

Verslag van een casestudie

Op weg naar een Nederlandse ontwerprichtlijn voor paalmatrassen 1



Foto 1 Paalmatras met AuGeo palen A15.

Samenvatting

Steeds vaker worden in Nederland paalmatrasystemen toegepast, meestal vanwege de korte bouwtijd en het feit dat vrijwel geen zetting optreedt. Nederlandse ontwerprichtlijnen voor deze systemen zijn momenteel echter niet beschikbaar. Daarom is een CUR werkgroep bezig met het opstellen van dergelijke richtlijnen, waarbij sterk wordt gekeken naar bestaande en in ontwikkeling zijnde buitenlandse richtlijnen. In deze publicatie worden de beschikbare internationale normen vergeleken aan de hand van vergelijkende berekeningen. Deel 2 van deze publicatie, in de volgende Geokunst, zal ingaan op langdurige metingen aan een bestaand Nederlands project, de Kyotoweg.

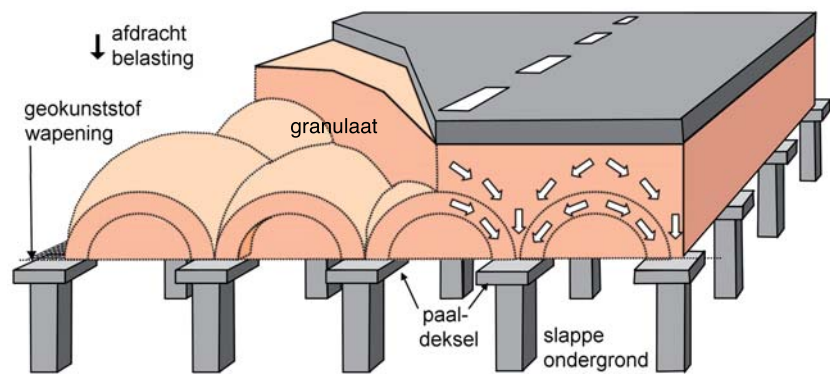
Aan deze publicatie is meegewerkt door de leden van de CUR-werkgroep 'Ontwerprichtlijn paalmatrassen', subcommissie 'Rekenmodellen': ir. Marijn Brugman, Arthe Civil & Structure B.V., ing. Martin de Kant, Grontmij, ir. Jan van Dalen, T&E Consult, ing. Piet van Duijnen, Movares, ir. Jeroen Dijkstra, Cofra, ing. Theo Huybregts, Ingenieursbureau Geologics, ing. Constant Brok, Huesker Synthetic en ir. Rudolf Andringa, Rotterdam Gemeentewerken

In de vorige GeoKunst, nr. 2, 2008, schreef Jan Heemstra over innovaties uit het verleden om stabiele weglighamen in slappe bodemgebieden te maken. Hij beschreef rijzenbedden (een zinkstuk met wiepen van rijshout, ofwel een soort matras gewapend met wiepen). Die constructie is te zien als voorloper van de paalmatrasystemen, die op dit moment aan populariteit winnen.

In de tijd van Keveling Buisman rekende men nog niet aan de zinkstukken zelf. Men koos, afhankelijk van de betekenis van de weg, voor een lichte, een zware of een zeer zware constructie.

Vandaag de dag rekenen we wel tijdens het ontwerpproces. Voor paalmatrassen is in Nederland echter nog geen norm beschikbaar. Daarom is een CUR werkgroep in het leven geroepen die een Nederlandse ontwerprichtlijn zal opstellen, voor het ontwerp van de matras, de palen en de gehele paalmatrasconstructie.

De CUR werkgroep heeft eerder al een werkrapport 2007-2 opgeleverd (downloaden op www.curbouweninfra.nl of www.delftcluster.nl/wegen) voor het ontwerp van de palen, en concentreert zich in dit artikel op het ontwerp



Figuur 1 Hangmatmodel- versus interlockingmodel.

van de met geokunststof gewapende matras. Hiervoor is een aantal rekenmodellen geselecteerd. Deze publicatie doet verslag van een casestudie, waarbij de berekeningsmethoden onderling zijn vergeleken en een parameterstudie is uitgevoerd.

Beschrijving te valideren ontwerpmethoden

In een vroeger CUR rapport uit 2002 (CUR 2002-7) wordt voor het ontwerp van een matras expliciet onderscheid gemaakt tussen het 'hangmat- of membraanmodel' en het 'interlockingmodel', dat in CUR 2002-7 nog 'granulaatmatrasmodel' wordt genoemd (Bush-Jenner). Al deze modellen zijn gebaseerd op het verschijnsel boogwerking. In het interlockingmodel zijn meerdere lagen geogrid wapening aanwezig met daartussen granulaat. De twee model-principes geven echter heel verschillende resultaten met betrekking tot de trekkracht in de wapening. Omdat er meer wetenschappelijk onderzoek voor hangmatmodellen beschikbaar is, of het in ieder geval beter gedocumenteerd is, heeft de CUR werkgroep haar aandacht eerst vooral gericht op de hangmatmodellen, en wel op de modellen in de British Standard, BS8006, en de Duitse concept-norm, EBGEO, hoofdstuk 6.9. Dit artikel geeft weliswaar een uitleg van de drie beschouwde rekenmethoden, maar gaat in de berekeningen alleen in op de twee hangmatmodellen

BS8006

De British Standard BS8006 heeft zijn formules gebaseerd op de formule die Marston in 1913 voorstelde voor pijpleidingen. Met die formules wordt uitgerekend welk aandeel van de belasting rechtstreeks naar de palen gaat. De belasting die niet rechtstreeks naar de palen gaat, moet worden gedragen door de geokunststof wapening (hangmatmodel). BS8006 geeft formules voor de berekening van de trekspanning in het geokunststof. BS8006 gaat er verder uit dat alle belasting uiteindelijk naar de palen gaat en de ondergrond in het geheel geen ondersteu-

ning geeft aan de matras.

De formules voor de krachtoverdracht zijn verschillend voor stuit- en kleefpalen. BS8006 gaat ervan uit dat stuitpalen zich stijver gedragen waardoor er meer belasting rechtstreeks naar de palen gaat. Bij kleefpalen gaat dan een groter deel van de belasting via de wapening naar de palen, waardoor de trekkracht in de wapening groter is dan in geval van stuitpalen. Hierbij gaat BS8006 er blijkbaar vanuit dat de ondergrond wel degelijk gedeeltelijk meedraagt, anders zou de matras het verschil niet kunnen voelen tussen stuit- en kleefpalen. Rekenkundig wordt die bijdrage van de ondergrond echter niet meegenomen. Het rekenen met de kleefpaalformules kan dus alleen worden toegepast als men er zeker van is dat de ondergrond blijft meedragen. Omdat de ondergrond volgens BS8006 geen ondersteuning geeft aan de matras mag worden

gewerkt met een holte onder de matras, en dat gebeurt in de praktijk geregeld. In dat geval heeft het geen zin om te rekenen met een onderscheid tussen kleef- en stuitpalen. Er moet dan worden gerekend met stuitpalen. Een systeem van meezakkende palen en permanente ondersteuning van de matras door de ondergrond valt niet onder het toepassingsgebied van BS8006.

De formules van BS8006 zijn niet geheel consistent. Zo klopt het verticale evenwicht niet altijd, en is de methode niet volledig 3D. Van Eekelen en Bezuijn (2008) gaan hier op in.

EBGEO

Zaeske heeft in de groep van professor Kempfert voor zijn promotiewerk een groot aantal proeven uitgevoerd en een wiskundig consistent model in elkaar gezet waarop de formules van EBGEO* zijn gebaseerd. In het rekenmodel wordt eerst



Foto 2 Houten palen voor paalmatras Zuidelingsdijk Gorinchem.



Foto 3 Geogrid wapening paalmatras zuidelingsdijk Gorinchem.

de belasting van aardebaan en verkeer verdeeld in een deel dat rechtstreeks op de palen werkt, en een restdeel. In een tweede rekenstap wordt dat restdeel verdeeld over de wapening en de slappe ondergrond, afhankelijk van de stijfheid van de wapening en de beddingsconstante van de ondergrond. Het is ook mogelijk om uit te gaan van een niet-blijvend dragende ondergrond, door de ondergrond 'uit' te zetten (beddingsconstante $k = 0$).

BUSH-JENNER of de 'advanced arching model'

Het Bush-Jenner model gaat ervan uit dat er een interlocking-effect optreedt tussen geogrid wapening en granulaat waardoor er gerekend kan worden met boogwerking met een zeer lage boog. Dit leidt tot een ontwerp met een geokunststof-wapening met een relatief lage sterkte. In een latere fase van het onderzoek zal de werkgroep proberen om dit interlocking-effect aan te tonen met eindige elementenberekeningen en experimenten, om ook deze rekenregel te valideren. Wanneer het mogelijk blijkt het 'interlocking-effect' analytisch in het Bush-Jenner model te verdisconteren, kunnen matrassen met één laag of meerdere lagen wapening beide in de Nederlandse ontwerprichtlijn worden beschreven.

Validatie van de ontwerpregels

Om de Britse norm BS8006 en de Duitse conceptnorm EBGEO te valideren, gaan we in dit artikel in op een uitgebreide serie berekeningen, waar-

bij EBGEO- en BS8006 berekeningen worden vergeleken met numerieke (Plaxis-)berekeningen. In het volgende nummer van GeoKunst worden EBGEO- en BS8006 berekeningen vergeleken met de resultaten van 2 jaar meten aan de Kyotoweg, een wegvak op houten palen bij Schelluinen.

Parameterstudie met twee cases

Er zijn twee cases doorgerekend, case 1 heeft een dunne aardebaan, en case 2 heeft een dikke

aardebaan, zie *figuur 2*. De hart-op-hart afstand van de palen en de maten van de ronde paaldeksels zijn verschillend, verder zijn de cases identiek. Voor beide cases is een aantal variatiestudies uitgevoerd, waarbij steeds één parameter is gevarieerd terwijl de overige parameters constant zijn gehouden.

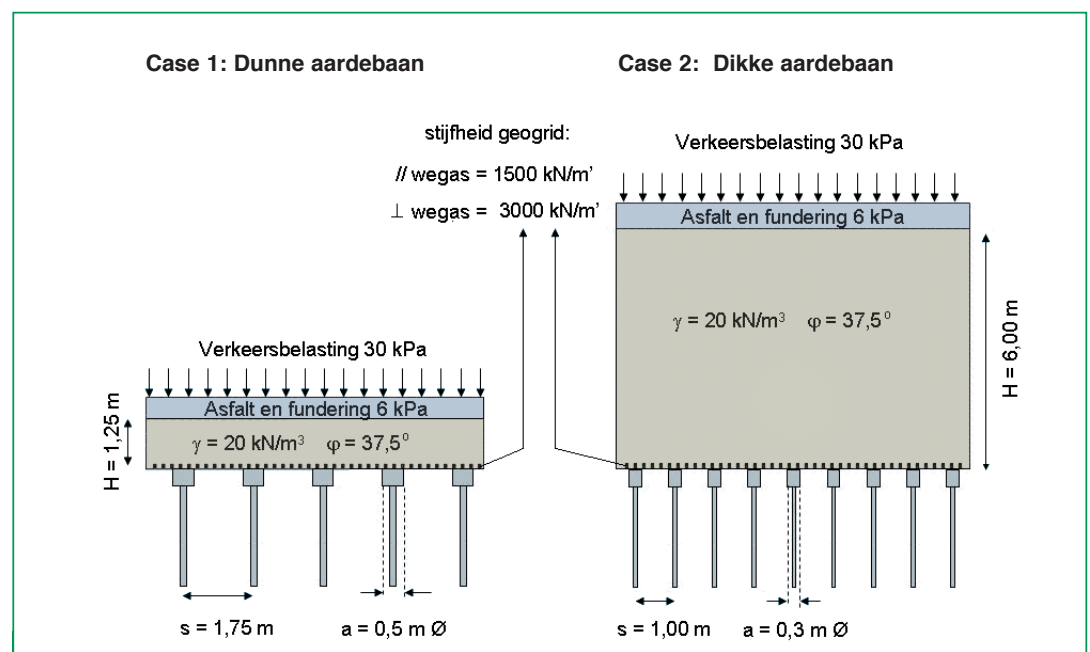
Beschrijving analytische berekeningen

De berekeningen met BS8006 en EBGEO zijn uitgevoerd conform de formules in die normen. Daarbij worden enkele opmerkingen gemaakt: De dimensies van de paaldeksels worden zo gekozen, dat het oppervlak van de vierkante BS8006-paaldeksele en de ronde EBGEO-paaldeksele gelijk is.

Verder wordt de stijfheid EA van de geokunststof wapening voor zowel BS8006 als EBGEO als invoerparameter beschouwd. Voor de BS8006 is de stijfheid echter geen invoerparameter. De rek is een invoerparameter, waarna de trekspanning in de wapening wordt uitgerekend. Met deze rek en de trekspanning is dan achteraf de stijfheid van de wapening te berekenen. Voor de vergelijkende berekeningen is de invoerrek voor de BS8006 berekeningen zo gekozen zodat de stijfheid van de wapening de juiste was. Bij alle berekeningen wordt er vanuit gegaan dat de ondergrond geen ondersteuning geeft aan de matras. De extra trekkracht in de wapening onder het talud van de ophoging is in deze vergelijking buiten beschouwing gelaten.

Beschrijving numerieke berekeningen

Er zijn twee types axiaal-symmetrische



Figuur 2 Dunne en dikke aardebaan.

Plaxisberekeningen uitgevoerd: een type dat snel kan rekenen, en ter verificatie een veel complexer type. Bij het snelle type is de slappe ondergrond genegeerd (uitgezet) en een één meter lange paal gemodelleerd. Bij het complexere model is de slappe ondergrond gemodelleerd met het Softsoil-creep model. De (gedraïneerde) ondergrond 'kruipt' tijdens de berekening onder de matras weg. In de eindsituatie draagt de ondergrond niet meer mee.

In beide modellen is de matras gemodelleerd met het Hardeningsoil model. De geokunststof wapening is gemodelleerd zonder interface-elementen, waarmee een maximale wrijving tussen granulaat en geokunststof wordt verkregen. Uit de berekeningen blijkt dat het eenvoudige en complexe rekenmodel zeer vergelijkbare resultaten geeft (minder dan 10% verschil in de totale krachten op de paaldeksels en trekspanningen in de wapening). Daarom worden in de figuren alleen de resultaten gegeven van de eenvoudige Plaxisberekeningen.

Rekenresultaten vergeleken

In figuren 3a en b op de volgende twee pagina's zijn de berekeningsresultaten voor de dunne en de dikke aardebaan samengevat.

Bush-Jenner geeft in vergelijking met de andere methoden zeker tien keer zo lage trekkrachten in de geogrids. De basisgedachte van Bush-Jenner (interlockingmodel) verschilt echter erg van die van EBGeo en BS8006 (hangmatmodel), waardoor de modellen niet vergelijkbaar zijn en de Bush-Jenner resultaten zijn weggelaten. We concentreren ons op de verschillen tussen de resultaten van BS8006, EBGeo en Plaxis.

De Britse BS8006 gebruikt voor het geokunststof de rek als invoerparameter, terwijl EBGeo en Plaxis de stijfheid van het geokunststof als invoerparameter hanteren. Voor de vergelijkende berekeningen is ervoor gekozen om de invoerrek van BS8006 steeds zo te kiezen, dat de stijfheid van het geokunststof gelijk is aan die zoals gebruikt in de andere berekeningen. Het bleek nodig om in sommige gevallen een bijzonder hoge invoerrek te kiezen. Dit was het geval bij de dunne aardebaan van case 1 (bij lagere stijfheden, kleinere paaldekselmaten, en bij de dunnere aardebaanvarianten). Bij een praktijkontwerp zou dat ontoelaatbaar zijn. In dit geval was het doel echter een vergelijkende studie uit te voeren.

Er is een opvallende overeenkomst tussen de resultaten van de berekeningen met EBGeo en



Foto 4 Paalmatras voor bastions Almere.

de resultaten uit de Plaxis berekeningen. Dit geldt althans voor alle dikkere aardebanen (alle case 2 - berekeningen en het rechterdeel van de grafiek bij de variatie van de aardebaandikte bij case 1). Voor de dunnere aardebaan wordt de zeer sterke overeenkomst alleen gevonden als de stijfheid van het geokunststof in de Plaxisberekeningen wordt vergroot, van 1500 naar ongeveer 4500 kN/m². Als er bij bijvoorbeeld H = 1,25 m in case 1 wordt gerekend met EA = 1500 kN/m², dan vindt Plaxis een circa 20% lagere trekspanning dan EBGeo.

Mogelijk wordt dit verschil veroorzaakt door

een verschil in dilatantie van het granulaat in de matras. Wij gebruiken in de Plaxis berekeningen een menggranulaat ($\varphi' = 37.5^\circ$) en de dilatantie (ψ) wordt standaard aangehouden op $\varphi' - 30^\circ$. In de proeven van Zaeske is gebruik gemaakt van zand als aanvulmateriaal. Het rapport van Zaeske hanteert een φ' -waarde van 38° en een ψ -waarde van 11° .

Vanaf een bepaalde aardebaandikte ($H \geq 1,4(s-a)$) geeft de BS8006 bij een verder stijgende aardebaandikte een constante trekspanning in de wapening. Dit komt door de aanname van BS8006 dat bij volledige boogwerking alle

extra belasting of aardebaandikte niet wordt overgedragen naar het geokunststof. Plaxis en EBGEO laten echter zien dat de belasting op het geokunststof wel degelijk toeneemt bij toenemende dikte van de aardebaan. Het variëren van de aardebaandikte en het variëren van de hart-op-hart afstand tussen de palen geven vergelijkbare resultaten (een grotere hart-op-hart afstand is vergelijkbaar met een kleinere aardebaandikte). Daarom zijn alleen de resultaten voor de aardebaandiktevariatie gegeven.

Niet in de grafieken, maar wel belangrijk is dat de trekspanning in het geokunststof volgens BS8006 niet wordt beïnvloed door de inwendige wrijvingshoek van het vulmateriaal van de aardebaan (het granulaat). Dit komt omdat de boogwerking binnen het model van BS8006 niet afhankelijk is van de eigenschappen van de aardebaan. EBGEO en Plaxis kennen die afhankelijkheid wel. De inwendige wrijvingshoek heeft in BS8006 overigens wel invloed op de trekspanning in de wapening ten gevolge van de spreidkrachten in de aardebaan, maar dat valt buiten de context van dit artikel.

Bij het toenemen van de aardebaandikte of de paaldekselmaat, vindt BS8006 voor case 1 een knik in de lijn voor de trekspanning. Deze wordt veroorzaakt doordat BS8006 onderscheid maakt tussen gedeeltelijke en volledige boogwerking (bij $H = 1,4 (s-a)$) en de formules niet goed op elkaar aansluiten. Uiteraard wordt deze knik niet gevonden met EBGEO en Plaxis.

Bij de heel dunne aardebaan vindt BS8006 gedeeltelijke boogwerking en daarmee een hogere trekspanning in de wapening. Deze hoge waarden worden mede veroorzaakt doordat de Britse norm een 2D configuratie gebruikt voor het bepalen van de lijnbelasting op de wapeningsstrook tussen twee aangrenzende paaldeksels. Als er was uitgegaan van een 3D configuratie (palen in plaats van muren onder de matras), dan zou de belasting anders worden verdeeld, en zou een lagere trekspanning in de wapening worden gevonden.

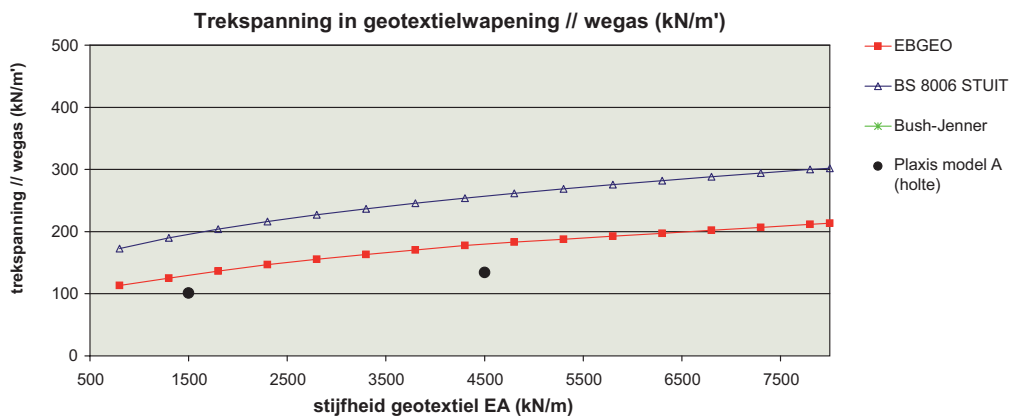
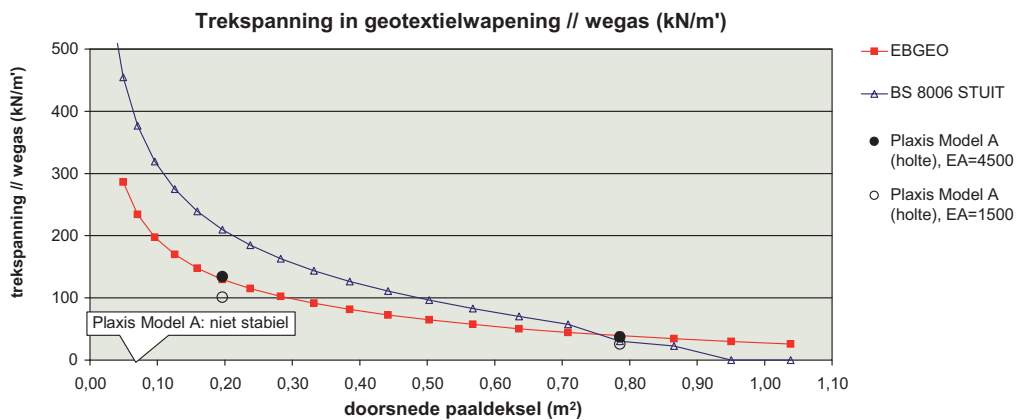
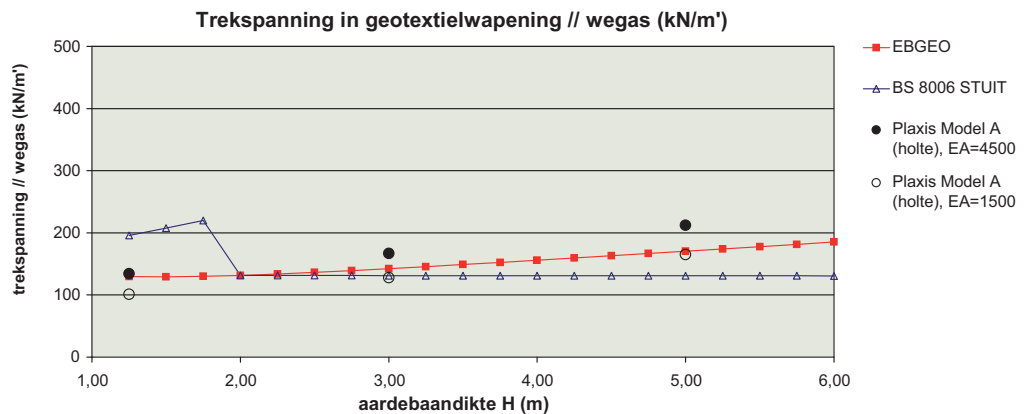
Conclusies

De gevonden overeenkomsten in resultaten tussen de Plaxis berekeningen (voor de dikkere aardebanen) en de berekeningen volgens EBGEO lijken op dit moment een sterk argument te zijn voor de EBGEO als ontwerpmethode. Een bezwaar tegen EBGEO kan misschien zijn dat deze nog (steeds) niet definitief is vastgesteld. BS8006 is niet erg consistent in verticaal evenwicht en in de formules voor gedeeltelijke en

Case 1: Dunne aardebaan

Geeft de ondergrond steun of wordt er gerekend met een holte: waarde beddingsconstante	holte: 0 kN/m
Aardebaandikte H (tussen bovenkant paalkop en aangrijppunt verdeelde	1,25 m
Hart op hartafstand palen	1,75 m
<i>Let op: EBGEO rekent met diagonale hoh afstand (bij vierkantsstramien palen), we vergelijken in de grafiek tov de afstand in x of y-richting</i>	
(Equivalentente) diameter paaldeksels	0,50 m
Materiaal ophoging	Puin
Materiaal ophoging soortelijk gewicht	$g = 20 \text{ kN/m}^3$
Materiaal ophoging inwendige wrijvingshoek	$j = 37,5 \text{ kN/m}^3$
Gewicht asfalt plus fundering	6 kPa
Verkeersbelasting (conform conceptrapportage C147/1) grijpt aan op 50 cm diepte	30 kPa
langudduur-rekstijfheid geotextiel richting wegass bij 4,5% rek	1500 kN/m'

Basisberekening



Figuur 3a Dunne aardebaan: curves 1-3.

Case 2: Dikke aardebaan

Geeft de ondergrond steun of wordt er gerekend met een holte: waarde beddingsconstante Aardebaandikte H (tussen bovenkant paalkop en aangrijppunt verdeelde verkeersbelasting)

Hart op hartafstand palen

Let op: EBGEO rekent met diagonale hoh afstand (bij vierkantsstramen palen), we vergelijken in de grafiek t.o.v. de afstand in x of y-richting

(Equivalentente) diameter paaldeksels

Materiaal ophoging

Materiaal ophoging soortelijk gewicht

Materiaal ophoging inwendige wrijvingshoek

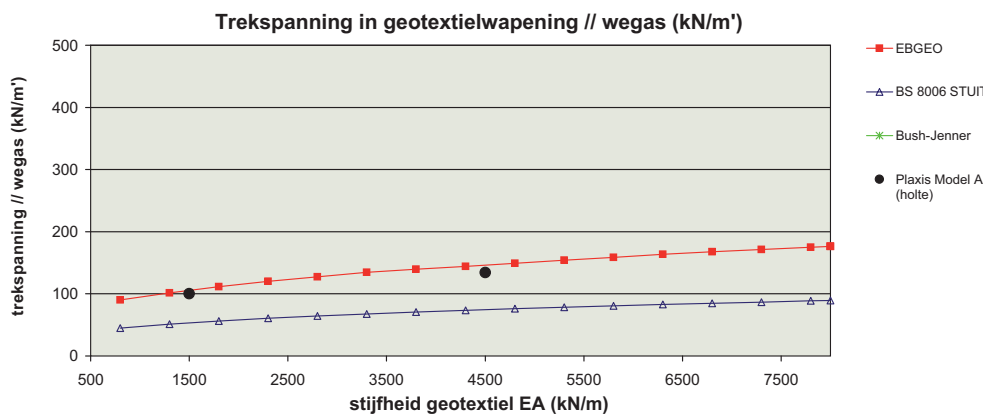
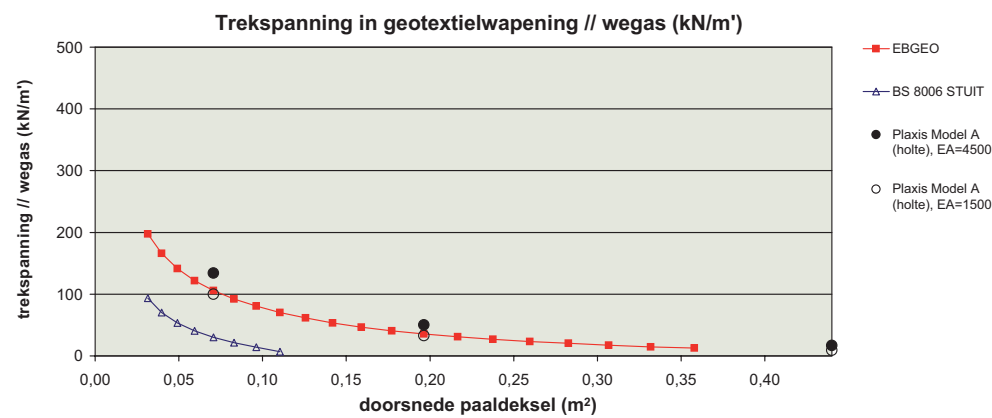
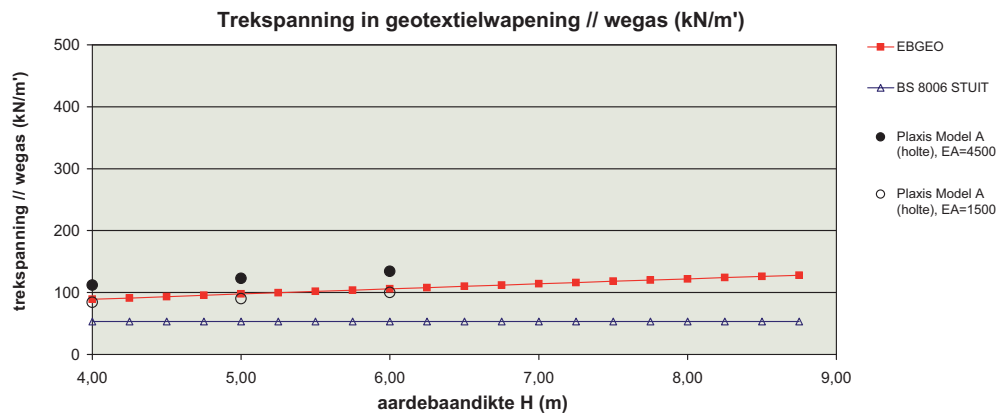
Gewicht asfalt plus fundering

Verkeersbelasting (conform conceptrapportage C147/1) grijpt aan op 50 cm diepte

langeduur-rekstijfheid geotextiel richting wegas bij 4,5% rek

Basisberekening

Holte: 0 kN/m	variabel
	1,00 m
	0,30 m
Puin en daarboven	$g = 20 \text{ kN/m}^3$
	$j = 37,5 \text{ kN/m}^3$
	6kPa
	30kPa
	1500 kN/m'



volledige boogwerking. Ook dat versterkt de voorkeur voor EBGEO.

Vervolgonderzoek

In de volgende GeoKunst worden EBGEO en BS8006 berekeningen vergeleken met veldmetingen aan de Kyotoweg.

Met dank aan

Delft Cluster, Deltares en CUR Bouw en Infra

*Momenteel is alleen een concept van deze norm uit juli 2004 beschikbaar.

Referenties

– British Standard, BS 8006 (1995) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. BSi, including amendments Mach 1999.

– EBGEO: Entwurf der Empfehlung 'Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern', juli 2004, Entwurf EBGEO Kapitel 6.9. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Fachsektion 'Kunststoffe in der Geotechnik' Arbeitskreis AK 5.2 'Berechnung und Dimensionierung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen'.

– CUR rapport 2002-7 Gewapende granulaatmatras op palen, Toepassing, ontwerp- en uitvoeringsaspecten ISBN 90 3760 262 2.

– CUR werkgroep rapportage CUR 2007-2: Eisen aan paalmatrasystemen, palen en inventarisatie matras Mei 2007, downloadbaar op www.delftcluster.nl/wegen, klik op publicaties.

– Van Eekelen, Suzanne en Bezuijn, Adam, 2008, Considering the basic starting points of the design of piled embankments in the British Standard BS8006, wordt gepubliceerd in de Proceedings van EuroGeo4, paper number 315, September 2008, Edinburgh, Schotland.

– Jan Heemstra, 2008, Wat wij nu nog van Keverling Buisman kunnen leren: De betekenis van klassieke matrassen in de wegenbouw voor de paalmatras van vandaag. GeoKunst juli 2008, nr. 2, blz 54-57.

– Zaeske, D. (2001), Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über Pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, Februar 2001.

Figuur 3b Dikke aardebaan: curves 4-6.