,0 en 1,9. Middeling geeft dan de veel gebruikte formule in de praktijk:

$$z \approx 1,5 \frac{pr}{E} = 0,75 \frac{pd}{E}$$

De elasticiteitsmodulus van de ondergrond ( $E_v$ ) wordt voor statische belasting veelal met een plaatbelastingsproef bepaald.

$$E_v = f \cdot \frac{P}{z} \cdot r(1-\nu^2)$$

Hierbij is aangenomen dat de elasticiteitsmodulus van de ondergrond in verticale richting constant is.

Combinatie van de formule met het Winkler model (beddingsconstante  $c = p/z$ ) geeft op eenvoudige wijze de formule voor de beddingsconstante uit de plaatbelastingsproef:

$$c = \frac{E_v}{f \cdot r \cdot (1-\nu^2)}$$

De schematisatie volgens Winkler (1867) is een simplificatie, immers:

- het veringsgedrag bij belasten en ontlasten kan in de praktijk niet worden voorgesteld door een getal (beddingsconstante). Bij belasting wordt een deel van de aangewende energie omgezet in verdichting.
- Het blijkt bij uitvoering met verschillende plaatdiameters dat de beddingsconstante bij een constante elasticiteitsmodulus van de ondergrond geen constante is maar afhangt van de plaatdiameter.

In het algemeen wordt in de praktijk als beddingsconstante van de ondergrond de waarde aangehouden die verkregen is uit plaatdrukproeven met een 30 inch-plaat (diameter 0,76 m). Voor andere plaatafmetingen wordt de reductiefactor van Stratton meestal gebruikt:

$$k_{0,76m} \approx \frac{1}{1,25} k_{0,50m} \approx \frac{1}{2,1} k_{0,30m} \approx \frac{1}{3,15} k_{0,16m}$$

alsmede

$$k_{0,76m} \approx \frac{1}{6,4} k_{0,05m(CBR\text{-stempel})}$$

Met de formule  $E_v=0,75.c.d$  die opgaat voor een plaat met een diameter van 0,76 m kan de volgende formule voor de beddingsconstante worden afgeleid:

$$k_{0,76} \approx 1,75 E_v$$

Hierbij zijn de dimensies respectievelijk (MN/m<sup>3</sup>) en (MPa).

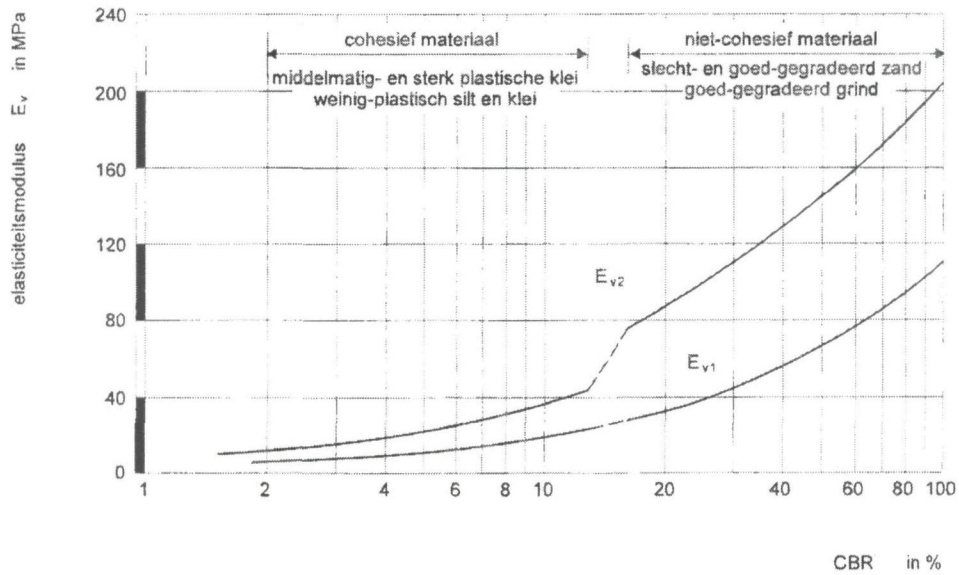
#### Relatie CBR en beddingsconstante

Omdat ook veel gebruik wordt gemaakt van de CBR waarde en er vele relaties met elasticiteitsmodulus en beddingsconstante zijn ontwikkeld, wordt dit ook nog even kort behandeld. De relatie kan belangrijk zijn om eventueel te besluiten of bepaalde metingen zinvol kunnen zijn voor dijkbekledingen.

Als theoretisch verband tussen de elasticiteitsmodulus van de ondergrond  $E_v$  (plaatdiameter 762 mm) en de CBR waarde voor matig- en dichtgepakt zand kan worden afgeleid [8]:

$$E_v \text{ (MPa)} \sim 2,4 \text{ CBR(\%)}$$

Floss [8] geeft relaties voor cohesief en niet-cohesief materiaal. Deze zijn in figuur 3 weergegeven.

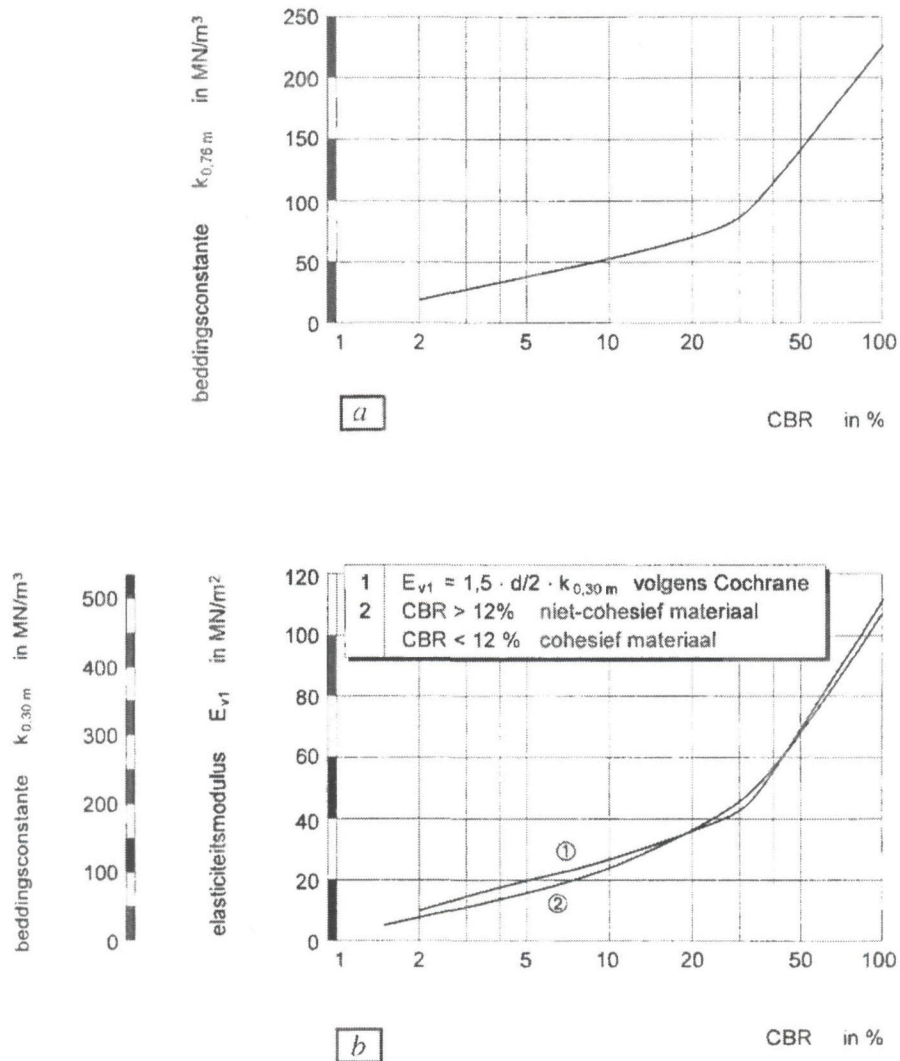


**Figuur 3. Verband tussen de elasticiteitsmodulus (Ev1 is eerste maal, Ev2 is tweede maal belasten) volgens de Duitse plaatbelastingsproef (diameter 300 mm) en de CBR proef [8].**

Deze relatie vertegenwoordigt de statische elasticiteitsmodulus en is dus niet gelijk aan de veel gebruikte relatie  $E_{dyn} = 10 \text{ CBR}$  die veel wordt gebruikt in de wegenbouw. De op deze wijze afgeleide dynamische elasticiteitsmodulus kan voor niet-cohesief materiaal met een factor 2,5 a 4 groter zijn dan de statische elasticiteitsmodulus.

Op basis van veldexperimenten van Cochrane [8] kunnen resultaten zoals aangegeven in figuur 4 worden samengevat.

$$k_{0,76\text{ m}} \approx \frac{1}{2,1} k_{0,30\text{ m}}$$



**Figuur 4. Verbanden tussen de beddingsconstante van platen met verschillende admetingen en de CBR waarde.**

De waarden in figuur 3 kunnen worden omgerekend met de formule:

$$E_v \text{ (MPa)} = 1,5 \cdot d/2 \cdot k_{0,30} \text{ (MN/m}^3\text{)}$$

Vervolgens kan dan worden gesteld:

$$K_{0,76\text{ m}} \sim 1/2,1 k_{0,30\text{ m}}$$

Ook wordt gevonden:



$$K_{\text{CBR}} = 27 \text{ CBR}$$

Lubking [8] vond voor vochtige Nederlandse zanden:

$$K_{\text{CBR}} \sim 32,5 \text{ CBR}$$

Waarbij de CBR waarde was bepaald in het laboratorium met ballast schijven.

Ook geldt zoals al eerder is aangegeven:

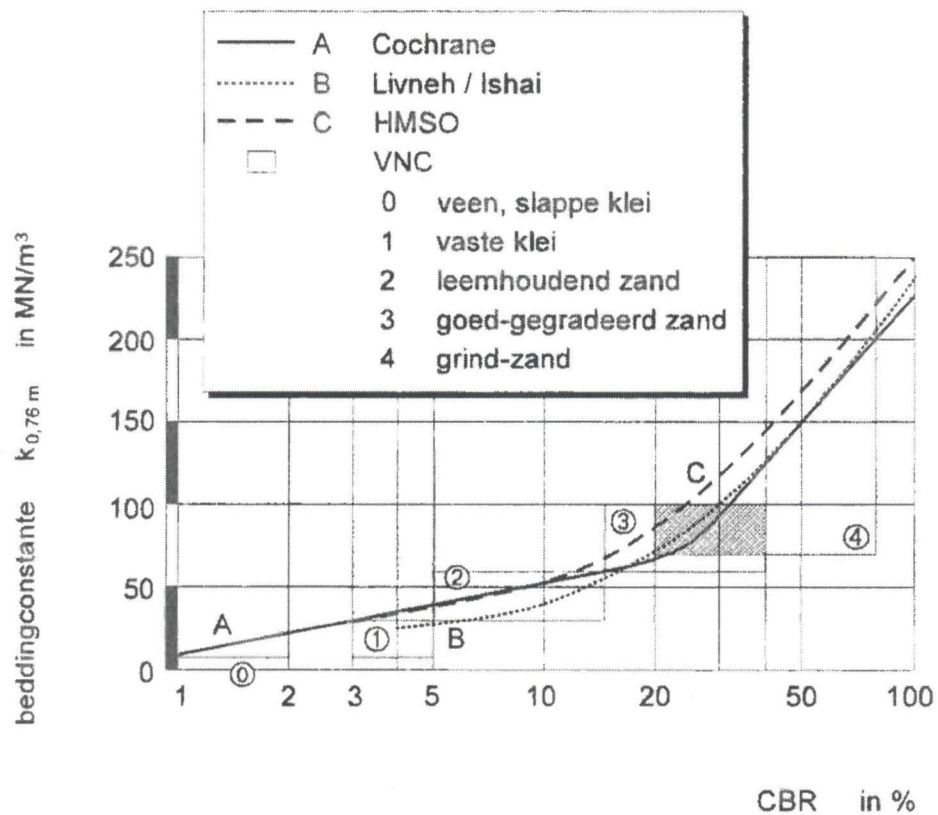
$$K_{0,76\text{m}} \sim 1/(6,4) \cdot k_{\text{CBR}}$$

Hieruit volgt dat ongeveer geldt:

$$K_{0,76} \sim 5 \cdot \text{CBR} \quad \text{en} \quad k_{0,30} \sim 10 \cdot \text{CBR}$$

Andere relaties tussen CBR en de beddingsconstantes zijn samengevat in figuur 5 [8].

Figuur 4.72

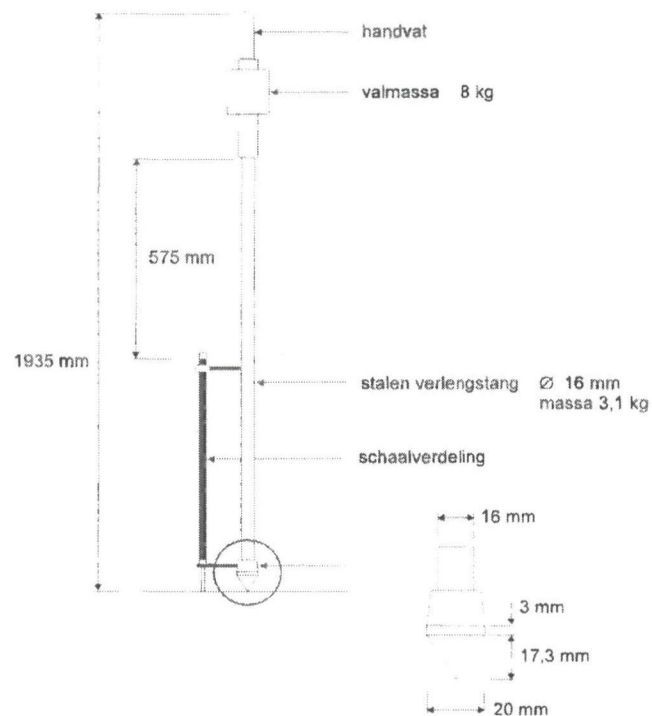


Figuur 5. Aanbevolen betrekkingen tussen de beddingsconstante van een plaat met diameter 762 mm en de CBR waarde

Correlaties tussen plaatbelastingsparameters en penetratieparameters.

Het is interessant om na te gaan welke correlaties in de weg- en vliegveldbouw worden gebruikt, omdat hier met een dynamische stijfheid van de ondergrond wordt gerekend. Voor de berekening met GOLFKLAP moet ook gebruik worden gemaakt van dynamische elasticiteitsmoduli.

In de weg- en vliegveldbouw wordt veel gebruik gemaakt van de zogenaamde dynamic cone penetrometer (DCP). Voor een indruk van de apparatuur zie figuur 6.



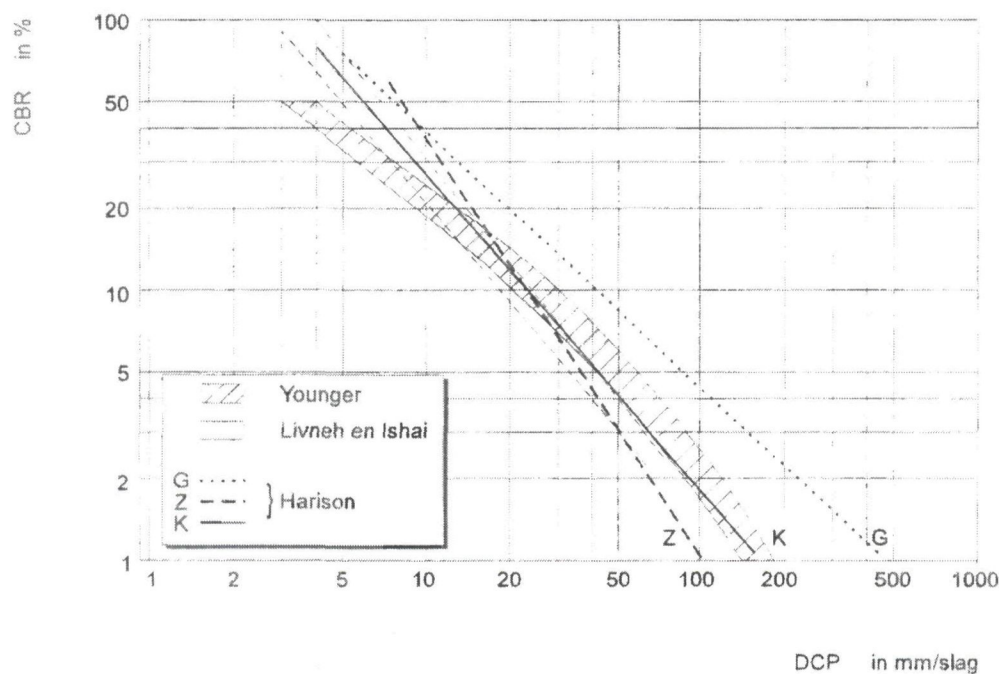
**Figuur 6. Gangbare DCP apparatuur, gebaseerd op de Scala penetrometer.**

DCP onderzoek wordt standaard veel toegepast in Australië, Afrika en Israel. DCP onderzoek is ook uitermate geschikt voor monitorings onderzoek zoals regelmatig noodzakelijk voor toetsing van bestaande zeedijken. Het is eenvoudig mogelijk om de gaten die ontstaan zijn omdat een aantal kernen geboord zijn voor het asfaltonderzoek voor de toetsingsprocedure, te gebruiken om DCP proeven uit te voeren. Tot een diepte van ongeveer 1 meter kan desgewenst informatie worden gekregen over de draagkracht van de ondergrond waar de asfaltbekleding op rust.

Er is ook een empirische relatie ontwikkeld tussen DCP en SPT.

$$\text{Log (mm/DCP-slag)} = -1,05 + 2,03\text{log(mm/SPT-slag)}.$$

In figuur 7 zijn verbanden gegeven tussen DCP en CBR volgens diverse onderzoekers.



**Figuur 7. Verband tussen de DCP-weerstand en de CBR-waarde volgens diverse onderzoekers.**

Voor de formules van Harrison (Z,G,K) geldt:

Z: Zand	$\log \text{ CBR} = 3,03 - 1,51 \cdot \log (\text{mm/DCP-slag})$
G: Goedgegradeerd Grind	$\log \text{ CBR} = 2,55 - 0,96 \cdot \log (\text{mm/DCP-slag})$
K: Kleilig materiaal	$\log \text{ CBR} = 2,56 - 1,16 \log(\text{mm/DCP-slag})$

Op deze manier zou op indirecte wijze via DCP metingen op de ondergrond van het dijklichaam een goede indruk kunnen worden verkregen van het draagvermogen van de ondergrond en via de relatie met de CBR een schatting van de beddingsconstante kunnen worden gemaakt. In bijlage 3 is een korte impressie gegeven van de methode zoals toegepast in Zuid Afrika.

#### Statische proeven versus dynamische proeven

De mechanische eigenschappen onder invloed van statische belastingen kunnen in situ worden bepaald met behulp van diverse meetmethoden. Voor de vaststelling van het verings- of vervormingsgedrag wordt veelal een plaatbelastingsproef uitgevoerd. De CBR proef geeft inzicht in het totale spanningsvervormingsgedrag, waardoor informatie over zowel stijfheid als sterkte beschikbaar komt.

In de literatuur wordt meestal een beddingsconstante bepaald met behulp van de plaatbelastingsproef. Hierbij worden verschillende stappen tijdens de proef gebruikt voor het bepalen van de beddingsconstante.

Zo zijn er de Duitse, de Zwitserse en USA procedures. In de meeste gevallen wordt de k-waarde niet bepaald in de eerste belastingsstap, maar minimaal in de tweede. Ook worden verschillende plaatdiameters gebruikt, afhankelijk van de grofheid van het materiaal. Uit praktische overwegingen wordt geprobeerd om zo gering mogelijke plaatdiameters te gebruiken teneinde de belasting zo laag mogelijk te houden.

In de GOLFKLAP berekeningen zijn de belastingsomstandigheden niet statisch. De maatgevende klappen worden geacht met een frequentie van tussen de 5 en 10 Hz op de dijkbekleding te beuken.

De mechanische eigenschappen onder invloed van dynamische belastingen kunnen in situ met behulp van vele meetmethodes worden bepaald.

Methodes die op dijken kunnen worden gebruikt zijn: valgewichtdeflectometer, de dynamische plaatbelastingsproef, de Dynaplaque, de Clegg hamer, de Loadman, etcetera.

In gevallen waar het materiaal aan een trillende belasting wordt onderworpen kunnen zowel het vervormingsgedrag onder invloed van trillingen als de doorlooptijd van de trillingen worden gemeten. Beide methodes leveren dynamische elasticiteitsmoduli. Bekende voorbeelden zijn: Dynaflectmetingen, Road Vibration Machine, SASW metingen.

Een speciale methode is de slagsondering. De slagsondering wordt vanaf het maaiveld uitgevoerd en niet zoals de Standard Penetration Test (SPT) vanaf de bodem van een boorgat. Daardoor is de proef sneller en eenvoudiger uitvoerbaar dan de SPT.

De dynamische elasticiteitsmodulus wordt in de wegebouw veel toegepast. In de praktijk wordt veel gebruik gemaakt van de relatie die voor niet-gebonden materialen blijkt te bestaan tussen de dynamische (gemeten) elasticiteitsmodulus en de CBR waarde.

Deze luidt volgens SCW [8]:

$$E_{\text{dyn}} \text{ (MPa)} = (5-20) \text{ CBR (\%)}$$

Met de alom bekende standaard vuistregel:

$$E_{\text{dyn}} \text{ (MPa)} = 10 \text{ CBR (\%)}$$

De elasticiteitsmodulus ontleend aan statische beproevingsmethodes zoals de statische plaatbelastingsproef of de Benkelman-balk, etcetera, ligt veel lager dan de dynamische elasticiteitsmodulus.

In het algemeen worden in de literatuur de volgende verbanden tussen de statische en de dynamische elasticiteitsmodulus gevonden:

$$E_{\text{dyn}} \sim (2-2,5) E_{\text{stat}} \text{ voor grofkorrelig materiaal}$$

$$E_{\text{dyn}} \sim (3-4) E_{\text{stat}} \text{ voor fijnkorrelig materiaal}$$

Het voordeel van de VGD meting is dat een dynamische belasting op het dijklichaam wordt uitgeoefend.



#### 4. VOORSTEL PROCEDURE BEDDINGSCONSTANTE UIT LITERATUUR EN EXPERT OPINION

In [9] is zowel een dynamische als een traag-cyclische rek component beschreven. De achtergrond voor het bepalen van de beddingsconstante in beide gevallen zou nog eens nader moeten worden beschouwd. In het algemeen geldt dat de traagcyclische beddingsconstante beduidend lager uitvalt dan de dynamische beddingsconstante. Dit is in lijn met wat uit de literatuur bekend is.

Voor zover bekend wordt in GOLFKLAP slechts met de dynamische aspecten rekening gehouden.

In [9] kan worden gevonden dat de ondergrondstijfheid als een equivalente veerconstante in het rekenmodel is gekenschetst door middel van een multivariate vorm.

$$K_{eq} = f\{G_a, h_a, B=H, D_r, s\} \quad (\text{MPa/m})$$

Waarin:

$G_a$ ,	Representatieve dynamische glijdingsmodulus van het asfalt (GPa)
$h_a$ ,	De bekledingsdikte (m)
$B=H$ ,	De representatieve golfhoogte (m) = tevens belastingsbreedte
$D_r$	De relatieve dichtheid van het zand (fractie, dus niet in %)
$s$	De stootfactor

Uit de tabel 8 in [9] blijkt dat de equivalente veerstijfheid, berekend met de multivariate vorm, varieert tussen 85,5 en 114 MPa/m.

Deze waarden geven een goede indicatie van de spanningsafhankelijkheid van de ondergrondreactie. Ook is te zien welke waarden voor de beddingsconstante verwacht kunnen worden. Getoond wordt dat bij verschillen in asfaltdikte van 150 mm tot 250 mm de beddingsconstante niet veel verandert.

Voorgesteld wordt om deze analyses nog eens goed te bestuderen en mede als uitgangspunt te nemen voor een op te zetten procedure.

De VGD metingen zijn in principe geschikt om een spanningsafhankelijke beddingsconstante voor de ondergrond te bepalen. Zowel het feit dat de belasting dynamisch is, als het feit dat de belasting kan worden gevarieerd, maakt de methode in principe geschikt. Ongelukkig genoeg is de belastingsvorm beduidend anders dan die bij de golfbelasting wordt aangenomen.

Een groot voordeel van de VGD meting is dat het resultaat kan worden opgevat als een dynamische plaatbelastingsproef en daarmee vergeleken kan worden met de statische stijfheden en de daaruit berekende k-waarden.

Hierbij geldt duidelijk dat de dynamische belasting in een beduidend hogere Edyn resulteert ten opzichte van de statische plaatbelastingsproef. Zoals in de literatuur wordt aangetoond kan deze waarde voor fijnkorrelig materiaal tot een factor 3 a 4

hogere elasticiteitsmodulus leiden ten opzichte van de statische plaatbelastingsproef met gelijke afmetingen.

Jammer genoeg vindt de belasting met het VGD plaats op het asfaltoppervlak plaats en niet op de ondergrond. Om deze reden is het ook belangrijk om de VGD resultaten te koppelen aan de berekende resultaten in [9].

Zeer voorzichtig moet worden omgegaan met het koppelen van de resultaten aan waardes zoals gevonden met statische plaatbelastingsproeven. Bij gebruik van dezelfde formules zou voor de ondergrond de dynamische stijfheid moeten worden gebruikt.

Wel is het mogelijk om aansluiting te zoeken met de in de wegebouw veel gebruikte relatie tussen de CBR waarde en de dynamische elasticiteitsmodulus van de ondergrond om een indruk te krijgen van de waarde die wordt bepaald met de VGD meting.

Het beste lijkt om de spanningsafhankelijkheid van de beddingsconstante in rekening te brengen via de mate van spreiding door de asfaltlaag. Hierbij spelen de laagdikte en de elasticiteitsmodulus van het asfalt een belangrijke rol.

## 5. RAPPORTEN KOAC-NPC EN BESTAANDE PROCEDURE.

De bestaande procedure gebruikt door KOAC-NPC is niet duidelijk. Voor het bepalen van de beddingsconstante wordt door KOAC-NPC de hierna gegeven formule gebruikt:

$$c = \frac{E}{2a(1-\nu^2)}$$

- c        Beddingsconstante (MPa/m)
- E        Elasticiteitsmodulus van de ondergrond (MPa)
- a        Straal van de belaste plaat (m)
- ν        Dwarscontractiecoëfficiënt (0.35 voor zand)

In bijlage 1 zijn voor een bepaald project voor de beddingsconstantes de karakteristieke waardes gegeven, zie tabel 5.

**Tabel 5. Karakteristieke beddingsconstante per dijkvak, zie bijlage 1.**

Dijkvak	Karakteristieke beddingsconstante (MPa/m)
1	46
2	43
3	38
4	39
5	35
6	44
7	46
8	43

Indien rekening gehouden wordt met een spreiding van 45 graden en een dwarscontractie coëfficiënt van 0.35, dan betekent dat voor de beddingsconstante in relatie tot de laagdikte (d) de relaties gelden zoals in tabel 6 gegeven.

**Tabel 6. Relatie tussen c en E voor een aangenomen spreiding van 45 graden en dwarscontractie van 0.35**

	d = 0.2 m	d = 0.3 m	d = 0.4 m
A	0.35	0.45	0.55
$2a(1-\nu^2)$	0.61	0.79	0.97
c =	E/0.61	E/0.79	E/0.97

In al deze gevallen is de waarde van c groter dan de waarde van E. Er lijkt een tegenstelling te zijn tussen de hier gebruikte benadering en de resultaten van KOAC-NPC, omdat de op basis van de oppervlakte modulus bij 1800 mm bepaalde laagste beddingsconstantes in tabel 7 veel hogere waardes geven dan die in tabel 5.

De gevonden resultaten in tabel 5 komen dus niet overeen met de berekeningen op basis van de oppervlakte modulus die waardes geeft tussen 100 en 180 MPa. Indien de absoluut laagste ondergrond modulus (van vele waardes) berekend volgens de



oppervlakte modulus plot wordt genomen, dan zouden met behulp van tabel 6 de beddingsconstantes zijn gevonden zoals gegeven in tabel 7.

**Tabel 7. Geschatte waarden van minimale beddingsconstante c voor verschillende laagdiktes voor de boven- en onderlijn voor een spreiding van 45 graden.**

Eondergrond (MPa)	Beddingsconstante (MPa/m) bij minimale Eondergrond en verschillende laagdikte		
	D = 0.2 m	D = 0.3 m	D = 0.4 m
102.2 (min. Bovenlijn)	167.5	129.4	105.4
87.1 (min. Onderlijn)	142.8	110.3	89.8

Uit de resultaten van een aantal projecten kan een indruk worden gekregen welke waarden KOAC-NPC heeft gevonden met haar procedure voor het bepalen van beddingsconstantes. In tabel 8 worden zowel de laagste waarde, de hoogste waarde als de bepaalde karakteristieke (5% laagste) waarde gegeven. Deze karakteristieke waarde wordt gebruikt in de GOLFKLAP berekening voor het betreffende dijkvat dat getoetst moet worden.

**Tabel 8. Spreiding in beddingsconstantes volgens KOAC-NPC voor een aantal projecten.**

Naam project	Waarde beddingsconstante (MPa/m)		
	Minimum	Maximum	Karakteristiek
Koehool-Westhoek	19	98	30
Lauwersmeerdijk 55,3 – 57,5	21	131	30
Lauwersmeerdijk 57,5 – 61,7	20	149	33
Westhoek – Zwarte Haan 13,0 – 16,7	19	116	35
Westhoek – Zwarte Haan 16,7 – 19,0	14	141	37

Opvallend zijn de zeer lage waarden die schijnbaar voor ieder dijkvak ook worden gevonden voor de beddingsconstante. Ook is voor alle projecten die gerapporteerd worden de enorme spreiding (het maximum is 5 tot 10 maal het minimum) in de berekende beddingsconstante zeer opvallend.

Bij nadere bestudering van de spreadsheets die ten grondslag liggen aan tabel 8, kan worden afgeleid hoe de beddingsconstante is berekend door KOAC-NPC.

Onderstaand is een voorbeeld gegeven van enige data voor Westhoek-Zwarte Haan 16,7 – 19,0 uit tabel 8. Aan de data is door de auteur een extra kolom toegevoegd met c45 als label. In deze tabel is de waarde van de beddingsconstante gegeven in het geval de spreiding van de VGD belast wordt aangenomen onder een hoel van 45 graden. In dit geval wordt a uitgebreid met de dikte van de asfaltlaag (0,15 + h). Zoals kan worden gezien zijn in dit geval alle beddingsconstantes groter in getal dan de ondergrond modulus E2. Ook blijkt de waarde aanzienlijk groter te zijn dan de door KOAC-NPC berekende c-waarde.



FileName	H1	Chainage	E1	E2	c(Mpa/m)	C45
Zwarte Haan Westhoek bovenlijn	215	16,7	9639,188	51,22839	50,3	79,97251
Koehool - Zwarte haan onder_F2	258	16,7	2340,527	70,49285	60,3	98,4482
Zwarte Haan Westhoek bovenlijn	217	16,75	4530,446	114,6276	111,8	177,9696
Koehool - Zwarte haan onder_F2	247	16,75	13900,76	25,65463	22,7	36,82122
Zwarte Haan Westhoek bovenlijn	218	16,8	9311,408	63,2994	61,5	98,01096
Koehool - Zwarte haan onder_F2	257	16,8	5803,337	47,46878	40,7	66,45636
Zwarte Haan Westhoek bovenlijn	200	16,85	5316,189	61,54004	63,8	100,1873

Bestudering van de VGD resultaten en de berekende beddingsconstantes in de spreadsheets levert de volgende vergelijking op voor het berekenen van de beddingsconstante:

$$c = \frac{E_2}{2 \times (0,15 + 2h) \times (1 - 0,35^2)}$$

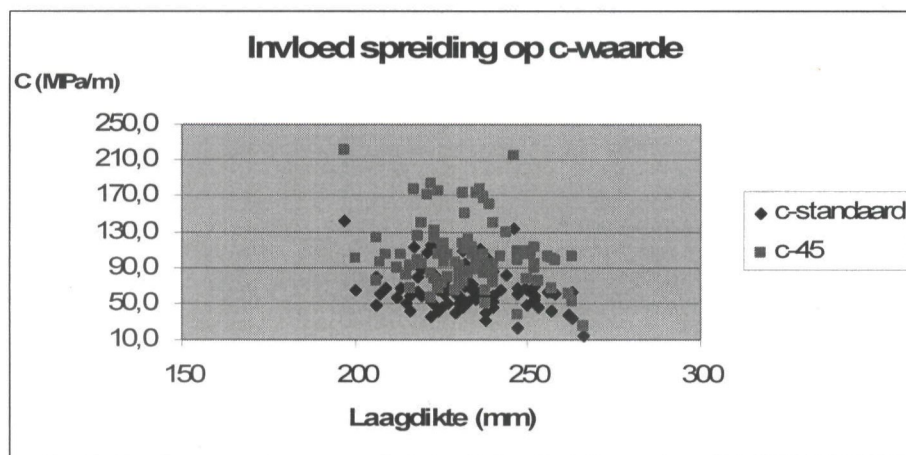
Hierin is:

E2	Berekende ondergrond modulus in MPa uit VGD
h	Asfaltlaagdikte in m

Duidelijk wordt uit de formule, dat KOAC-NPC een factor 2 gebruikt voor de spreiding in relatie tot de asfaltlaagdikte.

De formule verklaart de lage beddingsconstantes die door KOAC-NPC worden berekend.

Nergens wordt duidelijk gemaakt waarom de asfalt laagdikte met een factor 2 wordt vermenigvuldigd om de straal van de belaste plaat a te bepalen.



Figuur 8. Vergelijking van standard bepaalde beddingsconstante met de c-45 voor Westhoek-Zwarte Haan 16.7-19.0

In figuur 8 is voor alle meetresultaten van Westhoek- Zwarte Haan 16.7-19.0 nog eens aangegeven hoe groot het verschil tussen beide berekeningen is.

## **6. VERGELIJKING VOORSTEL MET BESTAANDE PROCEDURE.**

De bestaande procedure die gebruikt wordt door KOAC-NPC is niet duidelijk geworden door de bestudering van de literatuur en de rapporten van NPC. In een recente publikatie is wel vermeld, dat voor de spreiding van de plaatbelasting door het asfalt pakket een hoek van 45 graden is genomen. Het is duidelijk dat dit niet klopt met de aanpak die is gebruikt in de projecten die in tabel 8 in hoofdstuk 5 zijn vermeld.

Omdat niet echt bekend is welke procedure KOAC-NPC heeft gebruikt is het op dit moment onmogelijk om het voorstel te vergelijken met de bestaande procedure.

## 7. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### Conclusies.

In de literatuur is veel informatie beschikbaar over het bepalen van de beddingsconstante met de plaatbelastingsproef.

De beddingsconstante zoals bepaald uit de plaatbelastingsproef is gebaseerd op een statische belasting.

Omdat de golfbelasting als een dynamische belasting wordt berekend moet in GOLFKLAP worden gerekend met beddingsconstantes gebaseerd op dynamische elasticiteitsmoduli.

Geen informatie is beschikbaar in de KOAC-NPC rapporten over de dynamische elasticiteitsmodulus van de ondergrond op basis van de VGD metingen.

De door KOAC-NPC gebruikte procedure voor het bepalen van de beddingsconstante is niet met zekerheid te achterhalen uit de verstrekte informatie.

De door KOAC-NPC gemelde beddingsconstantes vertegenwoordigen zowel hoge waarden (140 MPa/m) als zeer lage waarden (14 MPa/m).

De problematiek in de lage beddingsconstantes die door KOAC-NPC worden gebruikt voor de toetsing zit vooral in de enorme spreiding in de beddingsconstante. Deze varieert van 14 tot 140 in het meest extreme geval, maar altijd minimaal een factor 5. Hierdoor is de karakteristieke waarde altijd extreem laag.

Bij een geringe laagdikte hoort een hoge beddingsconstante en bij een grote laagdikte hoort een lage beddingsconstante.

Bij een hoge asfaltstijfheid hoort een lagere beddingsconstante dan bij een lagere stijfheid.

De op basis van de Deltagoot proef teruggerekende dynamische beddingsconstantes zijn teruggerekende waarden op basis van een bepaalde asfaltstijfheid en de gemeten rekken.

Het verschil in lastspreiding tussen een VGD plaat en de driehoeksbelasting in GOLFKLAP leidt in principe tot verschillende beddingsconstantes.

Het is mogelijk om via DCP metingen een goede indicatie over de draagkracht van de ondergrond onder een dijklichaam te krijgen.

Het is indirect mogelijk om via de DCP meting en de omrekening naar een CBR waarde een indruk van mogelijke beddingsconstantes te krijgen.

In deze fase van de studie is nog geen eenduidige procedure voorstel voor het bepalen van de beddingsconstante tot stand gekomen.

## **Aanbevelingen**

Vaststellen wat de exacte procedure is waarmee KOAC-NPC de beddingsconstante bepaalt uit de VGD metingen.

De gebruikte filosofie in de deltagoot proef opnieuw bestuderen en vergelijken met de belasting zoals die nu met het VGD wordt aangebracht.

Nagaan waar de enorme spreiding in de beddingsconstante zoals die gerapporteerd wordt vandaan komt.

Nagaan welke combinaties met andere karakteristieke waardes mogelijk zijn.

DCP proeven uitvoeren op geboorde gaten voor kernen om een indruk van de draagkracht van de ondergrond onder het asfaltpakket te krijgen.

Na verder bestudering en volledige informatie komen tot een vaste procedure voor het terugrekenen van de beddingsconstante.



## REFERENTIES

- [1]. Plan van aanpak: Literatuurstudie Beddingsconstante (Project STUURBOORD/GA3). C.C. Montauban, DWW-Afd. Waterkeren, 30 juni 2005.
- [2]. Data analyse onderzoek asfaltbekleding Waddenzeedijken Noord-Holland. M.F.C. van de Ven, Rapport TU Delft, november 2005
- [3]. Technisch Rapport Asfalt voor Waterkeren, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, november 2002.
- [4]. Veiligheidsbeoordeling van Asfaltdijkbekledingen. Achtergrond bij het toetsen van asfaltdijkbekledingen volgens het Voorschrift Toetsen of Veiligheid VTV-2002. Concept versie 3.2
- [5]. Probabilistische benadering van golfklapschade aan de bekleding op de Waddenzeedijken Noord-Holland. Dr.ir. M. Huurman, rapport 7-05-133-3. TU Delft. October 2005.
- [6]. Elasticiteitstheorie. A. Verruijt, collegedictaat b16. TU Delft. Augustus 1972.
- [7]. Verdichting van de zandbaan. CROW rapport 04-04. maart 2004.
- [8]. Handboek Zandboek, CROW. April 2004.
- [9]. Dimensioneren van asfaltbekledingen op golfklappen, analyse van de relatie tussen golfbelasting en rekken. Grondmechanica Delft, rapport CO-347160/17. Juli 1994.

## BIJLAGE 1. Eerste globale analyse beddingsconstante uit [2]

### Bepaling ondergrond modulus: voorbeeld Waddenzee [2]

Het is nuttig om de deflectie profielen om te zetten in zogenaamd oppervlakte modulus figuren. Deze profielen geven een indruk van de constructie opbouw en de ondergrond. Vooral omdat hier sprake is van een eenvoudige constructie (ongeveer 30 cm asfalt op de ondergrond) kan uit de oppervlakte modulus goede informatie worden gekregen of dit ook zo blijkt te zijn en hoe de constructie reageert. Uit de ondergrond modulus grafiek blijkt ook of moet worden overwogen om meerdere lagen te onderscheiden.

Met behulp van de oppervlaktemodulus bepaling zijn schattingen gemaakt van de ondergrond modulus en is het signaal bekeken op basis van een twee-lagen systeem.

De oppervlaktemodulus kan worden bepaald met VGD uit de deflectie, de opnemerafstand en de uitgeoefende spanning. Voor het midden van de plaat ( $r = 0$ ) geldt:

$$E_0(0) = \frac{2(1-\nu^2)\sigma_0 a}{d(0)}$$

en voor ieder afstand  $r$  geldt onderstaande formule, waarbij  $E_0(r)$  = de oppervlaktemodulus (MPa) op afstand  $r$

$$E_0(r) = \frac{(1-\nu^2)\sigma_0 a}{rd(r)}$$

$\nu$	=	Constante van Poisson
$\sigma_0$	=	contactspanning onder de voetplaat (kPa)
$a$	=	straal van de voetplaat (=150 mm)
$d(r)$	=	Deflectie op afstand $r$ ( $\mu\text{m}$ )
$R$	=	afstand van deflectieopnemer tot lastmidden (mm)

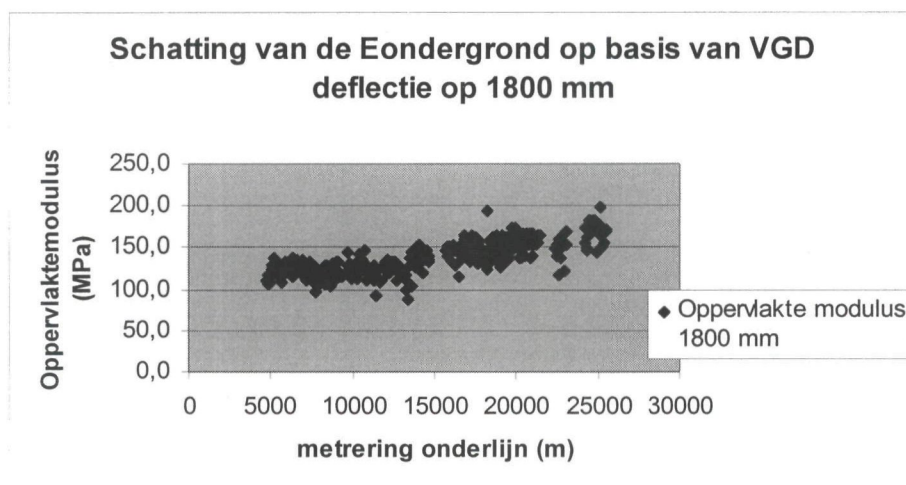
De grafiek van de oppervlaktemodulus geeft een goede indruk van de stijfheidsopbouw van de constructie waarop de meting is uitgevoerd.

In het algemeen wordt de waarde van de oppervlakte modulus op een afstand van 1800 mm beschouwd als de waarde die heel dicht bij de ondergrond modulus ligt.

Deze waarde kan dan ook als startwaarde worden gebruikt bij de uitwerking van de deflecties.

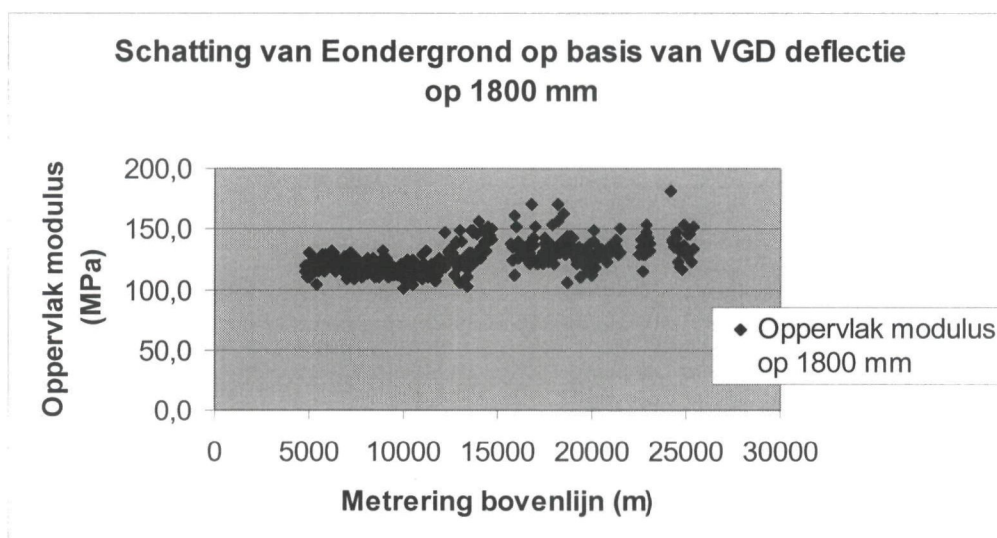
In figuur B11 en B12 uit [2] is een voorbeeld gegeven van het verloop van de oppervlakte modulus van zowel de bovenlijn (B11) als de onderlijn (B12) op een aantal meetpunten (5000, 6000, 24500 en 25000 meter). Duidelijk zichtbaar is het geleidelijke verloop van de curve. Ook kan duidelijk worden gezien dat op een afstand van ongeveer 500 mm van het centrum het verloop van de oppervlakte modulus neigt naar een constante waarde. Deze stijfheid is waarschijnlijk representatief voor de ondergrond modulus en kan gebruikt worden als startwaarde voor de verdere analyse van het deflectie profiel.

lijkt alsof boven 15000 m een hogere stijfheid voor de ondergrond geldt dan onder 15000 meter. Vooral de sterke uitschieters naar beneden zouden aan een nadere analyse moeten worden blootgesteld.



**Figuur B13 .** Overzicht van het verloop van de ondergrond modulus op basis van de 1800 mm deflectie voor de onderlijn. [2]

Voor de bovenlijn (figuur B14) geldt niet hetzelfde als voor de onderlijn. De trend naar hogere ondergrond modulus bij hogere kilometreering is niet duidelijk aanwezig. Wel lijkt de spreiding bij hogere kilometreering duidelijk toe te nemen. De lage ondergrond modulus gebieden zouden moeten worden vergeleken met die van de onderlijn.



**Figuur B14.** Overzicht van het verloop van de ondergrond modulus op basis van de 1800 mm deflectie voor de bovenlijn. [2]

Omrekening van ondergrond moduli naar beddingsconstante (nodig voor golfklap)

Er wordt vanuit gegaan dat is gerekend met een twee-lagen systeem, nl:

- Ongeveer 300 mm asfalt
- Ondergrond

Dit betekent dat er wel degelijk ondergrond moduli bepaald zijn. Hierover kan geen informatie worden gevonden.

De enige informatie die beschikbaar is zijn de cumulatieve grafieken van de beddingsconstante die schijnbaar volgens de formule van Verruyt zijn bepaald.

Aan de hand van de oppervlakte modulus bepalingen kan een schatting van de modulus van de ondergrond worden gedaan. Enige voorbeelden hiervan zijn gegeven in figuur B11 en B12, waar kan worden gezien dat na een opnemer afstand van ongeveer 1 meter de oppervlakte modulus niet meer varieert. Deze waarde is een goede schatting van de ondergrond modulus. De geschatte ondergrond moduli op basis van de oppervlakte modulus curves zijn samengevat in de figuren B13 en B14. Op basis van deze ondergrond waardes kan de beddingsconstante worden geschat.

#### Beddingsconstante

Voor de beddingsconstante is de hierna gegeven formule gebruikt:

$$c = \frac{E}{2a(1-\nu^2)}$$

- c Beddingsconstante (MPa/m)
- E Elasticiteitsmodulus van de ondergrond (MPa)
- a Straal van de belaste plaat (m)
- $\nu$  Dwarscontractiecoëfficiënt (0.35 voor zand)

Deze vergelijking komt goed overeen met de vergelijking in [Handboek Zandboek, CROW], zoals hierna gegeven:

$$k = \frac{E_v}{f \cdot (1-\nu^2)}$$

waarin  $f = 1.27-2.0$ .

Nader onderzoek zal nog moeten worden gedaan op dit gebied.

In [2] zijn voor de beddingsconstantes de karakteristieke waardes aangehouden zoals gegeven in tabel B11.

**Tabel B11. Karakteristieke beddingsconstante per dijkvak [2].**

Dijkvak	Karakteristieke beddingsconstante (MPa/m)
1	46
2	43
3	38
4	39



5	35
6	44
7	46
8	43

Indien rekening gehouden wordt met een spreiding van 45 graden en een dwarscontractie coefficient van 0.35, dan betekent dat voor de beddingsconstante in relatie tot de laagdikte (d) de relaties gelden zoals in tabel B12 gegeven.

**Tabel B12. Relatie tussen c en E voor een aangenomen spreiding van 45 graden en dwarscontractie van 0.35**

	d = 0.2 m	d = 0.3 m	d = 0.4 m
A	0.35	0.45	0.55
$2a(1 - \nu^2)$	0.61	0.79	0.97
c =	E/0.61	E/0.79	E/0.97

In al deze gevallen is de waarde van c groter dan de waarde van E. Er lijkt een tegenstelling te zijn tussen de hier gebruikte benadering en de resultaten van NPC, omdat de op basis van de oppervlakte modulus bij 1800 mm bepaalde laagste beddingsconstanten in tabel B13 veel hogere waarden geven dan die in tabel B11. De gevonden resultaten in tabel B11 komen dus niet overeen met de berekeningen op basis van de oppervlakte modulus die waarden geeft tussen 100 en 180 MPa. Indien de absoluut laagste ondergrond modulus (van vele waarden) berekend volgens de oppervlakte modulus plot wordt genomen, dan zouden met behulp van tabel B12 de beddingsconstanten zijn gevonden zoals gegeven in tabel B13.

**Tabel B13. Geschatte waarden van minimale beddingsconstante c voor verschillende laagdiktes voor de boven- en onderlijn voor een spreiding van 45 graden.**

Eondergrond (MPa)	Beddingsconstante (MPa/m) bij minimale Eondergrond en verschillende laagdikte		
	D = 0.2 m	D = 0.3 m	D = 0.4 m
102.2 (min. Bovenlijn)	167.5	129.4	105.4
87.1 (min. Onderlijn)	142.8	110.3	89.8

Omdat geen ondergrond moduli gegeven zijn, kan niet worden vergeleken. Zoals hiervoor aangegeven kan met behulp van de oppervlakte modulus een uitstekende beginschatting worden gemaakt vanuit de deflectiemetingen. De uiteindelijk bepaalde ondergrond modulus zou via analyse van de deflectie metingen beschikbaar moeten komen.

In de literatuur zijn diverse schatting formules ontwikkeld voor de Eondergrond. Als voorbeeld wordt hier gegeven de formule van Molenaar :

$$\text{Log } E_s = 9.87 - \log d_2$$

$E_s$  = elasticiteitsmodulus van de ondergrond (N/m<sup>2</sup>)

$d_2$  = deflectie gemeten op 2 meter van het last centrum (P = 50 kN, t = 0.02 s) in  $\mu\text{m}$ .

Met dit soort formules kunnen snel goede startwaardes worden gevonden voor de ondergrond modulus.

De deflectiemetingen door NPC zijn uitgevoerd met geofoons tot op 1.8 meter van het lastcentrum en de deflecties op deze afstand lagen tussen de 50 en 70  $\mu\text{m}$ . Invullen van deze twee waardes in de formule van Molenaar levert een stijfheid op van 148 MPa voor 50  $\mu\text{m}$  en 104 MPa voor 70  $\mu\text{m}$ . Deze waardes vergelijken zeer goed met de gevonden waardes voor de oppervlakte modulus.

Een goede indicatie van de waarde van de beddingsconstante kan ook worden verkregen via Houben [33]. Tabel B14 is uit [33] overgenomen. Deze waardes komen overeen met de waardes gegeven in [Handboek Zandboek, CROW].

**Tabel B14. Realistische waardes van de beddingsconstante voor diverse ondergronden [33].**

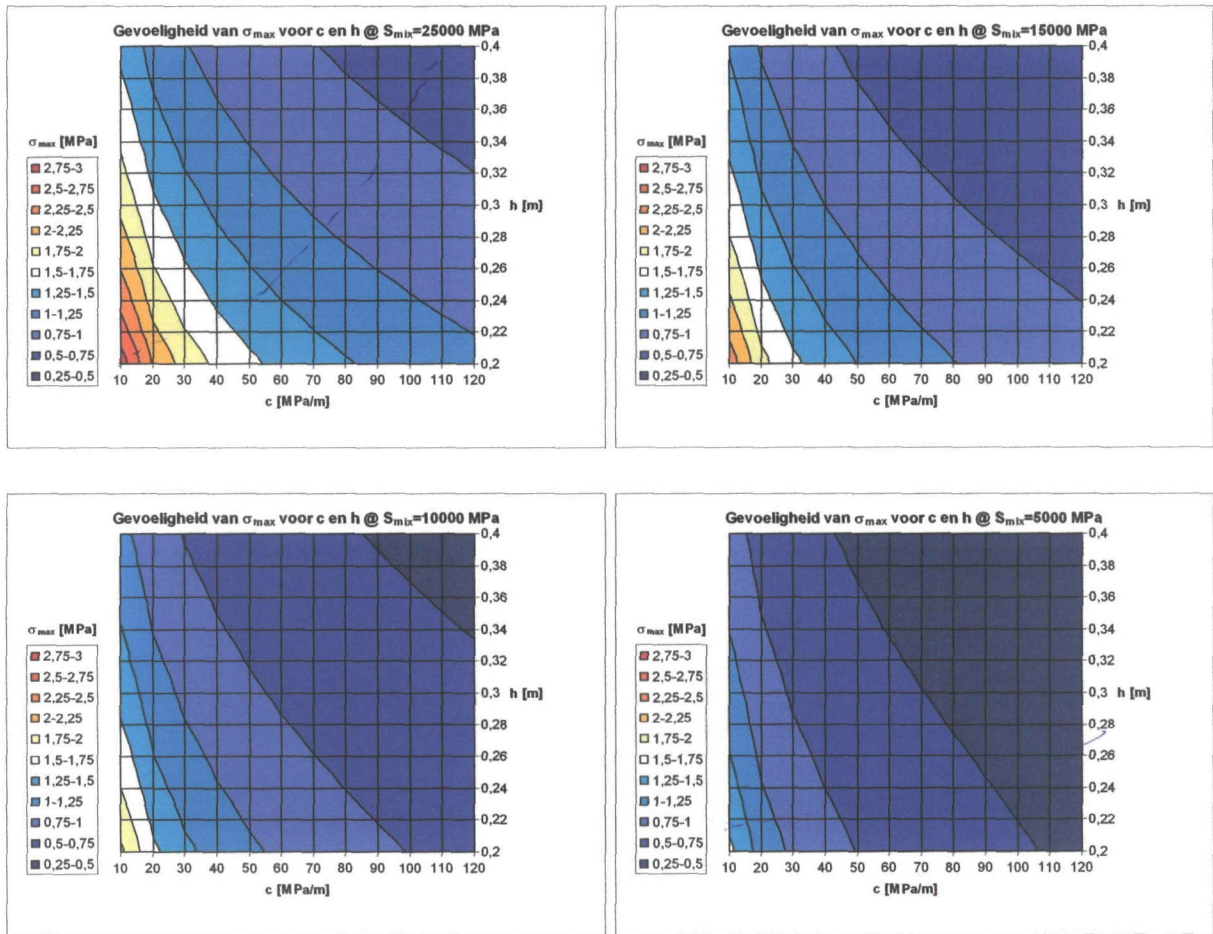
Subgrade	Beddingsconstante C (N/mm <sup>3</sup> )	Beddingsconstante C (MPa/m)
Well graded gravel and gravel/sand mix ,hardlly any fine material	0.08-0.13	80-130
Poor graded gravel, hardly any fine material	0.08-0.13	80-130
Gravel/sand/clay mixtures	0.05-0.13	50-130
Well graded sand and sand with gravel, hardly any fine mat	0.05-0.10	50-100
Poor graded sand, hardly any fine mat	0.04-0.10	40-100
Sand/clay mixtures	0.03-0.08	30-80
Very fine sand, sand with loam	0.03-0.05	30-50
Vast clay	0.01-0.03	10-30
Weak clay and peat	0.00-0.01	-10

Bij de aangenomen spreiding en poisson getal blijkt er een groot verschil te zijn tussen de geschatte beddingsconstante op basis van de oppervlakte modulus en de door NPC gerapporteerde karakteristieke waardes. Dit moet nader worden uitgezocht.

#### Conclusies analyse valgewichtmetingen.

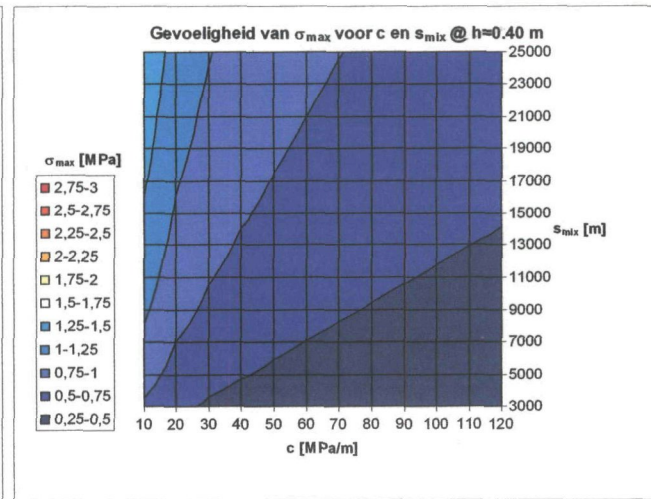
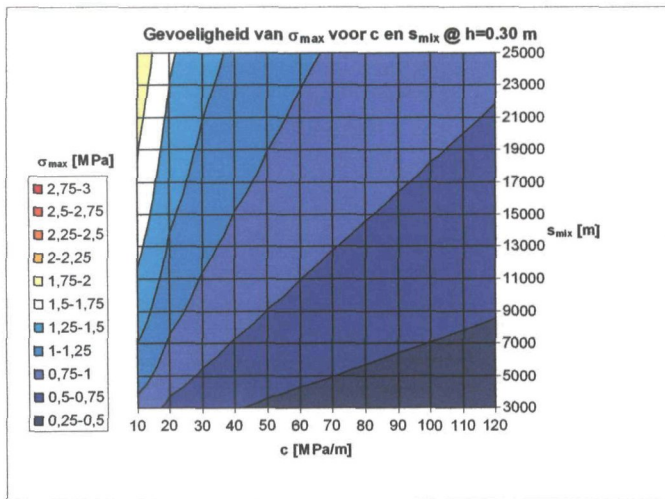
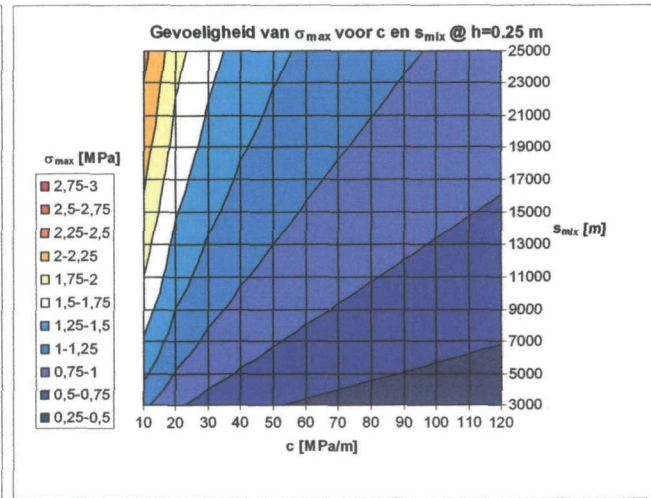
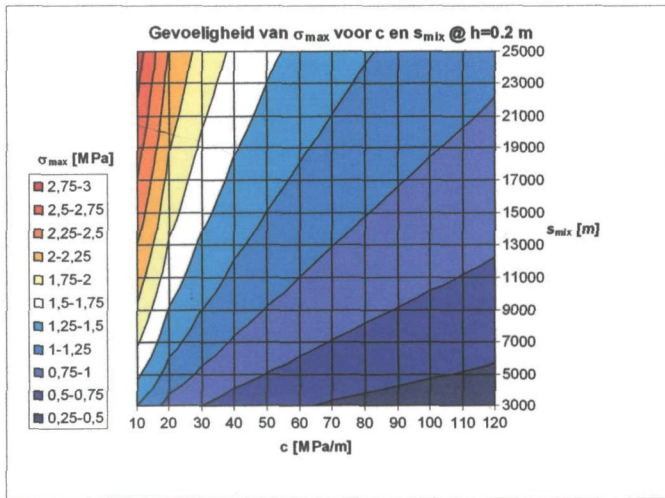
- Er is geen indicatie van de ondergrondmodulus beschikbaar (belangrijk voor het bepalen van de beddingsconstante in GOLFKLAP)
- De aangegeven relatie tussen beddingsconstante en Eondergrond lijkt niet te kloppen, maar kan niet worden gecontroleerd.

# ByLAGE 2. Gevoeligheidsanalyse GOLFKLAD



**Figuur . Invloed van de beddingsconstante  $c$  en de asfaltdikte  $h$  op het verloop van de maximale trekspanning bij constante stijfheid van het asfalt (25000, 15000, 10000, 5000 MPa)**





**Figuur . Invloed van de beddingsconstante c en de asfaltstijfheid  $s_{mix}$  op het verloop van de maximale trekspanning bij constante laagdikte van het asfalt (0.2, 0.25, 0.30, 0.4 m)**



Tabellen behorende bij de grafieken.

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij stijfheid 25000 MPa													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Laagdikte [m]	0,20	2,88	2,23	1,91	1,70	1,55	1,44	1,34	1,27	1,20	1,15	1,10	1,06
	0,22	2,64	2,05	1,76	1,58	1,44	1,34	1,25	1,19	1,13	1,08	1,03	0,99
	0,24	2,43	1,90	1,63	1,47	1,34	1,25	1,17	1,11	1,06	1,01	0,97	0,94
	0,26	2,24	1,76	1,52	1,37	1,26	1,17	1,10	1,04	1,00	0,95	0,92	0,88
	0,28	2,08	1,64	1,42	1,28	1,18	1,10	1,04	0,98	0,94	0,90	0,87	0,84
	0,30	1,94	1,54	1,34	1,20	1,11	1,04	0,98	0,93	0,89	0,85	0,82	0,79
	0,32	1,82	1,45	1,26	1,14	1,05	0,98	0,93	0,88	0,84	0,81	0,78	0,75
	0,34	1,71	1,36	1,19	1,07	0,99	0,93	0,88	0,83	0,80	0,77	0,74	0,72
	0,36	1,61	1,29	1,12	1,02	0,94	0,88	0,83	0,79	0,76	0,73	0,70	0,68
	0,38	1,52	1,22	1,06	0,96	0,89	0,84	0,79	0,76	0,72	0,70	0,67	0,65
	0,40	1,44	1,16	1,01	0,92	0,85	0,80	0,76	0,72	0,69	0,66	0,64	0,62

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij stijfheid 15000 MPa													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Laagdikte [m]	0,20	2,39	1,83	1,55	1,37	1,25	1,15	1,07	1,01	0,95	0,91	0,87	0,83
	0,22	2,20	1,69	1,44	1,28	1,17	1,08	1,01	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79
	0,24	2,03	1,57	1,34	1,20	1,09	1,01	0,95	0,90	0,85	0,81	0,78	0,75
	0,26	1,88	1,46	1,26	1,12	1,03	0,95	0,89	0,85	0,80	0,77	0,74	0,71
	0,28	1,75	1,37	1,18	1,06	0,97	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67
	0,30	1,64	1,29	1,11	1,00	0,91	0,85	0,80	0,76	0,72	0,69	0,67	0,64
	0,32	1,54	1,21	1,05	0,94	0,87	0,81	0,76	0,72	0,69	0,66	0,63	0,61
	0,34	1,45	1,14	0,99	0,89	0,82	0,77	0,72	0,69	0,66	0,63	0,60	0,58
	0,36	1,37	1,08	0,94	0,85	0,78	0,73	0,69	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56
	0,38	1,29	1,03	0,89	0,81	0,74	0,70	0,66	0,62	0,60	0,57	0,55	0,53
	0,40	1,23	0,98	0,85	0,77	0,71	0,66	0,63	0,60	0,57	0,55	0,53	0,51

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij stijfheid 10000 MPa													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Laagdikte [m]	0,20	2,05	1,55	1,31	1,15	1,04	0,95	0,89	0,83	0,78	0,74	0,71	0,68
	0,22	1,89	1,44	1,22	1,08	0,98	0,90	0,84	0,79	0,74	0,71	0,68	0,65
	0,24	1,75	1,34	1,14	1,01	0,92	0,85	0,79	0,75	0,71	0,67	0,64	0,62
	0,26	1,63	1,26	1,07	0,95	0,87	0,80	0,75	0,71	0,67	0,64	0,61	0,59
	0,28	1,52	1,18	1,01	0,90	0,82	0,76	0,71	0,67	0,64	0,61	0,59	0,56
	0,30	1,42	1,11	0,95	0,85	0,78	0,72	0,68	0,64	0,61	0,58	0,56	0,54
	0,32	1,34	1,05	0,90	0,81	0,74	0,69	0,65	0,61	0,58	0,56	0,53	0,52
	0,34	1,26	0,99	0,85	0,77	0,70	0,66	0,62	0,58	0,56	0,53	0,51	0,49
	0,36	1,19	0,94	0,81	0,73	0,67	0,63	0,59	0,56	0,53	0,51	0,49	0,47
	0,38	1,13	0,89	0,77	0,70	0,64	0,60	0,56	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45
	0,40	1,07	0,85	0,74	0,66	0,61	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47	0,45	0,44

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij stijfheid 5000 MPa													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Laagdikte [m]	0,20	1,55	1,15	0,95	0,83	0,74	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52	0,49	0,47
	0,22	1,44	1,08	0,90	0,79	0,71	0,65	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,45
	0,24	1,34	1,01	0,85	0,75	0,67	0,62	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,44
	0,26	1,26	0,95	0,80	0,71	0,64	0,59	0,55	0,51	0,49	0,46	0,44	0,42
	0,28	1,18	0,90	0,76	0,67	0,61	0,56	0,52	0,49	0,47	0,44	0,42	0,41
	0,30	1,11	0,85	0,72	0,64	0,58	0,54	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,39
	0,32	1,05	0,81	0,69	0,61	0,56	0,52	0,48	0,45	0,43	0,41	0,39	0,38
	0,34	0,99	0,77	0,66	0,58	0,53	0,49	0,46	0,44	0,41	0,39	0,38	0,36
	0,36	0,94	0,73	0,63	0,56	0,51	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38	0,36	0,35
	0,38	0,89	0,70	0,60	0,53	0,49	0,45	0,43	0,40	0,38	0,37	0,35	0,34
	0,40	0,85	0,66	0,57	0,51	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34	0,33

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij laagdikte 0,4 m													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Stijfheid dijkbekleding [MPa]	3000	0,71	0,55	0,47	0,42	0,38	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,27	0,26
	5000	0,85	0,66	0,57	0,51	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35	0,34	0,33
	7000	0,95	0,75	0,65	0,58	0,53	0,50	0,47	0,44	0,42	0,41	0,39	0,38
	9000	1,04	0,82	0,71	0,64	0,59	0,55	0,52	0,49	0,47	0,45	0,43	0,42
	11000	1,11	0,88	0,76	0,69	0,63	0,59	0,56	0,53	0,51	0,49	0,47	0,45
	13000	1,17	0,93	0,81	0,73	0,67	0,63	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,48
	15000	1,23	0,98	0,85	0,77	0,71	0,66	0,63	0,60	0,57	0,55	0,53	0,51
	17000	1,28	1,02	0,89	0,80	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54
	19000	1,32	1,06	0,92	0,84	0,77	0,72	0,68	0,65	0,62	0,60	0,58	0,56
	21000	1,36	1,09	0,95	0,86	0,80	0,75	0,71	0,68	0,65	0,62	0,60	0,58
	23000	1,40	1,12	0,98	0,89	0,83	0,77	0,73	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60
	25000	1,44	1,16	1,01	0,92	0,85	0,80	0,76	0,72	0,69	0,66	0,64	0,62

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij laagdikte 0,3 m													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Stijfheid dijkbekleding [MPa]	3000	0,91	0,69	0,58	0,51	0,46	0,43	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32	0,30
	5000	1,11	0,85	0,72	0,64	0,58	0,54	0,50	0,47	0,45	0,43	0,41	0,39
	7000	1,26	0,97	0,83	0,74	0,67	0,62	0,58	0,55	0,52	0,50	0,48	0,46
	9000	1,37	1,07	0,91	0,82	0,75	0,69	0,65	0,61	0,58	0,56	0,53	0,51
	11000	1,47	1,15	0,99	0,88	0,81	0,75	0,71	0,67	0,64	0,61	0,58	0,56
	13000	1,56	1,22	1,05	0,94	0,87	0,80	0,76	0,72	0,68	0,65	0,63	0,60
	15000	1,64	1,29	1,11	1,00	0,91	0,85	0,80	0,76	0,72	0,69	0,67	0,64
	17000	1,71	1,35	1,16	1,04	0,96	0,89	0,84	0,80	0,76	0,73	0,70	0,68
	19000	1,77	1,40	1,21	1,09	1,00	0,93	0,88	0,83	0,80	0,76	0,73	0,71
	21000	1,83	1,45	1,26	1,13	1,04	0,97	0,91	0,87	0,83	0,79	0,76	0,74
	23000	1,89	1,50	1,30	1,17	1,08	1,00	0,95	0,90	0,86	0,82	0,79	0,77
	25000	1,94	1,54	1,34	1,20	1,11	1,04	0,98	0,93	0,89	0,85	0,82	0,79

Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij laagdikte 0,25 m													
	Beddingsconstante [MPa/m]												
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Stijfheid dijkbekleding [MPa]	3000	1,06	0,79	0,66	0,57	0,52	0,47	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	0,33
	5000	1,30	0,98	0,83	0,73	0,66	0,60	0,56	0,53	0,50	0,47	0,45	0,43
	7000	1,48	1,13	0,95	0,84	0,77	0,71	0,66	0,62	0,58	0,56	0,53	0,51
	9000	1,62	1,25	1,06	0,94	0,85	0,79	0,74	0,69	0,66	0,63	0,60	0,57
	11000	1,75	1,35	1,15	1,02	0,93	0,86	0,81	0,76	0,72	0,69	0,66	0,63
	13000	1,85	1,44	1,23	1,09	1,00	0,93	0,87	0,82	0,78	0,74	0,71	0,68
	15000	1,95	1,52	1,30	1,16	1,06	0,98	0,92	0,87	0,83	0,79	0,76	0,73
	17000	2,04	1,59	1,36	1,22	1,11	1,03	0,97	0,92	0,87	0,83	0,80	0,77
	19000	2,12	1,66	1,42	1,27	1,17	1,08	1,02	0,96	0,92	0,87	0,84	0,81
	21000	2,20	1,72	1,48	1,32	1,21	1,13	1,06	1,00	0,95	0,91	0,88	0,84
	23000	2,27	1,77	1,53	1,37	1,26	1,17	1,10	1,04	0,99	0,95	0,91	0,88
	25000	2,33	1,83	1,58	1,42	1,30	1,21	1,14	1,08	1,03	0,98	0,94	0,91



Gevoeligheid spanning voor beddingsconstante en laagdikte bij laagdikte 0,2 m												
	Beddingsconstante [MPa/m]											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
3000	1,25	0,91	0,74	0,64	0,57	0,52	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35
5000	1,55	1,15	0,95	0,83	0,74	0,68	0,63	0,58	0,55	0,52	0,49	0,47
7000	1,78	1,33	1,11	0,98	0,88	0,80	0,74	0,70	0,65	0,62	0,59	0,56
9000	1,97	1,48	1,25	1,10	0,99	0,91	0,84	0,79	0,74	0,71	0,67	0,64
11000	2,13	1,61	1,36	1,20	1,08	1,00	0,93	0,87	0,82	0,78	0,74	0,71
13000	2,27	1,73	1,46	1,29	1,17	1,08	1,00	0,94	0,89	0,85	0,81	0,77
15000	2,39	1,83	1,55	1,37	1,25	1,15	1,07	1,01	0,95	0,91	0,87	0,83
17000	2,50	1,92	1,63	1,45	1,32	1,22	1,13	1,07	1,01	0,96	0,92	0,88
19000	2,61	2,01	1,71	1,52	1,38	1,28	1,19	1,12	1,06	1,01	0,97	0,93
21000	2,71	2,09	1,78	1,58	1,44	1,33	1,25	1,17	1,11	1,06	1,02	0,98
23000	2,80	2,16	1,85	1,64	1,50	1,39	1,30	1,22	1,16	1,11	1,06	1,02
25000	2,88	2,23	1,91	1,70	1,55	1,44	1,34	1,27	1,20	1,15	1,10	1,06



### BIJLAGE 3. DCP proef: korte impressie

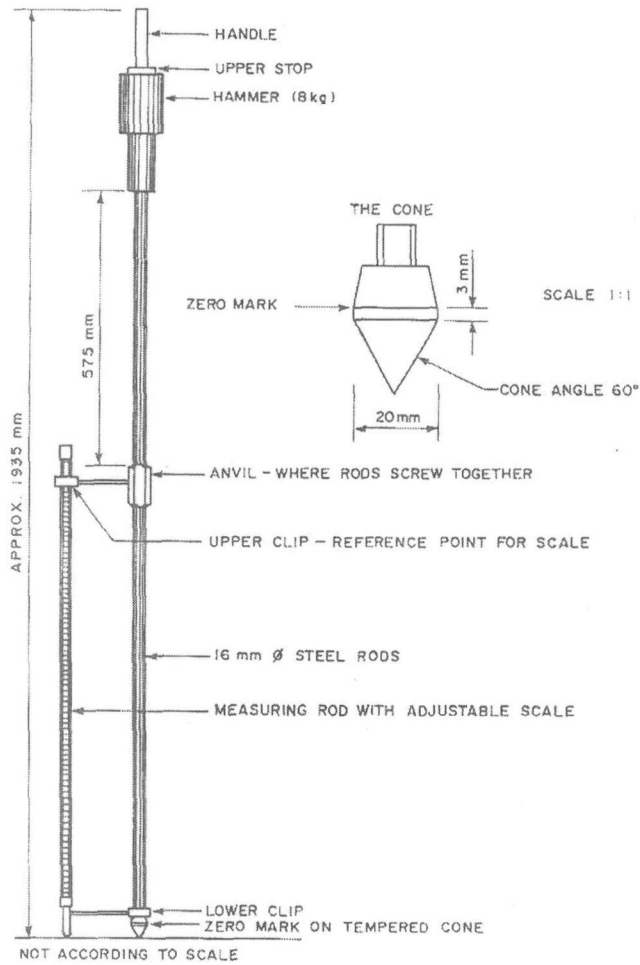


Figure 5.1: The Dynamic Cone Penetrometer (DCP)

DCP apparaat zoals toegepast in Zuid Afrika



Uitvoering van de proef in het veld.

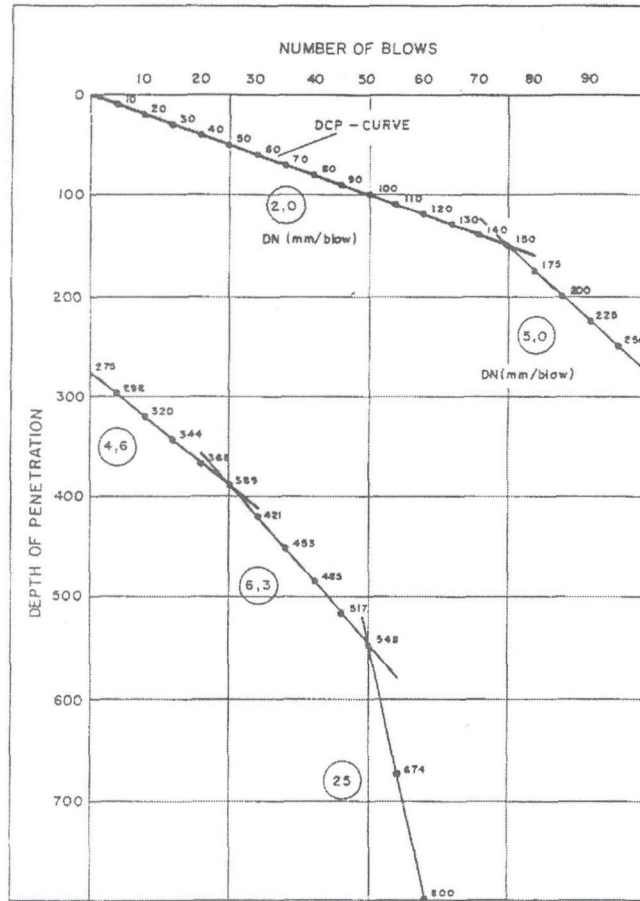


Figure 5.3: Example of a DCP field curve (after Kleyn [5.17])

Resultaat van een DCP proef.

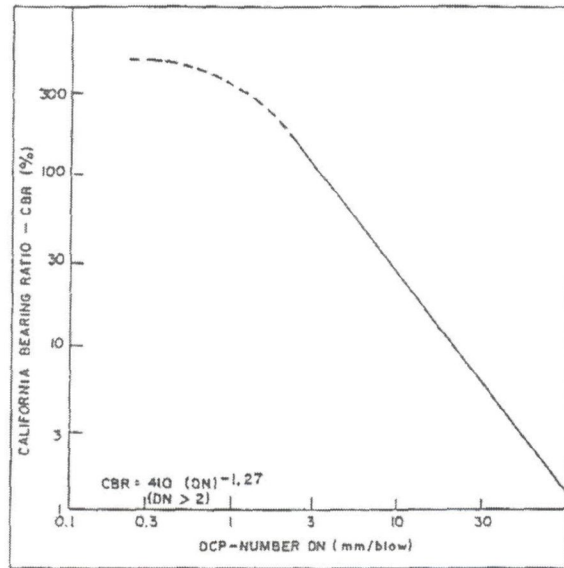


Figure 5.5(a): Relationship between CBR and DCP number (after Kleyn [5.17])

Grafiek waarmee de DCP waarde van een laag kan worden gekoppeld aan een CBR waarde



Table 5.5: Approximate relationship between soaked CBR and field DCP-CBR for a gravel road [5.33]

MATERIAL CLASSIFICATION	SOAKED CBR	APPROXIMATE FIELD DCP-CBR: GRAVEL ROAD					
		SUBGRADE		WEARING COURSE			
		WET CLIMATE ( $I_m > 0$ )	DRY CLIMATE ( $I_m < 0$ )	DRY STATE	MODERATELY DRY STATE	DAMP STATE	WET STATE
G4	80			318	228	164	117
G5	45			224	175	126	90
G6	25	59	65	186	134	96	69
G7	15	45	50	147	106	76	54
G8	10	38	43				
G9	7	33	37				
G10	3	20	24				

- Notes
1. The inter-relationship between soaked CBR and field DCP-CBR is very approximate due to the variability of moisture contents, materials, test methods, and densities. It assumed that the density relates approximately to the field density expected for that layer. More research is needed to give confidence to this relationship.
  2. The moisture contents that this table are based on are estimated moisture contents, based on various field studies and experience; they can vary in practice from the values assumed here. For the wearing course they are (expressed as the ratio of field moisture content to Mod.AASHTO optimum moisture content): dry state = 0,25; moderately dry = 0,5; damp = 0,75; wet = 1,0. For the subgrade, they are: dry 0,9; wet = 0,98.
  3. This table has been developed from Table 22 and Equation 36 of Emery (1992) (see Reference [5.34])

At the same time, the field density of the existing gravel road should be checked against specifications for a new paved road. If there are sufficient field density test results, then

