

# **Il calcolo con geosintetici nel rinforzo dello strato di fondazione mediante l'uso di modelli della capacità portante**

Sviluppato da: Ulrich Turczynski, Hochschule Anhalt, Sven Schwerdt, Gernot Mannsbart

Il presente fascicolo è la libera traduzione del metodo di calcolo sviluppato Ulrich Turczynski, Hochschule Anhalt, Sven Schwerdt, Gernot Mannsbart presentato in occasione del 5 Congresso di Geotecnica in Austria tenutosi a Vienna il 21/22 Febbraio 2005 e presente negli Atti nelle pagine 203 – 218 (titolo originale 5th Austrian Geotechnical Congress in Vienna, February 21st/22nd, 2005).

Il metodo di calcolo presuppone lo sviluppo di piccole deformazioni pertanto esso può essere impiegato nel dimensionamento delle sovrastrutture pavimentate, definendo il valore del modulo di deformazione raggiunto dalla sovrastruttura rinforzata. A tale scopo il metodo utilizza teorie ampiamente consolidate nella meccanica dei terreni, tra le quali citiamo la teoria di Odemark per il calcolo delle rigidezze equivalenti.

Sicuri di fornire un adeguato strumento tecnico di supporto al progettista, che intende comprendere a fondo le basi che rendono possibili l'implementazione di software dedicati, la Harpo S.p.A., divisione **seic**, mette a disposizione del professionista il presente manuale, certa di fornire un'utile ausilio alla progettazione a tutti quei professionisti che si occupano di problematiche stradali.

ing. Fulvio Bolobicchio

**Harpo spa**  
**divisione seic**

## Introduzione

Basandosi sul ben conosciuto metodo di Ingold e sui principi della costruzione di strade e geotecnica è stato possibile sviluppare un metodo di calcolo che consenta di determinare lo spessore dello strato di bonifica e la resistenza a trazione del materiale geosintetico in funzione della collocazione degli strati rinforzati su terreni a scarsa capacità portante.

## Impostazione dello studio

Nella costruzione stradale di nuove infrastrutture o nella manutenzione di quelle esistenti, sovente ci si trova di fronte al problema di attraversare aree a bassa capacità portante. In questi casi si richiede l'utilizzo di quelle misure aggiuntive che siano in grado di assicurarne la capacità portante che l'utilizzo e tali da rendere minimi i costi di manutenzione.

In Germania, è stato pubblicato [5] un manuale informativo sulla costruzione di strade su terreni a bassa capacità portante in cui è possibile reperire le misure aggiuntive da prevedersi.

Una possibilità menzionata nel manuale è quella di operare un intervento di bonifica in combinazione con materiali geosintetici. Di seguito una differenziazione è fatta tra due casi applicativi:

1. riduzione della profondità delle ormaie longitudinali, ottenute, ad esempio, dal transito di veicoli su strade non pavimentate.
2. raggiungimento di certo valore minimo della capacità portante, come, ad esempio prescritto per il piano di posa delle costruzioni stradali nella Norma tedesca RStO-01.

Per determinare lo spessore di bonifica di uno strato rinforzato e non rinforzato è possibile reperire molte procedure in letteratura. Parecchi di questi sono utilizzati nelle regioni a lingua tedesca e vengono riportati nella sottostante tabella.

<b>Tipo di bonifica</b>	<b>Profondità del ormaia</b>	<b>Aumento della capacità portante</b>
Non rinforzata	Giroud / Noiray (1981) [8] Floss (1997) [6]	Kohler et al. (1998) [12] RIL 836 (1999) [14] / DS 836 (1985) Beckmann / Prah (1992) [1]
Rinforzata con materiali geosintetici	Giroud / Noiray (1981) [8] Jaecklin / Floss (1988) [11] Ruegger / Hufenus (2003) [16] Giroud / Han (2001) [7] EBGEO, sezione 6.4 [4]	Beckmann / Prah (1992) [1] Ruegger / Hufenus (2003) [16] Houlsby / Jewell (1998) [9] Meyer / Elias (1999) [13] Ingold (1998) [10] EBGEO, sezione 6.3 [4]

*Tabella 1: elenco dei metodi di calcolo esistenti per determinare lo spessore di bonifica*

I metodi elencati in tabella costituiscono solo una selezione. Maggiori dettagli sui metodi di misura del rinforzo della base possono essere trovati consultando il lavoro prodotto da Berg [2].

Tutti i metodi conosciuti ad ora possono determinare lo strato richiesto di bonifica in moto da ottenere un dato valore minimo della capacità portante ma hanno lo svantaggio che non sono in grado di determinare la resistenza a trazione richiesta al materiale geosintetico. Un'eccezione a questo è il metodo sviluppato in accordo con Ingold [10] che permette di determinare la resistenza a trazione istantanea richiesta al geosintetico. Lo spessore del materiale di bonifica dovrà essere determinato utilizzando altri metodi.

Utilizzando i rudimenti della meccanica dei terreni con il metodo di Ingold come base, è stato sviluppato un metodo di progetto da parte del Anhalt Institute of Technology di Dessau chiamato "BKT method" (concetto di progettazione per la capacità portante) nella restante parte del presente documento. Esso consente di determinare i seguenti parametri:

- ✓ lo spessore richiesto per la bonifica;
- ✓ la resistenza istantanea richiesta al materiale geosintetico;
- ✓ la lunghezza di ancoraggio richiesta;
- ✓ la deflessione della superficie stradale;
- ✓ il modulo di deformazione raggiunto.

Il metodo è presentato nei successivi paragrafi e spiegato utilizzando un esempio di calcolo.

## Basi teoriche del metodo BKT

### Il Concetto di progettazione, in accordo con Ingold [10]

Il concetto di progettazione in accordo con Ingold presuppone un processo a livelli. Lo spessore richiesto per la bonifica risulta dalla capacità portante del sottofondo il quale, a sua volta, è funzione della coesione non drenata  $c_u$  e dal coefficiente di capacità portante  $N_c$ .

La relativa nomenclatura può essere vista nella figura 1.

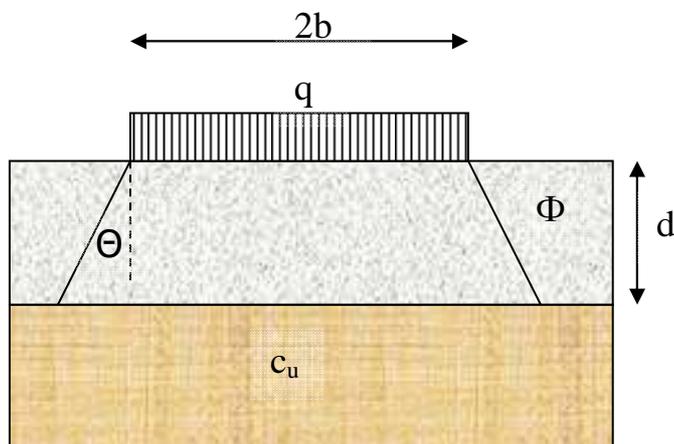


Figura 1 la nomenclatura definita da Ingold [10]

Il metodo richiede due passi:

- ✓ nel primo si determina la capacità portante del sottofondo non rinforzato. Si ipotizza che la distribuzione del carico avvenga uniformemente negli strati di base che gravano sopra ad esso;
- ✓ nel secondo passo si determina la resistenza a trazione richiesta al geosintetico quando un materiale geosintetico viene inserito per incrementare la capacità portante.

### Calcolo della capacità portante, caso non rinforzato

La massima capacità portante del sottofondo è determinata nel modo seguente:

$$q_u = N_c \cdot c_u \cdot \frac{b'}{b} \quad (1) \quad \text{con}$$

$$b' = b + d \cdot \tan \Theta \quad (2)$$

Nel caso in cui il piano di scivolamento sottofondo / strato fondazione è idealmente liscio, è possibile utilizzare il seguente valore di  $N_c$  (in accordo con Prandtl, citato nel [10]),

$$N_c = \pi + 2 \quad (3)$$

In realtà il piano di scivolamento non è idealmente liscio e lo strato di base non è in grado di assorbire le forze di trazione, pertanto ne risulterà una tensione tangenziale  $\tau$  (si veda la figura 2)

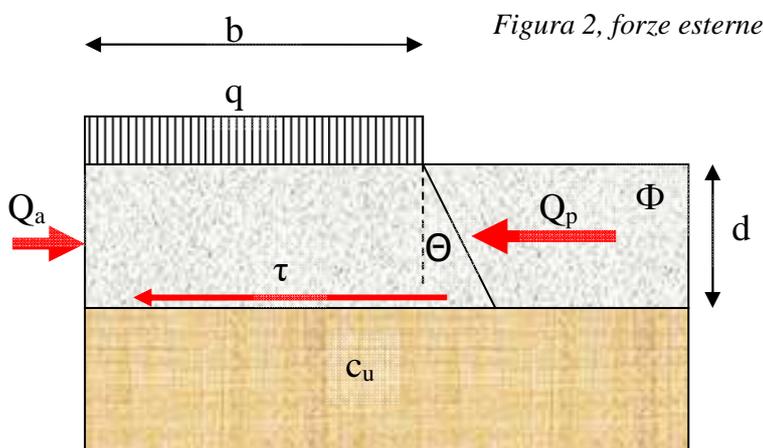


figura 2 forze esterne

La capacità portante del sottofondo è ridotta a seguito dell'azione delle tensioni tangenziali. Le tensioni tangenziali possono raggiungere un'intensità massima pari al valore della coesione non drenata. In tale ipotesi è possibile applicare la seguente relazione:

$$\rho = \frac{\tau}{c_u} \quad (4) \quad \text{con}$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

per  $\rho = 1$ , il coefficiente della capacità portante  $N_c$  si riduce della metà. Nella figura 3 viene rappresentata la relazione tra  $\rho$  e  $N_c$ .

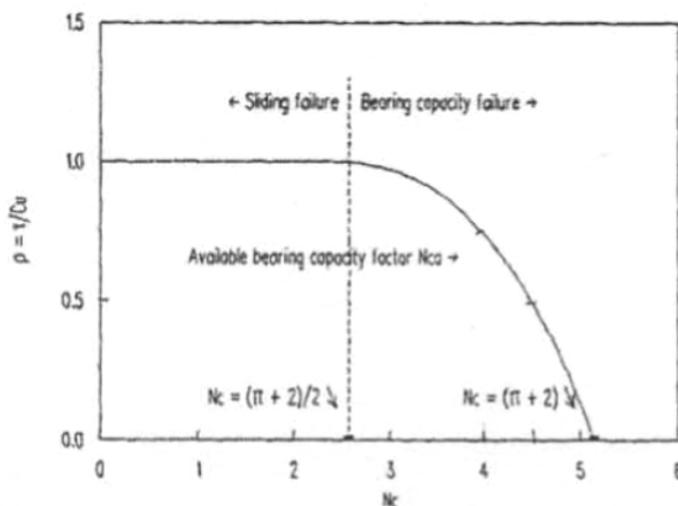


figura 3 relazione tra  $\rho / N_c$

Il valore del coefficiente di capacità portante  $N_c$  può essere determinato in funzione di  $\rho$  tramite la seguente relazione:

$$N_c = \frac{1}{2} \cdot (\pi + 2) + \arccos \rho + \sqrt{1 - \rho^2} \quad (5)$$

Nel calcolo di  $\rho$  si assume che la spinta attiva è dovuta dall'azione dei carichi da traffico e dal peso proprio del terreno compreso nell'area di distribuzione del carico. Al di fuori dell'area di distribuzione del carico, il terreno reagirà con una spinta passiva (vedasi figura 2).

Conoscendo la ben nota relazione che determina la pressione nel terreno e la resistenza propria dello stesso al peso proprio e dai sovraccarichi dovuti al traffico è possibile calcolare  $\rho$  con la seguente relazione.

$$\rho = N_c \cdot 2 \cdot k_a \cdot \ln\left(\frac{b'}{b}\right) + \frac{\gamma \cdot d^2 \cdot (k_a - k_p)}{(2 \cdot c_u \cdot b')} \quad (6)$$

con

$$m = 2 \cdot k_a \cdot \ln\left(\frac{b'}{b}\right)$$

e

$$c = \frac{\gamma \cdot d^2 \cdot (k_a - k_p)}{(2 \cdot c_u \cdot b')}$$

La relazione (6) può essere ridotta in forma lineare nel modo seguente:

$$\rho = m N_c + c \quad (7)$$

Le soluzioni della (5) e (7) richiedono un approccio di tipo iterativo.

In alternativa, la (5) può venir espressa con un polinomio di secondo grado

$$\rho = -0,17 \cdot N_c^2 + 0,96 \cdot N_c - 0,33 \quad (8)$$

Sostituendo la (7) nella (8) si ottiene una funzione quadratica di  $N_c$

$$N_c^2 - 5,75 \cdot (0,96 - m) \cdot N_c + 5,75 \cdot (c + 0,33) = 0 \quad (9)$$

### Calcolo della capacità portante con geosintetici di rinforzo.

La funzione del materiale geosintetico è quella di assorbire le tensioni tangenziali che si sviluppano e dissiparle. In questo caso il coefficiente di capacità portante assume il valore  $N_c = (\pi + 2)$ .

Il valore di calcolo della resistenza a trazione richiesta al materiale geosintetico è calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$F = 2 \cdot k_a \cdot q \cdot b \cdot \ln\left(\frac{b'}{b}\right) + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot d^2 \cdot (k_a - k_p) \quad (10)$$

La sollecitazione tangenziale assorbita dal materiale geosintetico è calcolata nel modo seguente:

$$\tau = \frac{F}{b'}$$

Pertanto il valore minimo del coefficiente di attrito del materiale geosintetico è pari a:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma_v} \quad (11)$$

dove  $\sigma_v$  è la tensione verticale agente sul materiale geosintetico.

### Valutazione

Il metodo di calcolo sviluppato in accordo con Ingold è basato sulla verifica della capacità portante del sottofondo. La tensione verticale ammissibile dipenderà dallo spessore dello strato di base, dalla capacità portante del sottofondo e dalla scelta dell'angolo di distribuzione del carico. Si sottolinea il fatto che tale metodo può anche essere utilizzato per bassi valori di deformazione. Ciò permette di utilizzarlo in aree trafficate con superfici pavimentate (strade classificate).

La nota critica riguarda il fatto che sia il coefficiente di capacità portante e l'intensità della resistenza a trazione dipendono dalla resistenza del terreno. Per piccole deformazioni e movimenti, come avviene nel caso di strade pavimentate, si può assumere che la resistenza del terreno si attivi per piccoli valori di deformazione. L'utilizzo della massima resistenza del terreno, come proposto da Ingold, porta da un lato ad un incremento di  $\rho$  e quindi ad una riduzione del coefficiente di capacità portante. Dall'altro lato la resistenza alla trazione richiesta al materiale geosintetico sarà più bassa.

### Il concetto di progetto della capacità portante (metodo BKT)

#### Introduzione

Il metodo BKT fu sviluppato partendo dal concetto di progetto di Ingold. La finalità del calcolo è quella di determinare lo spessore dello strato di base richiesto per un dato valore del carico sollecitante, noto il valore della capacità portante del sottofondo. Oltre a ciò bisogna determinare la resistenza a trazione del materiale geosintetico.

La verifica è attuata sul concetto del fattore di sicurezza globale, corrispondente con le recenti normative. Un passaggio al concetto con fattore di sicurezza parziale, in accordo con gli standard locali, è possibile in ogni fase del calcolo.

#### Procedura

Si utilizza lo schema proposto nella figura 1. La sequenza di progettazione è rappresentabile dal seguente diagramma di flusso:

1. determinazione della capacità portante ammissibile del sottofondo rinforzato;
2. determinazione dello spessore rinforzato della base;
3. determinazione della capacità portante del sottofondo non rinforzato,
4. resistenza a trazione richiesta al materiale geosintetico,

5. lunghezza di ancoraggio richiesta;
6. deformazione della superficie stradale;
7. modulo di deformazione raggiunto.

### Determinazione della capacità portante ammissibile del sottofondo rinforzato (rottura del terreno)

Usando la Norma DIN 4017 come base, la massima tensione che il sottofondo può ricevere è pari a:

$$\sigma_{0f, reinforced} = c N_{c, reinforced} v_c \quad (13)$$

dove  $c = c_v$  coesione non drenata;  $N_{c, reinforced} = (\pi + 2)$  in accordo con Prandtl;  $v_c = 1,0$  se il carico applicato è su una striscia o pari a  $1 + 0,2 \times (b/a)$  se rettangolo o pari a  $1,2$  se è un quadrato o una circonferenza.

Il fattore di forma  $v_c$  da usarsi è quello definito nella Norma DIN 4017.

Il coefficiente di capacità portante  $N_c = (\pi + 2)$  può essere utilizzato se e solo se le tensioni tangenziali sono assorbite dal rinforzo.

La tensione ammissibile nel sottofondo è:

$$\sigma_{0, reinforced} = \frac{\sigma_{0f, reinforced}}{\eta} \quad (14)$$

con  $\eta = 2,0$  (caso di carico 1, strada pavimentata classificata) o  $\eta = 1,5$  (caso di carico 2, strada non pavimentata).

### Determinazione dello spessore rinforzato della fondazione.

L'area di diffusione del carico sul sottofondo è pari a:

$$A' = \frac{F}{\sigma_0} \quad (15)$$

per semplicità, assumendo un'area circolare del carico

$$A' = \frac{\pi}{4} D'^2 \quad (16)$$

con  $D'$  diametro dell'area di carico sul piano di sottofondo.

$$D' = \sqrt{\frac{4A'}{\pi}} \quad (17)$$

$$\Delta D = D' - D \quad (18)$$

Con  $\Delta D$  incremento relativo del diametro dal valore iniziale.

Lo spessore richiesto allo strato di base rinforzato  $d$  è ottenuto come:

$$d = \frac{\Delta D}{2 \cdot \tan \Theta} \quad (19)$$

l'angolo di distribuzione  $\Theta$  del carico che si può utilizzare dipende dal tipo di materiale granulare impiegato e dal tipo di materiale geosintetico scelto.

Ingold [10] assunse un valore di  $\Theta = 26^\circ$ . Questo valore è molto inferiore se comparato con altri valori reperibili in letteratura. Ad esempio, Ruegger / Hufenus [15] fornirono il seguente range:

$$\varphi \leq \vartheta \leq \left( 45 + \frac{\varphi}{3} \right)$$

Staggi / Jaecklin [17] svilupparono una relazione in cui si teneva conto della qualità dello strato di base e del tipo di materiale geosintetico considerato.

Nella meccanica dei terreni, nei calcoli di prima approssimazione, spesso viene assunto un angolo di distribuzione del carico  $\Theta = 45^\circ$ .

La variazione del valore dell'angolo di distribuzione del carico ha un'influenza considerevole sullo spessore richiesto allo strato di base. Dai risultati ottenuti in modelli sperimentali si è potuto verificare come il valore di  $\Theta = 26^\circ$  è quello che fornisce i risultati più rispondenti.

### Determinazione della capacità portante del sottofondo non rinforzato.

In accordo con Ingold, il coefficiente di capacità portante può essere determinato dalla seguente relazione (cf. equ. 9)

$$N_c^2 - 5,75 \cdot (0,96 - m) \cdot N_c + 5,75 \cdot (c + 0,33) = 0 \quad (20)$$

con

$$m = 2 \cdot k_a \cdot \ln\left(\frac{D'}{D}\right)$$

e

$$c = \frac{\gamma \cdot d^2 \cdot (k_a - k_p)}{(2 \cdot c_u \cdot D')}$$

Ponendo il valore corrispondente a  $N_{c, non\ reinforced}$  è possibile calcolare la tensione verticale ammissibile agente sul sottofondo nel modo seguente.

$$\sigma_{c, non-reinforced} = \frac{c \cdot N_{c, non-reinforced} \cdot v_c}{\eta}$$

### Resistenza a trazione richiesta al geosintetico

La tensione verticale risultante residua  $\Delta\sigma_0$  determinata dalle (14) e (21) deve essere assorbita dal materiale geosintetico.

$$\Delta\sigma_{0, reinforced} = \sigma_{0, reinforced} - \sigma_{0, non\ reinforced} \quad (22)$$

La forza verticale risultante è data da:

$$\Delta P = \Delta\sigma \cdot A' \quad (23)$$

La forza di trazione agente sul materiale geosintetico è determinata in accordo con EBGeo (1997), sezione 6.5 [4] e Ruegger / Hufenus [16] dalla prova di capacità portante di un corpo di terreno rinforzato.

$$F_{B,d} = \frac{\cos(\Theta_d - \delta)}{\cos\varphi_{f,k} \cdot \cos\delta} \cdot \Delta P \quad (24)$$

L'angolo di scivolamento  $\Theta_d$  è determinato dalle note relazioni di meccanica dei terreni, ponendosi nella condizione semplificativa  $\delta = 0$ , ottenendo:

$$\Theta_d = \arccot\left[\sqrt{1 + (\tan\varphi_k)^2} - \tan\varphi_k\right] \quad (25)$$

La resistenza a trazione a breve termine è calcolata usando la seguente relazione:

$$F_{B,k0} = A_1 A_2 A_3 A_4 \eta F_{B,d} \quad (26)$$

### Lunghezza di ancoraggio richiesta al geosintetico

Si determina con la seguente relazione.

$$I_{requ} = \frac{\eta \cdot F_{B,d}}{\gamma \cdot d \cdot \tan\varphi_s + c_u} \quad (27)$$

con  $\eta$  = resistenza all'estrazione

La lunghezza di ancoraggio da porre in sito dovrebbe essere maggiore della lunghezza di ancoraggio così calcolata; qualora nel piano non vi sia una sufficiente lunghezza è necessario operare un risvolto, in modo da ottenere il valore richiesto.

### Deformazione superficiale della strada

Al fine di calcolare la deformazione della superficie stradale si utilizza il metodo dell'altezza equivalente sviluppato da Odemark [18] e rappresentato nella figura 5

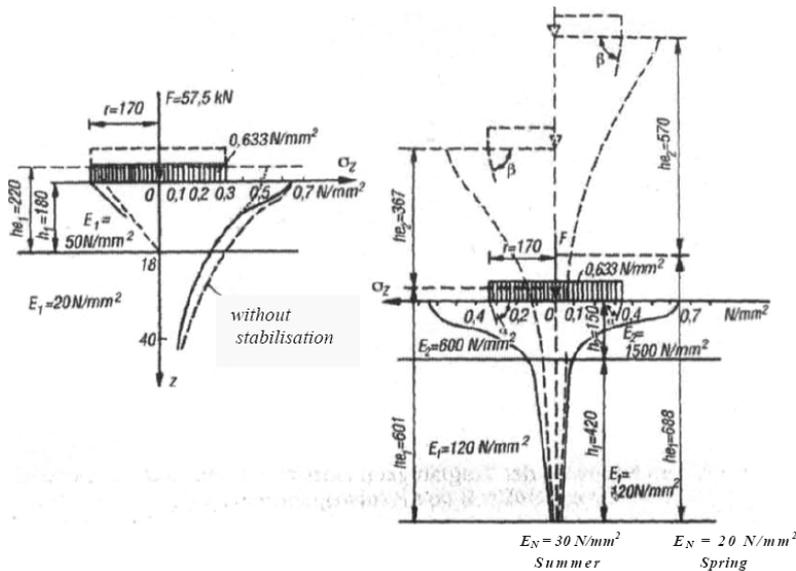


figura 5 diagramma del metodo di Odemark [18]

Per prima cosa bisogna definire l'altezza statica equivalente usando la relazione:

$$h_e = 0.9 \cdot h_1 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_h}} \quad (28)$$

La deformazione totale è determinata come deformazione parziale degli strati

$$s_{Ges} = \frac{0.75 \cdot D \cdot \sigma}{E_h} \cdot \cos \beta + \frac{0.75 \cdot D \cdot \sigma}{E_1} \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (29)$$

con

$$\beta = \arctan\left(\frac{h_e}{r}\right)$$

e

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_1}{r}\right)$$

### Modulo di deformazione raggiunto

$E_{VM}$  è il modulo di deformazione della sovrastruttura e dipende dai carichi e dalla deformazione totale, può essere calcolato nel modo seguente:

$$E_{VM} = 0.75 \cdot D \cdot \frac{\sigma}{s_{Ges}} \quad (30)$$

### Comparazione tra il metodo BKT con altri metodi di calcolo

Nel seguente grafico sono riportati i confronti tra i risultati ottenuti con il metodo BKT e gli altri metodi elencati in tabella 1

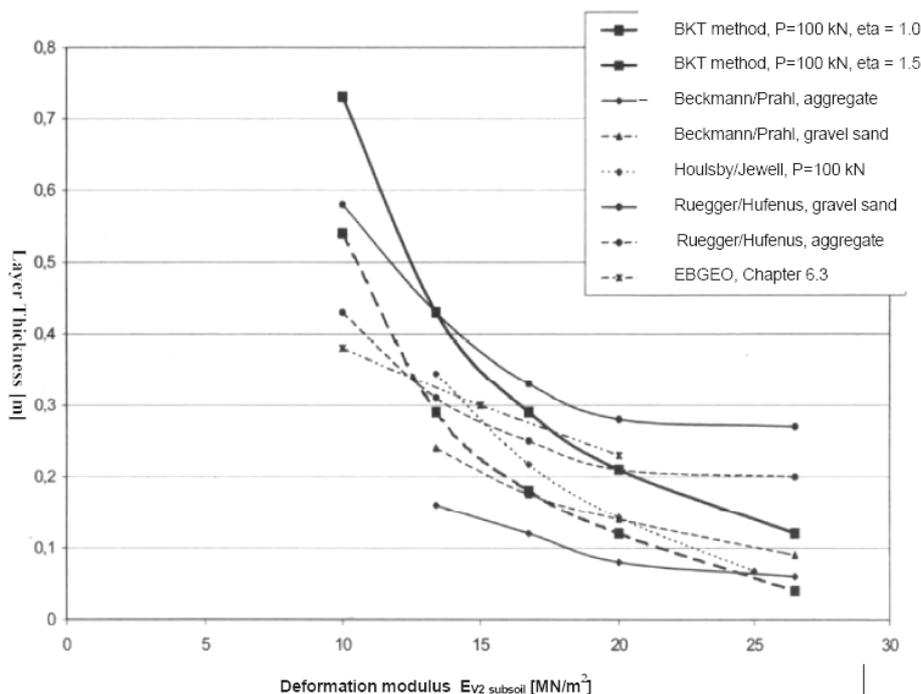


fig.6 comparazione dello spessore richiesto allo strato per lo stesso carico singolo quando  $E_{v2} = 45 \text{ MN/m}^2$

Si osserva come lo spessore dello strato di base determinato con il metodo BKT ricada nel range stimato dagli altri modelli di calcolo quando il fattore di sicurezza  $\eta = 1.0$ . Quando il fattore di sicurezza  $\eta$  adottato è pari a 1.5, come spesso accade nel caso non pavimentato, lo spessore determinato ricade nell'intervallo stimato dal metodo SVG. Questa differenza è anche imputabile dalle differenze dei valori iniziali.

## Esempio di calcolo

### Dati di ingresso

Nota:

il carico su ruota  $P = 80 \text{ kN}$ ; il fattore di sicurezza  $\eta = 1.5$ ;  $b/2 = 0.15 \text{ m}$ ;  $\gamma_{\text{soil exchange material}} = 20 \text{ kN/m}^3$ ;  
 $\Phi'_{\text{soil exchange material}} = 45^\circ$ ;  $C_{u, \text{subsoil}} = 60 \text{ kN/m}^2 \sim \text{CBR } 2\%$ ;  $u = 1.2$ ;  $\Theta = 26^\circ$

Pressione di compressione sotto ai pneumatici:

$$\sigma = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot b^2} = 1131.77 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Modulo di deformazione (derivato da  $c_u$ )

$$E_{v2} = 0.1117 c_u + 6.65 = 13.4 \text{ MN/m}^2$$

Coefficiente di spinta attiva del terreno / coefficiente di spinta passiva del terreno:

$$k_{ah} = 0.1716 \quad k_{ph} = 5.8284$$

### Capacità portante della strada rinforzata pavimentata

Pressione massima (eq 13)

$$\sigma_{0,f} = 370,19 \text{ kN/m}^2$$

Pressione ammissibile nel sottofondo (equazione 14)

$$\text{allow } \sigma_{0, \text{reinforced}} = 246,80 \text{ kN/m}^2$$

### Spessore richiesto dello strato di base rinforzato

Area di dissipazione del carico (eq 15)

$$A' = 0.32 \text{ m}^2$$

Diametro (eq 17)

$$D' = 0.64 \text{ m}$$

Altezza rinforzata (eq 19)

$$d = 0.35 \text{ m}$$

## Capacità portante della strada pavimentata rinforzata

Variabili ausiliarie

$$m = 0.26$$

$$c = -0.18$$

Coefficiente di capacità portante (eq 20)

$$N_c = 3.79$$

Il valore di  $N_c$  deve variare tra  $(\pi + 2)/2$  e  $(\pi + 2)$

La tensione ammissibile nel sottofondo, come da equazione (21) è  
allowable  $\sigma_{0, \text{non reinforced}} = 181.98 \text{ kN/m}^2$

## Resistenza a trazione sul materiale geosintetico

Tensioni verticali assorbite dal geosintetico (eq 22)

$$\Delta\sigma = 64.81 \text{ kN/m}^2$$

Forza verticale assorbita dal geosintetico

$$\Delta P = 21.01 \text{ kN}$$

Resistenza a trazione risultante (equazione 24)

$$F_{B,d} = 11.37 \text{ kN/m}$$

Scelta del geosintetico per la definizione dei parametri:

$$A_1 = 1.77, A_2 = 1.10, A_3 = 1.10, A_4 = 1.05$$

Fattore di sicurezza parziale

$$\eta = 1.75$$

Resistenza istantanea richiesta al geosintetico (eq 26)

$$F_{B,K0} = 44.75 \text{ kN/m}$$

Il geosintetico di rinforzo deve possedere un valore della resistenza a trazione istantanea  $\geq 44.75 \text{ kN/m}$

## Lunghezza di ancoraggio

Resistenza all'estrazione del geosintetico  $\eta = 1.4$

Lunghezza di ancoraggio (eq 27)

$$l = 0.24 \text{ m}$$

## Deformazione della superficie stradale

Modulo di elasticità dello strato di base

$$E_1 = 300 \text{ MN/m}^2$$

Altezza equivalente (eq 28)

$$H_e = 0.89 \text{ m}$$

Deformazione superficiale della strada (eq 29)

$$s = 0.004 \text{ m}$$

## Modulo di deformazione raggiunto

$$E_{VM} = 69.2 \text{ MN/m}^2$$

## Valutazione del metodo BKT

Il metodo BKT presenta numerosi vantaggi rispetto altri metodi. Il metodo considera la capacità portante del sottofondo attraverso prove sulla capacità portante del terreno in condizione non drenate.

Ciò rende possibile definire il livello di sicurezza (tramite  $\eta$ ). Prima che la normativa esistente lo permetta, è possibile cambiare il metodo attraverso il concetto dei fattori di sicurezza parziali.

Nel presente metodo, il materiale geosintetico ha il solo compito di assicurare la capacità portante del sottofondo. Vedendolo da un punto di vista di calcolo, ciò avviene perché il basso valore attribuito al coefficiente di capacità portante  $N_c = (\pi + 2)$  è conseguenza del fatto che la presenza del geosintetico riduce l'azione di attrito esistente tra il piano di sottofondo e lo strato granulare sovrastante.

Poiché il metodo presuppone la nascita di deformazioni molto piccole, tipiche di strade pavimentate, si esclude l'utilizzo della teoria di calcolo nota come teoria della membrana.

La resistenza a trazione, a breve termine, richiesta al geosintetico è calcolata come tensione tangenziale assorbibile dal rinforzo.

L'ampiezza dell'area di dissipazione dovrebbe essere nota al fine di dissipare le forze di trazione nell'area di sconfinamento. Ciò può essere determinato utilizzando il metodo BKT.

La verifica sul valore del modulo di deformazione raggiunto può essere fatto attraverso il metodo noto e generalmente riconosciuto di ODEMARK.

Le formule utilizzate sono lo stato dell'arte delle attuali conoscenze in campo di meccanica dei terreni e nella costruzione di strade. Pertanto la procedura che richiede la realizzazione di campi di prova, al fine di verificare la teoria sviluppata dal metodo di progettazione, non è necessaria.

## Bibliografia

- [1] Beckmann, U; Prahl, M. (1992): *Anwendung von Geogittern im Straßenbau - Unterlagen zur Bemessung des ungebundenen Straßenoberbaus*; 2. Kongreß Kunststoffe in der Geotechnik K-GEO 92 in Luzern; Schweizerischer Verband der Geotextilfachleute, St. Gallen, 1992, pp. 63-72
- [2] Berg, R.R.; Christopher, B.R.; Perkins, S. (2000): *Geosynthetic Reinforcement of the Aggregate Base/Subbase Courses of Pavement Structures*, GMA White Paper II, 2000
- [3] Beyer, H. (1993): *Bemessung von ungebundenen Schichten im Straßenbau auf der Grundlage der Mehrschichttheorie*; Universität Hanover, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Stadtebau, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau 1993
- [4] EBGeo (1997): *Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen*; Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- [5] FGSV (1994): *Merkblatt über Straßenbau auf gering tragfähigem Untergrund*; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Köln, Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau (FGSV Verlag GmbH) 1988
- [6] Floss (1997): *ZTVE Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau; Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau*; Kirschbaum Verlag, Bonn, 2nd Edition, 1997
- [7] Giroud, J.P Han, I (2001): *Design Method for Geosynthetic-Reinforced Unpaved Roads*; Tensar Earth Technologies Inc., 2001
- [8] Giroud, I-P.; Noiray, L. (1981): *Geotextile-Reinforced Unpaved Road Design*, ASCE, Vol. 107, No.9, 1981, pp. 1233-1254
- [9] Houlsby, G.T.; Jewell, R.A. (1998): *Design of reinforced unpaved roads for small rut depths; Geotextiles, Geomembranes and Related Products*; Balkema-Verlag Rotterdam; 1990; pp. 171-176
- [10] Ingold, T.S. (1998): *Improvement of Undrained Plane Strain Static Bearing Capacity*; Technical Note; 1998
- [11] Jaecklin, F .P.; Floss, R. (1988): *Methode zur Bemessung von Geotextilien im Straßenbau auf besonders weichem Untergrund*; Proc. I. Kongress Kunststoffe in der Geotechnik K-GEO'88, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, 1988
- [12] Kohler, U.; Herold, A.; Hering, A.: Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen und Einschätzung des Tragkraft des Erdplanums; Vorträge 25. Baugrundtagung Stuttgart 1998, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 1998, pp. 487-498
- [13] Meyer, Elias, J.M.: (1999): *Dimensionierung von Oberbauten von Verkehrsflächen unter Einsatz von multifunktionalen Geogrids zur Stabilisierung des Untergrundes*; Beiträge zur 6. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik (KGEO), Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 1999, pp. 261-268
- [14] RIL 836 (1999): *Erdbauwerke planen, hauen und instand setzen*; Richtlinie 836 der Deutschen Bahn AG, 1999 Edition
- [15] RStO-01 (200 I): *Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus*; 2001 Edition, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- [16] Ruegger, R.; Hufenus, R. (2003): *Bauen mit Geokunststoffen*; Schweizerischer Verband für Geokunststoffe, 2003
- [17] Staggl, H.; Jaecklin, F.P. (2002): *Die Wirkung von Geokunststoffen als Bewehrung der Tragschicht*; in: Strasse und Verkehr, No. 12 (December), 2002, pp. 515-520
- [18] Wiehler, H.G. (1996): *Straßenbau; Konstruktion und Ausführung*; Verlag für Bauwesen, Berlin, 1996

## Appendice

### Correlazioni frequenti tra i diversi parametri del sottofondo

		CBR	$c_u$	$q_c$ (CPT)	$k_{stat}$ Westergaard	$E_{dinamico}$	$E_{statico}$	SPT
		%	$kN/m^2$	$kN/m^2$	$kN/m^3$	$kN/m^2$	$kN/m^2$	
CBR	%	1	$3,3 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$5,6 \times 10^{-5}$	$8,9 \times 10^{-5}$	$9,7 \times 10^{-2}$	0,2
$c_u$	$kN/m^2$	30	1	0,1	$1,6 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	2,9	6
$q_c$ (CPT)	$kN/m^2$	300	10	1	$1,6 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-2}$	29	60
$k_{stat}$ Westergaard	$kN/m^3$	$18 \times 10^3$	600	60	1	1,6	1740	3600
$E_{dinamico}$	$kN/m^2$	$12 \times 10^3$	400	40	0,66	1	1180	2250
$E_{statico}$	$kN/m^2$	10,35	0,345	0,0345	$5,75 \times 10^{-4}$	$9,2 \times 10^{-4}$	1	2,07
SPT		5	0,17	0,016	$2,8 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-4}$	0,48	1

(fonte: technical training course Enkagrid February 2008 pag 3)

valori indicativi del CBR e $c_u$ *			
Tipo di sottofondo	CBR (%)	Coesione non drenata $c_u$ (kPa)	Note
Ammasso	5	150	Friabile o a bassa plasticità
roccioso	3 – 5	100 – 150	Non modellabile a mano
Solido	2 – 3	75 – 100	Non plasmabile a mano
Solido compatto	2	50 – 75	Plasmabile molto difficilmente tra le mani
Compatto	1 – 2	30 – 50	Plasmabile difficilmente tra le mani
Compatto soffice	1	20 – 30	Facile da modellare tra le mani
Soffice	0,5	20	Può essere rimaneggiato facilmente a mano
Molle			

\* I valori sono indicativi, nel progetto andrebbero determinati con appropriate indagini in sito e in laboratorio

(fonte: technical training course Enkagrid February 2008 pag 4)

### Dati richiesti per la progettazione con ENKAGRID

Generali:		
Nome progetto		.....
Ubicazione		.....
Di dettaglio:		
Tipo di strada		.....
Carico massimo su asse	kN	.....
Carico su ruota	kN	.....
Raggio della ruota	m	.....
Numero di assi passanti durante la vita della struttura non pavimentata		.....
Tipo di riempimento		.....
Angolo di attrito interno della fondazione	(..)°	.....
Angolo di diffusione delle pressioni	(..)°	.....
Peso unità volume della fondazione	$kN/m^3$	.....
Indice CBR del sottofondo	%	.....
Coesione non drenata $c_u$ del sottofondo	kPa	.....