

Paalmatras A15 Benelux, Van Ontwerp naar Uitvoering

ir. M.J.W. ter Linde
Strukton Civiel Projecten



ir. M.H.A. Brugman
Arthe civil & structure b.v.



Inleiding

De A15 door het Rotterdamse haven- en industriegebied is de afgelopen jaren ingrijpend aangepast. Om de doorstroming te verbeteren en de files terug te dringen werkt het consortium A-Lanes A15 in opdracht van Rijkswaterstaat aan de verbreding van de A15 en de bouw van de nieuwe Botlekbrug. Het consortium bestaat uit Ballast Nedam, Strukton, Strabag en John Laing. De verbreding van de A15 is een DBFM contract waarbij A-Lanes A15 naast het ontwerp, de bouw en financiering ook het onderhoud voor 25 jaar uitvoert. Op het traject tussen de Maasvlakte en het Vaanplein is de A15 verbreed van 2x3 naar 2x5 rijstroken. Om dit te kunnen realiseren moesten zowel de bestaande aardebanen en kunstwerken verbreed worden alsook nieuwe aardebanen en kunstwerken worden aangelegd. Door de complexe fasering bij een aantal knooppunten vormden tijd en ruimte vaak een uitdaging. Bij de knooppunten Vaanplein (ref. [3]) en Benelux vormden paalmatrasystemen een goede oplossing om gebrek aan tijd en ruimte het hoofd te kunnen bieden. In dit artikel worden ontwerp en uitvoering van het paalmatrasysteem 'Benelux' besproken, waarbij voor het ontwerp een vergelijking wordt gemaakt tussen de oude CUR 226:2010 en de nieuwe CUR 226:2016.

Situatie

Het knooppunt Beneluxplein verbindt de A15 met de A4. Eén van de nieuw te realiseren kunstwerken in dit knooppunt betreft een pergola constructie om de kruising van de afrit A15 naar de A4 met de nieuwe noordelijke parallelrijbaan van de A15 te verwezenlijken. De berekende eindzettingen voor de toeritten naar het te realiseren kunstwerk bedroegen circa 3 meter. Aangezien de locaties voor deze toeritten bij start van de aanleg ingeklemd lagen tussen een grote waterpartij en de huidige afrit A15-A4 die open diende te blijven, was er te weinig ruimte voor een oplossing met een traditionele voorbelasting. Om de toeritten binnen de beperkte ruimte te kunnen realiseren zijn zowel aan de oost- als aan de westzijde van de Pergola con-

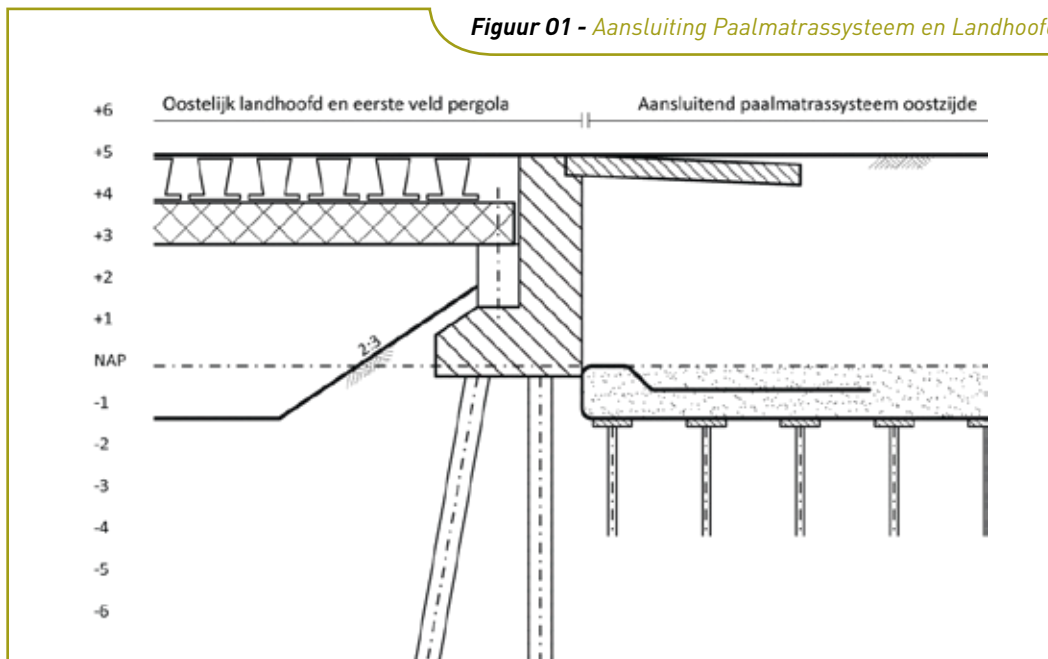
structie paalmatrasystemen toegepast (zie Figuur U1).

Ontwerp van het paalmatrasysteem Geometrie paalmatrasysteem en landhoofden Pergola

De paalmatrasystemen sluiten aan op de laaggelegen landhoofden van de Pergola. In figuur 01 is de aansluiting van het paalmatrasysteem op het oostelijk gelegen landhoofd van de Pergola weergegeven. Bij de aansluitingen op de landhoofden heeft de ophoging op het paalmatrasysteem een hoogte van ongeveer 6 à 7 meter (respectievelijk bij het oostelijk- en

westelijk landhoofd). Bij de aansluitingen op de aardebanen is deze afgenomen tot 2,5 meter. Bij het afstemmen van de ontwerpen van landhoofden en paalmatrasystemen is rekening gehouden met de schoorstanden van de palen onder de landhoofden, zodat hier geen conflicten zouden ontstaan (achterste rij palen van het landhoofd zijn te lood geplaatst). Daarnaast is overwogen de landhoofden te ontlasten door de ophoging van de terpen achter de landhoofden in gewapende grond uit te voeren. Het bleek echter logistiek en kostentechnisch efficiënter om de horizontale gronddruk uit de ophoging door de betonconstructie van de landhoofden

Figuur 01 - Aansluiting Paalmatrasysteem en Landhoofd



Tabel 1 Geometrie Paalmatrasystemen

	Paalmatras oostzijde	Paalmatras westzijde
Oppervlakte	2764 m ²	4489 m ²
Aantal palen	538	864
Hoogte	2,5 olopend naar 6,1 m	2,5 olopend naar 6,8 m
Paalstramien	2,25 x 2,25 m	2,25 x 2,25 m
Paaldoorsnede	0,29 x 0,29 m	0,29 x 0,29 m
Afmeting paaldeksel	0,75 x 0,75 m	0,75 x 0,75 m

Samenvatting

Voor de verbreding van de A15 tussen de Maasvlakte en het Vaanplein is bij knooppunt Benelux gekozen voor de aanleg van een paalmatras-systeem.

Het ontwerp is gemaakt conform CUR 226:2010, waarmee een gedegen ontwerp wordt gemaakt. Vergelijking van dit ontwerp met de herziene CUR 226:2016 geeft aan dat dit een mogelijke optimalisatie met kortere paallengtes geeft, maar dat er geen significante verschillen optreden

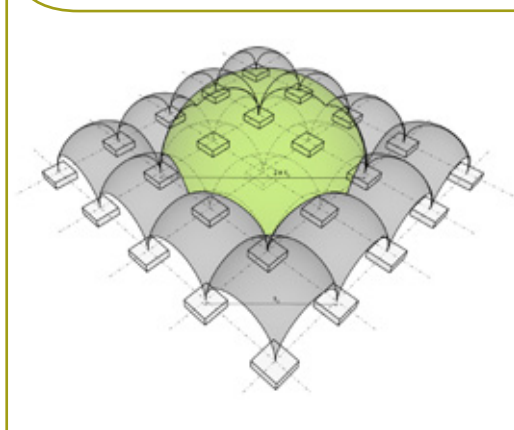
voor de toegepaste geokunststofwapening.

Bij de uitvoering van het paalmatras-systeem bleek echter dat een gedegen ontwerp nog geen onvoorwaardelijke garantie is voor een probleemvrije uitvoering. Ten gevolge van een aantal onvoorziene uitdagingen was het daarom noodzakelijk om het oorspronkelijke ontwerp aan te passen met behulp van een aantal inventieve aanvullende constructie elementen.

Tabel 2 Geometrie Paalmatras-systemen

Paalmatras	Metreering as MLVM	Aantal palen	Funderingsniveau niet-stijf matras (CUR226:2010)	Funderingsniveau stijf matras (CUR226:2016)	Reductie paal-lengte
Oost	0150 – 0235	195	NAP -19,5 m	(niet stijf)	-
	0235 – 0270	343	NAP -23,75 m	NAP -23,25 m	0,50 m
	0410 – 0445	126	NAP -21,50 m	NAP -21,50 m	0,75 m
	0445 – 0465	161	NAP -22,75 m	NAP -22,00 m	0,75 m
West	0465 – 0495	153	NAP -21,75 m	NAP -21,25 m	0,50 m
	0495 – 0555	294	NAP -21,25 m	NAP -21,00 m	0,25 m
	0560 – 0580	130	NAP -19,75 m	NAP -19,75 m	0,00 m

Figuur 02 - Drukboog bij paaluitval Paalmatras



op te laten nemen. In tabel 1 is een samenvatting gegeven van de geometrie van de paalmatras-systemen.

Ontwerp van de palen

De draagkrachtige pleistocene zandlaag waarop de paalmatras is gefundeerd is op de projectlocatie op 15 m onder maaiveld gelegen. Voor de fundering is gekozen voor geprefabriceerde betonpalen met een afmeting van 290 x 290 mm. Aangezien het projectgebied aan een autonome bodemdaling van enkele cm per jaar onderhevig is, is in het ontwerp van de palen een volledige negatieve kleefbelasting meegenomen. Conform de CUR 226:2010 (ref. [1]) dient voor de draagkrachtberekening van de palen de matras als

een niet-stijf bouwwerk te worden beschouwd. Conform NEN 9997-1 dient dus gerekend te worden met de bijbehorende correlatiefactoren voor ξ . In de herziene richtlijn CUR 226:2016, mag bij dikkere matrassen, waar bij paaluitval nog een volledige boog gevormd kan worden (zie ook figuur 02), de matras als stijf bouwwerk worden beschouwd. Voldaan moet worden aan de verhouding: $H \geq 0,66 * 2 * s_d - d_{eq}$ waarin H de hoogte van de ophoging is, s_d de diagonale hart-op-hart afstand van de palen en d_{eq} de equivalente diameter van de paaldeksel. Voor de paalmatras Benelux zou dit er op neer zijn gekomen dat ongeveer 40% van het oostelijk gelegen matras en het gehele westelijk gelegen matras als stijf bouwwerk beschouwd hadden mogen worden. In tabel 2 is een samenvatting gegeven van het paalontwerp zoals toegepast conform de CUR226:2010. Ter vergelijking is het paalontwerp zoals dat conform de CUR226:2016 zou zijn ook weergegeven.

Te zien is dat conform de herziene richtlijn een optimalisatie in paallengte van gemiddeld ongeveer 0,50 m mogelijk is door de matras als stijf bouwwerk te beschouwen.

Ontwerp van het matras

De matras is ontworpen conform de CUR 226:2010 (ref. [1]). Het hierin gehanteerde model voor boogwerking is het schalenmodel van Zaeske (ref. [6]). In de herziene richtlijn CUR

226:2016 is overgegaan op het zogenaamde Concentric Arches model zoals ontwikkeld door Van Eekelen (ref. [7]). Hierbij zijn voor de ontwerprichtlijn door middel van uitgebreide statistische analyses een bijbehorende modelfactor en partiële factoren vastgesteld (van Duijnen et al., ref. [8]). Daarnaast zijn in de CUR226:2016 de aan te houden verkeersbelastingen in overeenstemming gebracht met de Eurocode en daarmee iets groter geworden. In tabel 3 is een samenvatting gegeven van het ontwerp van de geokunststofwapening zoals dat conform de CUR226:2010 is uitgevoerd voor het laagst en hoogstgelegen deel van de paalmatras. Daarnaast is ook het ontwerp van de geokunststofwapening conform de herziene richtlijn weergegeven.

Te zien is dat de berekende trekkrachten conform de herziene richtlijn iets kleiner zijn dan conform de oorspronkelijke richtlijn uit 2010. Het verschil is echter dermate klein dat dit geen significante reductie in sterkte van de toegepaste geokunststofwapening oplevert.

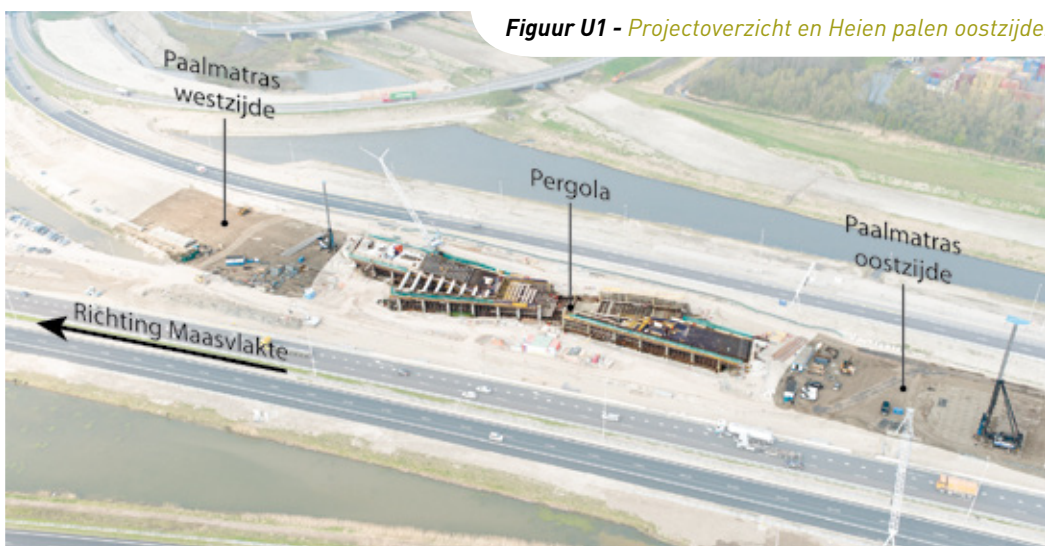
Van ontwerp naar uitvoering

Het oorspronkelijke ontwerp van de paalmatras-systemen is conform de CUR 226:2010 gemaakt en zo veel mogelijk afgestemd op alle mogelijke belastingcombinaties en de aan te houden faseringen. Voor het oostelijk gelegen matras was voldoende ruimte om het palenveld aan te kunnen brengen (zie figuur U1) en de matras-

Tabel 3: Overzicht ontwerp geokunststofwapening conform CUR 226:2010 en CUR 226:2016

		CUR226:2010	CUR226:2016
stramien palen (h.o.h.)	[m]	2,25 x 2,25	
doorsnede paaldeksel	[m]	0,75 x 0,75	
hoek inw. wrijving matrasvulling en ophoging	[o]	40	
vol. gew. matrasvulling en ophoging	[kN/m ³]	19,0	
MLVM-0420 Hoogte H = 6,75 m			
verkeersbelasting op niveau b.k. paaldeksel*	[kPa]	8,8	9,3
gevonden rek einde gebruiksfase (BGT)	[%]	4,3	4,9
rekenwaarde trekkracht (UGT, RC1 na 120 jaar)	[kN/m ²]	176	165
toeslag spreidkracht	[kN/m ²]	142	122
MLVM-0170 Hoogte H = 3,15 m			
verkeersbelasting op niveau b.k. paaldeksel*	[kPa]	15,6	25,6
gevonden rek einde gebruiksfase (BGT)	[%]	4,6	4,0
rekenwaarde trekkracht (UGT, RC1 na 120 jaar)	[kN/m ²]	129	130
toeslag spreidkracht	[kN/m ²]	42	42

* het betreft hier de wiellasten bovenop de constructie gespreid naar paaldekselniveau



Figuur U1 - Projectoverzicht en Heien palen oostzijde.

constructie op te bouwen. Tijdens de voorbereiding van de uitvoering van de paalmatras aan de westzijde werd echter op een aantal onvoorziene uitdagingen gestuit, waardoor het oorspronkelijke ontwerp niet zondermeer kon worden uitgevoerd.

Uitvoering Uitdagingen

De paalmatras is gelegen in een gebied met mogelijk Niet Gesprongen Explosieven (NGE). Voordat de palen geheid kunnen worden was het daarom noodzakelijk om het gebied middels een dicht stramien nader te onderzoeken. Ten gevolge van een, aan de noordzijde van de paalmatras gelegen, faseringsrijbaan bleek het niet mogelijk het complete NGE onderzoek uit te voeren. Hierdoor konden een aantal palen aan de

noordzijde van het westelijk gelegen paalmatras niet geheid worden zonder aanvullende maatregelen (zie figuur U2). Door het vervallen van deze palen dreigde een deel van de asfaltconstructie onvoldoende ondersteund te worden met mogelijk langsscheuren in het asfalt als gevolg, zie figuur U3.

Daarnaast diende op circa 10 meter afstand van de paalmatras een nieuwe duiker te worden aangebracht, waardoor de geplande voorbelasting waarop de paalmatras aan de westzijde aansloot niet kon worden aangebracht (zie figuur U4). Gezien de geringe afstand tussen de paalmatras en de duiker, en de hiermee gepaard gaande raakvlakken, moesten deze gezamenlijk worden beschouwd en is hiervoor een geïntegreerd nieuw ontwerp gemaakt.

Mogelijke oplossingen

Om de uitdagingen op te lossen zijn meerdere oplossingsrichtingen beschouwd zoals voor de paalmatras: toepassen van EPS; verleggen van het horizontale alignement; aan de noordzijde bij kant asfalt de ophoging begrenzen met een damwand of een L-muur, waardoor de druklijn vanaf kant asfalt wel boven de paalmatras blijft; plaatsen van een afschermende damwand om meer palen te kunnen heien; ander (niet geheid) paaltype toepassen. En voor de duiker zijn de beschouwde oplossingen: toepassen van EPS; doortrekken van de paalmatras over de duiker; betonnen overkluizing.

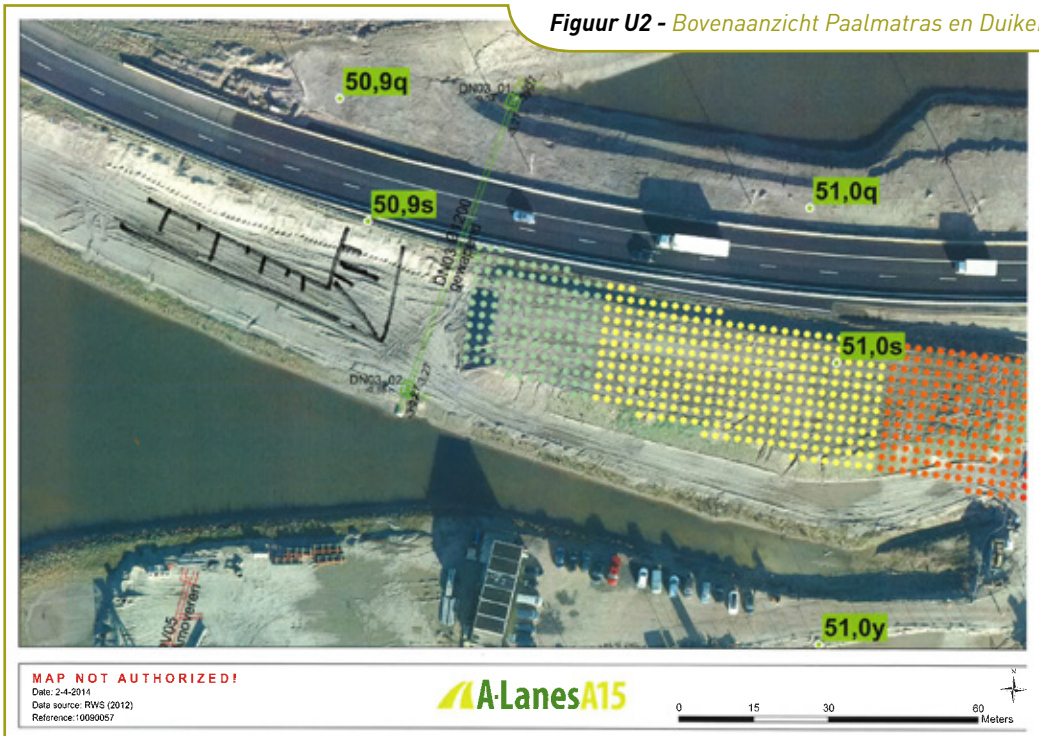
Een aantal van deze beschouwde oplossingen bleek echter niet uitvoerbaar of gaven grote aanvullende problemen ten gevolge van extra raakvlakken. Zo moest bij het verleggen van het horizontale alignement een aanvullende ophoging tot honderden meters voorbij de duiker worden aangebracht en verschoof zelfs een verderop gelegen snijpunt met een andere rijbaan. Hierdoor moest ook de locatie en het ontwerp van een groot aantal portalen worden aangepast, hetgeen weer veel nieuwe problemen op zou leveren.

Uiteindelijke oplossing

Het was daarom noodzakelijk om een aantal van de mogelijke oplossingen te combineren tot een nieuw geïntegreerd ontwerp:

1. Paalmatras aan de westzijde met 5 paalstramien (circa 10 m) verkorten en vervangen door een ophoging met EPS.
2. Een aantal palenrijen aan de noordzijde laten vervallen en de ophoging aan de noordzijde ter plaatse van kant asfalt begrenzen met een L-muur, zie figuur U5.
3. Ten behoeve van het heien van de palen een afschermende damwand aanbrengen tot in het pleistocene zand, welke ook gebruikt wordt voor de noodzakelijke bouwput voor de paalmatras.
4. Ophoging boven de duiker uitvoeren met EPS.

Ad 1. De benodigde ophogingen richting het einde van de paalmatras worden steeds geringer, waarbij de nieuw aan te leggen rijbaan steeds meer op een reeds bestaande ophoging ligt. Vanaf een bepaald punt ligt de benodigde ophoging onder de rijbaan geheel op deze reeds aanwezige ophoging en hoeft alleen voor een klein deel van de aan te brengen berm extra opgehoogd te worden. Verder is ter plaatse van het uiteinde van de paalmatras wel een voorbelasting aangebracht, waardoor een gedeelte van de

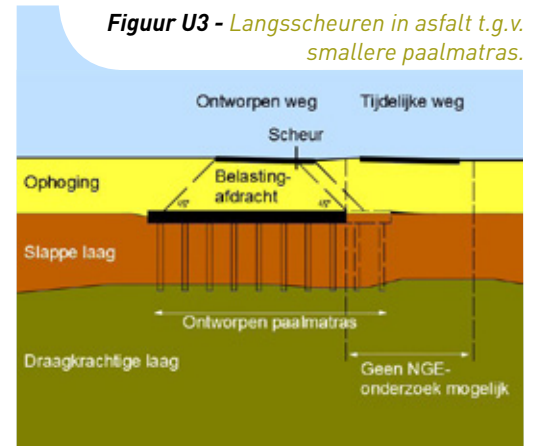


te verwachten zettingen reeds is opgetreden, zie figuur U4. De combinatie van de aanwezigheid van de bestaande ophoging, de minder grote benodigde ophogingen en de aangebrachte voorbelastingen maakt het mogelijk om een deel van de paalmatras te laten vervallen en uit te voeren met EPS.

De totale gewichtstoename van deze EPS ophoging en de funderingslagen met asfalt, met een dikte van 1,5 m, mag niet meer eindzettingen geven dan de zettingen welke reeds zijn opgetreden ten gevolge van de aangebrachte voorbelastingen. Hierdoor zullen de nog te verwachten restzettingen na het aanbrengen van de EPS constructie minimaal blijven. Aan de hand van de uitgevoerde zakbaakmetingen en aanvullende zettingsberekeningen is de minimale dikte van de EPS berekend. Hieruit blijkt dat bij het

toepassen van een EPS constructie van 1,8 m dik de belastingtoename ongeveer 14 kPa is, oftewel een equivalente ophoging van circa 75 cm zand hetgeen minder is dan de aangebrachte voorbelastingen. Deze belastingtoename geeft berekende eindzettingen van circa 10 à 15 cm, hetgeen minder is dan de met de zakbaken gemeten opgetreden zettingen van circa 20 à 25 cm ten gevolge van de aangebrachte voorbelastingen.

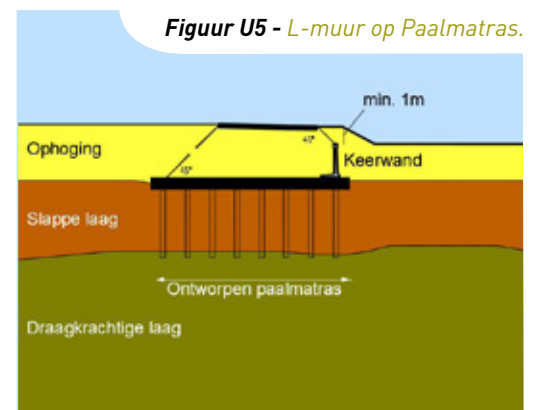
Ad 2. Door het laten vervallen van een aantal van de meest noordelijke palenrijen komt de druklijn onder 1 : 1 vanaf de noordelijke kant asfalt niet meer op de paalmatras uit, zie figuur U3. Om dit op te vangen wordt een L-muur op de paalmatras geplaatst, waardoor de belastingen uit het asfalt toch worden gedragen door de paalmatras, zie figuur U5. Over deze L-muur staat geen kerende hoogte, waardoor hier slechts minimale



horizontale krachten op worden uitgeoefend. De boven belastingen uit de rijbaan worden hierdoor rechtstreeks naar de onderliggende paalmatras afgedragen.

Ad 3. Uit een kostenanalyse blijkt dat het aanbrengen van een afschermdende tijdelijke damwand tot in het pleistoceen en de palen heien goedkoper is, dan het toepassen van een ander trillingvrij paalttype welke tot dicht bij het uitgevoerde NGE gebied kan worden aangebracht. Dit mede ten gevolge van het feit dat bij trillingvrije palen de diameter van de palen groter moet worden in verband met een lagere schachtwrijvingsfactor α_s , waardoor ook het ontwerp van de paaldeksels voor de paalmatras aangepast moet worden. Verder is het voor het maken van de paalmatras al noodzakelijk om een bouwput te maken met een damwand, welke alleen langer moet worden gemaakt tot in het pleistocene zand om ook als afscherming van het niet onderzochte NGE gebied te kunnen dienen. Hierdoor wordt de damwand een AZ36 met een lengte van 19 m, voor een kerende hoogte van circa 3,75 m, waarbij ook rekening is gehouden met een horizontale aanrijdbelasting vanuit de in gebruik zijnde faseringsweg.

Ad 4. Ter plaatse van het sluitgat boven de duiker moet een gewicht neutrale constructie worden aangebracht met EPS, aangezien hier geen



voorbelasting heeft gelegen en het niet wenselijk is dat de reeds aangebrachte duiker zettingen ondergaat. Uit aanvullende gewichtsberekeningen blijkt dat bij het toepassen van een EPS constructie van 2,8 m dik de belastingtoename ongeveer – 8 kPa is, oftewel een geringe afname en daarmee gewichtsneutraal.

Aandachtspunt bij de EPS constructie zijn nog de overgangen tussen de verschillende diktes en naar de naastgelegen gewone aardebaan. Voor de overgangen tussen de verschillende EPS diktes is uitgegaan van een talud van 1 : 5 en voor de overgang naar de aardebaan van een talud van 1 : 10, zie figuur U6. Dit conform CROW publicatie 325 Lichte ophoogmaterialen in de wegenbouw ref. [9].

Het eindresultaat van het geïntegreerde nieuwe ontwerp voor zowel het uiteinde van de paalmatras als voor de ophoging boven de duiker, is weergegeven in figuur U5, U6 en U7, met een principeschets van de L-muur op de paalma-

tras en een langs- en dwarsdoorsnede van de ontworpen EPS constructie. Hieruit blijkt dat de gevonden oplossing bestaat uit het combineren van meerdere verschillende principe oplossingen, om te komen tot het uiteindelijk benodigde maatwerk.

Conclusie

Het ontwerp van de paalmatrasystemen 'Benelux' is gemaakt conform de CUR 226:2010, waarmee een gedegen en betrouwbaar ontwerp kan worden gemaakt. Herberekening van dit ontwerp conform de herziene CUR 226:2016 resulteert voor de betreffende paalmatrasystemen bij een voldoende hoge ophoging op het matras in een mogelijke optimalisatie met betrekking tot de paallengtes, maar lijkt tevens aan te geven dat er geen significante reducties zijn in de benodigde sterkte van de toegepaste geokunststofwapening.

Uit de ervaringen bij de uitvoering van de paalmatrasystemen 'Benelux' blijkt dat een gede-

gen ontwerp nog geen onvoorwaardelijke garantie is voor een probleemvrije uitvoering. Ten gevolge van onvoorzien uitdagingen kan het noodzakelijk zijn dat het oorspronkelijke ontwerp aangepast moet worden. De constructie van de paalmatrasystemen is echter robuust genoeg om de noodzakelijke aanpassingen van het ontwerp met behulp van een aantal inventieve aanvullende constructie elementen op te kunnen vangen.

Referenties

- [1] CUR 226:2010. Ontwerprichtlijn paalmatrasystemen, Stichting CURNET, Gouda, ISBN 978-90-376-0518-1.
- [2] CUR 226:2016. Ontwerprichtlijn paalmatrasystemen – Herziening CUR-rapport 226, SBRCURnet, Gouda, artikelnr.:
- [3] Brugman, M.H.A., Vries, de, E.W., Brok, C.A.J.M. 2015. Bridge abutment foundation on a basal reinforced piled embankment, Proceedings of the XVI ECSMGE, ISBN 978-0-7277-6067-8, pp 241 - 246.
- [4] Van Eekelen, S.J.M. 2015a. De 2015 update van de Nederlandse SBRCURnet Ontwerprichtlijn Paalmatrasystemen, GeoTechniek december 2015, pp 34 – 38.
- [5] NEN-EN 9997-1:2011. Geotechnisch ontwerp van constructies – Deel 1: Algemene regels, Nederlands Normalisatie-instituut, Delft.
- [6] Zaeske, D., 2001. Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über Pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Uni Kassel, Heft 10, Februar 2001.
- [7] Van Eekelen, S.J.M., 2015b. Basal Reinforced Piled Embankments. Proefschrift TU Delft, ISBN 978-94-6203-826-4 (digitaal) of ISBN 978-94-6203-825-7 (papier).
- [8] Van Duijnen, P.G., Schweckendiek, T., Calle, E.O.F., Van Eekelen, S.J.M., 2015. Calibration of partial factors for basal reinforced piled embankments, In: Proceedings of ISGSR 2015 Risks, Rotterdam.
- [9] CROW Publicatie 325 2013. Lichte ophoogmaterialen in de wegenbouw, ISBN 978 90 6628 618 4.

