

Ontwerp pilot Kyotoweg bij Giessenburg

Baggerspeciematras op houten palen

Postbus 69
NL-2600 AB Delft
Stieltjesweg 2
NL-2628 CK Delft

Telefoon 015 269 35 00
Telefax 015 261 08 21
info@geodelft.nl
www.geodelft.nl

Postbank 234342
ING Bank NV
rek.nr.65.09.62.524
KvK S41146461 Delft

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Versie
04 Definitief

Aantal pagina's
59

Titel / subtitel

**Ontwerp pilot Kyotoweg bij Giessenburg /
Baggerspeciematras op houten palen**

Projectnaam

Innovatieve wegconstructies

Projectleider(s)

ir. S.J.M. van Eekelen

Projectbegeleider(s)

**dr.ir. M.A. Van
ing. A.T. Aantjes**

Overige leden projectteam

**ir. J. van Ruijven
ir. C. Lehen-de Rooij
ir. M.A.T. Visschedijk
Alfred vd Horst
ir. A. Bezuijen**

Opgesteld in opdracht van

**Kantakun, Van Biezen,
DWW, SenterNovem**

Verspreiding

Pilot Kyotoweg Giessenburg

Samenvatting rapport

GeoDelft bedacht een milieuvriendelijk wegbouwconcept: de Kyotoweg. De 'Kyotoweg' is een milieuvriendelijke weg die bestaat uit gemodificeerd baggerslib op houten palen. Deze weg heeft tal van milieuvoordelen boven traditionele wegen op zand.

GeoDelft werkt samen met onder andere Van Biezen (Willem van Delft), Kantakun (Arnout Beeker) en HUESKER Synthetic GmbH aan de ontwikkeling van dit concept

Om te demonstreren hoe een Kyotoweg wordt ontworpen en gebouwd, wordt op het opslagterrein van gebroeders de Kreij, Parallelweg Schelluinen, Giessenburg een pilot-Kyotoweg gebouwd. Dit rapport doet verslag van de ontwerpberekeningen en de plannen voor monitoring van spanningen en vervormingen tijdens en na de aanleg en belasten.

Dit onderzoek is een deel van een groter Delft Cluster onderzoek, 'Innovatieve wegconstructies', nummer CT 02.10.03, en wat weer een onderdeel is van het Delft Clusterproject 'Blijvend Vlakke wegen' (CT 02.10).

<u>Versie</u>	<u>Datum</u>	<u>Opgesteld door</u>	<u>Paraaf</u>	<u>Gecontroleerd door</u>	<u>Paraaf</u>
01	juni 2005	Suzanne van Eekelen		Harm Aantjes Meindert Van Arnout Beeker	
02	Oktober 2005	Suzanne van Eekelen		Joris van Ruijven	
03	November 2005	Suzanne van Eekelen		Meindert Van Arnout Beeker Willem van Delft Cissy Lehen	

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	De Kyotoweg	2
3	Beschikbare gegevens en uitgangspunten	6
3.1	Beschikbare gegevens	6
3.1.1	Locale omstandigheden	6
3.1.2	De houten palen	7
3.1.3	De gemodificeerd baggerspecie	8
3.1.4	De wapening	10
3.2	Belastingen	10
3.3	Uitgangspunten voor de pilot	10
4	Ontwerpberekeningen	12
4.1	Inleiding	12
4.2	Globaal ontwerp	14
4.3	De palen	16
4.3.1	De constructieve draagkracht van de palen	16
4.3.2	De geotechnische draagkracht van de palen	18
4.3.3	Conclusies ontwerp palen	18
4.4	Het matras	18
4.4.1	Ontwerp volgens verschillende theorieën aardebaan op palen	18
4.4.2	De dikte van de aardebaan	19
4.4.3	Ontwerp wapening gebruiksfase	22
4.4.4	Ontwerp wapening constructiefase	25
4.4.5	Conclusies ontwerp matras	27
4.5	De eindzetting van de wegconstructie	30
4.6	Stabiliteit aardebaan	30
4.7	Drainage / drooglegging	30
4.8	Geotechnische risicoanalyse	30
4.9	Monitoringsplan en maatregelenplan	31
4.9.1	het beheersen van de geotechnische risico's:	31
4.9.2	Het verkrijgen van meetdata voor rekenmodelontwikkeling en validatie	31
5	PR en communicatie	33
6	Conclusies en aanbevelingen	34
6.1	Algemeen	34
6.2	Ontwerpberekeningen	34
6.3	Kosten	34
6.4	Milieu	35
6.5	Aanbevelingen	35
7	Referenties	36
Bijlage(n)		
Bijlage 1	Bepaling verkeersbelasting	
Bijlage 2	Ontwerp van wapening in paal-matrasystemen	
Bijlage 3	Resultaten triaxiaalproeven en vrije prismaproeven	
Bijlage 4	Resultaten dynamische proeven	
Bijlage 5	Sondering gemaakt op de proeflocatie	
Bijlage 6	Grondwaterstandmetingen in het kader van de Betuweroute	
Bijlage 7	Certificaat Dubokeur Houten heipaal (met betonopzetter)	

Tabellen

Tabel 2.1	Gegevens waarmee milieu- en kostenvoordeel worden geschat	5
Tabel 2.2	Schatting milieuvoordeel door gebruik houten palen	5
Tabel 2.3	Schatting milieuvoordeel door recycling baggerslib	5
Tabel 3.1	Bodemopbouw	6
Tabel 3.2	Grondwaterstand	6
Tabel 3.3	Eigenschappen houten palen	7
Tabel 3.4	Eigenschappen Hegemann materiaal	8
Tabel 3.5	Uitgangspunten	11
Tabel 4.1	Samenvatting van partiële factoren die volgens de Britse norm BS 8006 moeten worden gebruikt bij aardebanen op palen (tabel 27, blz 98 van de BS 8006). De rechterkolom noemt de NEN normen die hiermee zoveel mogelijk overeenkomen, maar die niet speciaal voor aardebanen op palen zijn bedoeld.	12
Tabel 4.2	Partiële factoren volgens de NEN 6702	13
Tabel 4.3	hart op hart (hoh) afstand tussen palen bij aantallen palen in lengte of breedte pilot	16
Tabel 4.4	belastingen op palen (gebruikstoestand)	16
Tabel 4.5	Economisch ontwerp palenplan	17
Tabel 4.6	Diverse normen over minimale aardebaandikte ivm 'doorponzen'	20
Tabel 4.7	Minimale dikte aardebaan (m) om volledige boogwerking te garanderen. Bij onvolledige boogwerking werkt een deel van de bovenbelasting rechtstreeks op de wapening in plaats van rechtstreeks op de palen.	21
Tabel 4.8	Trekkracht in de wapening T_{rp} (kN/m) in langs richting van de weg, gedurende de gebruiksfase, ten gevolge van de verticale belasting die rechtstreeks op de wapening werkt.	22
Tabel 4.9	Trekkracht in de wapening T_{rp} (kN/m) in langs richting weg, gedurende de constructiefase, ten gevolge van de verticale belasting die rechtstreeks op de wapening werkt.	26

Figuren

Figuur 2.1	De Kyotoweg	2
Figuur 4.1	Dwarsdoorsnede pilot Kyotoweg	14
Figuur 4.2	Bovenaanzicht pilot Kyotoweg	14
Figuur 4.3	Detail dwarsdoorsnede pilot Kyotoweg	15
Figuur 4.4	palenpatroon ontwerp met 5 palen over de breedte	Error! Bookm
Figuur 4.5	Verklaring symbolen a, s en H	19
Figuur 4.6	Trekkracht in de wapening gedurende de gebruiksfase ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (bij een vooraf aangenomen maximale rek van 3%)	22
Figuur 4.7	Trekkracht T_{ds} in wapening loodrecht op de weg	23

Figuur 4.8 Inklemlingslengte L_e en lengte wapening buiten buitenste paal L_b	24
Figuur 4.9 Trekkkracht in de wapening gedurende de constructiefase ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (bij een vooraf aangenomen maximale rek van 3%)	26
Figuur 4.10 Definitieve ontwerp	29
Figuur 7.1 De berekeningsmethode van Carlsson (1987) is 2D. Carlsson neemt aan dat het gewicht van de grondwig op de wapening rust.	6
Figuur 7.2 Met 3D berekeningen vinden we grotere verplaatsingen onder in de aardebaan, en dus ook grotere spanningen in de wapening dan bij 2D berekeningen.	7
Figuur 7.3 Uitbreiding van de methode van Rogbeck: bij onvolledige boogwerking wordt de bovenbelasting wel meegenomen.	8
Figuur 7.4 Boogwerking met de methode van SINTEF (Svanø et al, 2000)	9
Figuur 7.5 Boogwerking volgens Hewlett et al. (1988)	9

1 Inleiding

GeoDelft bedacht een milieuvriendelijk wegbouwconcept: de Kyotoweg. De 'Kyotoweg' is een milieuvriendelijke weg die bestaat uit gemodificeerd baggerslib op houten palen. Het bouwen van een weg op palen heeft veel voordelen. Een korte aanlegtijd en een lange levensduur. Een weg op palen is duurzaam, zettingsvrij en daarom onderhoudsarm. Er wordt dus winst behaald in termen van het verminderen van files en daarmee het beperken van CO₂ emissie. De Kyotoweg heeft echter nog meer milieuvoordelen. Door het gebruik van houten palen wordt eeuwigdurende opslag van CO₂ gerealiseerd. Primaire grondstoffen worden gespaard door nuttig hergebruik van baggerslib.

GeoDelft werkt samen met onder andere Van Biezen (Willem van Delft), Kantakun (Arnout Beeker) en HUESKER Synthetic GmbH aan de ontwikkeling van dit concept.

Om te demonstreren hoe een Kyotoweg wordt ontworpen en gebouwd, wordt op het opslagterrein van gebroeders de Kreij, Parallelweg Schelluinen, Giessenburg een pilot-Kyotoweg gebouwd. Dit rapport doet verslag van de ontwerpberekeningen en de plannen voor monitoring van spanningen en vervormingen tijdens en na de aanleg en belasten.

Erkenning

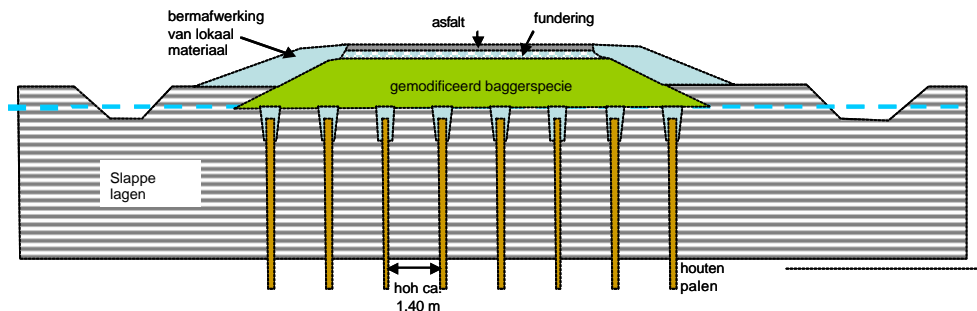
Het maken van dit ontwerp is gefinancierd door twee innovatievouchers van Senter, die door de MKB-ers Van Biezen en Kantakun bij GeoDelft zijn besteed. HUESKER Synthetic GmbH dacht mee bij het ontwerpen, dimensioneerde de wapening van het matras en zal deze wapening leveren. De monitoring tijdens en na de bouw van de pilot wordt betaald van een BSiK subsidie van Delft Cluster en een eigen bijdrage van GeoDelft. Verder hebben Kantakun, Van Biezen en de Kreij uit Giessenburg een eigen bijdrage geleverd in de vorm van uren en materieel. Bovendien zijn wij de gebroeders de Kreij (aannemer) erkentelijk voor het beschikbaar stellen van zijn terrein voor het aanleggen van een proef-Kyotoweg.

Dit onderzoek is een deel van een groter Delft Cluster onderzoek, 'innovatieve wegconstructies', nummer CT 02.10.03, en wat weer een onderdeel is van het Delft Clusterproject 'Blijvend Vlakke wegen' (CT 02.10).

2 De Kyotoweg

De 'Kyotoweg' is een milieuvriendelijke weg die bestaat uit gemodificeerd baggerslib op houten palen. Deze weg heeft tal van voordelen boven traditionele wegen op zand:

- Dit concept is bijzonder goedkoop: de kosten voor het baggerslib worden gecompenseerd door het uitsparen van stortkosten en houten palen zijn relatief goedkoop, mede door de uiterst efficiënte wijze waarmee ze worden aangebracht.
- Bossen produceren zuurstof en leggen grote hoeveelheden CO₂ vast in de vorm van hout. Sterft een boom of wordt het hout van de boom verbrand, dan komt het CO₂ weer vrij. Om te voorkomen dat dit gebeurt is het een goed idee om het in het hout vastgelegde CO₂ duurzaam op te slaan in de bodem. In onze veen- en kleigrond blijft het hout eeuwenlang in tact. Het CO₂ dat in het hout is opgeslagen komt dus niet door rot of verbranding alsnog weer in de lucht.
- Daarnaast is de productie van een houten paal milieuvriendelijker dan de productie van alternatieve palen, zoals bijvoorbeeld betonnen palen. Bij zowel de productie als het transport van betonnen palen komt meer CO₂ vrij dan bij de productie en het transport van houten palen.
- Het immobiliseren van de verontreinigingen en hergebruiken van het baggerslib.
- Minder gebruik van de primaire bouwstoffen zand en cement.
- De aanleg van de weg kan in een hoog tempo worden uitgevoerd.
- Het is een zettingsvrije en duurzame constructie, dat betekent dus dat minder wegonderhoud nodig zal zijn, en dus een geldbesparing (minder onderhoudsmaterialen en materieel), minder files en daarmee minder uitstoot van CO₂.



Figuur 2.1 De Kyotoweg

Snel en goedkoop

Een wegconstructie van gemodificeerd baggerslib op houten palen is snel aan te leggen, waardoor dus minder verkeershinder ontstaat bij de aanleg. Houten palen zijn bijzonder goedkoop voor dit soort toepassingen, mede doordat de palen licht zijn en met compact materieel zijn aan te brengen kunnen eenvoudig 200 tot 300 palen per dag (per stelling) worden aangebracht. De kosten van het aanbrengen van baggerspecie zijn ongeveer nul omdat deze even hoog zijn als de stortkosten die worden bespaard. Zowel het gebruik van houten palen als gemodificeerde baggerspecie is dus goedkoop, zeker als deze worden vergeleken met de lifecyclekosten (en file-overlast) van onderhoud aan 'traditionele' wegconstructies op zand.

Milieu/Kyoto protocollen

Houten palen

Bossen spelen een belangrijke rol in het vastleggen van CO₂: zij produceren zuurstof (O₂) en leggen door opname van water en zonne-energie grote hoeveelheden koostof © vast in de vorm van hout. Sterft een boom of wordt het hout van de boom verbrand, dan komt het CO₂ weer vrij.

Bosbouw wordt langzaam aan een handelsproduct om met de bijbehorende CO₂ reductie de protocollen van Kyoto (milieunormen) beter te halen. Aan de Kyoto-milieunormen dankt het wegconcept van baggerspecie op houten palen zijn naam.

Om te voorkomen dat de CO₂ op den (lange) duur weer vrij komt is het een goed idee om het in het hout vastgelegde CO₂ duurzaam op te slaan in de bodem. In onze veen- en kleigrond blijft het hout eeuwenlang in tact (denk aan 'veenlijken'). Het CO₂ dat in het hout is opgeslagen komt dus niet door rot of verbranding alsnog weer in de lucht.

Daarnaast is de productie van een houten paal milieuvriendelijker dan de productie van alternatieve palen, zoals bijvoorbeeld betonnen palen. Bij zowel de productie als het transport van betonnen palen komt meer CO₂ vrij dan bij houten palen.

Dat het toepassen van houten palen (met traditionele betonopzetter of poer) een zeer duurzame palenfundering is, blijkt ook uit de erkenning van Dubokeur®. Dubokeur® erkent dit funderingstype namelijk als de duurzaamste mogelijkheid voor de toepassing fundering op palen.

Dit dubokeurmerk is toegekend door het Dubo-centrum dat onder SenterNovem valt. Het Dubo-centrum verzamelt actief kennis en informatie over duurzaam bouwen, maakt dit toegankelijk en zorgt voor verspreiding onder professionals in de bouw.

De hoeveelheid koolstof die per kilometer provinciale weg als houten paal in de grond wordt vastgelegd, compenseert het passeren van zo'n 9 miljoen voertuigen. Dit wordt becijferd in het kader op blz 5.

Hergebruik gemodificeerd baggerslib

Rijkswaterstaat verwacht dat de komende 10 jaar jaarlijks ongeveer 10 miljoen kubieke meter vervuilde baggerspecie vrijkomt. Dit baggerslib wordt als afval in depots gestort, wat ruimte kost en waarvoor hoge stortkosten moeten worden betaald. Het gebruiken van baggerslib in wegconstructies dient daarmee een duidelijk maatschappelijk belang.

Het baggerslib is meestal een dunne, karnemelk-achtige substantie dat niet bruikbaar is als bouw materiaal. Het is echter mogelijk om de eigenschappen van het baggerslib zodanig te veranderen (modifieren) dat deze afvalstof toch verandert in een bruikbaar bouw materiaal.

Er bestaan diverse speciale technieken om gemodificeerd baggerslib te maken. Sommige soorten worden op het werk gemixt en in een soort bekisting gespoten, andere soorten zijn als zand verwerkbaar.

Het totale wegennet in Nederland is ruim 100.000 km lang, dus als per jaar ca. 0.1 % van het wegennet zou worden vernieuwd met een meter gemodificeerd baggerslib dan wordt al het vrijgekomen baggerslib hergebruikt.

Met gemodificeerd baggerslib is het mogelijk om een relatief dunne aardebaan op palen toe te passen. In verband met ruimtelijke inpassing kan dit gunstig zijn. Het is technisch echter heel goed mogelijk te werken met dikkere aardebanen op houten palen. De hoeveelheid gerecycled baggerslib neemt dan evenredig toe.

Geen of nauwelijks files door wegwerkzaamheden

Traditionele wegen op zand (gefundeerd op een aardebaan van zand) in gebieden met veen of klei kennen zettingsproblemen.: De wegconstructie zakt weg in de slappe bodem wat onveilige verkeerssituaties oplevert. Het wegdek moet ongeveer eens in de 2 à 3 jaar op hoogte worden gebracht en hersteld met alle (file-) hinder, kosten en CO₂ uitstoot die daarbij hoort.

Een wegconstructie op palen zakt niet. Door slijtage is het alleen nodig eens in de tien à vijftien jaar een nieuwe deklaag aan te brengen. Files door wegwerkzaamheden zullen dus decenia lang weinig voorkomen. De verwachte levensduur van de weg op palen is minimaal 100 jaar.

Gemak

Met deze constructie is het niet nodig om dikke pakketten zand aan te brengen voor voldoende stabiliteit: een relatief dunne aardebaan (orde 1 m dik) van gemodificeerd baggerslib volstaat.

Milieu en kostenvoordelen van de Kyotoweg

Tabel 2.1 geeft een aantal kentallen van de Kyotoweg waarmee we de milieu- en kostenvoordelen kunnen inschatten.

Tabel 2.1 Gegevens waarmee milieu- en kostenvoordeel worden geschat

	Polderweg	Provinciale weg
Breedte	4 meter	7.5 meter
Aardebaanhoogte	1 meter	1 meter
Aantal palen over breedte	5	8
Lengte palen	13 meter	13 meter
h.o.h. afstand tussen de palen	1.2 meter	1.2 meter
Aantal palen onder 1 km weg	4172	6674

Bossen slaan ongeveer 10 ton CO₂ per jaar per hectare op ((zie blz 36 *1) en (blz 36 *2)). Dus 40 jaars bossen hebben 400 ton CO₂ per ha opgeslagen. Eén ha 40-jaars-bos levert ongeveer 750 palen van 12 tot 18 meter lengte (zie blz 36 *3).

Tabel 2.2 Schatting milieuvoordeel door gebruik houten palen

	Polderweg	Provinciale weg
Duurzame opslag van CO ₂ in de grond	1113 ton CO ₂ /km weg	1780 ton CO ₂ /km weg
Besparing CO ₂ uitstoot doordat er minder file zal staan + onderhoud	pm	pm
Uitstoot CO ₂ van 2.000.000 km (benzine)autorijden	380 ton ⁻¹ CO ₂ komt overeen met 356 m weg	380 ton ⁻¹ CO ₂ komt overeen met 224 m weg
Aantal auto's die 1 km over de weg rijden die worden gecompenseerd door de houten palen onder die weg van 1 km	5.6 miljoen passerende auto's	9.0 miljoen passerende auto's

Tabel 2.3 Schatting milieuvoordeel door recycling baggerslib

	Polderweg	Provinciale weg
Hoeveelheid baggerslib per km weg	~5000 m ³ baggerslib	~8500 m ³ baggerslib
Stortkosten	ca. €25/m ³	
Besparing stortkosten	≅ €125.000	≅ €212.500
Hoeveel km weg kan er worden aangelegd met de totale jaarlijkse hoeveelheid baggerslib?	200 km weg [*]	110 km weg

Tabel 2.2 geeft schattingen van het milieuvoordeel van de weg van gemodificeerd baggerslib op houten palen. We zien dat de CO₂ opslag in de houten palen onder een polderweg ruim 5 miljoen auto's over een weg compenseert. Bij een provinciale weg kunnen zelfs rond de 9 miljoen auto's de weg passeren waarvan de CO₂ uitstoot volledig wordt gecompenseerd.

Tabel 2.3 geeft een schatting van de besparing die het gebruik van baggerslib oplevert.

3 Beschikbare gegevens en uitgangspunten

3.1 Beschikbare gegevens

3.1.1 Locale omstandigheden

Grond

Voor de proef is een sondering uitgevoerd ter plaatse van de locatie van de toekomstige Kyotowegpilot (zie bijlage 5).

De hoogte van het maaiveld ter plaatse van de sondering bedraagt NAP – 0,65 m. De eigenaar van de locatie vertelde dat er grote kans is op puin in de bovenste laag.

Uit de sondering (bijlage 5) blijkt de volgende bodemopbouw.

Ligging	tov NAP	Tov MV
maaiveld	NAP – 0,65 m	0
Lagen slappe grond, afwisselend veen en klei	NAP – 0,65 m tot NAP – 9,75 m	MV 0,00 m tot MV – 9,10 m
Pleistoceen zand	NAP – 9,75 m en dieper	MV – 9,10 m en dieper

Tabel 3.1 Bodemopbouw

Daarnaast zijn een aantal sonderingen beschikbaar die in de nabijheid zijn gemaakt, op de plaats waar een gebouwtje zal worden gebouwd. Deze plek ligt ruim 100 meter verderop, op het terrein van de eigenaar, de gebroeders de Kreij. Het maaiveld op deze locatie ligt ca. 0.55 m hoger dan die waar de Kyotowegpilot moet komen. De sonderingen die op deze iets hogere locatie zijn gemaakt, op ruim 100 m afstand van de pilotlocatie, laten hetzelfde beeld zien: eerste ongeveer 9 – 9.5 m slappe lagen, daarna het Pleistocene zand.

Grondwaterstand

Van de grondwaterstand zijn gegevens beschikbaar die eerder zijn verzameld in het kader van de aanleg van de Betuweroute. De Betuweroute loopt vlak langs de toekomstige locatie van de Kyotoweg.

De volgende metingen zijn beschikbaar:

	Afstand tot pilot (tot sondering)	Grondwaterstand tov NAP	Grondwaterstand tov maaiveld (MV)
Gemeten in boorlocatie B01 op 23 mei 2005 (zie bijlage 5)	115 m	NAP – 1,20 m	MV – 0,55 m
Hoogste grondwaterstand gemeten over een periode van jaren, voor Betuweroute (bijlage 6), (heel uitzonderlijke extremen weggelaten)	ca. 150 m	NAP – 1,41 m	MV – 0,76 m
Laagste grondwaterstand gemeten voor Betuweroute (bijlage 6), gemeten over een periode van jaren (heel uitzonderlijke extremen weggelaten)	Ca. 150 m	1.65 - NAP	1.00 – MV

Tabel 3.2 Grondwaterstand

Comment: Welke conclusies of aannamen volgen hier uit?

3.1.2 De houten palen

Gegevens die werden aangeleverd door de paalleverancier:

Rekenwaarde druksterkte hout lange duur belasting			10,90 * 10 ⁶			kN/m ²
Rekenwaarde druksterkte hout middellange duur belasting			11,80 * 10 ⁶			kN/m ²
Diameter verloop van de houten paal over de lengte			7,5			mm/m
punt diameter						
	90	100	110	120	130	mm
Maximale draagkracht houten paal lange duur belasting	69	83	102	119	140	kN
Kopdiameter van de paal bij 10 meter lengte (bij een houten paal is de kop dikker dan de punt. Een paal wordt meestal 'ondersteboven' geplaatst, dat wil zeggen, de onderzijde van de boom is de bovenzijde van de paal)	165	175	185	195	205	mm
Prijzen houten paal bij 10 m lengte geleverd op het werk	14,30	14,90	17,10	19,25	25,85	€
standaardbouwhout: E-modulus	11.000 N/mm ² x 80 % = 8800 N/mm ²					
Constructiehout: E-modulus	12.000 N/mm ² x 80 % = 9600 N/mm ²					

Comment: Wat is lange duur en wat middellang?

Tabel 3.3 Eigenschappen houten palen

Het oppervlak verloopt over de diepte. De stijfheid van de paal wordt bepaald door de lokale stijfheid over de lengte van de paal te integreren.

3.1.3 De gemodificeerd baggerspecie

Er is voor gekozen om met het zogenaamde Hegemann materiaal te werken. Dit Hegemann materiaal is van Duits fabrikaat en bestaat uit een mengsel van zanderig slib, 5% kleipoeder en 2% hydraulisch bindmiddel.

De in het baggerslib aanwezige schadelijke stoffen (zware metalen en organica) zijn in het Hegemann materiaal door toevoeging van mineralen in een langdurige stabiele toestand gebracht.

Het materiaal is zowel in Duitsland als in Oost Nederland (A 53) toegepast in wegconstructies. Bij al deze gevallen is het Hegemann materiaal ruim (minimaal 1 m) boven de grondwaterspiegel toegepast. Het materiaal wordt in lagen (van bijvoorbeeld 40 cm) als grond aangebracht en vervolgens verdicht.

Bij voldoende verdichting (> 90% proctordichtheid) is het droge materiaal vrij stenig.

In de Kyotowegpilot zal het materiaal eerst goed verdicht worden aangebracht en daarna zal het onderste gedeelte van de aardebaan verzadigd raken omdat dit (ieder jaar een deel van de tijd) onder de grondwaterspiegel ligt. Het materiaal verliest dan een stuk van zijn binding en wordt papierig. Om te onderzoeken hoe dit verzadigde (maar goed verdichte) Hegemann-materiaal zich gedraagt, heeft afstudeerder Alfred van der Horst een aantal triaxiaalproeven uitgevoerd op monsters die hij eerst goed (zowel 100 % proctordichtheid als 90 % proctordichtheid) heeft verdicht en daarna, in het triaxiaalapparaat heeft laten verzadigen. De resultaten van zijn triaxiaalproeven staan in bijlage 3 en zijn samengevat in onderstaande tabel.

	proctor dichtheid 100%. Uit triaxiaal-proeven op monsters die eerst zijn verdicht en vervolgens zijn verzadigd.	proctor dichtheid 90%. Uit triaxiaal -proeven op monsters die eerst zijn verdicht en vervolgens zijn verzadigd.	Volgens fabrikant (droog materiaal)	Rekenwaarden voor ontwerp (veilige benadering).
Inwendige wrijvingshoek	42,6°		32,5°	32,5°
Cohesie	9,8 kPa		15 kPa	4 kPa
Cu bepaald met Vrije Prisma- proeven				
Young's modulus E		9140 kN/m ²	10 MN	-
Volumieke gewicht	1,8 gr/cm ³ = 17,7 kN/m ³	15,9 kN/m ³	18,1 kN/m ³	15,9 kN/m ³
pH				

Tabel 3.4 Eigenschappen Hegemann materiaal

In dit ontwerp wordt gewerkt met een 'veilige benadering'. Het verzadigde materiaal onderaan in de aardebaan zal minder stijf en sterk zijn dan het droge materiaal bovenaan in de aardebaan.

Veiligheidshalve wordt voor de hele aardebaan echter gerekend met het natte, slappere materiaal. We hebben gerekend met de minimale sterkte zoals die uit de triaxiaalproeven kwam.

We leiden de helling van het talud af van de gevonden hoek van inwendige wrijving.

$\tan \phi / f_{ms}$. Volgens de Britse norm is $f_{ms} = 1.0$. Volgens de Nederlandse norm NEN 6740, blz 27 is 1.2 (voor 'andere constructies'). We gaan iets aan de veilige kant zitten en kiezen een talud van 1:2.

Invloed van dynamische belastingen op sterkte en stijfheid van het baggerspeciematrasmateriaal

Twee vragen zijn van belang:

1. Zijn de sterkte en de stijfheid afhankelijk van de snelheid van belastingen
2. Hebben een groot aantal belastingscycli invloed op de sterkte en stijfheid van het materiaal? (Maw: wordt de sterkte en stijfheid beïnvloed doordat er bijvoorbeeld 10.000 keer een vrachtauto over de baggerspeciematras heen rijdt?)

De eerste vraag wordt beantwoord door gewone triaxiaalproeven met verschillende snelheden uit te voeren.

Om de tweede vraag te beantwoorden is gekozen om een ongedraineerde cyclische triaxiaalproef uit te voeren op een verzadigd monster (de baggerspeciematras zal onderin verzadigd zijn).

De opgelegde frequentie in de proef is 0.5 Hz (dat simuleert een vrachtwagen met een as-afstand van 4 meter lengte die 2 m/sec (ofwel 7.2 km/uur rijdt). Bij GeoDelft is dit de maximale belastingsfrequentie die gehaald kan worden.

Er wordt gerekend in een punt dat op de hoogst denkbare freatische lijn ligt. Dit punt wordt immers geregeld verzadigd en vertoont daarmee het minst sterke en stijve gedrag. Het is het hoogste punt dat geregeld wordt verzadigd (capilaire stijging wordt even verwaarloosd).

De hoogste freatische lijn ligt op -0.76 m tov maaiveld. Het wegdek ligt op 0.50 m + maaiveld.

De proef is uitgevoerd met een celdruk die gelijk is aan de gronddruk die heerst op die diepte als verkeersbelasting niet in rekening wordt gebracht. Dat is:

$$\begin{aligned}\phi_v = \phi_v' &= 0.15 m^* \gamma_{\text{asfalt}} + 0.20 m^* \gamma_{\text{fundering}} + 0.91 m^* \gamma_{\text{Hegemann}} \\ &= 0.15 * 22.56 + 0.20 * 17.66 + 0.91 * 1.71 = 22.5 \text{ kPa.}\end{aligned}$$

Als variabele belasting worden de aslasten in rekening gebracht. Voor de drie verkeersklassen van VOSB 1995 betekent dit op deze diepte een wisselbelasting van resp 10, 16 en 21 kPa. De zwaarste verkeersklasse zal niet frequent optreden en die belasting wordt dus niet opgelegd bij de dynamische triaxiaalproef.

De volgende simulatie is bij een celdruk van 20 kPa achtereenvolgens uitgevoerd:

- 3000 keer een belasting van 6 kPa op te leggen,
- en daarna, na een drainagefase, 3000 keer een belasting van 12 kPa
- en tenslotte, weer na een drainagefase, 3000 keer een belasting van 18 kPa.

De resultaten van deze proeven staan in bijlage 4.

3.1.4 De wapening

Het matras van gemodificeerd baggerslib zal gewapend worden met een geotextiel. Deze wapening is ontworpen aan de hand van diverse analytische rekentechnieken. Bij dit onderdeel van het ontwerp heeft Huesker (Duitsland) gerekend volgens de 'oude Duitse school' en de 'nieuwe Duitse school'.

3.2 Belastingen

Belastingen van het Hegemannmateriaal zelf

Het eigen gewicht van het Hegemannmatras wordt in rekening gebracht (Tabel 3.4).

Verwaarloosd worden: hygrometrische krimp tijdens de eerste uren na het storten, de belasting van het verhardende Hegemannmateriaal (thermische en hygrometrische krimp), eventuele uitzetting en eventuele temperatuursveranderingen.

Verkeer

Er is gerekend met een verticale verkeersbelasting van 25 kPa. Bijlage 1 beschrijft waarom er met deze waarden wordt gerekend. Het is niet nodig te rekenen met een horizontale verkeersbelasting.

3.3 Uitgangspunten voor de pilot

Deze paragraaf geeft de uitgangspunten die zijn gehanteerd bij het ontwerpen van de Kyotowegpilot.

Onderwerp	Uitgangspunt	Bron
Wegdekoppervlak	6 * 10 m ² .	Locatie-eigenaar
Grondwaterstand: laagste peil	MV - 1,00 m	Gegevens palenleverancier
Grondwaterstand: hoogste peil	MV - 0,76 meter	Gegevens Betuweroute. Er is onduidelijkheid over het niveau van MV tov NAP, daarom is een veilige bovengrens aangenomen.
Type palen	Hout, Europees naaldhout	Palenleverancier
Positie bovenkant houten palen	Minimaal 40 cm onder het laagste grondwaterpeil	
Bovenzijde wegdek	Ongeveer gelijk met de bovenzijde van de Parallelweg. Dit houdt in dat het wegdek ca. 50 cm. boven het huidige MV komt te liggen.	In overleg met locatie-eigenaar

Onderwerp	Uitgangspunt	Bron
Drooglegging	Minimaal 25 cm boven hoogste grondwaterpeil, dit zal automatisch worden bereikt doordat het wegdek ca 50 cm boven MV komt (zie hierboven).	Gegevens en ervaring GeoDelft
Vorst:	...	Hoofdstuk 6 ('Bijzondere aspecten') van CROW-publicatie 189 'Keuzemodel wegconstructies'
Verkeersbelasting (vertikaal)	25 k N/m ² (zwaar verkeer)	Zie bijlage 1, op basis van VOSB 1995 en persoonlijke ervaring Brok (2005)
Verkeersbelasting (horizontaal)	geen	Sander Eijgenraam (Holland Railconsult)
Vierkant palenstramien		Voorstel van palenleverancier: een vierkant palenstramien is goedkoper te heien dan een driehoekstramien
Stijghoogte in watervoerende Pleistocene zandlaag	Maximaal: +1.70 NAP	Informatie Betuweroute
Maximaal toegelaten rek in wapening	Volgens BS 8006 (de Britse norm): maximaal 6%, maar aangehouden is 3 à 4% om dat er anders te grote vervormingen aan het wegdek kunnen optreden	
Volumiek gewicht asfalt	22.56 kN/m ³	VOSB 1995, blz 89 (in kg/m ³ *9.81/1000 = in kN/m ³)
Dikte asfaltlaag	0.15 m	Praktijk
Volumiek gewicht funderingslaag (hydraulisch menggranulaat)	17.66 kN/m ³	Soortelijk gewicht van droog grind volgens VOSB 1995, blz 89 (in kg/m ³ *9.81/1000 = in kN/m ³)
Dikte funderingslaag	0.20 m	Praktijk
Taludhelling Hegemann materiaal	32.5° ofwel ca. 1:2	Zie hoofdstuk 3.1.3.

Comment: Dit is erg licht m.i. Menggranulaat heeft een sg > 20.

Tabel 3.5 Uitgangspunten

Het baggerspeciematrasmateriaal zal een geringe treksterkte hebben. Om een robuust ontwerp te maken is er daarom vanuit gegaan dat de baggerspeciematras wordt gewapend met een geotextiel. Dit geotextiel wordt onderin de aardebaan aangebracht, juist boven de poeren.

4 Ontwerpberekeningen

4.1 Inleiding

Bij het ontwerp zijn beschouwd:

- de draagkracht van de palen, zowel geotechnisch als constructief
- de dimensionering van de belastingspreidende laag (ook wel genoemd: de aardebaan, het matras, of de baan van baggerslib)
- de eindzetting van de ophoging, dat wil zeggen de verwachte zetting van de paalfundering, zowel geotechnisch als constructief
- de stabiliteit van het talud.

Het matras en de palen moeten voor zowel de constructiefase als de gebruiksfase worden doorgerekend.

De zetting van matras en palen treedt vrijwel direct na het aanbrengen van de belasting op. De restzetting bij dit soort aardebanen op palen is verwaarloosbaar.

Volgens de Britse Norm BS 8006 (en gebaseerd op deze, volgende CUR 2002-7) moeten zowel partiële belastingsfactoren (op het gewicht van het ophoogmateriaal, verkeersbelasting en statische bovenbelasting) als materiaalfactoren (op de sterkte van de wapening en de palen) worden gehanteerd, zie onderstaande tabel:

Partiële factoren		Uiterste grenstoestand (ofwel: constructiefase)	Bruikbaarheidsgrenstoestand (ofwel: gebruiksfase)	NEN
Belastingsfactoren	Volumiek gewicht van de grond (ophoging)	$f_{is} = 1.3$	$f_{is} = 1.0$	NEN 6702
	Statische bovenbelasting	$f_i = 1.2$	$f_i = 1.0$	
	Dynamische bovenbelasting (verkeersbelasting)	$f_q = 1.3$	$f_q = 1.0$	
Materiaalfactoren (grond)	Toepassen op $\tan \phi'_{cv}$	$f_{ms} = 1.0$	$f_{ms} = 1.0$	NEN 6740
	Toepassen op c'	$f_{ms} = 1.6$	$f_{ms} = 1.0$	
	Toepassen op c_u	$f_{ms} = 1.0$	$f_{ms} = 1.0$	
Materiaalfactoren (wapening)	Toepassen op wapening basis sterkte	f_m Afhankelijk van wapeningstype en vereiste levensduur.		
Gond/wapening interactie factoren	Glijden langs oppervlak van wapening	$f_s = 1.3$	$f_s = 1.0$	
	Pull-out weerstand van wapening	$f_p = 1.3$	$f_p = 1.0$	

Tabel 4.1 Samenvatting van partiële factoren die volgens de Britse norm BS 8006 moeten worden gebruikt bij aardebanen op palen (tabel 27, blz 98 van de BS 8006). De rechterkolom noemt de NEN normen die hiermee zoveel mogelijk overeenkomen, maar die niet speciaal voor aardebanen op palen zijn bedoeld.

Voor de volledigheid leggen we hiernaast wat de NEN normen over deze factoren zeggen. We gebruiken deze NEN-factoren echter niet, omdat ze niet speciaal bedoeld zijn voor aardebanen op palen, maar voor funderingen van gebouwen.

		Grenstoestand 1	bruikbaarheid
Belastingsfactoren	Permanente belasting	$\gamma_{fg} = 1,2$ (ongunstig) $\gamma_{fd} = 0,9$ (gunstig)	$\gamma_{fg} = 1,0$
	Dynamische (veranderlijke) belasting (verkeersbelasting)	$\gamma_{fq} = 1,5$	$\gamma_{fq} = 1,0$
	Bijzondere belasting	$\gamma_{fa} = 1,0$	$\gamma_{fa} = 1,0$

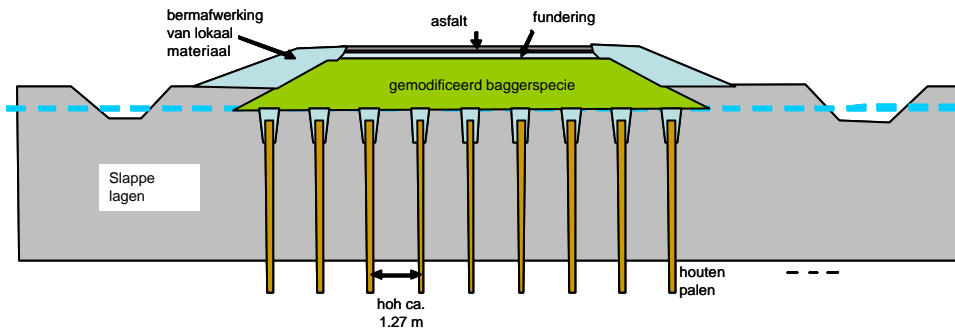
Tabel 4.2 Partiële factoren volgens de NEN 6702

Het geotechnisch ontwerp resulteert in een advies omtrent:

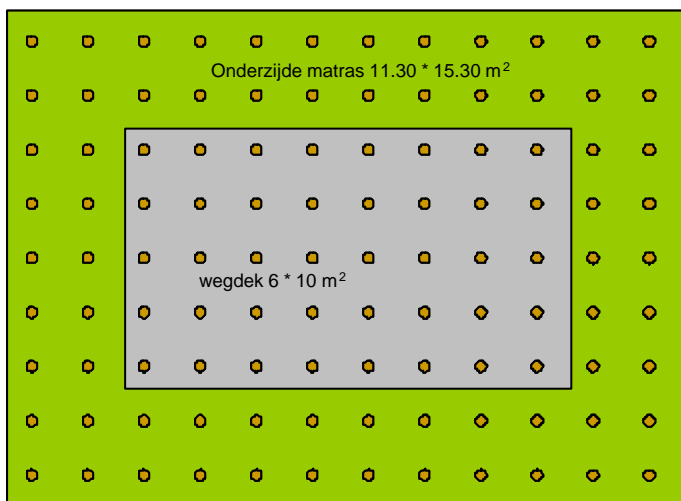
- paalttype, afmetingen, paalpuntniveau en draagkracht
- afwerking paalkop, ofwel de poer
- de opbouw en de materiaaleigenschappen van het gewapende baggermatras
- geotechnische risicoanalyse, monitorings- en maatregelenplan tijdens de uitvoering en gebruiksfase conform paragraaf 11.2.8 van de Handleiding wegebouw en ontwerp onderbouw

4.2 Globaal ontwerp

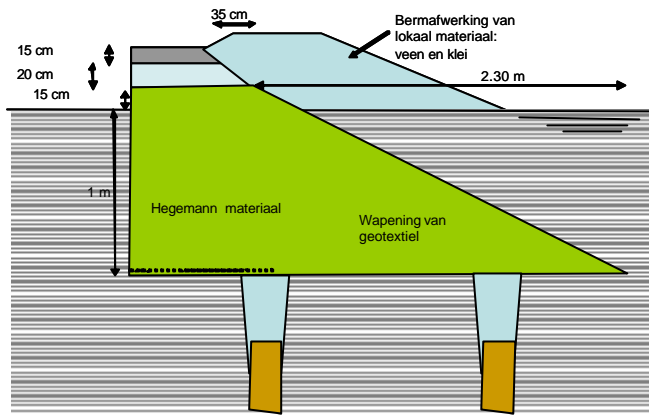
Onderstaande figuren geven een globaal ontwerp. Hoofdstuk 4.4.5 geeft een definitief ontwerp van de Kyotoweg.



Figuur 4.1 Dwarsdoorsnede pilot Kyotoweg



Figuur 4.2 Bovenaanzicht pilot Kyotoweg



Figuur 4.3 Detail dwarsdoorsnede pilot Kyotoweg

4.3 De palen

De palen worden berekend op de uiterste gebruikstoestand.

4.3.1 De constructieve draagkracht van de palen

Tabel 4.3 geeft een overzicht van de mogelijke paalgeometrieën.

aantal palen in de breedte	hoh afstand palen (m)	aantal palen in de lengte	hoh afstand palen (m)
4	2,83	6	2,55
5	2,26	7	2,19
6	1,88	8	1,91
7	1,61	9	1,70
8	1,41	10	1,53
9	1,26	11	1,39
10	1,13	12	1,28
		13	1,18
		14	1,09
		15	1,02

Tabel 4.3 hart op hart (hoh) afstand tussen palen bij aantallen palen in lengte of breedte pilot

De totale belasting op de palen is als volgt berekend:

	Belasting (kPa)	Partiële factoren volgens BS 8006	In rekening te brengen belasting (kPa)
verkeersbelasting =	25,0	$f_t = 1.3$	32,5
bovenbouw (10 cm asfalt + 15 cm fundering) =	6,9	$f_{ts} = 1.3$	9,0
aardebaan (1.15 m Hegemann 15.9 kN/m ³) =	18,3	$f_{ts} = 1.3$	23,8
totaal	50,2		65,3

Tabel 4.4 belastingen op palen (gebruikstoestand)

De palen zullen in een vierkantpatroon worden aangebracht omdat de palenleverancier aangeeft dat dit de meest economische manier van werken levert.

Het wegdek moet 6 m breedte en 10 m lengte krijgen. Voor asfalt en fundering wordt een talud aangehouden van 45° en voor het Hegemann materiaal wordt de minimaal aanwezige inwendige wrijvingshoek aangenomen als taludhelling. Hieruit volgt dat de onderzijde van de Hegemann-aardebaan een oppervlak heeft van 11,30 * 15,30 m².

Het volgende is berekend en afgeleid:

paalpunt- diameter (mm)	prijs bij 10 m lengte per paal (€)	max draagkrach t paal langeduur belasting (kN)	totale opp dat op paal mag rusten (m ²)	Maxi- male hoh afstand (m)	aantal palen in breedt e	hoh afstand in breedte- richting (m)	aantal palen in lengte	hoh afstand lengte in richting (m)	totaal aantal palen	prijs bij 10 m lange palen (€)
90	14,3	69	1,06	1,03	11	1,03	15	1,02	165	2360
100	14,9	83	1,27	1,13	10	1,13	14	1,09	140	2086
110	17,1	102	1,56	1,25	10	1,13	13	1,18	130	2223
120	19,25	119	1,82	1,35	9	1,26	12	1,28	108	2079
130	25,85	140	2,15	1,46	8	1,41	11	1,39	88	2275

Tabel 4.5 Economisch ontwerp palenplan

Hier volgt uit dat het meest economische ontwerp is: $9 * 12 = 108$ palen, 120 punts palen (dwz paalpuntdiameter = 120 mm). Hoh afstand is 1.26 m in de lengterichting en 1.28 m in de breedterichting. Ofwel de gemiddelde hoh afstand wordt 1.27 m.

Bij deze berekening is aangenomen dat de afstand van een buitenste paal tot de teen van het talud gelijk is aan $\frac{1}{2} * \text{hoh afstand}$.

4.3.2 De geotechnische draagkracht van de palen

Voor de verticale draagkracht van de palen zijn berekeningen uitgevoerd met MFoundation, op basis van de sondering die is uitgevoerd op de pilotlocatie (zie bijlage 5) en de belastingen volgens Tabel 4.4. Deze berekeningen geven de diepte tot waarop de palen moeten worden geheid. De berekeningen geven het geotechnisch puntdraagvermogen, paalgroepswerking en de negatieve kleeft.

De palen hoeven geen horizontale verkeersbelasting op te nemen. Maar er kan wel een horizontale belasting op de randpalen ontstaan door taludinstabiliteit. Paragraaf 4.4.3 berekent dat de trekkracht in de wapening ten gevolge van dit mechanisme gelijk is 25,7 kN/m. We houden aan dat deze kracht ook op de palen werkt (met een h.o.h. afstand van 1,27 m levert dit een horizontale kracht op randpalen van $1,27 \cdot 25,7 = 32,6$ kN.

Dit zal een conservatieve benadering zijn, omdat de wapening een deel van deze kracht op zal nemen. Bij de pilot worden daarom metingen verricht aan de horizontale verplaatsingen van de randpalen met het doel een beeld te vormen van de horizontale belasting van deze palen.

Het is de bedoeling om zonder schoorpalen te werken. De horizontale belasting moet via de poeren en de palen worden afgedragen naar de omliggende grond. Met MPile werd berekend of dit mogelijk is. MPile geeft de horizontale verplaatsingen van de palen en de maximale spanningen in die palen ten gevolge van de horizontale belasting.

4.3.3 Conclusies ontwerp palen

Er wordt gewerkt met met 9 * 12 120 punts palen. De palen staan op een h.o.h. afstand van 1,27 meter. Op de palen worden betonnen poeren gestort, met een bovendiameter van 30 cm. De palen moeten worden geheid tot NAP – 13 m (MV -12,35 m, dus ongeveer 3,35 m in het Pleistoceen).

4.4 Het matras

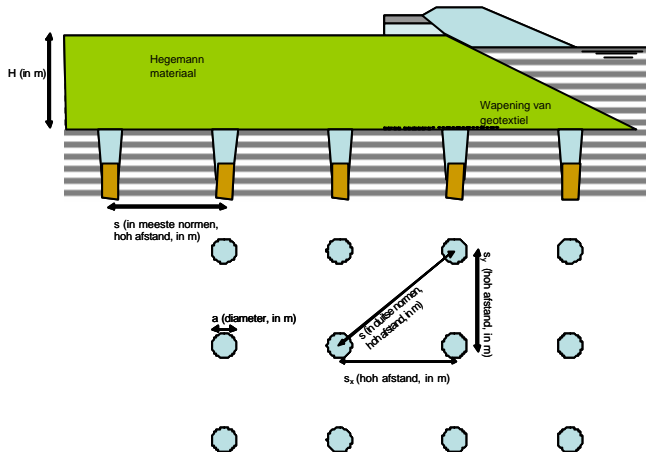
4.4.1 Ontwerp volgens verschillende theorieën aardebaan op palen

Er zijn meerdere werkwijzen voorhanden om de aardebaan te ontwerpen in een aardebaan-op-palen constructie. Alleen Groot-Brittannië heeft officieel vastgestelde ontwerpnormen, maar die worden bekritiseerd. Deze kritiek gaat met name om het uitrekenen van de trekkracht in de wapening (het geotextiel) als gevolg van de verticale belasting (inconsistent) en ten gevolge van horizontale belasting die ontstaat door de taludinstabiliteit (conservatief).

Duitsland (de groep van prof. Kempfert van de universiteit van Kessel, e.a.) is een stuk verder met het ontwikkelen van theorie. Dit heeft nog niet geleid tot een Duitse norm. Wel tot een aantal afspraken (de 'nieuwe Duitse school', beschreven in Entwurf der Empfehlung "Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern", juli 2004). Gegeven de complexiteit van deze Duitse afspraken, worden deze nieuwere Duitse theorieën niet meegenomen in de berekeningen in dit hoofdstuk. In dit ontwerp betrekken we wel de rekenmethode van Hewlet en Randolph et al, uit 1988 (de 'oude' Duitse school), waar nog altijd vaak naar wordt gerefereerd.

Huesker (geotextielenfabrikant in Duitsland) is bereid gevonden om ons samenwerkings-verband te versterken door mee te rekenen en mee te denken met dit ontwerp. Zij hebben de constructie volgens de 'nieuwe' en volgens de 'oude' Duitse school berekend.

Dit hoofdstuk presenteert de resultaten van berekeningen met diverse analytische modellen (grotweg: de 'Skandinavische school' (Svanø, Rogbeck en Carlsson)', GeoDelft (Van Eekelen, 2003) maakte een verbetering op het eenvoudige model van Rogbeck (extended Rogbeck), de 'oude Duitse school' (Hewlet, Randolph et al.) en de 'Britse school' (BS 8006). De methoden worden toegelicht in bijlage 2.



Figuur 4.4 Verklaring symbolen a, s en H

4.4.2 De dikte van de aardebaan

We beschouwen twee aspecten van de aardebaandikte:

- De 'minimale dikte' benodigd om 'doorponzen' te voorkomen.
- De dikte die nodig is om volledige boogwerking te laten optreden. Bij volledige boogwerking zal *alle* bovenbelasting worden afgedragen naar de palen. Bij niet-volledige boogwerking kan een constructie nog altijd voldoen. Alleen dan wordt een gedeelte van de bovenbelasting opgevangen door de wapening. Deze wapening moet dit deel van de bovenbelasting doorgeven aan de palen. De trekkrachten in de wapening kunnen hiervan een stuk groter worden.

De minimale dikte van de aardebaan in verband met doorponzen

Volgens de Britse Norm BS 8006 voor granulaatmatrassen moet de aardebaandikte H minimaal gelijk zijn aan $0,7 (s-a)$. CUR rapport 2002-7 geeft zelfs de voorkeur aan een dikte van minimaal $1,0 (s-a)$. Hierbij wordt uitgegaan van een grofkorrelig materiaal van goede kwaliteit met $\phi' = 35^\circ$. De Nederlandse Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Onderbouw (2004) geeft geen suggesties voor een minimale aardebaandikte in verband met 'doorponzen'. Wel suggereert deze handleiding op blz 214 een minimale dikte van de aardebaan om

- een volledige boogwerking mogelijk te maken in een aardebaan zonder wapening (3 à 4 keer de paalafstand)
- een volledige boogwerking mogelijk te maken in een aardebaan met meerdere lagen wapening met daartussen grofkorrelig aanvulmateriaal (1 à 1.5 keer de paalafstand)
Hierbij wordt het niet duidelijk wat onder de 'paalafstand' wordt verstaan. Bovendien beschouwen wij een systeem waarbij het matras wordt gewapend met één laag wapening onderin het matras.

In paragraaf 4.3.1 hebben we ervoor gekozen om de palen hoh 1.27 meter te plaatsen. De poerbovenzijde is rond $\varnothing = 0.30$ m, wat voor een vierkante paaldeksel een equivalente maat heeft van $a \cdot a = 0.27 \cdot 0.27$ m². Dit geeft een $s-a = 1.00$ m.

De totale Hegemannmatras heeft volgens het huidige ontwerp een dikte van 1.15 meter. Dat geeft een $H/(s-a) = 1.15/1.00 = 1.15$. Volgens de regels voor de minimum aardebaandikte is de aardebaan dus, volgens zowel de Britse als de Nederlandse normen, voldoende dik. Hierbij gaan we ervan uit dat de aardebaan is gemaakt van zand of een grofkorrelig materiaal met wapening.

s	Ontwerp	hoh afstand (m)	1.27 m
a	Ontwerp	equivalente lengte zijde vierkante paaldeksel (m)	0.27 m
s-a	Ontwerp	s-a	1.00 m
H	Vereiste minimale dikte aardebaan volgens Britse norm BS 8006 (1995/1999)	$0.7(s-a)$	0.70 m
H	Vereiste minimale dikte aardebaan volgens CUR rapport 2002-7 (2002)	$1.0(s-a)$	1.00 m
H	Nederlandse Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Onderbouw (oktober 2004)	Niet van toepassing, omdat we werken met één laag wapening en omdat geen suggesties worden gegeven ivm 'doorponzen'	

Tabel 4.6 Diverse normen over minimale aardebaandikte ivm 'doorponzen'

Wij hebben echter geen grofkorrelig materiaal maar gemodificeerd baggerspeci (het Hegemannmateriaal). In natte vorm heeft dat materiaal een ϕ' van 32.5° à 45° . Dat verschilt niet zoveel van de 35° die wordt vereist voor de Britse norm.

Onze aardebaandikte voldoet aan de Britse norm, en ook aan de eis van het CUR rapport 2002-7. De Nederlandse Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Onderbouw stelt geen eisen aan constructies van het soort dat wij bouwen (één laag wapening).

Aardebaan wel of niet dik genoeg voor het ontwikkelen van volledige boogwerking?

We hebben gekeken naar hoe dik de aardebaan dient te zijn om volgens de diverse rekenmodellen (bijlage 2) volledige boogwerking te laten ontwikkelen. Het is niet noodzakelijk om deze aardebaandikte ook daadwerkelijk te hebben. Maar als een boogwerking niet volledig kan ontwikkelen, dan zal een deel van de bovenbelasting (verkeersbelasting) rechtstreeks op de wapening werken.

Hoh afstand palen (m)	1.09	1.18	1.26	1.40	1.53	1,61
Svanø	1,40	1,55	1,69	1,93	2,15	2,29
(ext.) Rogbeck	1,54	1,71	1,86	2,12	2,36	2,51
Carlsson	1,54	1,71	1,86	2,12	2,36	2,51
BS 8006	1,15	1,28	1,39	1,59	1,77	1,88
McKelvey	2,47	2,74	2,98	3,40	3,79	4,03

Tabel 4.7 Minimale dikte aardebaan (m) om volledige boogwerking te garanderen. Bij onvolledige boogwerking werkt een deel van de bovenbelasting rechtstreeks op de wapening in plaats van rechtstreeks op de palen.

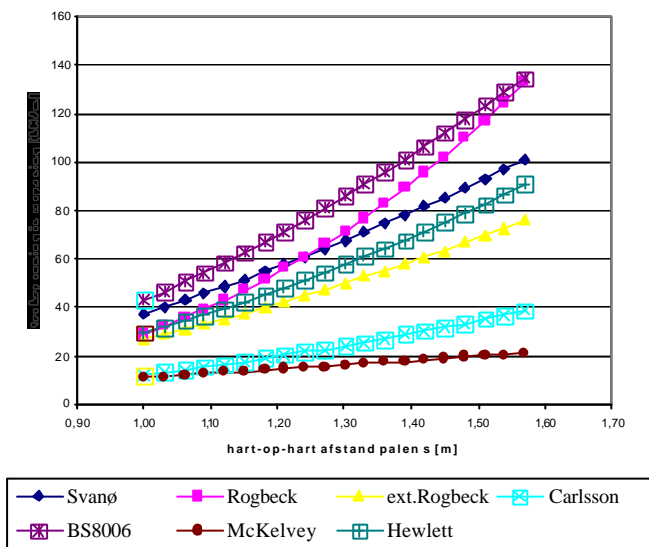
Als we de dikte van de fundering en asfaltlaag meerekenen, dan hebben we een aardebaandikte van maximaal 1,50 m. Volgens de meeste methoden betekent dit dat we zullen moeten werken met een onvolledig ontwikkelde boogwerking. Daar moet in de ontwerpberekeningen van de wapening mee rekening worden gehouden. Carlsson en Rogbeck zijn niet bedoeld voor situaties met onvolledige boogwerking. Extended Rogbeck en de andere rekenmodellen wel.

4.4.3 Ontwerp wapening gebruiksfase

Deze berekening moet zowel worden uitgevoerd voor de gebruiksfase (in deze paragraaf) als voor de constructiefase (in de volgende paragraaf).

Trekkraft in de lengterichting van de weg

We berekenen eerst de trekkraft in de wapening ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (zie onderstaande figuur). Deze trekkraft T_{rp} is in de lengterichting van de weg maatgevend voor de vereiste sterkte (BS 8006, artikel 8.3.3.3.)



Figuur 4.5 Trekkraft in de wapening gedurende de gebruiksfase ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (bijeen vooraf aangenomen maximale rek van 3%)

Toegestane rek in geotextiel	9*12 palen, hoh afstand palen = 1.27 m trekkraft in de wapening T_{rp} (kN/m) in langsrichting weg						
	Svanø	Rogbeck	ext. Rogbeck	Carlsson	BS 8006	Mc Kelvey	Hewlett & Randolph et al *)
2 %	171	66	92	23	144	42	267
3 %	140	55	77	19	120	35	218
4 %	121	49	68	17	107	30	189
5 %	108	45	62	16	98	28	169
6 %	99	42	58	15	91	26	154

Tabel 4.8 Trekkraft in de wapening T_{rp} (kN/m) in **langs**richting van de weg, gedurende de gebruiksfase, ten gevolge van de verticale belasting die rechtstreeks op de wapening werkt.

*) 'Oude Duitse school'

Als we uitgaan van een rek van 3%, dan moet worden uitgerekend een trekkraft die varieert tussen de 35 en de 218 kN/m.

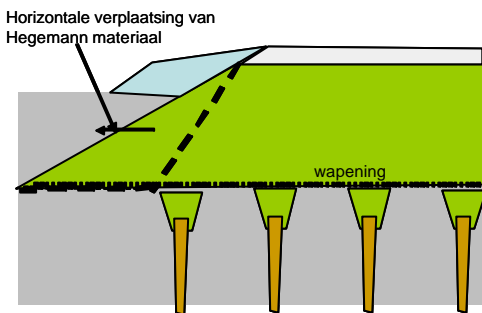
Om deze trekkracht T_{rp} (kN/m) op te kunnen vangen, moet de wapening in de langsrichting van de weg een treksterkte hebben van $f_w * T_{rp}$. De waarde voor f_w moet worden gegeven door de fabrikant van het betrokken materiaal.

Deze berekende waarden zullen later worden vergeleken met de metingen die tijdens de pilot worden gedaan. Bij het ontwerp van de pilot wordt uitgegaan van berekeningen volgens de 'nieuwe Duitse school', die worden uitgevoerd door Huesker.

In de dwarsrichting moet de treksterkte nog 25.7 kN/m groter zijn doordat er een extra treksterkte moet worden bijgeteld ivm stabiliteit van het talud (zie de volgende paragraaf).

Trekkracht dwars op de weg

Vervolgens berekenen we de maximale trekkracht in de wapening tgv horizontale instabiliteit (lateral sliding). Dit zou kunnen worden berekend met MStab, maar hier volgen we de Britse norm BS 8006 voor het berekenen van deze trekkracht T_{ds} . In de richting loodrecht op de weg moet worden gerekend met de maximale trekkracht $T_{rp} + T_{ds}$.



Figuur 4.6 Horizontale schuif geeft trekkracht T_{ds} in wapening loodrecht op de weg

Volgens BS 8006, artikel 8.3.3.7 moeten we deze trekspanning als volgt uitrekenen:

$$T_{ds} = 0.5 * K_a (f_{is} \gamma H + 2f_q p) H$$

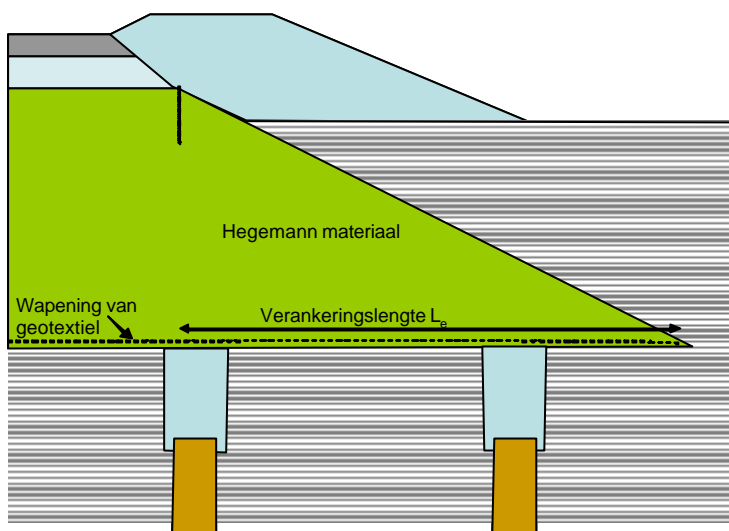
K_a	Actieve gronddruk coëfficiënt = $\tan^2 (45^\circ - \phi_c/2)$, met $\phi_c = 32.5^\circ$ geeft dit een $K_a = 0.3$
f_{is}	Is de partiele belastingsfactor voor volumiek gewicht grond (= 1.3)
f_q	Is de partiele belastingsfactor voor de bovenbelasting (= 1.3)
p	bovenbelasting

$$\text{Dus } T_{ds} = 0.5 * K_a (f_{is} \gamma H + 2f_q p) H =$$

$$= 0.5 * 0.3 * (1.3 * 15.9 * 1.5 + 2 * 1.3 * 25) * 1.5 = 25.7 \text{ kN/m}$$

Om deze trekkracht T_{rp} (kN/m) op te kunnen vangen, moet de wapening in de dwarsrichting van de weg een treksterkte hebben van $f_m * T_{rp}$. De waarde voor f_m moet worden gegeven door de fabrikant van het betrokken materiaal.

Verankeringslengte wapening



Figuur 4.7 Inklemningslengte L_e en lengte wapening buiten buitenste paal L_b

Om de trekspanning T_{ds} , die dwars op de weg werkt op te kunnen vangen is het nodig dat het Hegemann materiaal niet over de wapening naar buiten glijdt. Om dit te voorkomen hanteert de Britse norm BS 8006 een minimale verankeringslengte: L_e :

$$L_e = \frac{0.5 K_a H (f_{ts} \gamma H + 2 f_{tp}) f_n}{\gamma h a' \tan \phi'_{cv} f_{ms}} = \frac{0.5 * 0.3 * 1.5 * (1.3 * 15.9 * 1.5 + 2 * 1.3 * 25) * 1.3 * 1.0}{15.9 * 0.75 * 0.3 * 1.0} = 4.4 \text{ m}$$

waarin f_n een risicofactor is:	Uit BS 8006 blz 18, tabel 3
$f_n = 1.0$	Aardebannen en constructies waar bezwijken matige schade geeft en functieverlies
$f_n = 1.1$	Constructies die een snelweg ondersteunen, hoofdwegen, spoorwegen, dammen, zeekering, etc.
En:	
h	Gemiddelde hoogte van de aardebaan boven de wapeningslengte L_p
a'	Interactiecoëfficiënt die de wrijving tussen grond en wapening relateert aan ϕ'_{cv} is hier gekozen als 0.3
f_{ms} f_{cs} f_{fs}	Zie hoofdstuk 4.1

Over de manier waarop deze verankeringslengte moet worden aangebracht (bijvoorbeeld over de hoogte waarop de terugslag moet worden aangelegd, doet de BS 8006 geen uitspraak.

Hoeveel moet de wapening tot voorbij de buitenste palen steken (in m)

In de richting dwars op de weg moet als volgt worden berekend hoeveel de wapening over de buitenste palen heen moet gaan:

$$L_b = \frac{f_{cb}(T_{r0} + T_{r5})}{\gamma h \left(\frac{a_1 \tan \phi'_{p/1}}{f_{ms}} + \frac{a_2 \tan \phi'_{p/2}}{f_{ms}} \right)} = \frac{1.0 \cdot 1.3 \cdot (144 + 25.7)}{15.9 \cdot (0.3/\sqrt{3}) \cdot (0.3 \cdot \tan(32.5) + 0.3 \cdot \tan(20))} = 0.70 \text{ m}$$

In de richting in de lengterichting van de weg moet als volgt worden berekend hoeveel de wapening over de buitenste palen heen moet gaan:

$$L_b = \frac{f_{cb} T_m}{\gamma h \left(\frac{a_1 \tan \phi'_{p/1}}{f_{ms}} + \frac{a_2 \tan \phi'_{p/2}}{f_{ms}} \right)} = \frac{1.0 \cdot 1.3 \cdot (144)}{15.9 \cdot (0.3/\sqrt{3}) \cdot (0.3 \cdot \tan(32.5) + 0.3 \cdot \tan(20))} = 0.60 \text{ m}$$

4.4.4 Ontwerp wapening constructiefase

Het meest kritische moment tijdens de constructiefase wordt nagerekend, namelijk het moment dat er één laag van 30 cm Hegemann materiaal is aangebracht op de wapening. Dit is het meest kritische moment omdat er op dat moment door de geringe aardebaandikte het minste boogwerking kan optreden. Bij de volgende laag is de aardebaan dikker, en de bovenbelasting even groot en daarom is die situatie minder kritisch.

De eerste laag wordt, net als de andere lagen, verdicht met een trilblok die 6 ton weegt ($p = 60 \text{ kN}$ bovenbelasting). Bij navraag blijkt gewerkt te worden met een trilblok van 1200 kg dat maximaal 4 ton kan drukken (en een slagkracht heeft van 1000 à 1500 kg). We veronderstellen dat de berekening met 6 ton een goede benadering is.

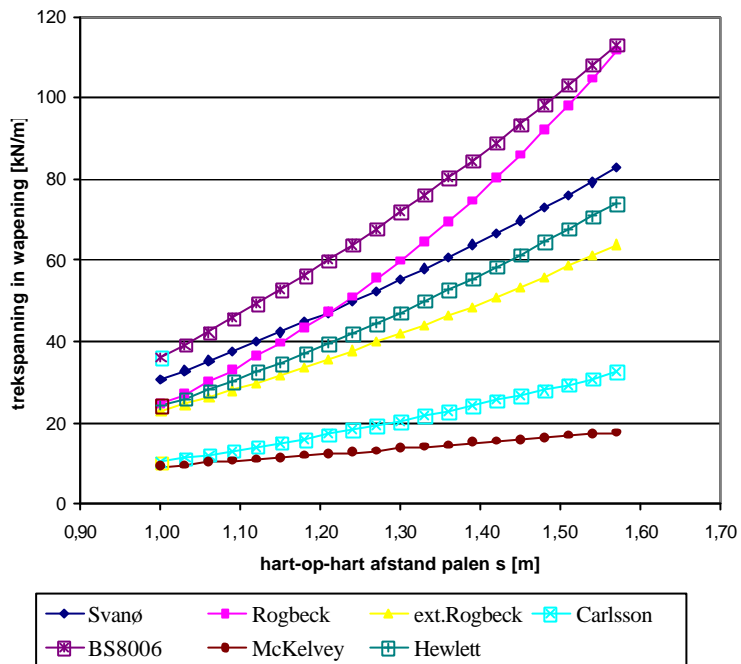
Dikte aardebaan $H = 30 \text{ cm}$

Bovenbelasting $p = 60 \text{ kN}$, verdeeld over 8 m^2 , geeft een bovenbelasting van 7.5 kPa .

Alle overige waarden zijn gelijk aan de voorgaande berekeningen

Trekkraft in de lengterichting van de weg

Net als in de vorige paragraaf berekenen we eerst de trekkraft in de wapening ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (BS 8006, artikel 8.3.3.3.):



Figuur 4.8 Trekkracht in de wapening gedurende de constructiefase ten gevolge van de verticale belasting op deze wapening (bij een vooraf aangenomen maximale rek van 3%)

Toegestane rek in geotextiel	9*12 palen, hoh afstand palen = 1.27 m trekkracht in de wapening T_{rp} (kN/m) in langsrichting weg						
	Svanø	Rogbeck	ext. Rogbeck	Carlsson	BS 8006	Mc Kelvey	Hewlett & Randolph et al *)
2%	38	29	27	12	43	11	29
3%	31	24	23	10	36	9	24
4%	27	22	20	9	32	8	21
5%	24	20	18	8	29	7	19
6%	22	18	17	8	27	7	17

Tabel 4.9 Trekkracht in de wapening T_{rp} (kN/m) in **langs**richting weg, gedurende de constructiefase, ten gevolge van de verticale belasting die rechtstreeks op de wapening werkt.
*) 'Oude Duitse school'

Als we uitgaan van een rek van 3%, dan moet worden een trekkracht uitgerekend die varieert tussen de 9 en de 36 kN/m. Deze waarden liggen beduidend lager dan de waarden die zijn uitgerekend voor de gebruiksfase (in de vorige paragraaf). Dus de waarden die zijn uitgerekend voor de gebruiksfase zijn maatgevend.

Trekkkracht dwars op de weg

Net als in de vorige paragraaf wordt de trekkkracht in de wapening, dwars op de weg als volgt berekend:

$$T_{ds} = 0,5 * K_a (f_{is} \gamma H + 2 f_q p) H = \\ = 0,5 * 0,3 * (1,3 * 15,9 * 1,5 + 2 * 1,3 * 25) * 1,5 = 1,16 \text{ kN/m}$$

Ook hier is de trekkkracht voor de gebruiksfase maatgevend (vorige paragraaf).

Verankeringslengte wapening

Om te voorkomen dat het Hegemann materiaal over de wapening naar buiten glijdt wordt de minimale verankeringslengte L_e net als in de vorige paragraaf berekend volgens BS 8006:

$$L_e = \frac{0,5 K_a H (f_{is} \gamma H + 2 f_q p) f_{td}}{\gamma h \frac{a_1 \tan \phi'_{o1}}{f_{ms}}} = 1,0 \text{ m}$$

Hoeveel moet de wapening tot voorbij de buitenste palen steken (in m)

In de richting dwars op de weg moet als volgt worden berekend hoeveel de wapening over de buitengste palen heen moet gaan:

$$L_b = \frac{f_{td} (T_{cp} + T_{ds})}{\gamma h \left(\frac{a_1 \tan \phi'_{o1}}{f_{ms}} + \frac{a_2 \tan \phi'_{o2}}{f_{ms}} \right)} = 1,0 \text{ m}$$

Hierbij is de constructiefase dus maatgevend. Echter de lengte van L_e in de gebruiksfase stelt nog hogere eisen (4,4 m voorbij de schouder van het talud).

In de richting in de lengterichting van de weg moet als volgt worden berekend hoeveel de wapening over de buitengste palen heen moet gaan:

$$L_b = \frac{f_{td} T_{cp}}{\gamma h \left(\frac{a_1 \tan \phi'_{o1}}{f_{ms}} + \frac{a_2 \tan \phi'_{o2}}{f_{ms}} \right)} = \frac{1,0 * 1,3 * (144)}{15,9 * (0,3/\sqrt{3}) * (0,3 * \tan(32,5) + 0,3 * \tan(20))} = 0,97 \text{ m}$$

We constateren dat de wapening die in de gebruiksfase sterk genoeg is, dat die ook sterk genoeg is in de constructiefase. De wapening dient tot 4,4 m buiten de 'schouder' van de aardebaan te worden doorgezet (hierin is de gebruiksfase maatgevend). En tot 1,0 m buiten de laatste paal (hierin is de constructiefase maatgevend).

4.4.5 Conclusies ontwerp matras

Figuur 4.9 geeft een overzicht van het definitieve ontwerp.

De aardebaan wordt, inclusief fundering en asfalt, 1,50 m dik. Dit is volgens de meeste modellen onvoldoende dik om boogwerking volledig tot ontwikkeling te laten komen. De meeste rekenmodellen kunnen wel rekenen aan onvolledige boogwerking.

De treksterkte van de wapening zal ook worden bepaald door Huesker, met behulp van de 'nieuwe Duitse school'. Met de voor deze studie beschikbare modellen is een trekkracht uitgerekend:

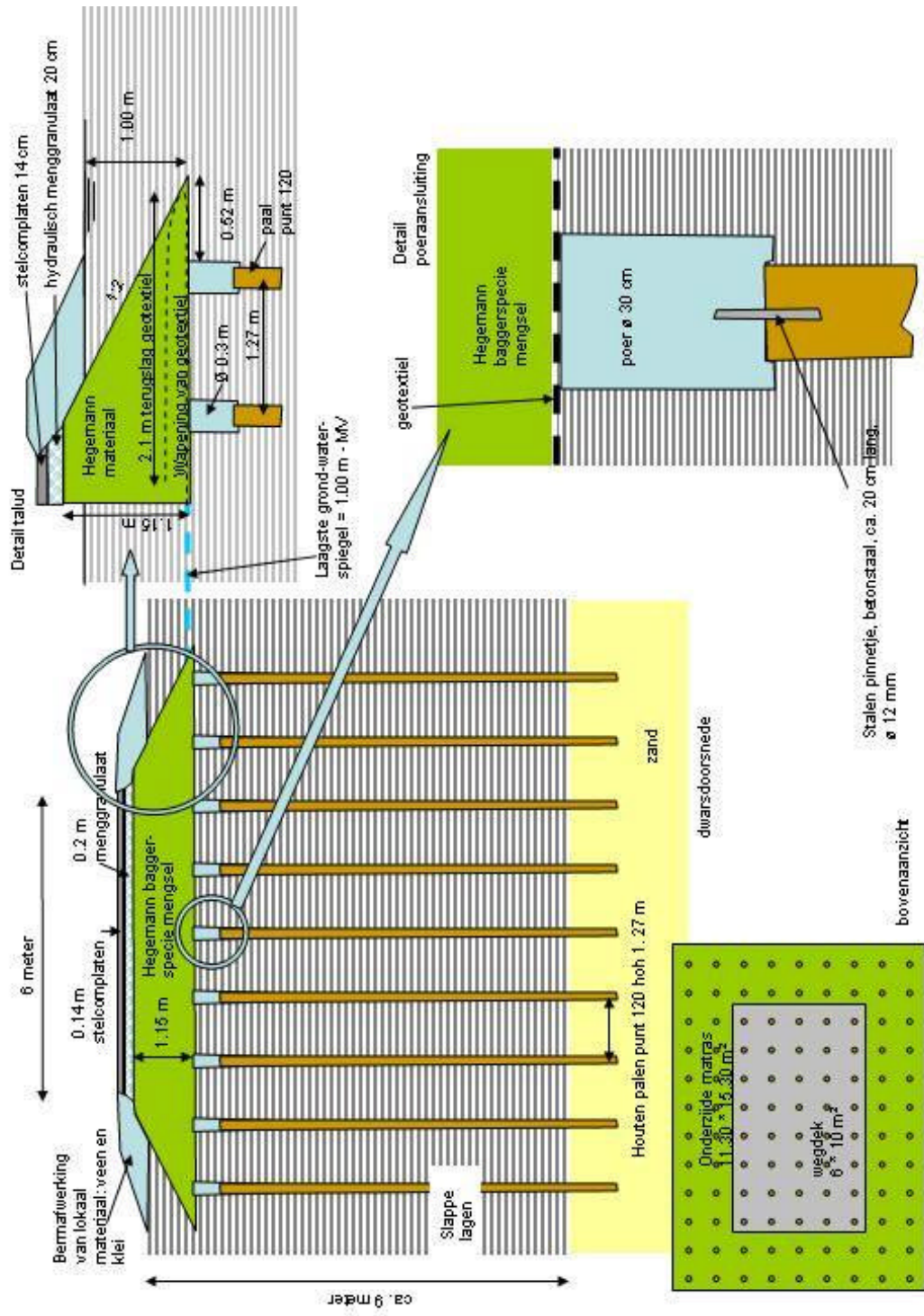
- in de lengterichting van de weg: tussen de 35 en de 218 kN/m

- in de dwarsrichting op de weg: 27,5 kN/m' meer, dus de totale trekkracht in die dwarsrichting ligt tussen de 62,5 en de 245,5 kN/m'.

De wapening dient tot 4,4 m buiten de 'schouder' van de aardebaan te worden doorgezet (hierin is de gebruiksfase maatgevend). De lengte van het talud = $2 * \text{hoogte} = 2,3$ m. Dat betekent dus dat het geotextiel $4,4 - 2,3 = 2,1$ m moet worden teruggeslagen.

En tot 1.0 m buiten de laatste paal (hierin is de constructiefase maatgevend). De afstand tussen de buitenste paal = 0,48 m. Dat betekent dat het geotextiel in dit geval 0,52 m moet worden teruggeslagen.

In totaal moet het geotextiel dus volgens de Britse norm aan alle kanten 2,1 m 'oversteken' en worden teruggeslagen.



Figuur 4.9 Definitieve ontwerp

4.5 De eindzetting van de wegconstructie

De palen zullen iets zetten. De invloed daarvan op de boogwerking in het matras zal minimaal zijn, omdat de zettingen tussen de palen in naar verhouding groot is. De totale constructie zal in de gebruiksfase zo goed als zettingsvrij zijn.

4.6 Stabiliteit aardebaan

Check de lokale en overall stabiliteit van de aardebaan (Bishop)
Check de stabiliteit tegen opdrijven tijdens de aanleg
Check de stabiliteit tegen opdrijven tijdens het gebruik van de weg.

4.7 Drainage / drooglegging

De wegconstructie wordt zo snel aangelegd dat de bouwput in de slecht doorlatende grond geen gelegenheid krijgt om vol te lopen. Een bemaling zal dus niet noodzakelijk zijn. Verder steekt het wegdek in het ontwerp 50 cm boven het huidige maaiveld uit, wat een voldoende drooglegging garandeert. Er zijn geen aanvullende drainagevoorzieningen nodig.

4.8 Geotechnische risicoanalyse

Bij een ophoging op een paalfundering bestaan de volgende risicofactoren:

- de draagkracht van de paalfundering
- horizontaal deformatiegedrag
- zettingsgedrag van de paalfundering
- werking van de belastingspreidende laag (het matras)
- de hoeveelheid trillingen die worden geproduceerd bij installatie van de palen. de mate waarin het bestaande weglichaam en de omgeving gevoelig zijn voor trillingen.
De laatste twee punten zijn bij de pilot niet relevant, aangezien er zich geen trillingsgevoelige objecten in de nabijheid van de pilot bevinden.
- Uitvoeringsrisico's (bijvoorbeeld opdrijven)
- Beheersrisico's (bijvoorbeeld vorst)

De risicofactoren kunnen resulteren in de volgende ongewenste gebeurtenissen:

- zetting van de ophoging in de gebruiksfase door overschrijding draagkracht palen of slecht functioneren van de belastingspreidende laag
- schade aan de omgeving
- schade aan de bestaande weg

Hier wordt nagegaan of een realistische variatie van de meest onzekere parameters er toe leidt dat het ontwerp niet meer voldoet aan het programma van eisen. In het laatste geval wordt voor het desbetreffende risico een monitorings- en maatregelenplan opgesteld of wordt het ontwerp of het programma van eisen bijgesteld.

4.9 Monitoringsplan en maatregelenplan

Het **monitoringsplan** dient twee doelen:

1. het beheersen van de geotechnische risico's, hierbij hoort een maatregelenplan voor als de monitoringsresultaten tegenvallen
2. het verkrijgen van meetdata voor het valideren en/of verder ontwikkelen van ontwerpmodellen.

4.9.1 het beheersen van de geotechnische risico's:

Overschrijding van de draagkracht van de palen en/of zettingen door het slecht functioneren van de belastingspreidende laag:
Bij praktijktoepassingen zullen periodieke hoogtemetingen van het wegdek worden uitgevoerd. Bij de pilot zal de eerste periode van 5 meetronden worden uitgevoerd, waarvan 3 tijdens de constructie (na het aanbrengen van iedere laag van het matras) en twee achteraf.

De kans op schade aan de omgeving:

Verder zal voor de start van de pilot de directe omgeving worden gefotografeerd en waar mogelijk en nodig worden ingemeten.

De kans op schade aan de bestaande weg:

Bij de pilot niet van toepassing.

Het maatregelenplan

Bij tegenvallende resultaten kunnen de volgende maatregelen worden genomen:

- bij zetting van de ophoging in de gebruiksfase door overschrijding van de draagkracht van de palen of door slecht functioneren van de belastingspreidende laag: deel van de ophoging vervangen door licht ophoogmateriaal.
- Bij schade aan de omgeving: eventueel kan worden afgezien van het installeren van palen nabij belendingen. Dan zijn aanvullende maatregelen nodig om een zettingsarme constructie te realiseren, bijvoorbeeld door toepassing van een lichtgewicht baggerspeciemengsel.

4.9.2 Het verkrijgen van meetdata voor rekenmodelontwikkeling en validatie

Doel van de metingen, uitgevoerd door GeoDelft en gefinancierd door Delft Cluster, is inzicht te krijgen in de mate van boogwerking: Welk deel van de belasting gaat rechtstreeks naar de palen, en welk deel van de belasting maakt een 'omweg'. Dat wil zeggen dat de belasting op het geotextiel rust, die de belasting door middel van trekkracht overdraagt op de palen.

Met het voorgestelde onderzoek zullen de volgende zaken worden gemeten:

- de kracht op de paalkop (bepaling van het gedeelte van de bovenbelasting dat direct op de paal werkt)
- de zakking van het geotextiel tussen de paalkoppen
- de zakking op verschillende diepten in de baggerspecie tussen de palen in (directe bepaling van de hoogte van de 'boog')
- de zakking op verschillende dieptes in de baggerspecie dicht bij de palen, waardoor de vorm van de boog in kaart kan worden gebracht.
- de waterspanning in het veen direct onder het geotextiel (ofwel direct onder het baggermatras), midden tussen de palen. Hiermee wordt bepaald of het veen gedurende de constructiefase, maar ook tijdens de gebruiksfase een dragende functie vervult of niet.

Het meten van de kracht op de paal (exclusief de kracht die via het geotextiel op de palen werkt, zodat krachtdoos bovenop geotextiel aangebracht wordt) wordt uitgevoerd met een krachtdoos bestaande uit 2 RVS platen, met daar tussen olie. De dikte van de krachtdoos bedraagt circa 20 mm. De maximale kracht bedraagt 125 kN. Bepaling van de druk geschiedt met een trillende (?) snaar die aan het maaiveld mbv een handuitleeskastje kan worden vastgelegd. De RVS platen moeten even groot zijn en de zelfde vorm hebben als de bovenzijde van de poer. Op deze manier wordt de totale kracht die rechtstreeks op de paal werkt gemeten.

De poer zal even hoog worden uitgevoerd (door de aannemer) als de andere palen, om een normale werking van het geotextiel te garanderen. De bovenzijde van de poer plus opneemsysteem komt dus ruim 2 cm hoger uit dan die van de andere palen.

Het meten van de zakking van het geotextiel tussen de houten palen geschiedt met een plaatje gemonteerd op het geotextiel, met een metalen binnen- en buitenstang naar het maaiveld. Het meten van de zakkingen in de bagger wordt op identieke wijze uitgevoerd, waarbij de minizakbaak op de gewenste hoogte wordt geplaatst. Omdat de zettingen in de baggerspecie gering zijn, zal bij het ontwerp speciale aandacht worden besteed aan de afmetingen en het soortelijk gewicht van het Hegemannmateriaal.

Het meten van de waterspanning in de poriën van de veenlaag geschiedt door het plaatsen van een waterspanningsopnemer in de veenlaag (voor aanvang van het construeren, of na het installeren van de palen en poeren?).

Omschrijving werkzaamheden en prijsopgave

De werkzaamheden bestaan uit de volgende leveringen en diensten:

- Het plaatsen van 1 (of 2?) waterspanningsopnemers.
- Het plaatsen van 2 krachtdozen op het geotextiel ter plaatse van de paalkop. Dit gebeurt op twee palen.
- Het plaatsen van 2 nauwkeurige minizakbakken op het geotextiel
- Het plaatsen van circa 5 minizakbakken in gebied tussen geotextiel en maaiveld
- mobilisatie en calibratie van de meetapparatuur
- De huur meetapparatuur
- De koop van 2 drukdozen
- Het uitvoeren van een nulmeting
- Het uitvoeren van 5 meetronden, waarvan 3 tijdens de bouw (na elke Hegemann-materiaallaag 1), en twee meetronden nadien.
- Aannemer de Kreij voert vervolgmetingen uit en levert GeoDelft de meetresultaten
- Het uitwerken van 10 meetronden en presentatie van de meetresultaten

5 PR en communicatie

Er wordt overleg gevoerd met de Ingenieur, om hen de 'primeur' van de Kyotoweg te gunnen. Op het moment dat de Ingenieur publiceert zal een persbericht worden verstuurd. Tijdens de week van de aanleg zal op 23 november 2005 een kick-off bijeenkomst worden georganiseerd voor het Delft Cluster project Blijvend Vlakke wegen, waaronder de Kyotoweg ook valt. De dag zal worden afgesloten met een excursie naar de bouw van de Kyotoweg.

Het communicatiebedrijf VWM Topiq maakt een artist impression van de Kyotoweg.

Verder zullen er diverse publicaties worden geschreven over het project.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Algemeen

Dit rapport toont aan dat het heel haalbaar lijkt de Kyotoweg op een commercieel interessante wijze te bouwen. Voor het ontwerp zijn een aantal beschikbare rekenregels gecombineerd. Voor het commercieel kunnen uitbaten van dit paalmatrassysteem is het noodzakelijk dat een algemeen geaccepteerde ontwerprichtlijn wordt vastgesteld.

6.2 Ontwerpberekeningen

In Nederland zijn nog geen officiële normen beschikbaar voor het ontwerpen van aardebanen op palen. In de literatuur zijn verschillende ontwerpmodellen beschikbaar. Alleen Groot-Brittannië kent een officieel geaccepteerde norm. Duitsland kent sinds kort een aanbeveling. In dit rapport wordt in grote lijnen de Britse norm gevolgd bij het maken van een ontwerp. Alleen het 'rekenhart' voor het ontwerp van het geotextiel in de aardebaan wordt voor verschillende rekenmethoden uitgewerkt. Dit geeft nog heel verschillende uitkomsten.

Uiteindelijk zal voor de keuze van de wapening de 'nieuwe Duitse school' worden gevolgd, ofwel de rekenmethode die wordt beschreven in de Duitse Entwurf EBGEO Hoofdstuk 6.9.

Eind november zal de pilot die in dit rapport wordt ontworpen worden gebouwd. GeoDelft zal een uitgebreid monitoringsprogramma uitvoeren bij de uitvoering en het gebruik van de pilot. Met de meetresultaten zullen, in Delft Clusterverband, de verschillende ontwerpmodellen die in dit rapport worden behandeld, worden gevalideerd.

Bij de berekeningen van matrassen wordt bij geen van de analytische modellen de 'bovenbouw' (de fundering en het asfalt) automatisch meegenomen. Ook bijvoorbeeld niet voor de bepaling van de minimale dikte van de aardebaan om doorponsing te voorkomen. Het zou goed zijn als onder- en bovenbouwontwerp beter wordt geïntegreerd in Nederland.

Het definitief ontwerp staat getekent op bladzijde 29.

6.3 Kosten

De kosten van de Kyotoweg liggen laag. Dat komt doordat het gebruik van houten palen lage kosten met zich mee brengt. Het hout is licht en snel te verwerken. Op dit moment is de betrokken aannemer in staat om in één werkdag van 8 uur, met één heiploeg 200 tot 300 palen per dag te heien.

Bovendien zijn de kosten voor de levering en het aanbrengen van het Hegemann-baggerspeciemengsel vergelijkbaar met de kosten die worden uitgespaard doordat er niet gestort hoeft te worden. Hierdoor wordt de aardebaan feitelijk gratis aangelegd. Alleen de kosten van de wapening moeten hier nog worden gerekend.

6.4 Milieu

De Kyotoweg dankt zijn naam aan de milieuvriendelijkheid van het concept. Met het gebruik van van baggerspecie wordt een baggerspecie-overschotprobleem mede opgelost.

Bossen spelen een belangrijke rol in het vastleggen van CO₂: zij produceren zuurstof (O₂) en leggen door opname van water en zonne-energie grote hoeveelheden koolstof (C) vast in de vorm van hout. Sterft een boom of wordt het hout van de boom verbrand, dan komt het CO₂ weer vrij.

Bosbouw wordt langzaam aan een handelsproduct om met de bijbehorende CO₂ reductie de protocollen van Kyoto (milieunormen) beter te halen.

Om te voorkomen dat de CO₂ op den (lange) duur weer vrij komt is het een goed idee om het in het hout vastgelegde CO₂ duurzaam op te slaan in de bodem. In onze veen- en kleigrond blijft het hout eeuwenlang in tact (denk aan de 'veenlijken'). Het CO₂ dat in het hout is opgeslagen komt dus niet door rot of verbranding alsnog weer in de lucht.

Daarnaast is de productie van een houten paal milieuvriendelijker dan de productie van alternatieve palen, zoals bijvoorbeeld betonnen palen. Bij zowel de productie als het transport van betonnen palen komt meer CO₂ vrij dan bij houten palen.

Dat het toepassen van houten palen (met traditionele betonopzetter of poer) een zeer duurzame palenfundering is, blijkt ook uit de erkenning van Dubokeur®. Dubokeur® erkent dit funderingstype namelijk als de duurzaamste mogelijkheid voor de toepassing fundering op palen.

Dit dubokeurmerk is toegekend door het Dubo-centrum dat onder SenterNovem valt. Het Dubo-centrum verzamelt actief kennis en informatie over duurzaam bouwen, maakt dit toegankelijk en zorgt voor verspreiding onder professionals in de bouw.

De hoeveelheid koolstof die per kilometer provinciale weg als houten paal in de grond wordt vastgelegd, compenseert het passeren van zo'n 9 miljoen voertuigen.

6.5 Aanbevelingen

Om de Kyotoweg praktisch toepasbaar te maken moeten een aantal zaken nog worden ontwikkeld. Voor Nederland geldt dat er een set behoorlijke, algemeen geaccepteerde ontwerpregels voor aardebanen op palen moeten worden vastgesteld. Bovendien zou deze set rekenregels in een softwareprogramma algemeen beschikbaar moeten worden gemaakt. Binnen het Delft Cluster programma 'innovatieve wegconstructies' zal hieraan worden gewerkt.

Er zal verder nog moeten worden gekeken naar het langetermijngedrag van de constructie, de duurzaamheid onder invloed van trillingen (verkeersbelasting), de thermisch isolerende werking en de invloed daarvan op het wegdek. Eventueel kan de mogelijkheid deze wegconstructie te combineren met de opvang van de zonnewarmte in het wegdek en opslag van energie in de ondergrond worden onderzocht.

7 Referenties

Internetbronnen:

*1Bron: <http://www.businessforclimate.nl/CO2.html>.

*2Bron: Kantakun Instruments + Research (a.beeker@kantakun.nl)

*3Bron: Van BiezenHout B.V.B.A., Hechtel-Eksel (België), info@houtenheipaal.nl

*4Bron: studie van GeoDelft, CO409640/0017 v04 'Baambrugse Zuwe, vooronderzoek reconstructie'

Regelgeving/normen/handleidingen:

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

CUR rapport 175 *Geokunststoffen in de wegenbouw en als grondwapening*, ISBN 90 376 0046 8

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 Bewhrungen aus Geokunststoffen".

Het ontwerpen van stalen bruggen, basiseisen en eenvoudige rekenregels (VOSB 1995) (NEN 6788)

British Standard, BS 8006 (1995) *Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills*. BSi.

Handleiding Wegenbouw – Ontwerp Onderbouw, Product-methodebladen, versie 2.0, ISBN 90-369-5567-X, DWW-2004-067, eerste druk, versie 2.0, oktober 2004

Handleiding constructief ontwerpen

Leidraad

Andere publicaties:

Carlsson, B. (1987) *Reinforced soil, principles for calculation*, Terratema AB, Linköping (in Swedish)

Eekelen, S.J.M. van; Bezuijen, A.; Oung, O.; Boogwerking in aardebanen op palen: experimenteel onderzoek, *Civiele Techniek*, 58(2003)3, pp. 16-20

Eekelen, S.J.M. van; Bezuijen, A.; Oung, O.; Arching in piled embankments; experiments and design calculations, *Proceedings BGA Internatioal Conference on Foundations*, Dundee, September 2003 London, Telford, 2003, pp. 885-894

Guido, V.A., Knueppel, J.D. and Sweeny, M.A., [1987] *Plate Loading Tests on Geogrid-Reinforced Earth Slabs*, Geosynthetics 1987 Conference, Volume 1, New Orleans, USA

Hewlet, W.J., Randolph, M.F. Aust, M.I.E [1988] *Analysis of piled embankments*, *Ground Engineering*, April 1988, Volume 22, Nuber 3, 12-18

McKelvey, James A. [1994] *The Anatomy of Soil Arching*, Geotextiles and Geomembranes 13 (1994) 317-329

Rogbeck, Y., Gustavsson, S., Södergren, I. Lindquist, D. [1998] *Reinforced Piled Embankments in Sweden – Design, Aspects* Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics 755-762

Svanø, G., Ilstad, T., Eiksund, G., Want, A., [2000] *Alternative calculation principle for design of piled embankments with base reinforcement*, Proceedings of the 4.th GIGS in Helsinki

Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York, USA, p. 66

Persoonlijke gesprekken

Aantjes, H. (GeoDelft), 2005

Berg, F. van den, (GeoDelft) 2005

Brok, C. (Huesker), 2005

Ruijven, J. van, (GeoDelft) 2005

Comment:
Verwijder dit sectie -einde niet!!!

Bijlage 1 Bepaling verkeersbelasting

Er bestaan verschillende inzichten voor welke verkeersbelasting zou moeten worden gehanteerd bij het ontwerpen van wegen. De Handleiding Wegenbouw – ontwerp onderbouw zegt niets over de in rekening te brengen verkeersbelasting

Wij bespreken de volgende regels of normen:

- De NEN 6788 (VOSB 1995)
- De Handleiding constructief ontwerpen
- De Leidraad ...
- Praktijkervaringen van diverse mensen (oa. Brok, 2005, Van, 2005, en Van Ruijven, 2005 en Van den Berg, 2005)

1.1. De NEN 6788 (VOSB 1995)

De NEN 6788 (VOSB 1995) maakt (op blz 90) voor gewoon verkeer de volgende belastingsindeling:

Klasse 600	(Bruggen in) hoofdverkeerswegen, waarbij omleggen van verkeer is uitgesloten
Klasse 450	(Bruggen in) hoofdsverkeerswegen, waarbij de mogelijkheid bestaat een zeer zware wagen, die slechts bij uitzondering voorkomt langs een (om)weg wordt geleid
Klasse 300	(Bruggen) niet bestemd voor zeer zware voertuigen

Tabel B1.1 definitie verkeersklassen volgens VOSB 1995

Na overleg met de locatie-eigenaar wordt voor het Giessenburgproject gekozen voor klasse 600, omdat er zeer zware wagens over het terrein rijden. Deze klasse vertegenwoordigt overigens wel zeer zwaar verkeer.

Het wegvak wordt $6 \times 10 \text{ m}^2$. Dwars op de rijrichting is het wegvak 6 meter breed, zodat er moet worden gerekend met twee rijstroken (artikel A.2.5.1 VOSB).

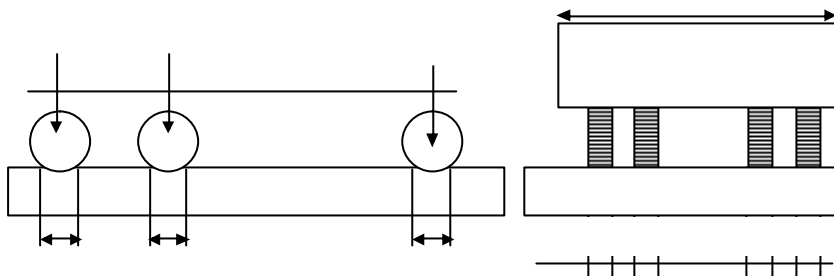
De belasting voor een rijstrook is:

Gelijkmatig verdeelde belasting		Eén wagen	
Klasse 600	4 kN/m ² met een maximum van 12 kN per meter rijstrook	Asdrukken 3 x 200 kN (totaal 600 kN ofwel 60 ton)	Elke asdruk verdeeld over 4 wielen
Klasse 450	3 kN/m ² met een maximum van 9 kN per meter rijstrook	3 x 150 kN (totaal 450 kN ofwel 45 ton)	4 wielen
Klasse 300	2 kN/m ² met een maximum van 6 kN per meter rijstrook	3 x 100 kN (totaal 300 kN ofwel 30 ton)	4 wielen

Tabel B1.1 mobiele belastingen volgens VOSB 1995

Klasse 600 is echt een bijzonder zware klasse. Ter vergelijking: in Amsterdam worden alleen vrachtwagens toegelaten (voor winkelbevoorrading) die lichter zijn dan 7.5 ton. In Zwitserland mogen pas sinds een paar jaar wagens het land in als ze zwaarder zijn dan 28 ton. In Europa geldt meestal een limiet voor transport over de weg van 40 ton.

Hebben we klasse 600 en twee rijstroken van ieder 3 meter breed, dan moeten we rekenen met een gelijkmatig verdeelde belasting van 12 kN per meter rijstrook



Figuur B1.1 Belastingsklasse 600 (uit: VOSB 1995)

Voor bruggen/wegen voor gewoon verkeer moet de volgende remkracht in rekening worden gebracht:

Klasse 600	200 kN (=20 ton)
Klasse 450	150 kN (=15 ton)
Klasse 300	100 kN (=10 ton)

Tabel B1.3 remkrachten (dus horizontale krachten) volgens VOSB 1995

Factoren op verkeersbelasting

Gegeven de geringe waarschijnlijkheid dat twee vrachtwagens tegelijk ieder van één rijstrook gebruik maken, hoeft de totale gelijkmatige belasting plus twee wagenbelastingen maar voor 80% in rekening te worden gebracht (A.2.5.5 lid 4 blz 91 van VOSB 1995)

Bovengenoemde belastingen moet worden vermenigvuldigd met een belastingsreductie B (art A.2.10.2 van VOSB 1995). Voor gewoon verkeer geldt (art A.2.11.2 en 3):

$B = 0,6 + 40 / (100 + l)$. Hierbij is $l = 1,5 * (s-a)$ (volgens A.2.10.4.c) waarbij (s-a) is de afstand tussen twee paaldeksels.

Voor de hoh afstanden tussen de palen die we beschouwen (0,9 à 1.55 meter met een equivalente dekselmaat van 0,27 m en dus $l = 1,5 * (0,63 \text{ à } 1,82) = 1.35 \text{ à } 2.25$) is de waarde van B gelijk aan 1.00. De stootcoëfficiënt S hoeft niet meegenomen te worden, omdat die alleen voor bruggen geldt.

aantal palen	hoh afstand palen (m)	$l = 1.5(s-a)$ (m)	Belastingsreductie B
8*12 palen	1.55	1.93	0.99
6*9 palen	1.30	1.55	0.99
7*11 palen	1.10	1.25	1.00
5*8 palen	0.97	1.06	1.00

Tabel B1.4 Mogelijke palenstramien

Verkeersbelasting voor ontwerpberekeningen

Voor het ontwerp van de aardebaan is het redelijk om te rekenen met een verkeersbelasting die zich spreidt met de diepte van de aardebaan. Hoe dieper, hoe minder verkeersbelasting per m^2 er in rekening hoeft te worden gebracht. Uit de VOSB valt het volgende te berekenen. Als we ervan uitgaan dat de belasting zich spreidt onder een hoek van 45° , wat redelijk is voor een cohesieve aardebaan die van Hegemann materiaal is gemaakt, dan vinden we:

Verkeers-klasse volgens VOSB	wiellast (kN) (= aslast / 4 wielen)	diepte onder wegdek (m)	max. aantal wielen die tegelijk op een oppervlak werken	verkeerslast door aslast (kPa)	gelijk verdeelde verkeerslast (kPa)	totale verkeerslast (kPa)
VOSB klasse 600	50	0,25	2	98	4	102
	50	0,50	4	46	4	50
	50	0,75	8	35	4	39
	50	0,93	8	29	4	33
	50	1,00	8	27	4	31
	50	1,25	8	21	4	25
	50	1,50	8	17	4	21
VOSB klasse 450	37,5	0,25	2	73	3	76
	37,5	0,50	4	34	3	37
	37,5	0,75	8	27	3	30
	37,5	0,93	8	22	3	25
	37,5	1,00	8	20	3	23
	37,5	1,25	8	16	3	19
	37,5	1,50	8	13	3	16
VOSB klasse 300	25	0,25	2	49	2	51
	25	0,50	4	23	2	25
	25	0,75	8	18	2	20
	25	0,93	8	14	2	16
	25	1,00	8	13	2	15
	25	1,25	8	10	2	12
	25	1,50	8	8	2	10

Tabel B1.5. Hoe diep werkt volgens de VOSB 1995 welke verkeersbelasting? Hierbij is uit de VOSB overgenomen: bij 2 wielen $b * l = 0,75 * 0,32 m^2$. Bij 4 wielen is $b * l = 2,50 * 0,32 m^2$. Bij 8 wielen is $b * l = 2,50 * 1,32 m^2$. Er wordt uitgegaan van een spreidingshoek van 45° , wat redelijk is bij een cohesief aardebaanmateriaal. Let op: bij een gewoon granulair materiaal zou een hoek van 30° aangehouden moeten worden, en dan vinden we hogere verkeersbelastingen!

Voor het ontwerpen van een aardebaan is het redelijk om de verkeersbelasting per m² die halverwege de dikte van de aardebaan werkt te hanteren. Volgens figuur ... is de diepte van de halve aardebaan 0,93 m onder het wegdek. Op die diepte wordt voor de drie verkeersklassen resp. 33, 25 en 16 kPa aan verkeersbelasting gevonden.

Brok (2005) zegt dat een verkeersbelasting van 20 à 25 kPa een praktijkontwerpwaarde is. Dat komt dus goed overeen met verkeersklasse VOSB klasse 450. En deze klasse is nog altijd iets boven de verkeersklasse die binnen Europa wordt gehanteerd. **Daarom wordt in dit ontwerp met 25 kPa gerekend.**

Voor het berekenen van de totale bovenbelasting op de aardebaan is hierbij nog het gewicht van het asfalt en de funderingslaag opgeteld.

Voor de volledigheid wordt hier nog de verkeersbelasting gegeven die de Leidraad Rivieren hanteert. Deze aannames zijn ook door de Handreiking Constructief Ontwerpen van de TAW overgenomen. In Leidraad Rivieren 1 wordt gerekend met een gelijkmatig verdeelde ontwerpbelasting van 15 kPa op één rijstrook ter breedte van 2,5 m.

De pijpleidingencode Zuid Holland 1990 baseert zich nog op de – inmiddels verouderde – VOSB 1963. Evenwel komen de essenties van de VOSB 1963 en VOSB 1995 overeen.

De Handreiking Constructief Ontwerpen gaat ervan uit dat per 17 m' dijk één VOSB-laststelsel aanwezig is. Dan valt af te leiden dat een belasting van verkeersklasse VOSB 1995 verkeersklasse 600 (of VOSB 1963 verkeersklasse 60) overeenkomt met een gelijkmatig verdeelde belasting van een kleine 15 kN/m² voor één rijstrook ter breedte van 2,5 m volgens Leidraad 1 (Namelijk 600 kN verdeeld over een breedte van 2,5 meter en een lengte van 17 m').

Bij calamiteiten wordt voor dijken nog een andere verkeersbelasting in rekening gebracht. In dat geval wordt een dijk afgesloten voor verkeer, maar kan er wel transport van zwaar materiaal en materieel over de dijk noodzakelijk zijn. In dit geval is een belasting in de vorm van een rij zandauto's op de kruin van de dijk c.q. op een weg aan de binnenzijde van de dijk niet onmogelijk. Een dergelijke belasting kan worden benaderd door een belasting van 400 kN per 12 m' over een breedte van 2,5 m, dat wil zeggen ca. 13 kPa.

Dynamische belastingen

Wegen worden in Nederland nooit dynamisch ontworpen. Het is voor dit project echter belangrijk om inzicht te hebben in de invloed van de snelheid van belastingen op de sterkte en stijfheid. Ook de invloed van vele belastingwisselingen op de sterkte en stijfheid zijn belangrijk. Dit is beschreven in hoofdstuk 3.1.3.

Bijlage 2 Ontwerp van wapening in paal-matrassystemen

2.1. Ongefundeerde gewapende wegconstructies

Het CUR 175 rapport (1995) behandelt het ontwerp van geokunststoffen in de wegenbouw. Er is in deze publicatie nog geen sprake van gefundeerde wegtypes. De wapening van geokunststoffen wordt aangebracht tussen funderingslaag en aardebaan.

Er worden twee soorten rekenmodellen gegeven; membraanwapening en horizontale wapening:

1. membraanwapening, waarbij de geokunststof als 'hangmat' functioneert op plaatsen waar de ondergrond is bezweken en door middel van trekkrachten de belasting wordt overgebracht naar naastliggende gebieden waar de ondergrond niet is bezweken. Voor het mobiliseren van het trekdraagvermogen van de membraanwapening is vervorming nodig. Deze vervorming is groot vergeleken met de vervorming die nodig is voor het ontwikkelen van de horizontale wapening. Daarom is deze methode alleen bruikbaar voor onverharde wegen en niet voor verharde wegen.
2. horizontale wapening, waarbij het extra draagvermogen wordt ontleend aan de wrijving tussen het funderingsmateriaal en de geokunststof en tussen de geokunststof en de ondergrond. Hierbij worden twee effecten onderscheiden:
 - a. versterking van het funderingsmateriaal, ook wel plaatwerking genoemd, die speciaal optreedt na verdichting;
 - b. toename van het draagvermogen van de ondergrond door reductie van de horizontale schuifspanning op de ondergrond, waardoor de zijdelingse vervorming wordt beperkt.

Het rapport veronderstelt dat in de praktijk een combinatie van deze twee systemen optreedt. Zo kwam de CUR commissie tot twee rekenmethodieken:

1. De methode van Sellmeijer, die uitgaat van membraanwapening. De bijdrage van de horizontale wapening is via een kunstgreep aan de berekeningsmethodiek toegevoegd.
2. de methode van Houlsby ea., die uitgaat van alleen horizontale wapening. De membraanwapening wordt verwaarloosd (omdat er uitgegaan wordt van kleine vervormingen).

2.2. Gefundeerde gewapende wegconstructies (paal matrassystemen)

2.2.1. Overzicht van ontwerpregels

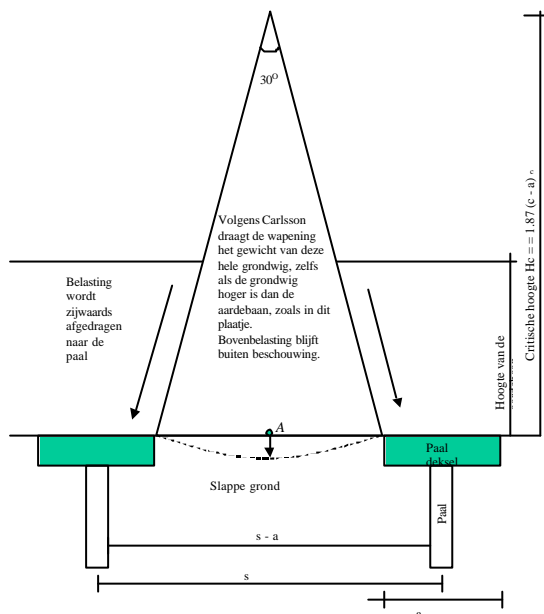
Dit hoofdstuk vergelijkt een aantal ontwerpregels uit de literatuur, namelijk:

- Carlsson (1987)
- Uitgebreid Carlsson (Rogbeck, 1998, in dit rapport noemen we deze methode 'Rogbeck')
- Uitgebreid Rogbeck (Dit is Rogbeck uitgebreid met onvolledige boogwerking en bovenbelasting)
- SINTEF (Svanø et al., 2000)
- British Standard, BS 8006 van 1995 (Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills).
- McKelvey (1994), die is gebaseerd op Terzaghi.
- Hewlett et al. (1988)

De meeste berekeningsmethoden beginnen met het berekenen van het gewicht van de grond dat op de wapening rust, dus het gewicht van de grondig zoals van figuur 2.1. Hiermee wordt de spanning in de wapening (meestal geotextiel) berekend. In Van Eekelen (2001) wordt uitgebreider ingegaan op dit onderwerp.

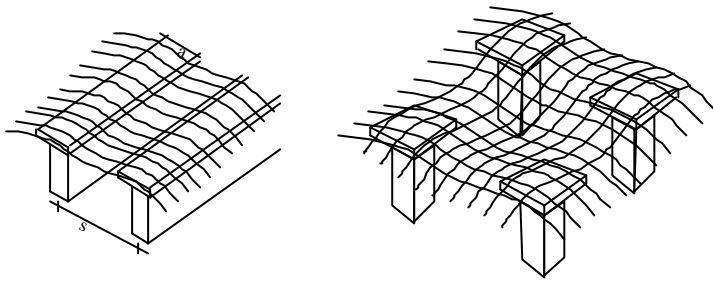
2.2.2. Carlsson, Rogbeck and extended Rogbeck

Figuur 7.1 toont de twee-dimensionale (2D) benadering van Carlsson (1987). Hij gaat uit van een 2D grondwig tussen de paalkoppen. De grondwig met een bovenhoek van 30° moet worden gedragen door de wapening. Carlsson maakt gebruik van het verticale gewicht van de grondwig en de kettingregel om de wapeningsspanning uit te rekenen.



Figuur 7.1 De berekeningsmethode van Carlsson (1987) is 2D. Carlsson neemt aan dat het gewicht van de grondwig op de wapening rust.

Figuur 7.2 laat het verschil zien tussen een 2D en een 3D benadering. Kempton et al. (1998) toonden aan dat de verschillen tussen 2D en 3D berekeningen behoorlijk groot kunnen zijn. Zij voerden berekeningen uit met Flac, en vonden voor de 3D berekeningen belangrijk grotere verplaatsingen onder in de aardebaan, en dus ook grotere spanningen in de wapening.



Figuur 7.2 Met 3D berekeningen vinden we grotere verplaatsingen onder in de aardebaan, en dus ook grotere spanningen in de wapening dan bij 2D berekeningen.

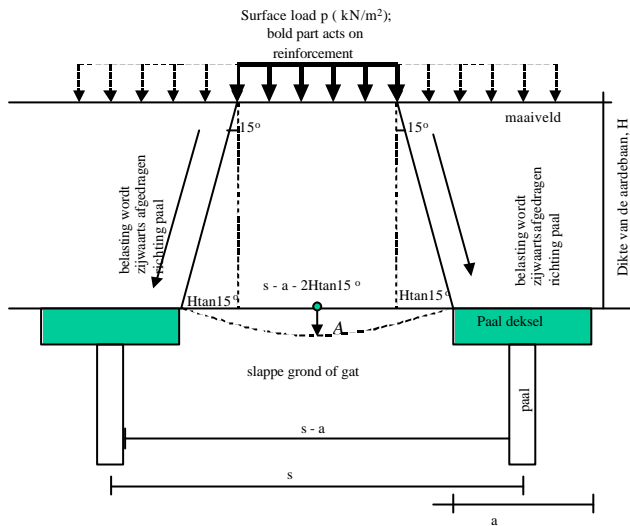
Rogbeck (1998) breidde de methode van Carlsson uit met een 3D factor, waarmee de berekende wapeningsspanning vermenigvuldigd moet worden.

$$F_{3D, Rogbeck} = \frac{1 + \frac{c}{a}}{2} F_{2D, Carlsson} \quad (7.1)$$

waarin F_{3D} en F_{2D} de wapeningsspanningen zijn voor resp. 3D en 2D condities. Met de 3D factor van Rogbeck vinden we hogere wapeningsspanningen dan met de 2D methode van Carlsson.

Zowel Carlsson als Rogbeck gaan uit van volledige boogwerking. Als echter de dikte van de aardebaan kleiner is dan de kritische hoogte van Carlsson, dan is er sprake van onvolledige boogwerking. Is er geen bovenbelasting, dan overschatten zowel Carlsson als Rogbeck de spanning in de wapening. Is er wel bovenbelasting, dan zal een gedeelte van die bovenbelasting rechtstreeks op de wapening werken, en kan de spanning in de wapening hoger worden dan de spanning zoals voorspeld door Carlsson of Rogbeck.

Daarom hebben wij de methode van Rogbeck uitgebreid voor het geval van onvolledige boogwerking. Wij rekenen alleen met het daadwerkelijke gewicht van het bestaande gedeelte van de grondwig. Als er inderdaad onvolledige boogwerking optreedt, en er is bovenbelasting, dan rekenen we het gedeelte van de bovenbelasting dat op de grondwig werkt mee (dat is het vette gedeelte van de bovenbelasting in Figuur 7.3).



Figuur 7.3 Uitbreiding van de methode van Rogbeck: bij onvolledige boogwerking wordt de bovenbelasting wel meegenomen en alleen het werkelijk bestaande deel van de grondwig.

2.2.3. British Standard BS 8006

De Britse Standaard BS 8006 wordt nogal eens als ontwerpnorm gehanteerd. In Van Eekelen (2001) toonden wij al aan dat deze norm inconsistente resultaten geeft.

De methode is oorspronkelijk ontwikkeld door Jones et al. (1990). BS 8006 onderscheidt 3 categorieën, afhankelijk van de relatieve diktes van de aardebaan H :

1. de dikte van de aardebaan is kleiner dan 70% van de ruimte tussen de palen ($H < 0.7(s-a)$). Dit wordt niet toegestaan om locale zettingsverschillen te voorkomen,
2. onvolledige boogwerking: $0.7(s-a) < H < 1.4(s-a)$. Hierbij wordt de bovenbelasting meegenomen,
3. volledige boogwerking: $H > 1.4(s-a)$.

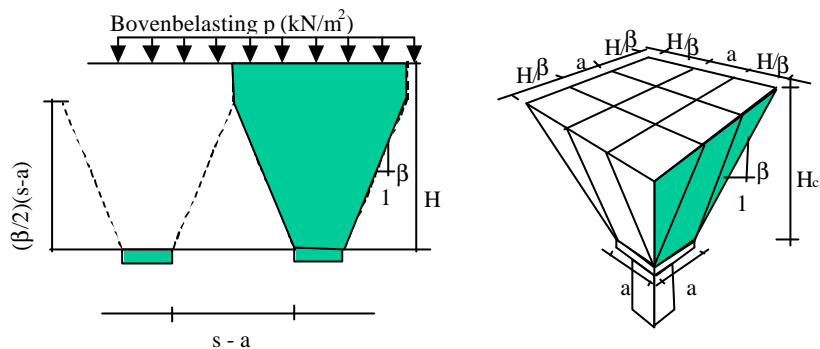
Voor gevallen 2 en 3 zijn verschillende formules beschikbaar die het grondgewicht w_g dat op de wapening berekenen. Zodra er een bovenbelasting wordt meegenomen, geven beide formules een andere uitkomst voor $H = 1.4(s-a)$. De berekende belasting op de wapening is dus niet continu bij toenemende H .

De methode BS 8006 is gebaseerd op 2D formules voor leidingen. De methode is uitgebreid met de derde dimensie.

2.2.4. Svanø et al (SINTEFF)

SINTEFF heeft een volledig 3D methode ontwikkeld (Svanø et al (2000)). Ook deze onderzoekers gaan ervan uit dat de wapening een grondmoot draagt. Figuur 7.4 laat zien hoe de 3D grondmoot van Svanø et al eruit ziet, die wordt gedragen door een paal. De auteurs verwachten dat β (zie figuur 3.4) waarden zal aannemen tussen 2.5 en 3.5. Ze veronderstellen dat de rest van de grond wordt gedragen door de wapening. Mocht de

dikte van de aardebaan onvoldoende zijn voor volledige boogwerking, dan wordt de bovenbelasting ook meegenomen.



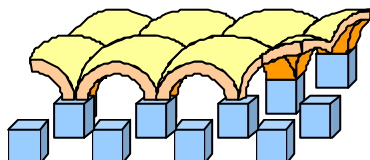
Figuur 7.4 Boogwerking met de methode van SINTEF (Svanø et al, 2000)

2.2.5. McKelvey and Hewlett

Alle rekenregels die we tot hier hebben beschreven gaan uit van de één of andere aanname voor de boogwerking in de grond: hoe ziet de boog er precies uit. Bij alle maakt het niet uit in wat voor soort grond de boogwerking moet plaatsvinden. Dit hoofdstuk beschrijft de twee enige methodes die wij in de literatuur vonden die het gedrag van de grond zelf meenemen. Deze methodes van McKelvey (1994) and Hewlett et al (1988) gebruiken een grondmodel met een cohesie c en een interne wrijvingshoek ϕ .

McKelvey (1994) baseerde zijn theorie op Terzaghi (1943). Hij beschrijft hoe boogwerking zich ontwikkelt in een stuk grond waarin een gat ontstaat. Hij veronderstelt dat de grond direct boven het gat de vorm aanneemt van een 'hangmat', en dat ergens boven het gat een 'plane of equal settlement' bestaat. Dat betekent dat er een punt bestaat dat evenveel zakt als de punten direct daaromheen. Met deze aannamen vindt hij een spanning in het punt A van figuur 2.1. Tenslotte breidt McKelvey zijn theorie uit met de tensioned membrane theorie om de geotextiel mee te kunnen modeleren.

Hewlett et al. (1988) voerden een aantal simpele proefjes uit, en baseerden daarop een volledige 3D theorie dat de stabiliteit van een 3D zandboog beschouwt (Figuur 7.5). Ze leidden een aantal behoorlijk ingewikkelde vergelijkingen af. Hewlett et al. geeft alleen vergelijkingen om de verdeling van de belasting tussen palen en wapening te berekenen. Wij gebruiken de kettingvergelijking zoals Svanø et al. dat doen om de wapeningsspanning te berekenen.



Figuur 7.5 Boogwerking volgens Hewlett et al. (1988)

2.3. Evaluatie van ontwerpregels

De rekenregels die hier worden behandeld zijn alleen bedoeld en geschikt voor constructies waarbij geotextiel of geogrit als wapening in de aardebaan wordt toegepast.

Bij de meeste rekenregels wordt het gedrag van de grond niet meegenomen.

De meeste rekenregels nemen bovenbelasting bij onvolledige boogwerking ook niet mee. Wij hebben zelf de regels van Carlsson/Rogbeck zodanig uitgebreid dat bovenbelasting bij onvolledige boogwerking wel wordt meegenomen.

Geen van de rekenregels nemen dynamische verkeersbelasting mee.

Van Eekelen (2001) toont aan dat de Britse Standaard BS 8006 inconsistente resultaten geeft.

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
3

Bijlage 3 Resultaten triaxiaalproeven en vrije prisma proeven

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
3

Bijlage 4 Resultaten dynamische proeven

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
4

Bijlage 5 Sondering gemaakt op de proeflocatie

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
5

Bijlage 6 Grondwaterstandmetingen in het kader van de Betuweroute

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
6

Bijlage 7 Certificaat Dubokeur Houten heipaal (met betonopzetter)

Rapportnummer
CO-418350-0014 v04

Datum
november 2005

Bijlage(n)
7

Zertifikat Certificat Certificaat

Product: Houten heipaal (met betonopzetter)
Toepassingen: - Fundering op palen

Certificaathouder: D. Van Biezen Groep
Postbus 48
2170 AA Sassenheim
Telefoon: 0252-222 800
Fax: 0252-232 861
E-mail: info@dvanbiezen.nl
Website: www.dvanbiezen.nl



Verklaring van NIBE Research bv

Deze verklaring is op basis van het NIBE reglement (kenmerk 722.03.07.049) voor uitgifte van milieukwaliteitverklaringen, uitgegeven door NIBE Research bv.

NIBE Research bv beoordeelt de houten heipaal met (traditionele) betonopzetter, vanuit milieu- en gezondheids oogpunt als de beste dubokeuze in de toepassing fundering op palen. Met dit producte voldoet D. van Biezen Groep aan de door het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie- en Ecologie gestelde eisen, voor het voeren van het DUBOKEUR®.

DUBOKEUR®

**Dit product is beoordeeld als de beste dubokeuze in de toepassing:
fundering op palen**

ing. Ruben Abrahams
(projectleider)

dr. ir. Michiel Haas
(directeur)

Het Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie is lid van het keurmerk Milieu Keurmerk bv, NIBE Research bv, NIBE Fundering bv en NIBE Energie.



Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie bv

Voor milieubewust en gezond
bouwen, wonen en werken.

Postbus 229, 1400 AE Bussum

telefoon +31 (0)35 - 6948233

telefax +31 (0)35 - 6950042

E-mail info@nibe.org

Website www.nibe.org

Referentienummer: BW-A1-17-NOV04
Uitgegeven: 1 februari 2005
Geldig tot: 1 maart 2007

© Nederlands Instituut voor Bouwbiologie en Ecologie, NIBE Research bv.

Dubokeur® is een merk van NIBE bv.

lid ONRI
nibe