Gemeente Rotterdam

P085 - Reefbrug

Schetsontwerp gebruik oude windturbinebladen als hoofddraagconstructie

Versie 2.0







Van: PJ. Van der Laarse, L. Tromp, P. Dinai, MPAM. Verheijen, B. Kloeg, WD. Schutte, M. Mesfim

Datum: 1 oktober 2026

Cluster Stadsontwikkeling

Inhoudsopgave

1 Inleiding 3
2 Samenvatting 4
3 Oogsten bladen 5
3.1 Eerste specificatie benodigde bladen 5
3.2 Eerste verkenning beschikbare bladen 6
4 Schetsontwerpen 8
4.1 Concepten 8
4.2 Beoordelingscriteria schetsontwerpen 11
4.3 Oplossingen om kortere bladen geschikt te maken voor de overspanning 13
5 Constructieve haalbaarheid 14
5.1 Aanvullende metingen onderzoek haalbaarheid Enercon E40/3 14
5.2 Eenvoudige analytische beschouwing Enercon E40/3 14
5.2.1 Bepaling buigstijfheid 15
5.2.2 Inschatting maximale overspanning 18
5.2.2.1 Bepaling van de mogelijke maximale overspanning voor de eenvoudig opgelegde balk 19
5.2.2.2 Bepaling van de mogelijke maximale overspanning voor de eenzijdig ingeklemde balk 21
5.2.2.3 Beoordeling van de sterkte 21
5.2.2.4 Conclusie constructieve haalbaarheid Enercon E-40/3 23
5.2.2.5 Aanbeveling 23
6 Risicosessie 24
7 Tweede verkenning beschikbaarheid en definitieve bladkeuze 27
8 Schetsontwerp geselecteerd blad (LM 25.5) 30
9 Projectvervolg 32
9.1 Materiaalonderzoek 32
10 Bijlagen 34

1 Inleiding

De Reefbrug (beheercode P085) is een houten fietsvoetgangersbrug in de Rotterdam in de wijk Zuidwijk. De brug dient te worden vervangen, omdat de bestaande constructie technisch einde levensduur is. De vervanging van de brug wordt namens Stedelijk Beheer gebruikt als casus voor het hergebruiken van afgeschreven windturbinebladen uit de windenergiesector als hoofddraag-constructie. Dit project leert de gemeente Rotterdam om circulair te bouwen in de GWW, draagt bij aan het behalen van Rotterdamse klimaatdoelstellingen en helpt met het oplossen van een bestaand afvalprobleem in de windenergiesector.

Dit rapport dient als eindproduct van de schetsontwerpfase voor de Reefbrug, zoals gedefinieerd in het Plan van Aanpak (P085_PvA_28-02-2024_def). Het volgt op de bureaustudiefase (P085_Bureaustudie_rapport_v1.1.pdf) waarin is bepaald dat het technisch haalbaar is om een brug te maken waarvan de hoofddraagconstructie bestaat uit gebruikte windturbinebladen.

Op basis van de opgedane kennis uit de bureaustudie is bepaald wat voor turbinebladen geschikt zijn voor de Reefbrug en wat voor constructie daarmee kan worden gemaakt.

** d.d. 1 oktober 2026; herziening tbv externe publicatie.

2 Samenvatting

In de SO-fase is het projectteam uitgebreid met dhr. ir. B. Kloeg, medeoprichter van het bedrijf InfraBlades en tevens verbonden aan de TU Delft. Dhr. Kloeg is recent afgestudeerd aan de TU Delft met als onderwerp voor de masterscriptie het hergebruik van turbinebladen voor (zwaar)verkeer bruggen. Naar aanleiding van de resultaten van zijn onderzoek is hij met een compagnon een startup begonnen om het concept commercieel te gaan aanbieden. Dhr. Kloeg heeft veel kennis van turbinebladen in GWW-toepassingen en marktkennis. Hij zal tijdens het verdere verloop van het project als adviseur namens de gemeente betrokken blijven en namens de TU Delft het materiaalonderzoek uitvoeren.

De samenwerking met Blade-Made als intermediair t.b.v. het oogsten van bladen heeft geleid tot het verkrijgen van geschikte bladen. Als eerste is er een poging gedaan om relatief korte 19 m bladen – die reeds bij Blade-Made in opslag waren – te benutten. Dit is in afwijking van de bevindingen van de bureaustudie, namelijk dat een blad van 35 m nodig zou zijn. Maar bezichtigingen van zulke bladen (+/-35 m) hebben uitgewezen dat zulke bladen te groot zijn en niet ruimtelijk inpasbaar in de omgeving. Bovendien is het zo dat als de Reefbrug uitgaat van (te) grote bladen dan zal het concept niet veelvuldig kunnen worden gereproduceerd en dat hindert de adaptatie van het hergebruik van windturbinebladen en de circulaire transitie. Op basis van korte 19 m bladen zijn diverse schetsontwerpen opgesteld. Een kort blad is ook in doorsnede kleiner, wat gunstig is voor de inpassing in de omgeving. De draagkracht van de doorsnede is echter ook geringer. Met name de draagkracht van de tip van het blad is gering, terwijl de tip in dit geval wel nodig is voor de oplegging. Naar aanleiding van nader onderzoek naar benodigde versterkingen (zoals bijv. steunpunten) en op basis van de risicosessie is besloten dat grotere bladen van 25 m benodigd zijn. Daarop is gezocht naar bladen met een lengte van ca. 25 m te zoeken. Bladen van 25 m vormen een goede middenweg tussen zo klein mogelijk en toch voldoende robuust. Het eerste type blad van ca 25 m bleek ongeschikt te zijn, omdat de draagconstructie uit hout bestaat, wat onzekerheden met zich meebrengt voor de restlevensduur en minder besparingen van milieu-impact met zich meebrengt. Uiteindelijk is in het blad type LM 25.5 (NM52/900) het juiste blad gevonden, met composiet draagconstructie. Drie bladen van het type LM25.5 zijn beschikbaar bij Iver in het Friese Franeker. Deze bladen zijn vastgelegd en worden tot nader order opgeslagen in Franeker.

In de SO-fase is de inpassing van deze bladen onderzocht. De bladen lijken goed inpasbaar in de omgeving, rekening houdend met de randvoorwaarden van toegankelijkheid, veiligheid, interactie met objecten in de omgeving en eisen van het waterschap. Nadere afstemming met Stedenbouw/Landschap blijft een aandachtspunt voor het Voorlopig Ontwerp.

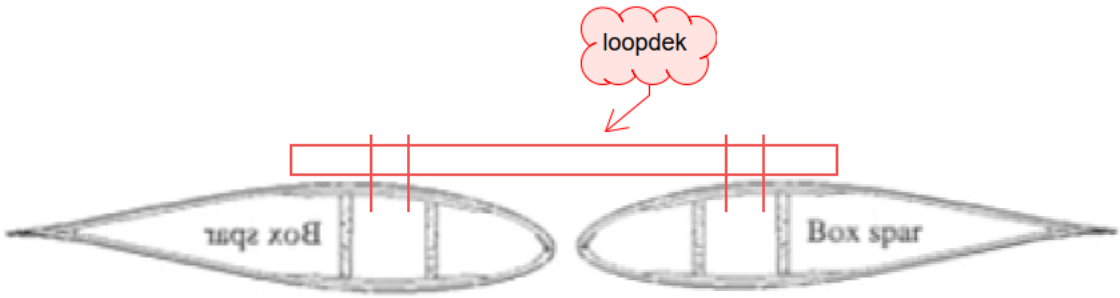
In deze schetsontwerpfase zijn mogelijke configuraties verkend en oplossingen geformuleerd voor de opleggingen (verlengd steunpunt of inklemming), eventuele tussensteunpunt, en al dan niet versterkingen van de leuningen, om met de windturbinebladen tot een functioneel en veilig, inpasbaar brugontwerp voor de Reefbrug te kunnen komen. In de hiernavolgende Voorontwerpfase worden de bladen onderzocht op constructieve opbouw en mechanische eigenschappen. Op basis van de resultaten van deze onderzoeken wordt het constructieve ontwerp in hoofdlijnen vastgesteld. Het Voorontwerp biedt ook voldoende aanknopingspunten om met de Welstandscommissie tot overeenstemming te komen over het uiterlijk van de brug. De materiaaltesten worden uitgevoerd bij de TU Delft. Het exacte testprogramma wordt door het projectteam vastgesteld op basis van belang voor de constructie bij aanvang van de Voorontwerpfase.

3 Oogsten bladen

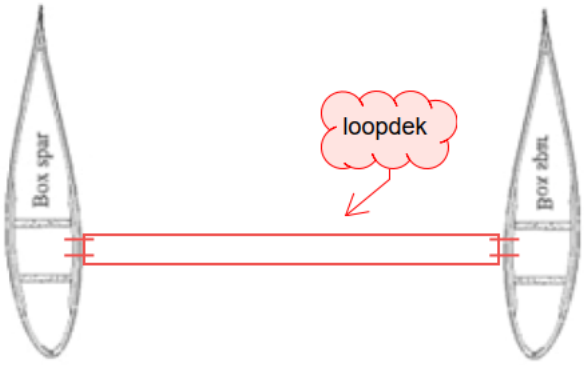
3.1 Eerste specificatie benodigde bladen

Op basis van de bureaustudie is bepaald dat een blad van 30-40 m als basis zou moeten dienen voor de Reefbrug met een overspanning van 19 m. Het uitgangspunt bij deze aanname is dat 1/3 van een blad niet constructief gebruikt wordt, anderszins hergebruikt wordt of afval wordt. De doorsnede die richting de tip van het blad steeds kleiner wordt heeft voor het laatste derde deel te weinig draagkracht.

Om tot een specificatie van het gewenste blad te komen is verder gekeken naar de oriëntatie. Een turbineblad heeft in de doorsnede meestal twee stukken massief composiet (spar caps), verbonden door één of twee dwarskrachtschotten (shear webs). Samen fungeert het als buigligger. De bladen kunnen als ligger *flapwise* (plat, fig. 1) of *edgewise* (rechtop, fig. 2) worden gebruikt. Flapwise oriëntatie sluit aan bij de manier waarop het blad is ontworpen. Een flapwise toepassing faciliteert eerder een dek óp het blad in plaats van ertussen. Door het blad edgewise toe te passen wordt de sparcap-shear web combinatie om de zwakke as belast, wat nadelig is, als de bijdrage van de neus en trailing edge (scherpe achterrand vleugelprofiel) niet wordt meegenomen. Het voordeel van edgewise is echter dat de constructiehoogte onder het loopdek kan worden gereduceerd. Dat is wenselijk omdat de beschikbare ruimte onder de brug ter plaatse van de watergang beperkt is. Bij edgewise toepassing en geringe ruimte onder het dek, steekt de bladconstructie boven het dek uit. Een grotere doorsnede is moeilijker inpasbaar en levert een meer opgesloten gevoel op voor de bruggebruiker. Een slanker blad is eenvoudiger inpasbaar in de omgeving. Bij een edgewise configuratie worden de neus en trailing edge van het blad effectiever benut en zwaarder belast. Uit de bureaustudie is gebleken dat sommige bladen meer materiaal in de neus hebben, wat gunstiger is in geval van edgewise toepassing.



Figuur 1 – Oriëntatie bladen; flapwise



Figuur 2 – Oriëntatie bladen; edgewise

De bladen worden betrokken via het bedrijf Blade-Made als intermediair op basis van het volgende eisenpakket, vastgesteld op basis van voorgaande verkenning en de bureaustudie (tabel 1):

Eisen en wensen windturbinebladen project Reefbrug	Gemeente Rotterdam	
v1.0		
datum	26-9-2024	
Eisen	**Opmerkingen**	
Bruglengte 18-19m	Uitgaangde van een overspanning van de brug van minimaal 17m - Evt voor platte toepassing: GE37 voldoet prima. Koorde GE 37 is orde 3.5 - 4 m en dikte verlopend van 1.22m-650mm- 450mm - 350mm. Typisch sparcap area: 30mm x 350mm, bij dikte blad is	
Drie identieke wieken	Uit zelfde productiebatch en/of zelfde windveld	
Buiten reguliere vermoeiingsveroudering mogen de bladen niet beschadigd zijn.	Schades zoals impactschade, schades die te herleiden zijn tot sloop en transport, etc. (constructieve schades).	
Wensen	**Opmerkingen**	**Prioriteit**
Bladen hebben een constructieve aerofoil (voorrand)	Zoals LM-bladen. Dit geeft ontwerper de optie om bladen eventueel ook edgewise te gebruiken	1
Gebruikshistorie van de bladen is bekend	Meer duidelijkheid over reststerkte	2
Bladen komen uit de regio Rijnmond of zo dichtbij mogelijk	Transport heeft grote impact op milieulast	3
Bladen die nog niet de volledige theoretische levensduur hebben gehad. Blad zo jong mogelijk.	Jonger blad geeft langere restlevensduur en grotere reststerkte	4
Land-based wieken in plaats van sea-based wieken	Bladen die op zee zijn gebruikt hebben meer schade	5
Ontwerpdata van de bladen is beschikbaar	Minder reverse-engineering nodig	6
Zo recht mogelijke bladen	Bladen die zo min mogelijk kromming (verdraaiing) hebben geven de meeste ontwerpvrijheid	7

Tabel. 1 – Eisenpakket oogsten bladen

3.2 Eerste verkenning beschikbare bladen

Blade-Made heeft in eerste instantie (feb 2025) diverse bladen voorgesteld (tabel 2):

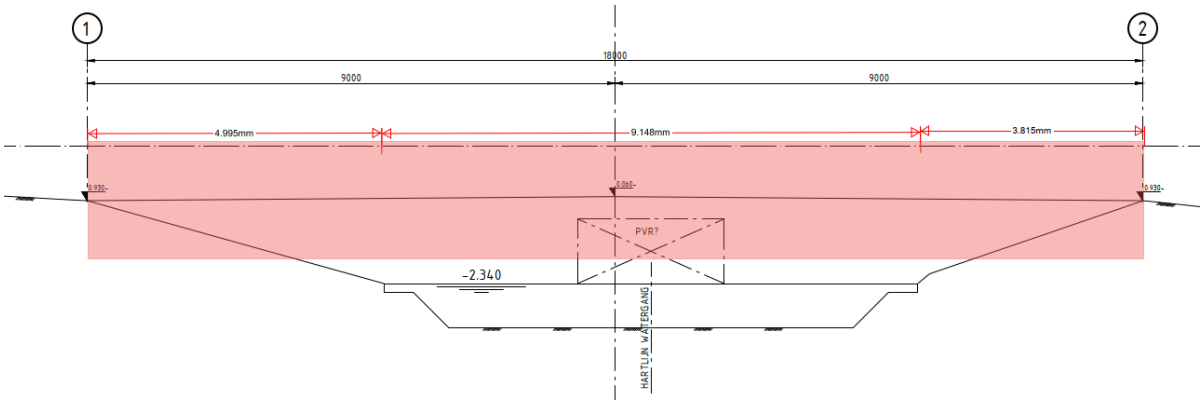
Type	Lengte	Bouwjaar	Beschikbaarheid
Enercon E-40/3 (OF E-40/500)	19,13m (incl. tip)	1998	Direct
NEG Micon NM80	38.8 m	2004	Direct
Vestas V66	33m	2000 (+/-)	Direct
Vestas V52, 79x	25.3m	Onbekend	Nog niet geoogst
NM54/950, 45x	±26.5m ?	Onbekend	Nog niet geoogst

Tabel 2 – Voorgestelde bladen Blade-Made

In lijn met de bureaustudie was op de opslaglocatie van Blade-Made was de NEG Micon NM80 (fig. 3) te bezichtigen. Deze bladen met een lengte van 38,8 m hebben aan de wortel waar ze vastzitten aan de as van de turbine een diameter van ca. 2 m. Het projectteam heeft geconcludeerd dat de grote doorsneden van +30 m bladen de bladen mogelijk ongeschikt maken voor de Reefbrug. Dit is een nieuw inzicht ten opzichte van de bureaustudie. Figuur 4 toont de 2 m diameter als rode balk in het profiel van de watergang.



Figuur 3 – NEG Micon NM80



Figuur 4 – Projectie diameter 2 m op projectlocatie

De Enercon E-40/3 is een kleiner type blad dat direct op de werf beschikbaar was, zie Figuur 5. Dit blad is 19,1 m lang en wijkt daarmee significant af van het advies uit de bureaustudie om een blad van +30 m te nemen. Besloten is de haalbaarheid van de Enercon E-40/3 nader te onderzoeken evenals de inpasbaarheid van de grotere bladen.



Figuur 5 – Enercon E-40/3

4 Schetsontwerpen

Op basis van eenvoudige modellen van het exterieur van het Enercon E40/3 (L = 19.1 m), LM37.3 (L = 37,25 m) en APX60 (L = 29 m) blad zijn door de architect een viertal schetsontwerpen opgesteld.

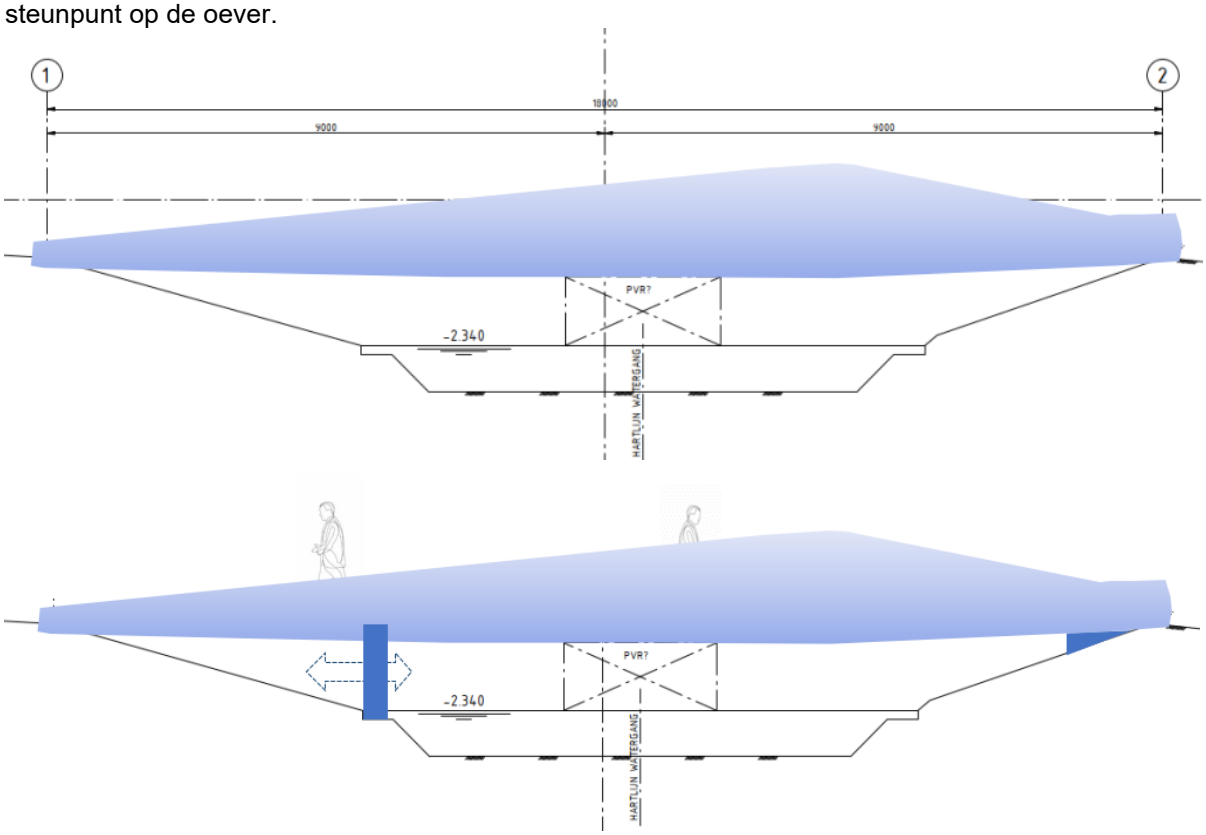
4.1 Concepten

Er zijn vier verschillende concepten opgezet:

1. **Puur** Hele wieken, compleet ongeschonden toegepast (blad Enercon E40/3)
2. **Kracht** Hele wieken, aan een oever verbonden (blad Enercon E40/3)
3. **Slim** Delen uit grote wieken als dekplaten verwerkt (blad LM 37.8)
4. **Lang** Wieken met overlengte die de brug in het landschap inleiden (blad APX60)

Puur

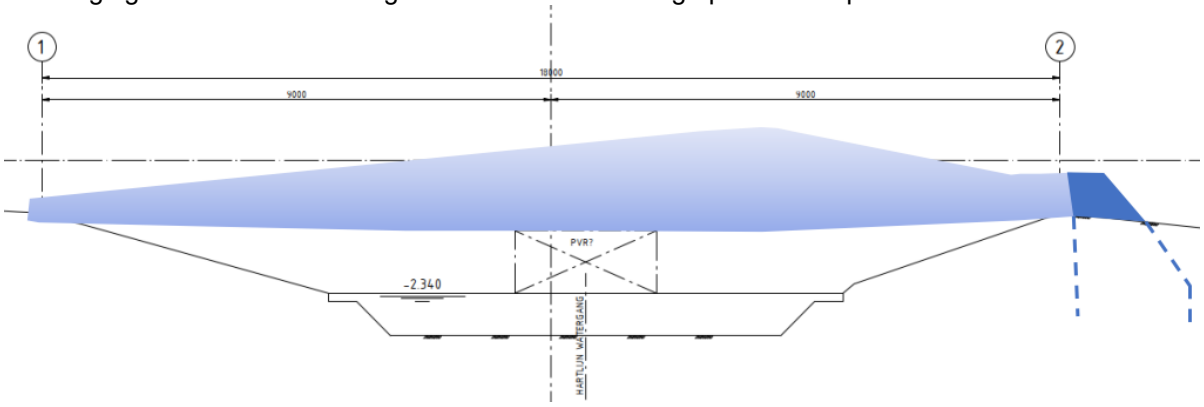
Concept Puur (fig.6) streeft een zo eerlijk mogelijke toepassing van wieken na. De vorm is gegeven, daar wordt niet op ingegrepen maar zo puur mogelijk gebruik van gemaakt. Dat dit een molenwiekenbrug is zal niemand ontgaan. De brug wordt – indien noodzakelijk –voorzien van een steunpunt op de oever.



Figuur 6 – Concept Puur - blad Enercon E40/3

Kracht

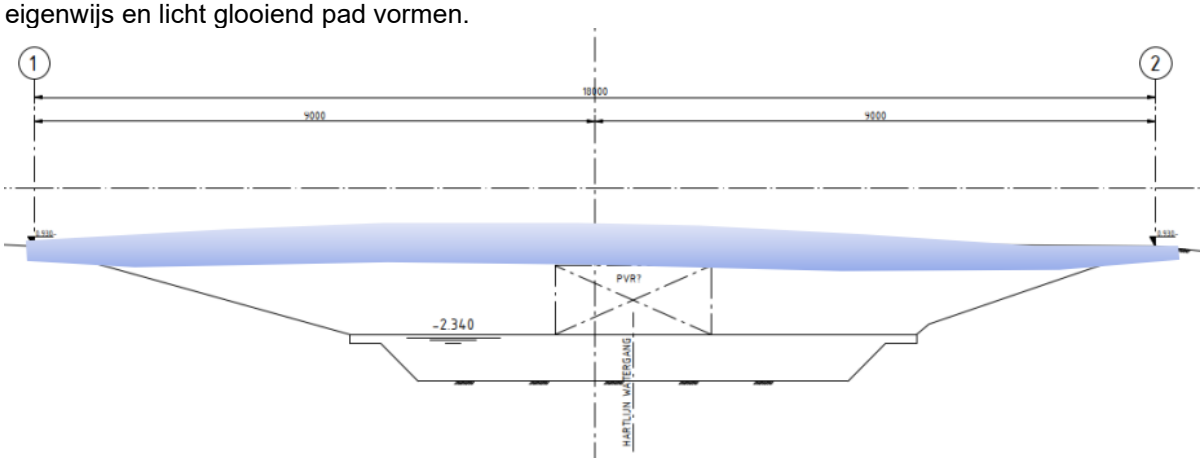
Bij concept Kracht (fig. 7) worden de wieken aan één oever vastgemaakt. De vorm is gegeven, daar wordt niet op ingegrepen maar zo puur mogelijk gebruik van gemaakt. Dat geldt ook voor de bevestiging. Kracht kan worden gezien als een uitbreiding op het concept Puur.



Figuur 7 – Concept Kracht - blad Enercon E40/3

Slim

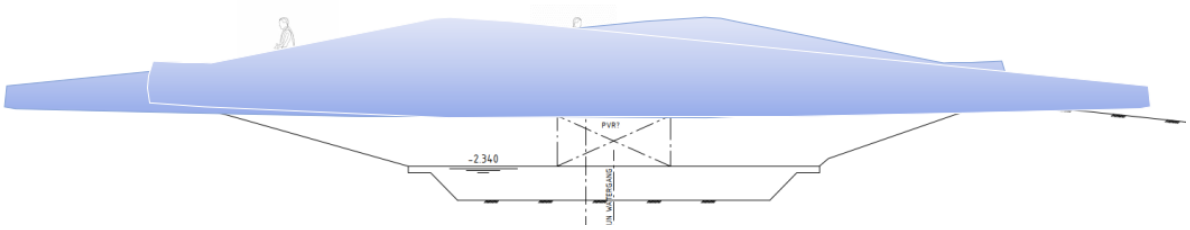
Concept Slim (fig. 8) maakt optimaal gebruik van de kracht die in de wieken verstopt zit. Door de juiste delen uit de wieken te selecteren worden sterke dekken geoogst die, aan elkaar bevestigd, een eigenwijs en licht glooiend pad vormen.



Figuur 8 – Concept Slim - blad LM 37.8

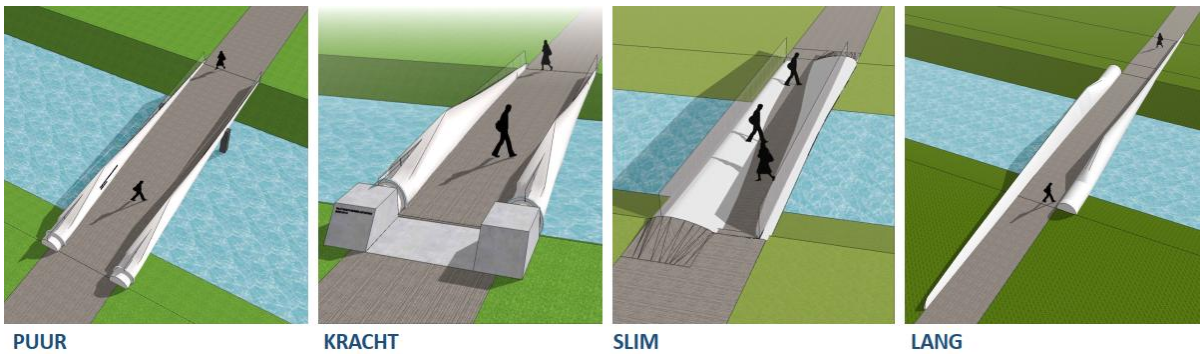
Lang

Concept Lang (fig. 9) maakt gebruik van de wieken zoals ze zich aandienen. Te lang betekent benutten van die overlengte. De wieken overspannen de watergang maar lopen in het landschap door. Ze leiden de wandelaars naar de brug.



Figuur 9 – Concept Lang – blad APX60

Er zijn samenvattend vier concepten (fig. 10) ontworpen op basis van de in tabel 2 weergegeven potentieel geschikte, beschikbare of vergelijkbare bladen. Voor een uitgebreidere weergave van de concepten wordt verwezen naar bijlage C.



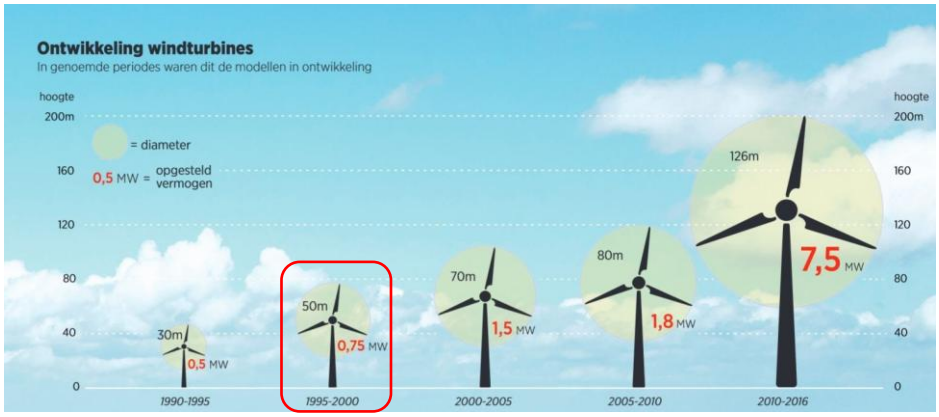
Figuur 10 – Overzicht brugconcepten

4.2 Beoordelingscriteria schetsontwerpen

De keuze voor een variant wordt gemaakt op basis van een trade-off tussen de constructieve haalbaarheid en de inpassing van de brug in zijn omgeving samen met de circulariteit. Hoe groter het blad, des te eenvoudiger is het om de constructieve haalbaarheid aan te tonen. Een groot blad is echter moeilijk in te passen in de omgeving of er kunnen slechts delen van een blad worden gebruikt, wat leidt tot afval of mogelijk laagwaardiger hergebruik.

Schaalbaarheid

Naast het realiseren van de Reefbrug heeft dit project als tweede doel kennis en techniek te ontwikkelen die het voor medeoverheden makkelijker maakt om windturbinebladen als draagconstructie te adapteren. Daarom moet in ogenschouw worden genomen wat het gemeentelijk areaal aan bruggen omvat. Uitgaande van fietsvoetgangersverkeer vallen de meeste bruggen in Nederland tussen de 10 m en 20 m lengte. De Reefbrug zit met 18 m al tegen de bovengrens van deze groep. Als de Reefbrug uitgaat van (te) grote bladen dan zal het concept niet veelvuldig kunnen worden gereproduceerd en dat hindert de adaptatie van het hergebruik van windturbinebladen en de circulaire transitie. Schaalbaarheid hangt ook samen met de eenvoud van het ontwerp en het zoveel mogelijk beperken van vele ingrepen (lokaal versterken bijv.), zodat efficiënt kan worden gebouwd. Ten slotte is het zo dat windturbines met een rotordiameter van ca. 50+ m de komende jaren ontmanteld zullen gaan worden en dat deze bladen van ca. 25+ m de komende jaren veel beschikbaar zullen zijn (fig. 11).



Figuur 11 – Overzicht ontwikkeling windturbines.

Inpasbaarheid

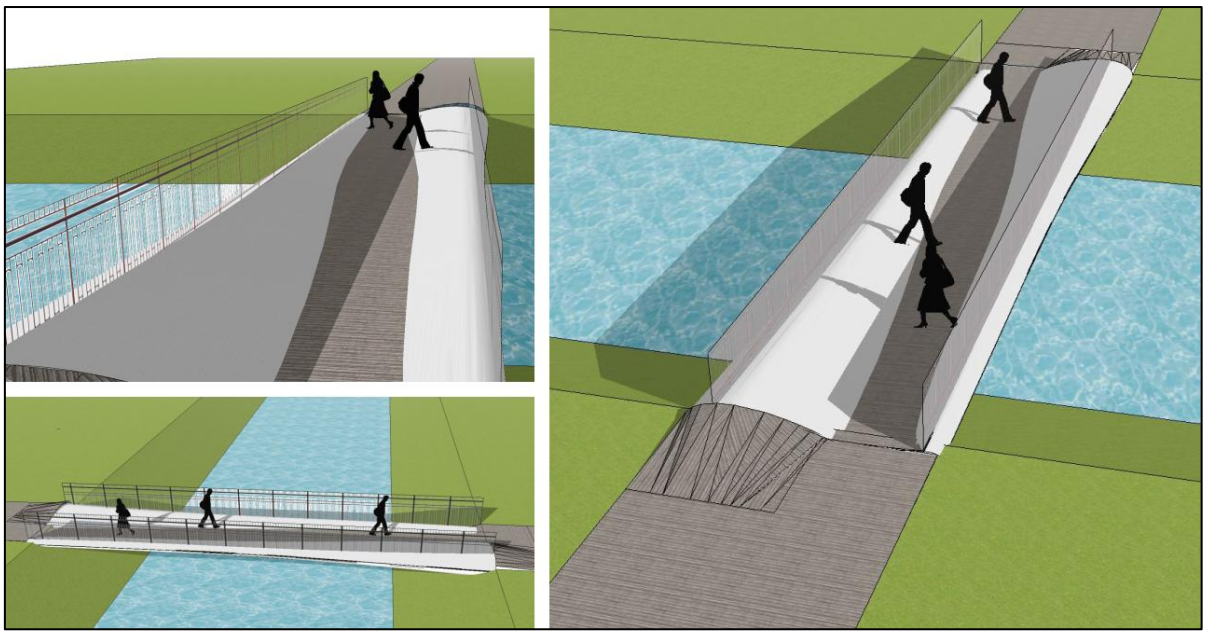
De constructiehoogte is zeer bepalend voor de inpasbaarheid. Edgewise toepassing heeft als voordeel dat de merendeel van het blad zich boven het loopvlak bevindt. Het nadeel ervan is dat de composietdelen dominant in beeld zijn. Bovendien wordt het blad in buiging belast om de zwakke as. Dit is constructief aan de ene kant optimaler omdat de hele doorsnede meewerkt, maar ook onzekerder omdat de neus en de trailing edge bij een blad vooral aerodynamisch zijn en niet altijd constructief uitgevoerd zijn. Het is constructief vergelijkbaarder met de belasting van een windturbineblad, en dus zekerder, om de bladen flapwise te gebruiken (zie ook figuur 1). Nadeel hiervan is echter dat het blad zich onder het dek bevindt, daardoor is dit concept moeilijker inpasbaar voor situaties waar het waterschap een minimale doorvaartenvelop hanteert, zoals bij de Reefbrug. Zie ter illustratie ook het concept van Polyproducts uit Werkendam (fig. 12).



Figuur 12 – Brugconcept Polyproducts

In het schetsontwerp Slim voor de Reefbrug wordt voorzien dat het dek dichter op het blad zit dan in de Polyproductsvariant, waardoor de constructiehoogte beperkt wordt. Het gevolg is dat het looppad de curve van het blad moet gaan volgen en dat de bladen een soort van overklimvoorziening worden.

Om dat te voorkomen moet het dek op de bladen worden gelegd, waardoor de constructiehoogte toeneemt of de bladen moeten verder buiten het dek worden geplaatst waardoor de totale breedte van de brug significant toeneemt (vb. fig. 13). Ook is het zo dat Slim delen van de grote bladen gebruikt. Dat houdt in dat een deel van het blad moet worden verwijderd, waar vervolgens (nog) geen bestemming voor is. Vanuit circulair oogpunt verdient het de aanbeveling om de bladen zoveel mogelijk in zijn geheel te gebruiken.



Figuur 13 – 3D illustratie concept Slim

4.3 Oplossingen om kortere bladen geschikt te maken voor de overspanning

Conform de bureaustudie kan er niet vanuit worden gegaan dat het constructief niet mogelijk om met kortere bladen zoals de Enercon E40/3 de overspanning van de Reefbrug in één keer te halen. Daarom is onderzocht of er aanvullende maatregelen genomen kunnen worden om kortere bladen geschikt te maken voor de overspanning van de Reefbrug. Er zijn drie opties bedacht, die onderling kunnen worden gecombineerd:

1. Dragende leuning toepassen en/of lokale verstijvingen maken.
2. Een juk toepassen om de overspanning op te delen in twee kleinere overspanningen
3. Het blad momentvast verbinden op het landhoofd, waardoor een gunstiger krachtswerking ontstaat.

Een en ander betekent dat ‘Puur’ en ‘Kracht’ kunnen worden gecombineerd om tot het ontwerp te komen. Een mogelijke combinatie kan bijvoorbeeld bestaan uit het toepassen van een dragende leuning in combinatie met een momentvast landhoofd. Maar ook een reguliere leuning in combinatie met een steunpunt. Esthetiek, milieu-impact, kosten en uitvoerbaarheid zullen worden afgewogen bij het opstellen van het Voorlopig Ontwerp.

5 Constructieve haalbaarheid

Om te bepalen in hoeverre de in alinea 4.3 beschreven maatregelen voldoende draagkracht opleveren voor kortere bladen is een constructieve verkenning gedaan op basis van het Enercon E40/3 blad. Hierbij wordt gebruik gemaakt van verschillende doorsnedemetingen van dit type blad. Deze doorsnedes zijn gebruikt voor de aanleg van een plantsoen in Meppel in Drenthe[1]. Het projectteam heeft op locatie metingen verricht, zie bijlage A.

5.1 Aanvullende metingen onderzoek haalbaarheid Enercon E40/3



Figuur 14 – Enercon E40/3 in opslag bij Blade-Made

Het projectteam heeft maten opgenomen van vijf verschillende doorsnedes. In totaal, inclusief de metingen aan het blad bij de opslag in ’s Gravendeel (fig. 14, 15), zijn er dus zeven doorsnedes in beeld gebracht, zie bijlage A. In combinatie met gerichte aannames over de E-modulus van het materiaal kan hiermee een inschatting gemaakt worden van het verloop van de buigstijfheid over de lengte van het blad. Hiertoe is de constructieve haalbaarheid met een vereenvoudigde aanpak in hoofdstuk 5.2 verder uitgewerkt.



Figuur 15 – Enercon E40/3 in plantsoen Meppel

5.2 Eenvoudige analytische beschouwing Enercon E40/3

Op basis van de gemeten doorsnede zijn vereenvoudigde analytische berekeningen uitgevoerd voor het Enercon E40/3 blad. De doorsnede wordt hierbij vereenvoudigd tot een constante doorsnede, op basis van een ingeschatte representatieve doorsnede. Verder wordt de doorsnede van het bladprofiel vereenvoudigd tot een kokerprofiel.

Opgemeten doorsnede Enercon E40/3 blad

[1] Project gerealiseerd door Blade-Made

Uit de metingen is bepaald dat de koorde van het blad verloopt, van 1.4 m tot ongeveer 2 m, en de hoogte van het profiel, van 265 mm - 760 mm. De breedte van de spar cap zoals opgemeten varieert van ongeveer 140 mm - 345 mm. De dikte van de spar cap varieert van 25 mm – 34 mm. Dikte-variaties kunnen voortkomen uit meer composiet materiaal maar ook uit een variatie in vezelvolumegehalte (lokaal meer hars) en duiden dus niet direct op een veel hogere sterkte.

Daarnaast is er een neussectie met een breedte van ong. 170 mm met een dikte van ong. 13 – 18 mm waar laminaat aanwezig is. Ook in de trailing edge aan de achterzijde is een laminaat aanwezig met breedte van ong. 180 mm en een dikte van ong. 13 –20 mm.

Vereenvoudigde doorsnede
De berekeningen worden uitgevoerd voor een aangenomen constante doorsnede van :

- Koorde c = 1.2 m (conservatieve aanname).
- Breedte spar cap b_f = 300 mm
- Dikte sparcap t_f = 30 mm.
- Hoogte blad h of h_{web} = 350 mm.
- Huiden lijf: 2 huiden van t_w = 2 mm.

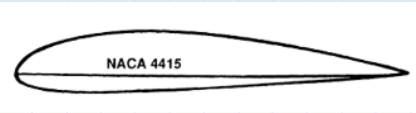
5.2.1 Bepaling buigstijfheid

De buigstijfheid van het blad als brugligger hangt af van de oriëntatie van het blad. In de schetsen van hoofdstuk 4 is te zien dat het blad zowel liggend verticaal (edgewise) als horizontaal (flapwise) toegepast wordt. Voor beide oriëntaties wordt een inschatting gemaakt.

De buigstijfheid EI is bepaald op basis van een E-modulus zoals gepubliceerd voor het (gebruikte) G37 blad. Dit is een vrij hoge stijfheid van E_x = 36.8 GPa. Om de gevoeligheid in te schatten voor een mogelijk afwijkende, lagere stijfheid is een bandbreedte van de EI bepaald met een lagere stijfheid van E_x = 26.8 GPa.

Bepaling buigstijfheid EI flapwise-uitvoering (horizontaal)
Variant 3, **Slim,** is *flapwise,* d.w.z. een horizontale configuratie. De ingeschatte EI voor deze horizontale configuratie is:
EI_hor = 1.8 - 2.4 * 10^4 kN*m^2.

De bijdrage van de neus en trailing edge zijn in deze configuratie verwaarloosd, omdat deze zich op de neutrale lijn bevinden en de bijdrage gering is.



sectie geinspireerd op Enercon 40/3, materiaal eigenschappen obv G37
flapwise, dwz horizontale configuratie

$h_{web} := 350\ mm$ hoogte web

$t_f := 30\ mm$ dikte flens

$b_f := 300\ mm$ breedte flens

$t_w := 2 \cdot 2\ mm$

$E_w := 11.5\ GPa$ stijfheid web x-ri

$E_f := 36.8\ GPa$ stijfheid flens - x ri

$$EI := E_f \cdot \left((2) \cdot b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_{web} + t_f}{2} \right)^{(2)} + \frac{2}{(12)} \cdot b_f \cdot t_f^{(3)} \right) + 2\ E_w \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h_{web}^{\ 3} \right) = \left(2.429 \cdot 10^4 \right)\ m^2 \cdot kN$$

Bepaling buigstijfheid EI edgewise- uitvoering

De drie ontwerpen **Puur, Kracht en Lang** zijn *edgewise*, dwz verticaal. In eerste instantie wordt hiervan alleen de torsiebox beschouwd- dwz de sectie van lijven en spar caps, voor dezelfde 2 materiaalstijfheden.

De ingeschatte EI voor een *edgewise*, dwz verticale configuratie uitgaande van alleen de sparcap-sectie is:

EI_vertexclneusTE = 4.3 - 5.7 * 10^3 kN*m^2.

Dit is fors lager dan de horizontale configuratie.

maximale sectie blad - vericale orientatie

$h_{web} := 350\ mm$

$t_f := 30\ mm$

koorde

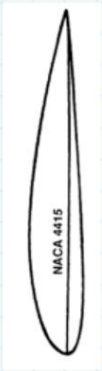
$c := 1.2\ m$

$b_f := 300\ mm$

$t_w := 2 \cdot 2\ mm$

$E_w := 11.5\ GPa$

$E_f := 36.8\ GPa$



uitgaande van 2 webs

$$EI_{dwars} := 2\ E_w \cdot \left(h_{web} \cdot t_w \cdot \left(b_f \frac{1}{2} \right)^{(2)} \right) + 2\ E_f \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_f \cdot {b_f}^3 \right) = \left(5.693 \cdot 10^3 \right)\ m^2 \cdot kN$$

Echter, zeker in deze configuratie zijn de bijdragen van de neus en trailing edge aanzienlijk.

Indien we voor de eenvoud uitgaan van een zwaartepunt halverwege de koorde, dan is de ingeschatte EI van de neus en de trailing edge:

Voorbeeld EI neus en trailing edge (stijfheid Ef = 36.8 GPa):

Bijdrage stijfheid van neus en tip 'webs'

$b_{tip} := 100\ mm$ $t_{tip} := 10\ mm$ $b_{nose} := 150\ mm$ $t_{nose} := 10\ mm$

$c := 1.2\ m$

$$EI_{extra} := 1\ E_f \cdot \left(b_{nose} \cdot t_{nose} \cdot \left(\frac{c - t_{nose}}{2} \right)^{(2)} + \frac{1}{(12)} \cdot b_{nose} \cdot {t_{nose}}^{(3)} \right) + 2\ E_f \cdot \left(b_{tip} \cdot t_{tip} \cdot \left(\frac{c - b_{tip}}{2} \right)^{(2)} + \frac{1}{(12)} \cdot t_{tip} \cdot {b_{tip}}^{(3)} \right) = \left(4.187 \cdot 10^4 \right)\ m^2 \cdot kN$$

Nemen we die bijdragen mee, dan is de ingeschatte EI-bandbreedte:
EI_vertinclneusTE = 3.5 - 4.8 * 10^4 kN*m^2.

Deze stijfheid is met medeneming van de bijdrage van de neus en trailing edge ongeveer 2 maal hoger dan de horizontale configuratie.

De aangenomen koorde van 1.2 m is hierbij conservatief; de koorde kan toenemen tot zelfs 2 m.

Vergelijking met Referentie Windturbines

De resultaten van de berekeningen zijn op hoofdlijnen vergeleken met typische EI-waarden zoals deze in algemeen aanvaarde referentie windturbinemodellen aanwezig zijn.

Als voorbeeld kan worden gekeken naar de NREL WindPACT modellen, bijvoorbeeld de 750 kW turbine met bladen met een lengte van ca. 24 m. Ter hoogte van een koorde van 1.2 m (op ca. 70% van de bladlengte gemeten vanaf de wortel) worden daarvoor de volgende karakteristieke waarden gegeven: een *flapwise* (horizontale) stijfheid van ca. 7 * 10^3 kN*m^2 en een *edgewise* (verticale) stijfheid van ca. 3 * 10^4 kN*m^2. Merk wel op dat de stijfheid van het blad exponentieel afneemt richting de tip, en vice versa, dus de exacte waarden hangen sterk af van het gekozen meetpunt langs het blad.

De aangehouden eigenschappen zijn van dezelfde orde grootte als de referentiewaarden en voldoende passend bij deze fase in het ontwerp. De ondergrens aanname (E = 26,8 GPa)lijkt het meest representatief, waarbij de horizontale oriëntatie mogelijk iets te optimistisch is. Merk op dat de snede van het referentieontwerp zich op 70% van de lengte van het blad bevindt, wat betekent dat voor 70% van de liggerlengte de koorde langer is en de stijfheid groter zal zijn.

5.2.2 Inschatting maximale overspanning

Een belangrijke vraag betreft of met het relatief kleine blad een overspanning van 19 m mogelijk is voor de 4 schetsontwerpen. Navolgend wordt een inschatting gemaakt van de zakking onder frequente verkeersbelasting. Op basis daarvan wordt bekeken of een overspanning van 19 m kan, of dat verkorting van de overspanning nodig is. Dit wordt eerst gedaan op basis van de doorbuiging. Vervolgens wordt ook nog gekeken naar de sterkte.

Doorbuiging en randvoorwaarden

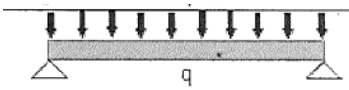
De 4 varianten verschillen niet alleen in blad oriëntatie, maar ook in de oplegging, en dus de randvoorwaarden.

Voor de ingeschatte buigstijfheden wordt gekeken naar de toelaatbare overspanning voor 2 situaties;

- Eenvoudig opgelegde balk (rotatievrij) **(Puur, Slim en Lang)**
- Aan één zijde ingeklemd **(Kracht)**

Hierbij is gebruik gemaakt van de volgende doorbuigingsformules:

- Eenvoudig opgelegde balk

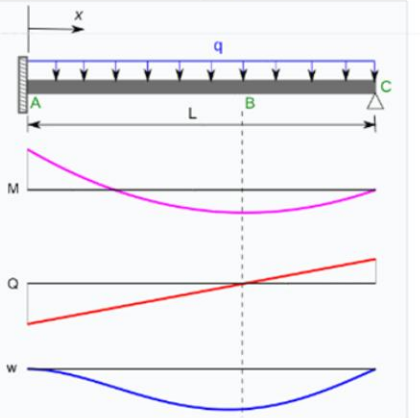
Load Cases	Maximum Moment	Maximum Deflection
	$\frac{qL^2}{8}$	$\frac{5qL^4}{384EI}$
	$\frac{qL^2}{8}$	$\frac{5qL^4}{384EI}$

- Aan één zijde ingeklemde balk

Another commonly encountered statically indeterminate beam problem is the cantilevered beam with the free end supported on a roller.[5] The bending moments, shear forces, and deflections of such a beam are listed below:

Text
Small

Distribution	Max. value
$M(x) = -\frac{q}{8}(L^2 - 5Lx + 4x^2)$	$M_B = -\frac{9qL^2}{128}$ at $x = \frac{5L}{8}$ $M_A = \frac{qL^2}{8}$
$Q(x) = -\frac{q}{8}(8x - 5L)$	$Q_A = -\frac{5qL}{8}$
$w(x) = \frac{qx^2}{48EI}(3L^2 - 5Lx + 2x^2)$	$w_{\max} = \frac{(39+55\sqrt{33})}{65{,}536}\frac{qL^4}{EI}$ at $x = \frac{15-\sqrt{33}}{16}L$



De streefwaarde van de doorbuiging is L/150, met L is de lengte van de overspanning.

Zonder additionele steunpunten is de overspanning 19 m. De overspanning kan beperkt worden door het anders vormgeven van de landhoofden en fors gereduceerd worden door het toepassen van extra steunpunten.

Er zal in deze SO- rapportage, vanwege de vele aannames ten aanzien van de doorsnede en de materiaalstijfheden en diktes, niet in detail ingegaan worden op de individuele uitkomsten, echter worden kwalitatief conclusies getrokken.

Er is bij de berekeningen uitgegaan van de laagste waarde van de ingeschatte buigstijfheden (op basis van E_f = 26.8 GPa) en brugbreedte van 2.5 m. Er is hierbij uitgegaan van 2 brugliggers, die ieder een effectieve belasting van 1.25 m brugdek dragen.
De frequente verkeersbelasting is 0.8 * 5 kN/m^2.

De aangehouden richtwaarde voor de zakking is gebaseerd op een doorbuiging van L/150 en een benuttingsgraad (unity check) van 0.8, om ruimte te laten voor onvoorziene belastingen of andere eigenschappen.

5.2.2.1 Bepaling van de mogelijke maximale overspanning voor de eenvoudig opgelegde balk

Flapwise – Horizontaal (Slim)

- Voor de eenvoudig opgelegde balk is een overspanning van 19 m niet mogelijk.
  De orde grootte overspanning o.b.v. de doorbuiging is voor de horizontale configuratie ongeveer 9 - 11 m. Dit betekent dat een tussensteunpunt noodzakelijk is.

Voorbeeld voor de horizontale configuratie en een overspanning van 11 m:

$EI = (1.778 \cdot 10^4)\ m^2 \cdot kN$ buigstijfheid (horizontale configuratie)

$L := 11\ m$ overspanning

$b := 1.25\ m$ breedte

$q := 0.8 \cdot 5\ \frac{(kN) \cdot b}{m^2}$ frequente belasting verkeer

$\delta_{SS} := \frac{5}{(384)} \cdot \frac{q \cdot L^4}{(EI)} = 53.612\ mm$ zakking

$\delta_{limiet} := \frac{0.9\ L}{150} = 66\ mm$ limietwaarde zakking

$UC_{zakking} := \frac{\delta_{SS}}{\delta_{limiet}} = 0.812$ unity check zakking

Edgewise – Verticaal (Puur en Lang)

- Voor de eenvoudig opgelegde balk is een overspanning van 19 m niet mogelijk.
  De orde grootte overspanning voor de verticale configuratie o.b.v. de doorbuiging is ongeveer 12-14 m. Dit betekent dat een tussensteunpunt noodzakelijk is.

Voorbeeld voor een verticale configuratie en een overspanning van 14 m:

$EI_{dwars} + EI_{extra} = (3.483 \cdot 10^4)\ m^2 \cdot kN$ buigstijfheid (vertikale configuratie)

$L := 14\ m$ overspanning

$b := 1.25\ m$ breedte

$q := 0.8 \cdot 5\ \frac{(kN) \cdot b}{m^2}$ frequente belasting verkeer

$\delta_{SS} := \frac{5}{(384)} \cdot \frac{q \cdot L^4}{(EI_{dwars} + EI_{extra})} = 71.8\ mm$ zakking

$\delta_{limiet} := \frac{0.9\ L}{150} = 84\ mm$ limietwaarde zakking

$UC_{zakking} := \frac{\delta_{SS}}{\delta_{limiet}} = 0.855$ unity check zakking

5.2.2.2 Bepaling van de mogelijke maximale overspanning voor de eenzijdig ingeklemde balk

Edgewise – Verticaal (Kracht)

- Voor de eenzijdig ingeklemde balk is een overspanning van 19 m niet mogelijk. De orde grootte overspanning voor de verticale configuratie o.b.v. de doorbuiging is ongeveer 16-17 m. Dit betekent dat bij deze configuratie een eenzijdig inklemming met een aangepast landhoofd wellicht mogelijk is. Deze configuratie is met een tussensteunpunt goed haalbaar.

Voorbeeld voor een verticale configuratie en een overspanning van 17m:

$L := 17\ m$	overspanning
$b := 1.25\ m$	breedte
$q := 0.8 \cdot 5\ \frac{(kN) \cdot b}{m^2}$	frequente belasting verkeer
$w(x) := \frac{q \cdot x^2}{48 \cdot (EI_{dwars} + EI_{extra})} \cdot (3 \cdot L^2 - 5 \cdot L \cdot x + 2 \cdot x^2)$	formule zakking eenzijdig ingeklemd
$x := \frac{15 - \sqrt{33}}{16} \cdot L$	locatie maximale zakking eenzijdig ingeklemd
$w(x) = 64.932\ mm$	maximale zakking eenzijdig ingeklemd
$UC_{zakking} := \frac{w(x)}{\delta_{limiet1}} = 0.802$	UC zakking

5.2.2.3 Beoordeling van de sterkte

De sterkte van de varianten is lastig in algemene zin te beoordelen. De onzekerheden zijn voor een horizontale configuratie geringer, omdat de werking berust op de sterkte van de spar cap, wat ook een belangrijk constructief element is in een windturbineblad.

Indien voor de situatie van de eenvoudig opgelegde balk de spanningen bepaald worden voor de bepaalde lengte, op basis van het maximale moment (Mmax = 1/8 q L^2), dan zijn deze binnen de verwachte sterkte van het materiaal.

Maximale spanningen *flapwise* / horizontaal (L = 11m):

$\gamma_F := 1.5$ belastingsfactor verkeer

$M_{max} := \frac{\gamma_F \cdot q \cdot L^2}{(8)} = (1.134 \cdot 10^5)\ J$ maximaal moment L = 11 m

$\sigma_{max} := \frac{(E_f) \cdot M_{max} \cdot \frac{h_{web}}{2}}{EI} = 29.923\ MPa$ maximaal optredende buigspanning (EI horizontaal blad, E = 26.8 GPa)

$f_{xRk} := 504\ MPa$ ingeschatte karakteristieke treksterkte

Voor druksterkte wordt o.b.v. typische partiele veiligheidsfactor voor druksterkte van de TS19101 aangehouden, van 5.

$f_{xRd} := 504\ \frac{MPa}{5} = 100.8\ MPa$ ingeschatte ontwerpwaarde druksterkte

$UC_{sterkte} := \frac{\sigma_{max}}{f_{xRd}} = 0.297$ Unity check buiging

Edgewise/ vertikaal (L = 14 m):

$\gamma_F := 1.5$ belastingsfactor verkeer

$M_{max} := \frac{\gamma_F \cdot q \cdot L^2}{(8)} = (1.838 \cdot 10^5)\ J$ maximaal moment L = 14 m

$\sigma_{max} := \frac{(E_f) \cdot M_{max} \cdot \frac{h_{web}}{2}}{EI_{dwars} + EI_{extra}} = 24.74\ MPa$ maximaal optredende buigspanning (EI vertikaal blad, E = 26.8 GPa)

$f_{xRd} := 504\ \frac{MPa}{5} = 100.8\ MPa$ ingeschatte ontwerpwaarde druksterkte

$UC_{sterkte} := \frac{\sigma_{max}}{f_{xRd}} = 0.245$ Unity check buiging

Bij een vertikale configuratie hebben de neus en de trailing edge een belangrijk aandeel. Echter, deze bijdrage is afhankelijk van de sterkte van de tussenliggende constructie tussen neus en sparcap en tussen trailing edge en spar cap, die berust op dunne sandwichpanelen met dunne huiden. Deze delen zijn mogelijk gevoelig voor plooi. In een volgende ontwerpfase moet daar met een nadere beschouwing goed naar gekeken worden.

Voor alle varianten (met uitzondering van **Lang**) is de oplegging aan één zijde afhankelijk van het dunne uiteinde van het blad. De tip is zeer slank en moet daar naar verwachting versterkt worden. Dit kan lokaal bijvoorbeeld door het dek daar constructief mee te laten werken aan de overspanning.

5.2.2.4 Conclusie constructieve haalbaarheid Enercon E-40/3

Geconcludeerd kan worden dat ook met een relatief kleiner blad, zoals de Enercon E-40/3 de verschillende ontwerpen mogelijk zijn, maar dat aanvullende maatregelen nodig zijn.

Voor de doorbuiging betreft dit verkorten van de overspanning. De variant Kracht, met een eenzijdige inklemming kan mogelijk volstaan met een slim uitgevoerd landhoofd, waarmee de overspanning verkort wordt (tot ongeveer 17m). Voor de overige varianten is naar verwachting een tussensteunpunt nodig of bijvoorbeeld een meedragende leuning.

Voor de sterkte betreft dit versterking van het dunne bladuiteinde ter plaatse van de oplegging. Verder moet bij een edgewise configuratie goed uitgezocht worden wat de samenstelling en sterkte van het deel tussen de trailing edge en de spar cap is. De sterkte van de gehele doorsnede moet in kaart gebracht worden, zodat aangetoond kan worden dat ook de stijfheid en sterkte van neus en trailing edge-sectie constructief gebruikt kan worden.

5.2.2.5 Aanbeveling

Het Enercon 40/3 blad is aan de kleine kant voor de overspanning. Het lijkt haalbaar, echter de mate waarin versterkingen nodig zijn moet blijken uit nader onderzoek. Met name de geringe afmetingen van de sectie aan de tip ter plaatse van de oplegging is een groot aandachtspunt. Verschillende oplossingen om de overspanning mogelijk te maken zijn denkbaar. Een iets groter blad met, een grotere lengte zal minder versterkingen nodig hebben en meer veiligheidsmarge bieden in het ontwerp.

6 Risicosessie

Naar aanleiding van constructieve verkenning op basis van Enercon E40/3 blad is een risicosessie gehouden met vertegenwoordigers van Rotterdam, TU Delft en RHDHV. Doel van de risicosessie is het in kaart brengen van de risico's om een inschatting te kunnen maken van de haalbaarheid van een kleiner blad, de mogelijk te nemen maatregelen in het ontwerp en het materiaalonderzoek. Navolgend zijn de uit de sessie voortgekomen hoofdpunten gerapporteerd.

De geoogste risico's zoals overgenomen van de post-its uit de sessie zijn ingedeeld in categorieën constructie, kosten en esthetiek.

- Constructie
    - Materiaaleigenschappen blijken mogelijk lager dan verwacht
    - Het is moeilijk om een goed rekenmodel te maken met correcte componentdiktes die verlopen over de lengte van het blad
    - Connecties spar caps met shear webs kunnen zwakke plekken zijn
    - Kunnen we op de juiste plekken voldoende capaciteit vinden voor het bevestigen van onderdelen zoals dek-, en leuningdelen?
    - Duurzaamheid van bevestiging leuning?
    - Dwarskrachtstuik van de schil van het blad
    - Hoe een blad te kiezen dat onbeschadigd is?
    - Leeftijd bladen niet altijd goed bekend. Ouder blad kan lager dan verwachte eigenschappen betekenen
    - Goede testresultaten van één blad geeft nog geen garanties voor de andere bladen
- Kosten
    - Doordat het testprotocol pas komt na koop van de bladen kan het zijn dat te laat wordt ontdekt dat de bladen niet geschikt zijn.
    - De afwijkende vorm van het blad kan kostenverhogend werken bij het pasmaken van leuningelementen
    - Te veel twijfel en uitstelgedrag leidt tot vertraging
- Acceptatie
    - Als de brug niet voldoende gebruikscomfort heeft dan kan dat de publieke perceptie van het gebruik van windturbinebladen negatief beïnvloeden
    - Extra funderingselementen toevoegen kan leiden tot een negatief beeld qua duurzaamheid omdat fundering zwaar weegt in de totale milieu-impact
    - Als er veel extra maatregelen moeten worden getroffen om het blad geschikt te maken dan kan dat verdere acceptatie hinderen
    - Bladen zijn niet in oorspronkelijke vorm herbruikbaar voor een derde leven
    - Niet een te groot blad kiezen, want anders acceptatie ook gehinderd
    - Geen Ierse brug bouwen
- Esthetiek
    - De zichtbaarheid van de bladen in het zijaanzicht van de brug (?)
    - Brug kan snel een lelijk van uiterlijk worden door alg aangroei en/of graffiti
    - Bevestiging leuning aan blad kwetsbaar of erg in het zicht (lelijk)
    - Puur blijkt uiteindelijk niet zo puur door veel extra toevoegingen
    - Zijn de rechtopstaande bladen al niet te grof voor de omgeving?

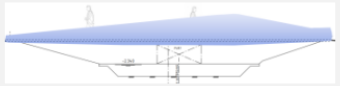
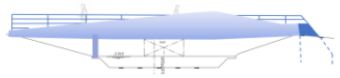
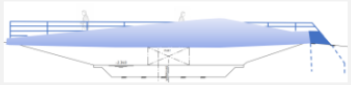
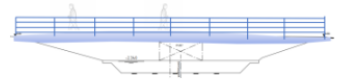
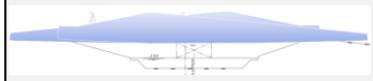
De uitkomst van de risicosessie is dat er in deze fase nog te veel onzekerheden over de draagkracht van het Enercon E40/3 blad in combinatie met de voorgestelde maatregelen.

De grootste onzekerheid zit in de materiaaleigenschappen en eventuele verborgen schades in oude bladen. Als die tegenvallen kan het ertoe leiden dat het gebruik voor de Reefbrug onhaalbaar wordt. De Reefbrug moet een positieve showcase worden voor het hergebruik van bladen in civiele kunstwerken. Afbreukrisico moet worden geminimaliseerd.

Verder moeten veel extra maatregelen worden getroffen om met de korte bladen zoals de Enercon E40/3 de Reefbrug te kunnen realiseren. Er is onzekerheid of de vele toevoegingen die aan het blad zouden moeten worden toegevoegd om de Reefbrug te maken wel goed aansluiten bij de uitgangspunten die voor het project zijn vastgesteld, zoals in onderstaand kader gesommeerd.

Algemeen
De brug heeft een eenheid van ontwerp. Opvallend is gebruik van “harde” materialen als beton, staal en composiet met een ranke uitstraling. Overwegend heeft de brug een horizontaal karakter.
Aanlanding
De brug kent een simpel en onopvallend landhoofd van beton of composiet. Dit landhoofd is minimaal gedimensioneerd en vormgegeven als een geheel met het brugdek.
Dek
Het dek is plat en strak en valt van de brug het meest in het oog. Het dek geeft in het beeld uiting aan het oversteken van het water. In geval gebruik gemaakt wordt van circulair/re-use materiaal is een lichte toog mogelijk zolang deze volgt vanuit de oorspronkelijke vorm van het circulaire materiaal en de toog niet overheersend is in het beeld.
Oplegpunten
De brug kent zo min mogelijk oplegpunten. Als steunpunten nodig zijn, zijn deze onderdeel van de ontwerpopgave. Ze zijn onopvallend en zo minimaal mogelijk gedimensioneerd.
Leuning / hekwerk
De leuning is bij voorkeur recht en slank/ rank/ luchtig vormgegeven als los element op het ‘strakke’ vlakke brugdek. De leuning heeft een regelmatige opbouw zonder hiërarchie en met een horizontaal karakter. De leuning is korter dan het dek om het losstaande karakter te benadrukken. De beëindiging van de leuning is met aandacht vormgegeven als bijzonder detail, waarbij een van de structuren doorsteekt.
Kleur
Gezien het bijzondere karakter van het project mag deze brug een wat uitgesprokenere kleur hebben dan beschreven in de bruggenvisie. Wel moet het totale kleuren palet van de brug samenhangend en harmonieus zijn. Geen vloekende/ harde/ felle kleuren.

De Risicosessie is verwerkt in volgende Multi Criteria Analyse (MCA) voor de Reefbrug:

	Constructieve risico's	Toepasbaarheid op andere plekken	Inpassing omgeving	Aansluiting op beeldambities	Circulariteit	Kosten	Ongewogen score	Gewogen score
Betekenis scores	*+2 laag risico; -2 hoog*	*+2 makkelijk; -2*	*+2 goed; -2 slecht*	*+2 goed; -2 slecht*	*2 hoog circulair; -2 lineai*	*+2 goedkoop; -2 duur*		
weging	*x2*	*x1*	*x1,5*	*x1*	*x1,5*	*x2*		
Puur  ENERCON E40 eenvoudig opgelegd, edge wise	**-2** Blad is niet sterk en stijf genoeg om overspanning in één keer te overbruggen. = **showstopper**	**0** Relatief klein blad leent zich voor veel parkbruggen tot ca. minimaal 15m lengte. Beperkte hoogte en geen stp onder loopdek is pro voor waterschap	**2** Beperkte formaat blad maakt dat goede balans kan worden gevonden tussen vrijhouden PvR waterschap en landelijke inpassing	**2** Relatief klein object is niet dominant in landschap. Sluit sterk aan op wens voor overwegend horizontaal karakter brug	**2** Repurpose in zo zuiver mogelijke vorm = hoog circulair. Maar beperkte beschikbaarheid type blad leidt tot waardevermindering onderzoek = laag circulair	**2** Meest eenvoudige fundering en minste bewerking resulteert in lage kosten. Blad per direct beschikbaar via Blade-Made	Niet haalbaar	
Puur+  ENERCON E40 combi Puur & kracht + maatregelen	**1** Haalbaarheid constructie kan niet worden vastgesteld zonder materiaaltests in SO-fase	**1** Relatief klein blad leent zich voor veel parkbruggen tot ca. minimaal 15m lengte. Beperkte hoogte onder loopdek is pro voor waterschap. Maar steunpunt is beperkend	**2** Beperkte formaat blad maakt dat goede balans kan worden gevonden tussen vrijhouden PvR waterschap en landelijke inpassing	**1** Steunpunt doet afbreuk aan horizontale karakter brug en doorsnijdt zicht op talud	**1** Repurpose in zo zuiver mogelijke vorm = hoog circulair. Maar beperkte beschikbaarheid type blad leidt tot waardevermindering onderzoek = laag circulair + meer bewerkingen door versterkingen	**0** Veel extra maatregelen maken constructie relatief duur	6	8,5
Kracht  ENERCON E40 eenzijdig ingeklemd, edge wise	**-2** Blad is niet sterk en stijf genoeg om overspanning in één keer te overbruggen. = **showstopper**	**2** Relatief klein blad leent zich voor veel parkbruggen tot ca. minimaal 15m lengte. Beperkte hoogte en geen stp onder loopdek is pro voor waterschap	**2** Beperkte formaat blad maakt dat goede balans kan worden gevonden tussen vrijhouden PvR waterschap en landelijke inpassing	**2** Relatief klein object is niet dominant in landschap. Sluit sterk aan op wens voor overwegend horizontaal karakter brug	**1** Zo min mogelijk aanpassingen aan bestaande blad/ Bevestiging aan fundering via bestaande wortel van het blad	**0** Extra maatregelen maken constructie realtief duur	Niet haalbaar	
Slim  LM 37,8 flap wise parallel, golvend dek	**1** Brug op basis van een groot genoeg blad is sterk genoeg en belast om de correcte as.Wel spanningsveld met eisen waterschap vwb constructiehoogte	**2** Uitgangspunt is bladen worden bewerkt. Bij kleine brug kunnen kleine delen worden genomen en vise versa	**-1** Golvend dek slaat mogelijk niet aan bij eisen vanuit Mobiliteit. Spanningsveld tussen beperken constr. hoogte vs voldoende sterkte	**2** Meest horizontale variant, meest ingetogen	**-1** Meer bewerking noodzakelijk. Ook moeten de tips en/of de wortels van de bladen worden verwijderd	**-1** Bij Blade-Made beschikbare delen zijn al vergeven voor ander project. Meer bewerking is meer kosten. Eenvoudige onderbouw is minder kosten	2	1
Lang  APX60 eenvoudig opgelegd, edge wise	**2** Blad is zeer waarschijnlijk sterk en stijf genoeg. Indien nodig kan met kleine ingreep worden versterkt. Naar idee van PUUR+	**0** Blad is vooral langer dan ENERCON, maar niet voor hoger, waardoor inpassing op andere plekken mogelijk, maar wel bewerkelijker	**1** Blad is groter dan ENERCON E40. Maar tot 25 nog steeds inpasbaar. Wel minder inpasbaar dan ENERCON E40.	**1** Relatief klein object is niet dominant in landschap. Sluit sterk aan op wens voor overwegend horizontaal karakter brug. Blad iets groter dan ENERCON E40	**2** Repurpose in zo zuiver mogelijke vorm = hoog circulair. Ruime beschikbaarheid type blad = waardevermeerdering onderzoek. Minimale versterkingen	**0** Fundering en versterkingen minimaal. Kosten krijgen blad is onzeker. **Mogelijk showstopper**	6	9,5

7 Tweede verkenning beschikbaarheid en definitieve bladkeuze

Uit de Multi Criteria Analyse (MCA) is te zien dat concept Lang het beste scoort – dat wil zeggen de laagste risico's heeft. De visualisatie is gebaseerd op een groter blad (L = ca. 37 m) met een grotere doorsnede (koorde). Voor de schaalbaarheid en betere inpassing in stedelijke omgeving is het wenselijk de lengte te beperken, waarbij uitgangspunt is dat de koorde dan niet veel toeneemt t.o.v. het Enercon blad. Besloten is Blade-Made te vragen te zoeken naar een alternatief blad met een lengte van ca 25 m. Op basis van de tot nu toe bekende gegevens mag worden aangenomen dat een 25 m blad de ideale middenweg is tussen een zo klein mogelijk blad omwille van inpassing in de omgeving en een robuust blad met voldoende draagkracht dat tegelijk zo min mogelijk restmateriaal achterlaat bij verwerking.

In de VO-fase wordt bepaald of er al dan niet extra steunpunten, versterkingen of andere aanpassingen nodig zijn om de 18 m van de Reefbrug te kunnen overspannen.

Bladtype AL26
Blade-Made vond bladen van het type AL26 (fig. 16):



Figuur 16 – Hoofdmaten AL26

Dit type blad is 26,5 m lang met een roterende tip. Dat houdt in dat de tip (TLm in figuur 16) kan roteren om de lengteas van het blad. De tip kan daardoor fungeren als aerodynamische rem. Dit houdt wel in dat de tip niet mee kan dragen als onderdeel van een buigligger omdat de verbinding met de rest van het blad niet als momentvast kan worden gezien. Zie verbindingsdetail in figuur 17.



Figuur 17 – Bevestigingsdetail flexibele tip

Dit is voor de Reefbrug geen probleem want de bruglengte is ca 18 m. De overlengte zou in het maaiveld steken. Doordat de tip er af kan hoeft er geen voorziening te worden getroffen om het blad in te korten. Uit technische tekeningen bleek echter dat dit blad is opgebouwd in gelamineerd hout (fig. 18).



Figuur 18 – Doorsnede inwendige houtopbouw

Het blijkt dat er in het verleden pogingen zijn gedaan om bladen van gelamineerd hout te maken, welke werden bekleed met een dunne laag composiet om het hout te beschermen tegen weersinvloeden. Er zijn bladen in omloop geweest tot ca 40 m lang, die dus hebben bestaan naast bladen die van composiet waren. Naarmate de windturbines groter werden konden de bladen niet meer van hout worden gemaakt, omdat het hout niet sterk genoeg was. De industrie is verdergegaan met volledig composiet als draagconstructie en is daarin doorontwikkeld.

Hout blijkt net als composiet uitstekende vermoeiingseigenschappen te hebben en het is te verwachten dat bladen van hout ook goed kunnen worden hergebruikt. De invloed van vocht en de onzekerheid in de beschermende werking van de composiet schil brengen onzekerheden met zich mee. De milieu-impact van het houten blad is geringer, dus de milieuwinst als gevolge van hergebruik is ook geringer.

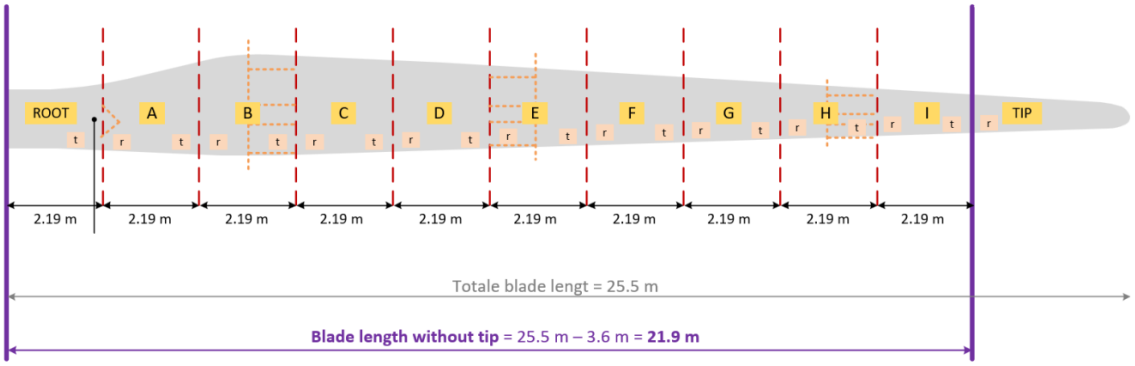
Rotterdam heeft ervoor gekozen om deze bladen niet te gebruiken vanwege:

1. De insteek van het project is om een oplossing aan te dragen voor een bestaand afvalprobleem van composieten windturbinebladen;
2. Eerdere kennis uit de bureaustudie is gebaseerd op volledig composiet bladen en dan niet meer van toepassing op het vervolg van het project;
3. Omwille van de bredere toepasbaarheid van het onderzoek is het belangrijk dat de bladen van composiet zijn, omdat de meest gebruikte bladen van composiet zijn.

Merk op dat er nu ook weer ontwikkelingen zijn op het gebied van toepassing van houten bladen. Een Duitse startup – Voodin – betreedt opnieuw de markt met houten turbinebladen. Zij gebruiken 'Laminated Vineer Lumber' als bouwmateriaal. Het betreft hier feitelijk hetzelfde hout als eerder werd gebruikt. Maar omdat veel dunnere lagen worden gebruikt hebben oneffenheden in hout minder impact op de draagkracht van de constructie waardoor bladen tot 80 m kunnen worden gerealiseerd en mogelijk langer in de toekomst. Door middel van een computergestuurde freestechniek kan Voodin verschillende modellen bladen reproduceren. Voodin zet in op het vervangen van oudere generaties bladen, zoals de generatie die nu in de brug wordt gebruikt.

Definitieve bladkeuze: LM25.5

Uiteindelijk is de keuze gemaakt voor een alternatief blad, te weten de LM25.5 (NM52/900)[2]. Dit is een blad van nagenoeg gelijke afmetingen als de AL26, maar is (vrijwel) volledig van composiet gefabriceerd. Dit blad is eveneens beschikbaar gevonden in de markt (fig. 19, 20).



Figuur 19 – Hoofdmaten NM 52/900

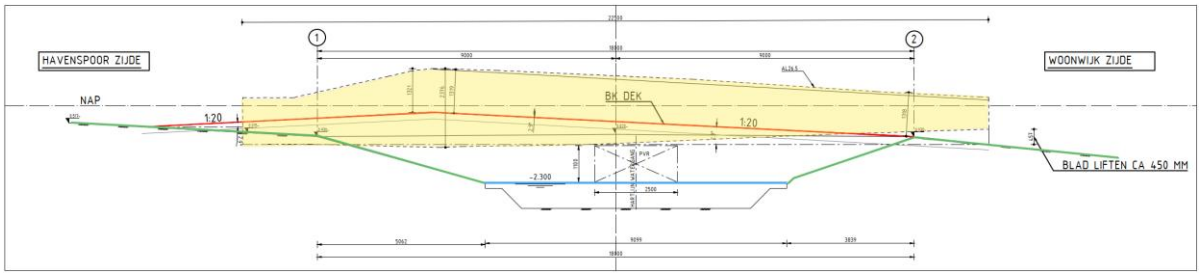


Figuur 20 – Foto blad LM52/900 in opslag

[2] 52 verwijst naar de rotordiameter, 900 verwijst naar het vermogen (900KW).

8 Schetsontwerp geselecteerd blad (LM 25.5)

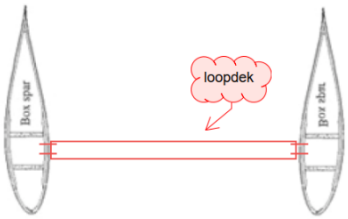
De inpassing op het doorsnedeprofiel van de Reefbrug en maatvoering van het geselecteerde blad LM 25.5 is weergegeven in fig. 21.



Figuur 21 maatvoering blad LM25.5

Het concept is gebaseerd op de varianten Puur en Lang: een eenvoudige oplegging, waarbij het dek zo puur mogelijk toegepast wordt en deels uitsteekt. De beweegbare tip is hierbij verwijderd.

De LM25.5 laat zich goed inpassen in het profiel van de Reefbrug. De bladen kunnen edgewise worden toegepast, zie fig.22.



Figuur 22 - Principe-doorsnede schetsontwerp

De bladen hebben een maximale koorde van 2,25 m (maat K in figuur 19).

In de VO-fase wordt bepaald of er al dan niet speciale landhoofden, extra steunpunten, versterkingen of andere aanpassingen nodig zijn om de 18 m van de Reefbrug te kunnen overspannen.

Inpassing dek t.b.v. toegankelijkheid en sociale veiligheid
Zonder aanpassingen is het gevolg dat gebruikers tussen twee muren door zullen lopen. Dit is onwenselijk met het oog op de sociale veiligheid. Door het dek onder een hellingen te laten meelopen met het hoogteverloop van de bladen kan dit worden voorkomen. Dit is mogelijk onder een helling van 1:20. Daar mee wordt ook gegarandeerd dat de brug toegankelijk is voor minder validen.

Door de hellingen aan de zijde van het Havenspoorpad 1,5-2 m voor de brug te laten beginnen komt de hoogte van de borstwerking op de hoogste punt precies uit op 1,30 m, hetgeen de eis is voor de leuninghoogte conform het BBL. Aan de zijde van de woonwijk sluit de helling naadloos aan op het bestaande maaiveld, waardoor aan die kant geen ophoging van het maaiveld nodig is. Dat is wenselijk omdat zich aan die zijde een boom bevindt. Ophoging is nadelig voor het wortelstelsel.

Bijlage D bevat de tekening van het SO. Deze is nog gebaseerd op het type AL26, welke qua maatvoering heel dicht de LM25.5 benadert.

9 Projectvervolg

Nu het blad en de afmetingen bekend zijn kan het ontwerp verder uitgewerkt worden. In de voorontwerpfase zal het ontwerp op basis van berekeningen op basis van de daadwerkelijke afmetingen van het blad en de doorsnede, en op basis van gemeten materiaaleigenschappen verder uitgewerkt worden. Hieruit zal blijken in welke mate de overspanning ingekort moet worden (landhoofd of steunpunt) en of/in welke mate versterking nodig is.

9.1 Materiaalonderzoek

Van het type LM25.5 worden drie bladen afgenomen, via Blade-Made, bij het Friese bedrijf Iver. De bladen worden bewaard op de werf van Iver in Franeker. Van de drie bladen worden er twee voorzien als constructie-elementen voor de brug. Een derde blad wordt gebruikt als testobject om informatie te verzamelen van de doorsnede op verschillende plaatsen, en materiaaleigenschappen te bepalen. Een van de bladen vertoont lichte beschadigingen. Dit blad zal worden gebruikt als testblad.

Testprotocol

Het 'testblad' wordt op het terrein van Iver onder verantwoordelijkheid van Blade-Made gezaagd in stukken waarvan vervolgens in het laboratorium van TU Delft de doorsnede, de laminaatopbouw en de mechanische eigenschappen van de laminaten op de verschillende plekken in de doorsnede worden vastgesteld. Zo wordt de constructie in kaart gebracht, waarmee verdere constructieve berekeningen uitgevoerd kunnen worden.

Onderstaande testprogramma is door Liesbeth Tromp van Haskoning en Marko Pavlovic van TU Delft opgesteld.

1. **Burn out testen voor de spar cap (flens), webs (lijfplaten) en de shell (buitenschaal) – minimaal 3 monsters per element per sectie of veranderende dikte**
    - 3 elementen (spar cap, web, shell) x 3 secties (layups/diktes)
2. **Coupons snijden tbv materiaaltesten (waterstraalsnijden)**
    - See item 3. voor hoeveelheden.
    - Extractie van 9 platen, 1-2m^2/stuk, van het blad (on site), derden
    - Watersnijden 12 platen om 400 coupons te maken (35 stuks van elke plaat)
3. **Materiaaltesten op coupons – spar cap / web – per verschillende geconstateerde layup – voor tenminste drie secties, spar cap , web en shell 6- 8 monsters per test**
    - **0°-richting**
        1. **Trek**
        2. **Druk**
        3. **Afschuiving**
        4. **Interlaminaire afschuifsterkte (ILSS)**
        5. **Glasovergangstemperatuur (Tg)**
    - **90°-richting**
        1. **Trek**
        2. **Druk**
        3. **Afschuiving**
        4. **ILSS**

    3 elementen (spar cap, web, shell) x 3 secties (lay-ups/diktes) x 1,5 richtingen (niet elke keer 0° en 90° benodigd) x 3,5 test types (niet elke keer afschuiving en Tg benodigd) (voor 6-8 monsters) = 50 testen

4. **Component tests voor bevestigingen aan de bladen (optioneel) 3x3**
    - Optie 1: Eenvoudige test boutverbindingen: 3 types laminaten, elk 3 monsters
    - Optie 2 (Indien nodig): Component testen op specifiek type bevestigingen

5. **Full scale test (niet-destructief, on site). Testen van doorbuiging, comfort en demping.** Tevens validatie van ontwerp door een belasting van 6 kN/m^2 gelijkmatig verdeeld (120% gebruiksbelasting), tbv verkrijgen bouwvergunning

Om breder hergebruik van windturbinebladen te ondersteunen is het testprotocol zoals nu voorzien is, breder dan strikt noodzakelijk om de Reefbrug te realiseren. Zo is er onder andere een uitgebreide meting van de brug (deflectie en versnellingen) opgenomen, waarbij de gemeente normaliter een eenvoudiger doorbuigingsproef voorziet. Ook is er een onderzoeker voorzien die het onderzoek en de resultaten zal vastleggen in een paper ten behoeve van de kennisoverdracht. Met deze extra informatie ten aanzien van eigenschappen en uit te voeren onderzoeken ontstaat er een betere basis voor toekomstige initiatieven met hergebruik van windturbinebladen. Dit is in aansluiting op de door de gemeente Rotterdam verkregen SPUK-KCI subsidie van de Rijksoverheid. Voorwaarde van deze subsidie is dat de opgedane kennis breed wordt gedeeld om de circulaire transitie te ondersteunen.

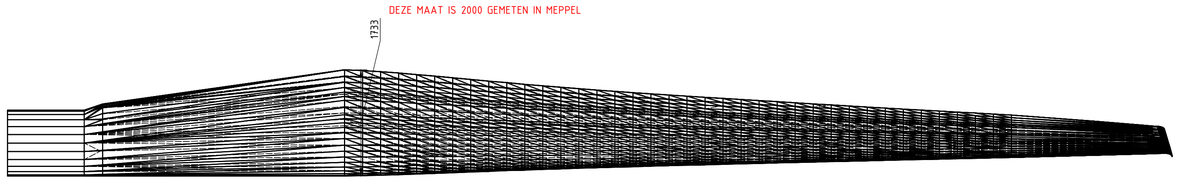
Afhankelijk van wat wordt aangetroffen in de te oogsten bladen, kan het zijn dat een aantal testen uiteindelijk misschien niet nodig blijken te zijn. Op basis van de keuze voor het LM25.5 blad en de opties voor versterking dient het testprotocol te worden aangepast. Dit wordt gedaan in de VO-fase.

Scannen
Verder wordt bekeken in welke mate scans gemaakt kunnen worden, met bijvoorbeeld C-scan of ultrasoon scantechnieken. Door het composietmateriaal (in de constructie) te scannen en vervolgens te testen worden de scans gekalibreerd. Als vervolgens de in de brug gebruikte bladen ook gescand worden, ontstaat meer bevestiging en inzicht in de kwaliteit van de bladen.

10 Bijlagen

A. Metingen Enercon E40/3 Meppel
B. Profiel Watergang
C. Schetsontwerpen
D. SO-tekening

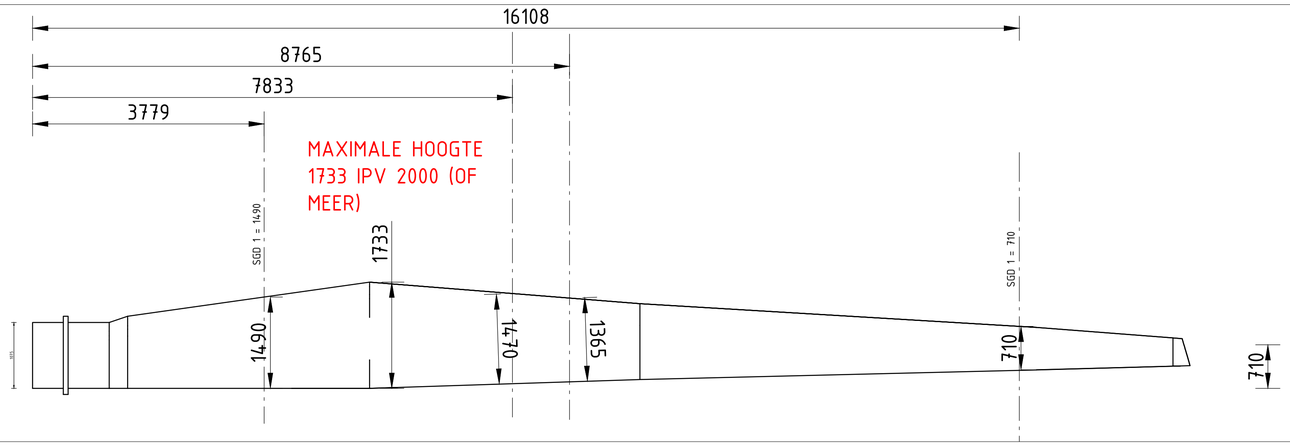
Bijlage A – Metingen Enercon E40/3 Meppel





SKETCHUP MODEL E40 ZIJAANZICHT

SCHAAL 1 : 50



ZIJAANZICHT INPASSEN MEETGEGEVENS

SCHAAL 1 : 50

blad 1 **wortel**



Blad 2

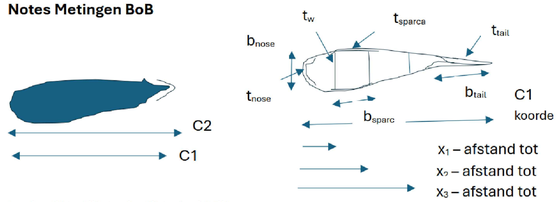


[mm]

#	L	C1	C2	h	bsparcap	tsparcap	bnose	tnose	btail	ttail
1	3.1m	1490		750	340	27,5-29,1	160	20	150	15,8 - 24
2		710		110	140	12	160	9-11		
				d w	tw					
				30-32	1,3					

wortel		L	t		ctc bolts	D bolt				
		140 mm	57 mm		78	36 mm				

Notes Metingen BoB



bw is dikte lijf, tw is dikte huid lijf

[mm] BLEKKERS EILAND

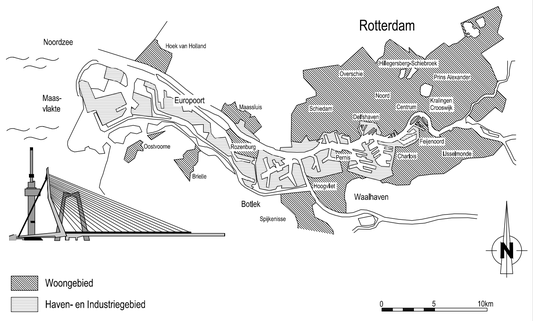
#	C1	C2	h	bsparcap	tsparcap	bnose	tnose	btail	ttail
1	2000		580	300	28-30	150	18	150-200	13
2	1470	1490	760	340	29,5	200	18-25	210	17-25
3	1925	1965	480	330	25-31,5				
4	1365		340	345	30	190	13	200	18,5
5	1780		390	265	31-34	170	23	175	17,5 - 20

#		x1	x2	x3
1		450	695	
2		385	670	
3		410	645	
4		380	580	1100
5		400	610	1135

Opmerkingen

- Maten in meters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld
- Diameters in millimeters, tenzij anders vermeld

Situatie



Versie

f			
e			
d			
c			
b			
a			
Versie	Omschrijving	Tekenaar	Datum

Bestandsnaam: E40 Meting.dwg | Projectcode: | Verwijzing:

Gemeente Rotterdam
Stadsontwikkeling
Projectmanagement en Engineering
de Rotterdam
Wilhelminakade 179
Postbus 6575 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
...
E-mail:
...

REEFBRUG

E40 AFMETINGEN
SKETCHUPMODEL VS INMETING

Behoort bij: | Nummer: | Documentsoort: Tekening

Geografische code:

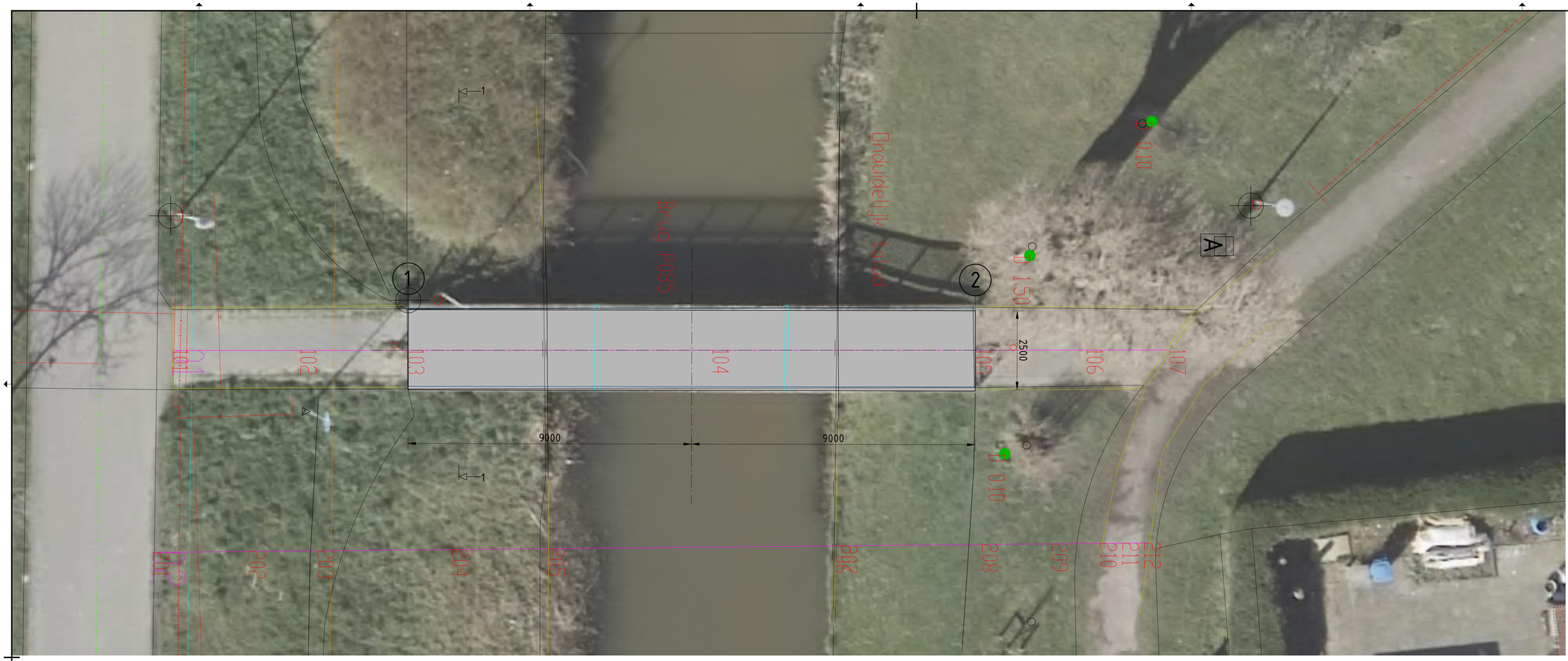
Formaat: A1 | Blad 1 van 1 bladen

Schaal:

Getekend:	Gecontroleerd:	Geautoriseerd:	Tekeningnummer:
TKR	WDS		SCHETS-S002 a
Paraaf	Paraaf/Datum	Paraaf/Datum	Wijk/Projectcode - Soort - Volgnummer / Versie

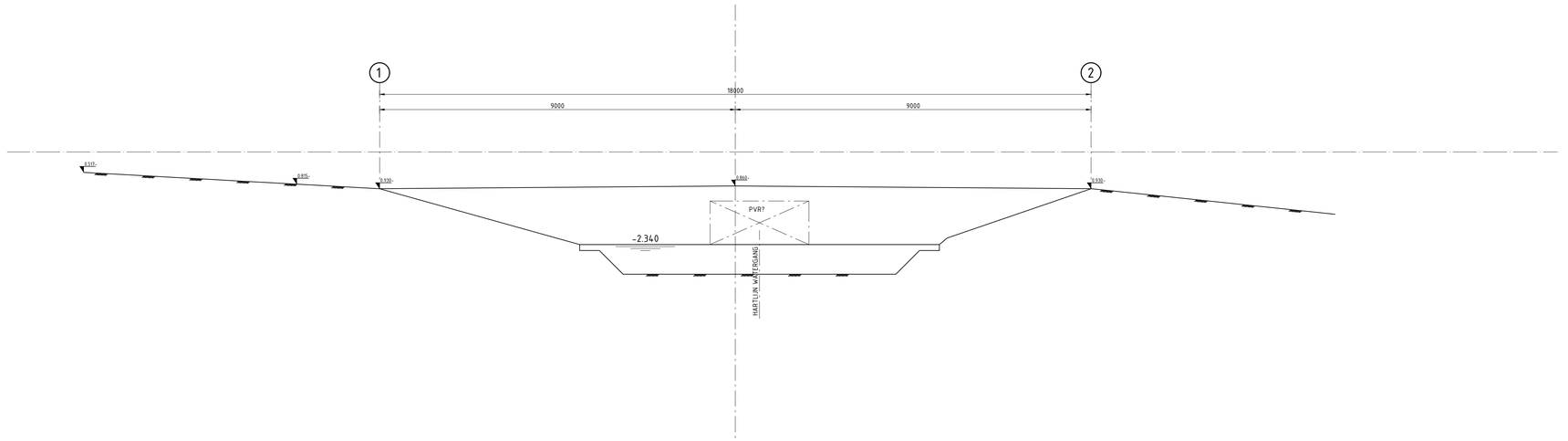
P:\SO\IR\BIM\KW-REEFBRUG\ACADISO

Bijlage B – Profiel watergang



BOVENAANZICHT

SCHAAL 1 : 50



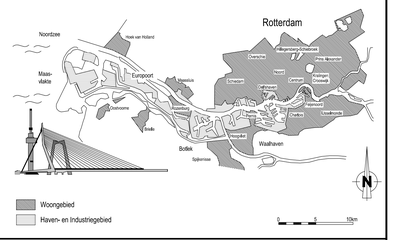
AANZICHT BRUG

SCHAAL 1 : 50

Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

Situatie



Versie

f			
e	VOORLOPIG 00-00-2019		
d			
c			
b			
a			
Versie	Omschrijving	Tekenaar	Datum

Bestandsnaam: V001 Reefbrug.dwg | Projectcode: | Verwijzing:

Gemeente Rotterdam

Stadsontwikkeling
Bureau Management en Engineering
Ing. Rotterdam
Wilhelminakade 179
Postbus 6075 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
E-mail:

REEFBRUG

PROFIEL WATERGANG

Behoort bij: | Nummer: | Documentsoort: Tekening

Geografische code:

Formaat: A0 | Blad 1 van

Schaal: 1 | bladen

Getekend: - 00-00-0000 Parraf

Gecontroleerd: - Parraf/Datum

Geautoriseerd: - Parraf/Datum

Tekeningnummer: 00-00-000 | 0

Wijk/Projectcode + Soort + Volgnummer | Versie

P:\GO\RBM\MW-REEFBRUG\ACAD\V0

Bijlage C –Schetsontwerpen

REEFBRUG

PILOTPROJECT WAARBIJ GEBRUIKTE WINDMOLENWIEKEN EEN TWEEDELEVEN KRIJGEN DOOR ALS CONSTRUCTIEVE LIGGERS IN DE NIEUWE ROTTERDAMSE *REEFBRUG* OPGENOMEN TE WORDEN.






NOORD

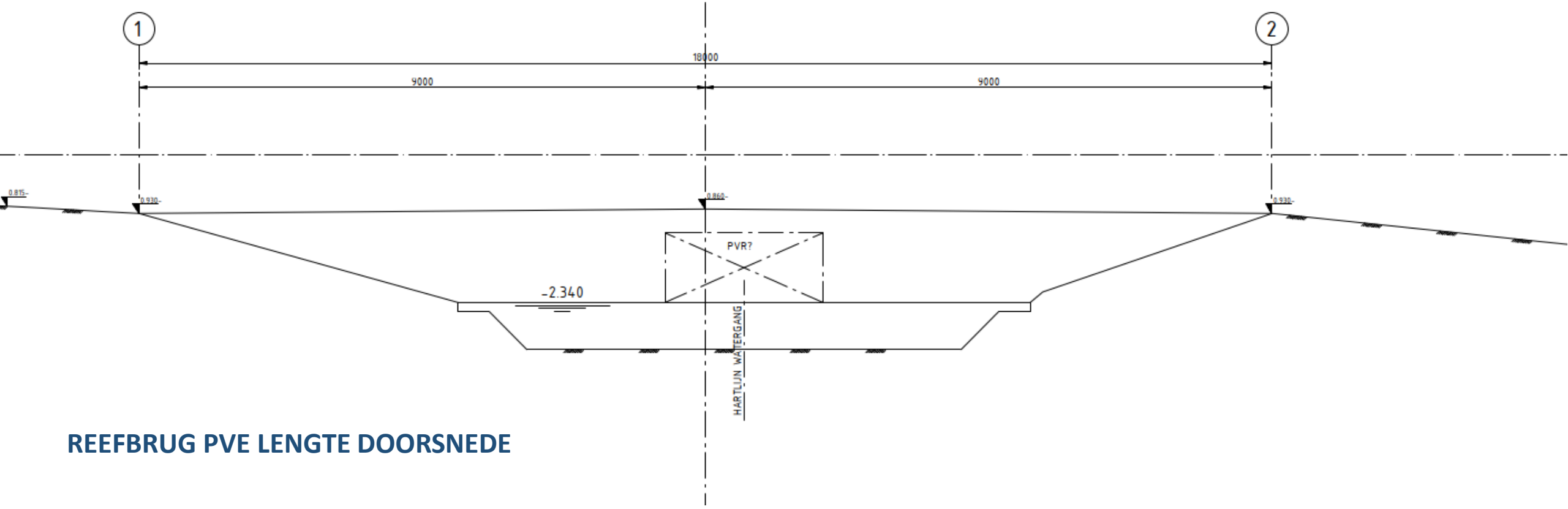
huidige situatie Reefbrug

ZUID









REEFBRUG PVE LENGTE DOORSNEDE

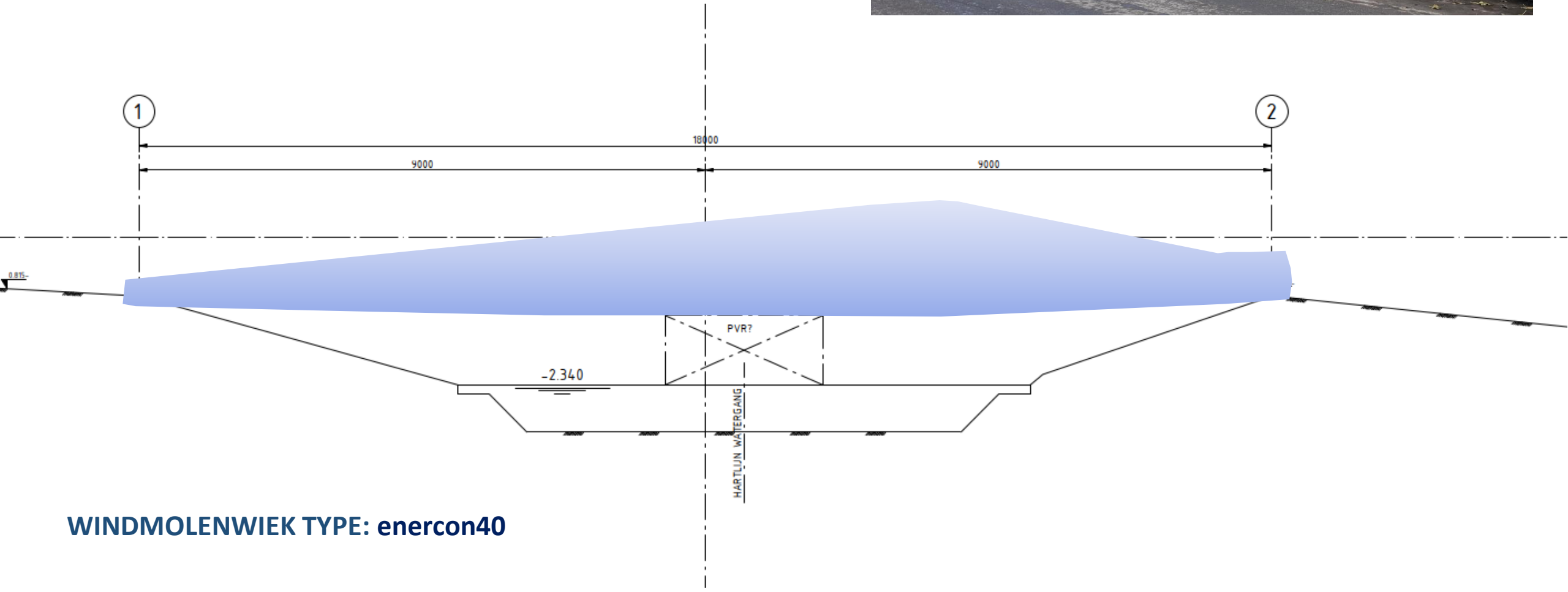
1. **PUUR** hele wieken, compleet ongeschonden toegepast
2. **KRACHT** hele wieken, aan een oever verbonden
3. **SLIM** delen uit grote wieken als dekplaten verwerkt
4. **LANG** wieken met overlengte die de brug in het landschap inleiden

CONCEPTEN

PUUR

CONCEPT *PUUR* STREEFT EEN ZO EERLIJK MOGELIJKE TOEPASSING VAN WIEKEN NA. DE VORM IS GEGEVEN, DAAR WORDT NIET OP INGEGREPEN MAAR ZO PUUR MOGELIJK GEBRUIK VAN GEMAAKT. DAT DIT EEN MOLENWIEKENBRUG IS ZAL NIEMAND ONTGAAN….



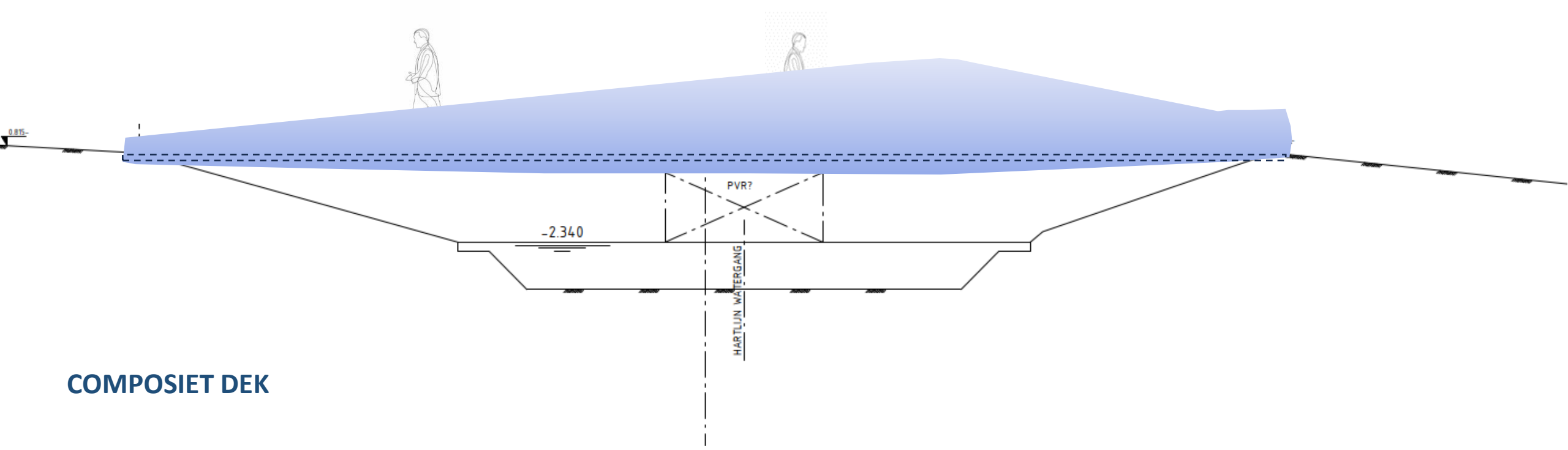


WINDMOLENWIEK TYPE: enercon40

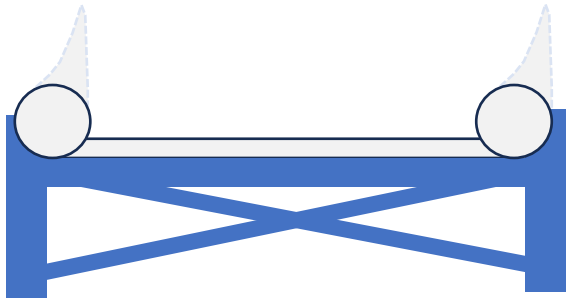




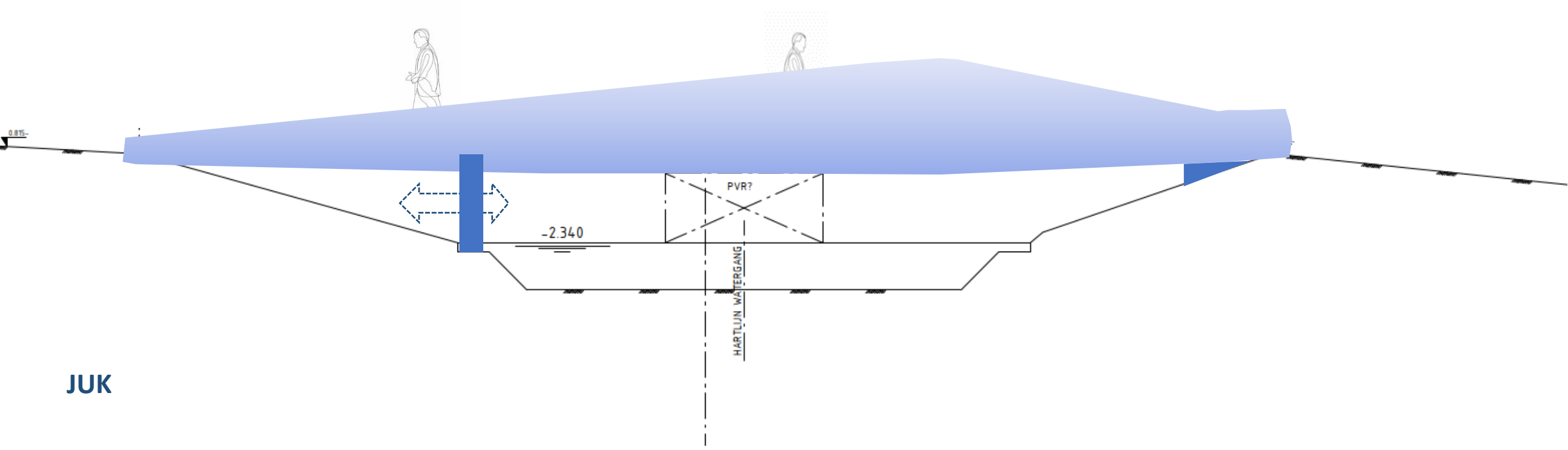




COMPOSIET DEK



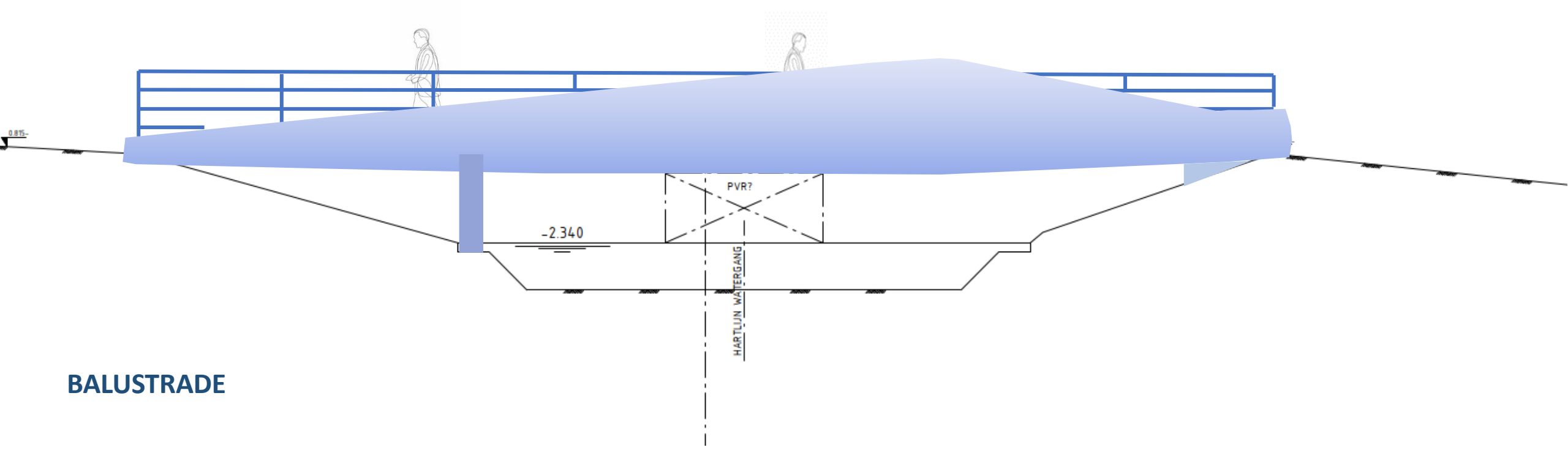




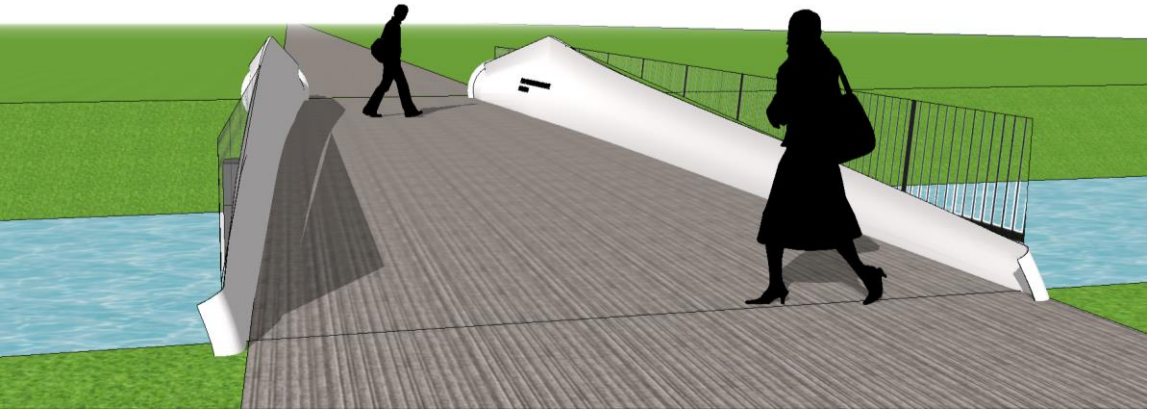
JUK

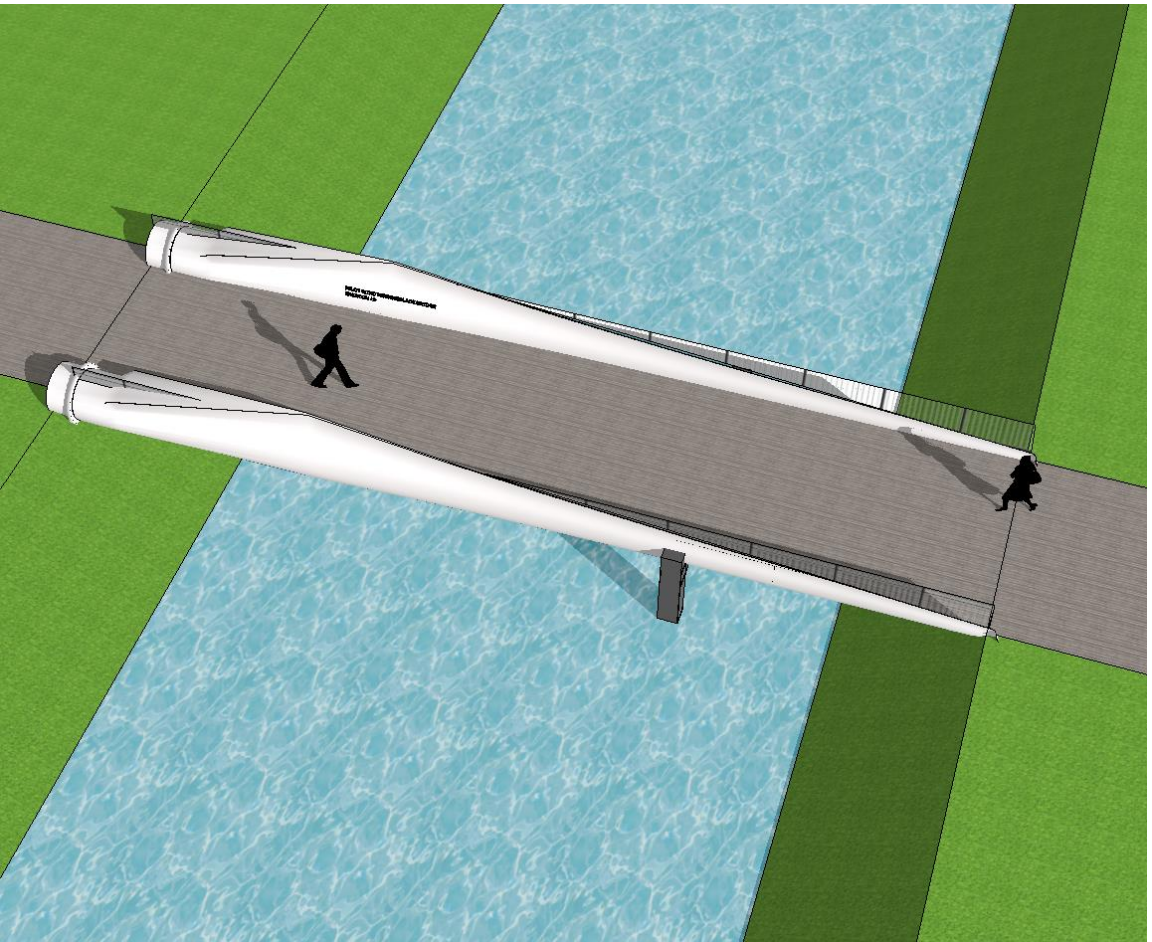


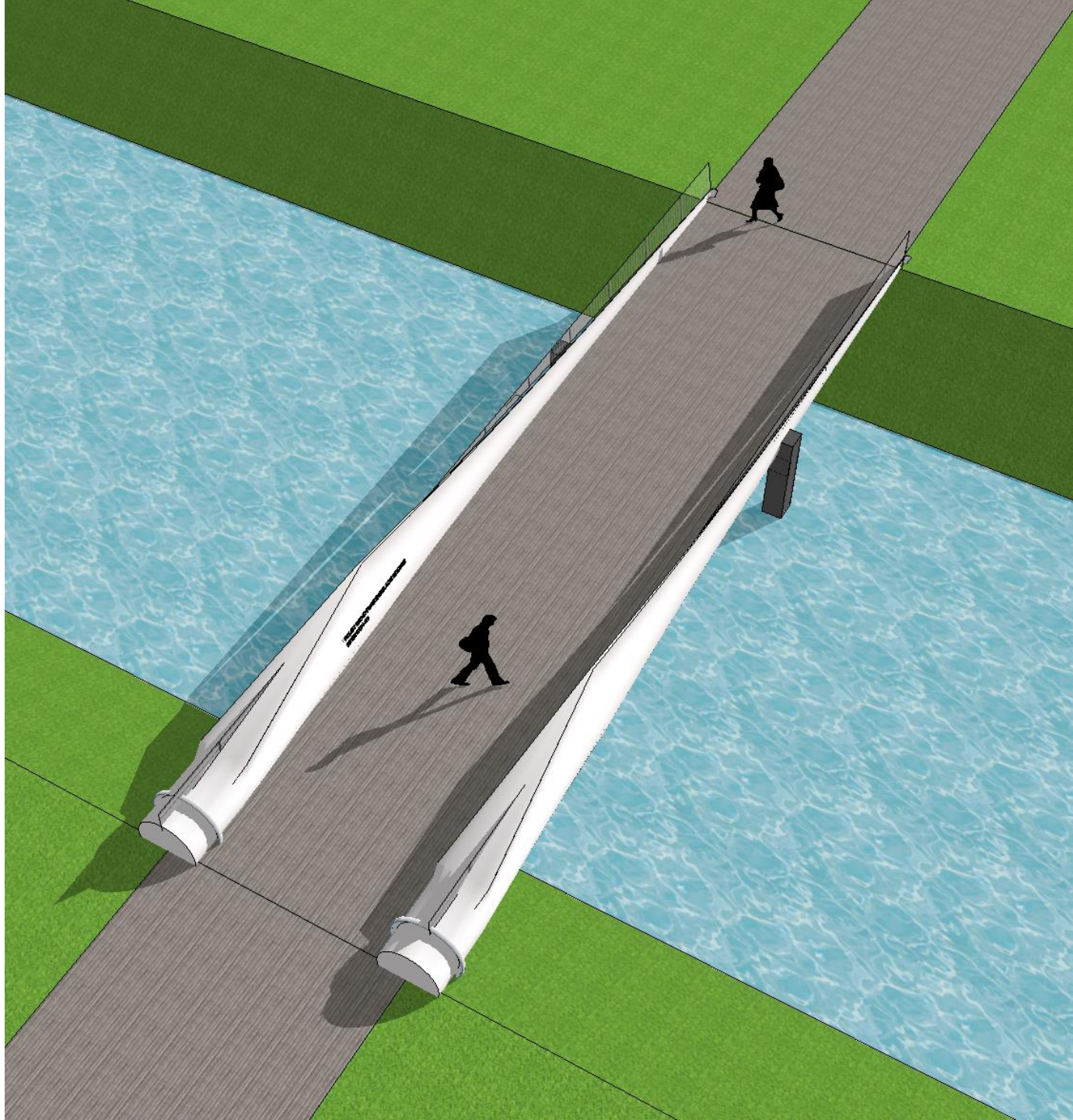




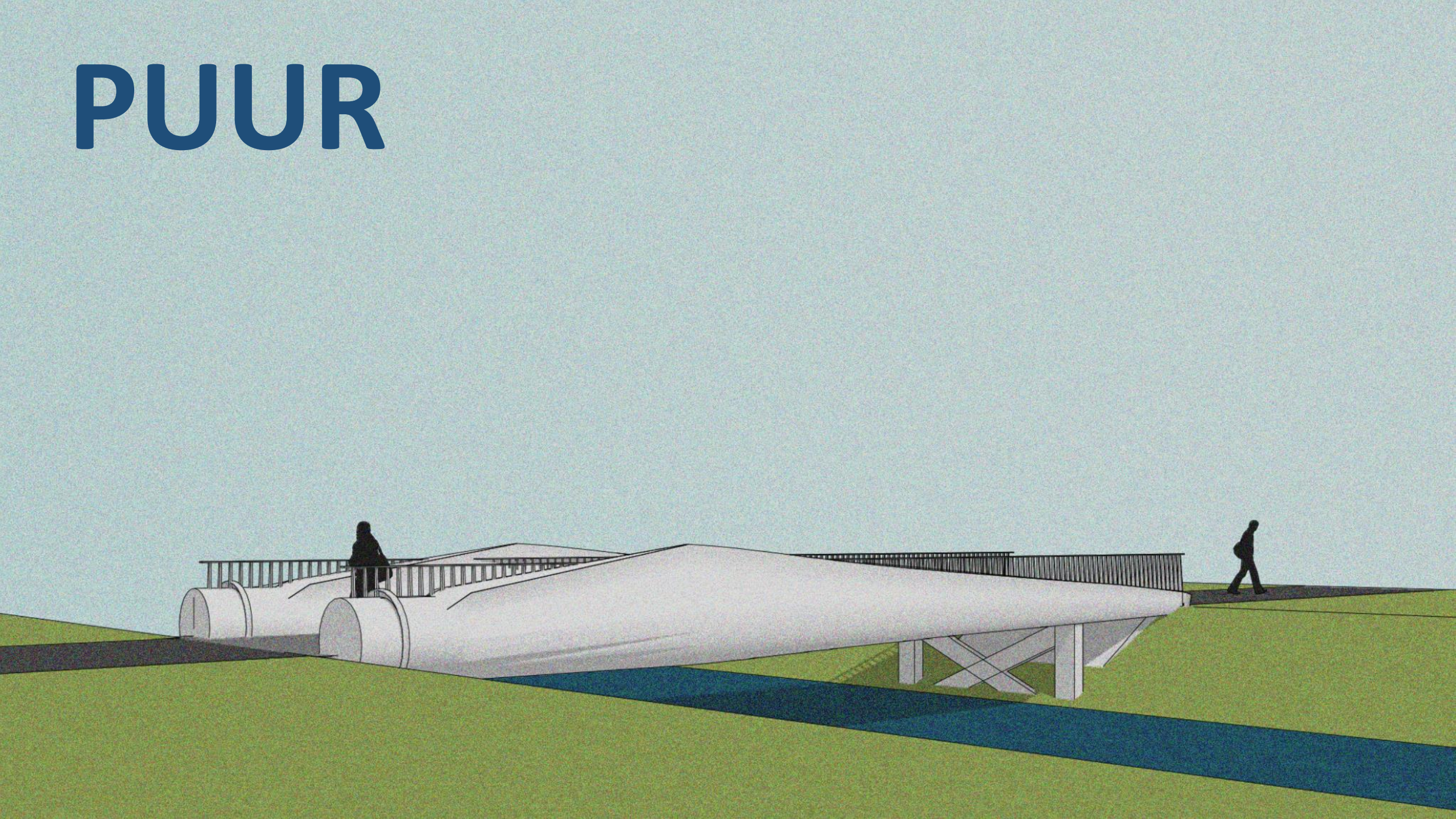
BALUSTRADE







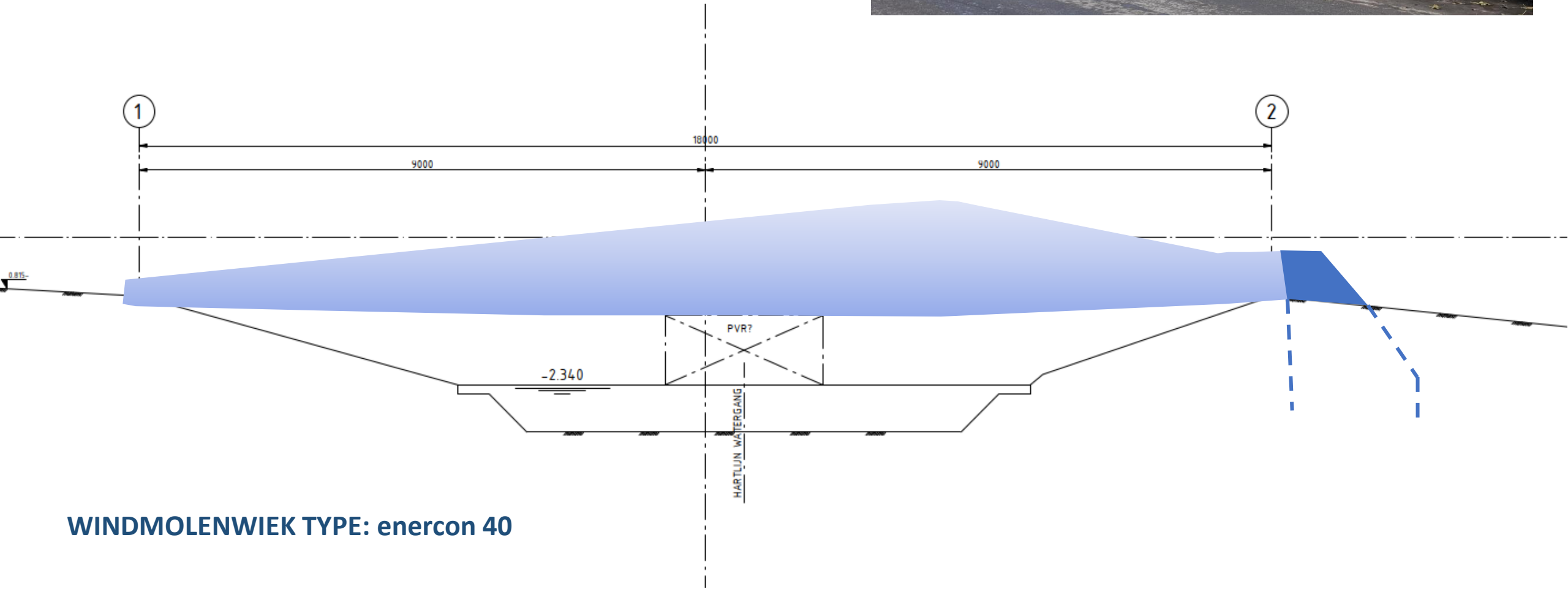
PUUR



KRACHT

BIJ CONCEPT *KRACHT* WORDEN DE WIEKEN AAN 1 OEVER VASTGEMAAKT. DE VORM IS GEGEVEN, DAAR WORDT NIET OP INGEGREPEN MAAR ZO PUUR MOGELIJK GEBRUIK VAN GEMAAKT. DAT GELDT OOK VOOR DE BEVESTIGING



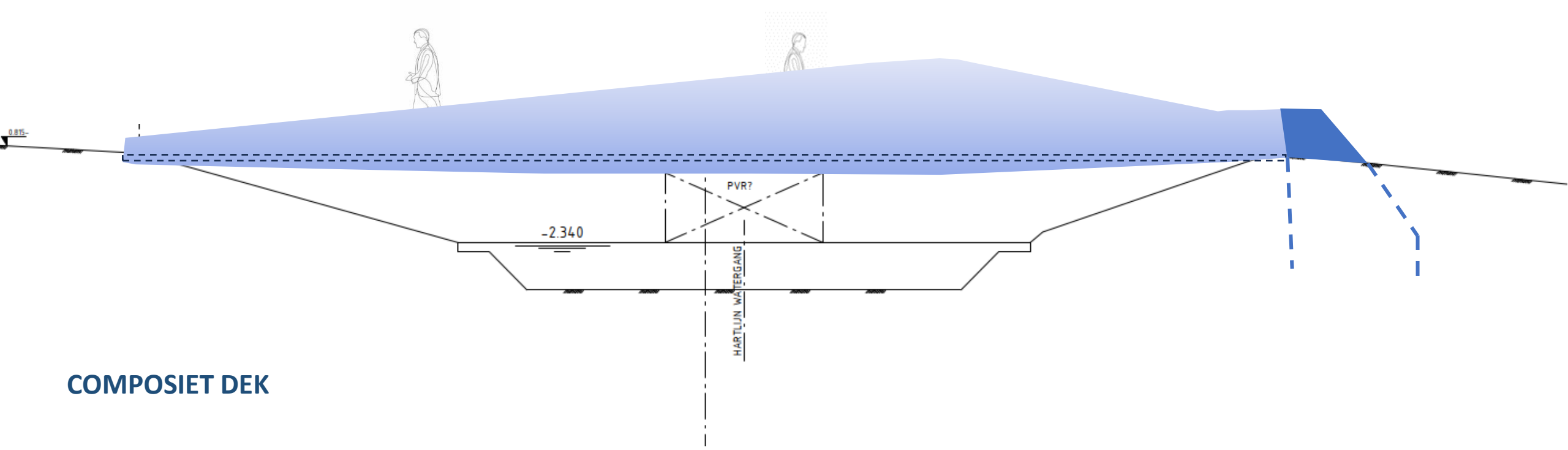


WINDMOLENWIEK TYPE: enercon 40









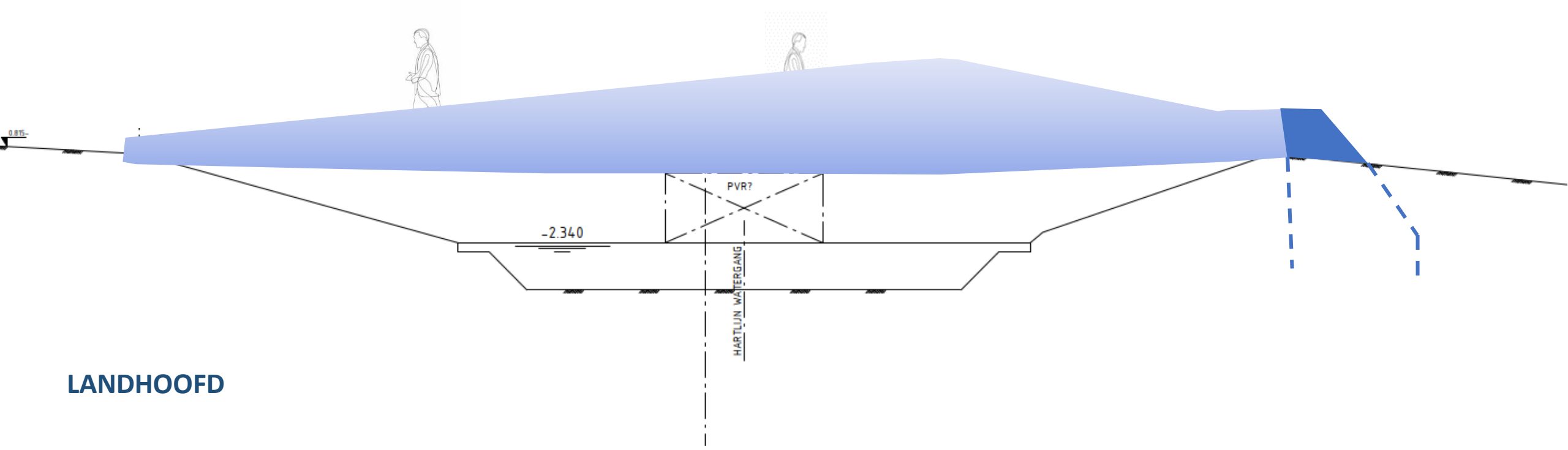
COMPOSIET DEK







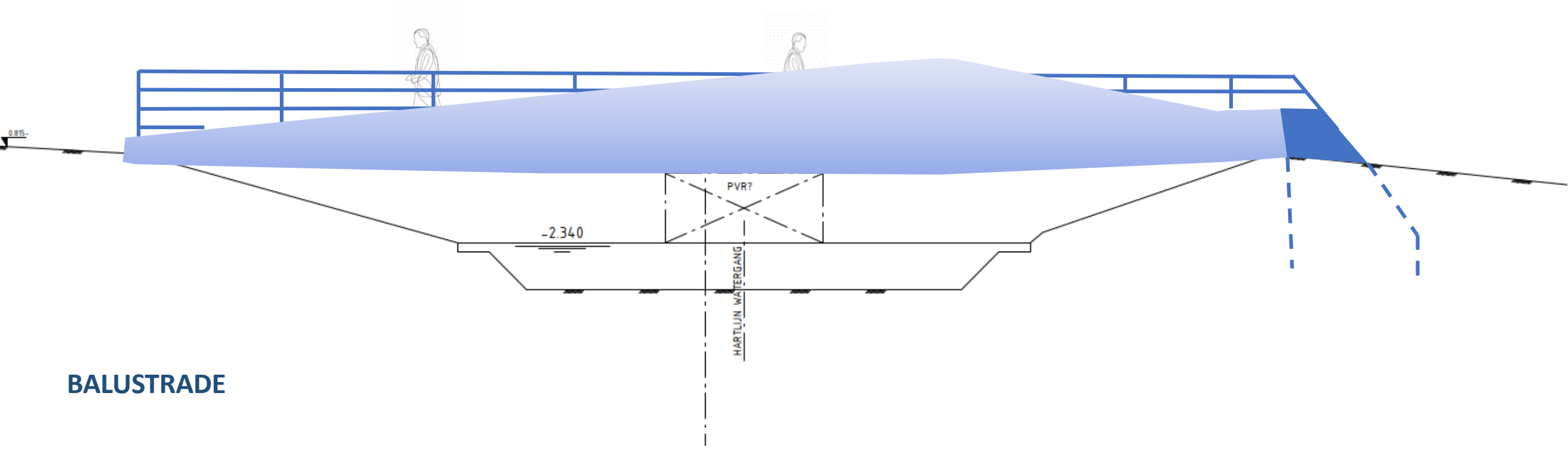




LANDHOOFD

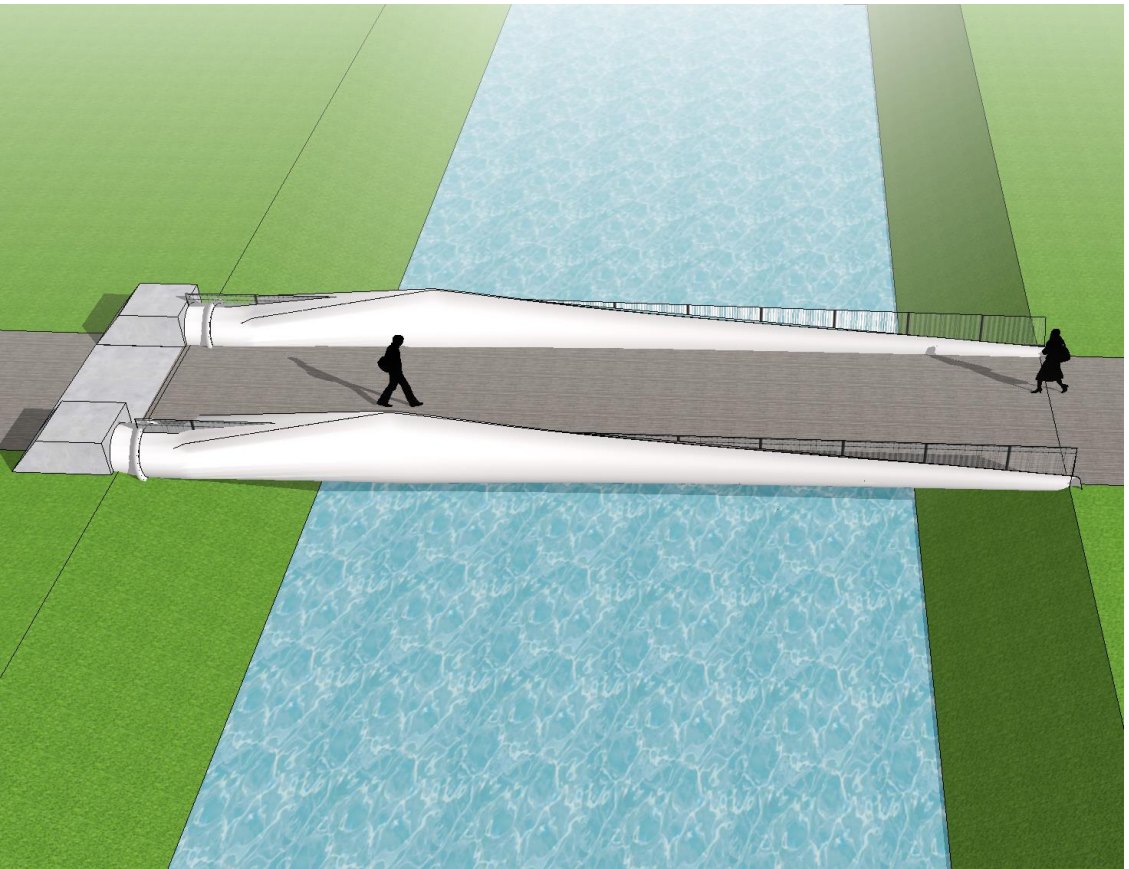






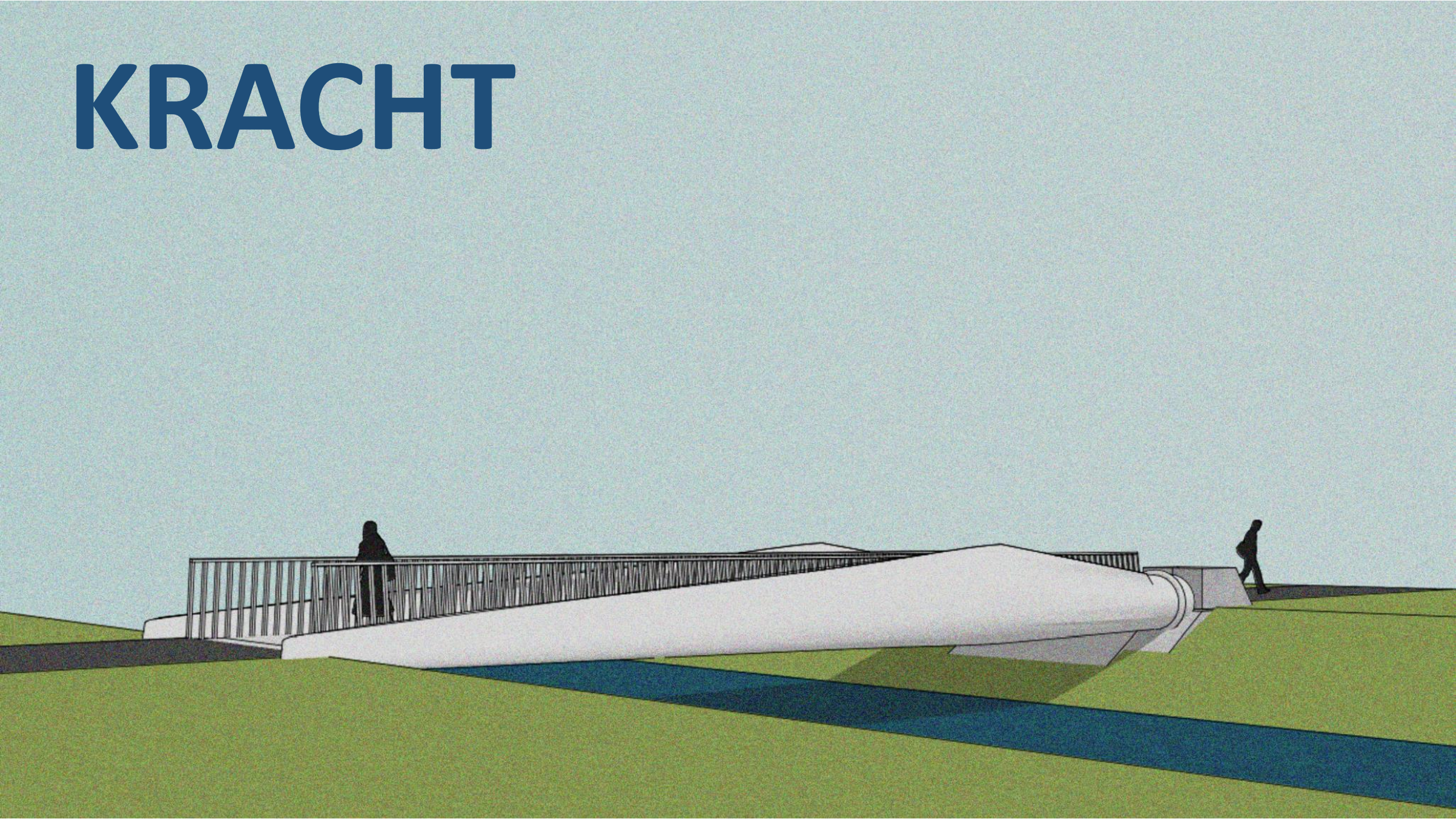
BALUSTRADE







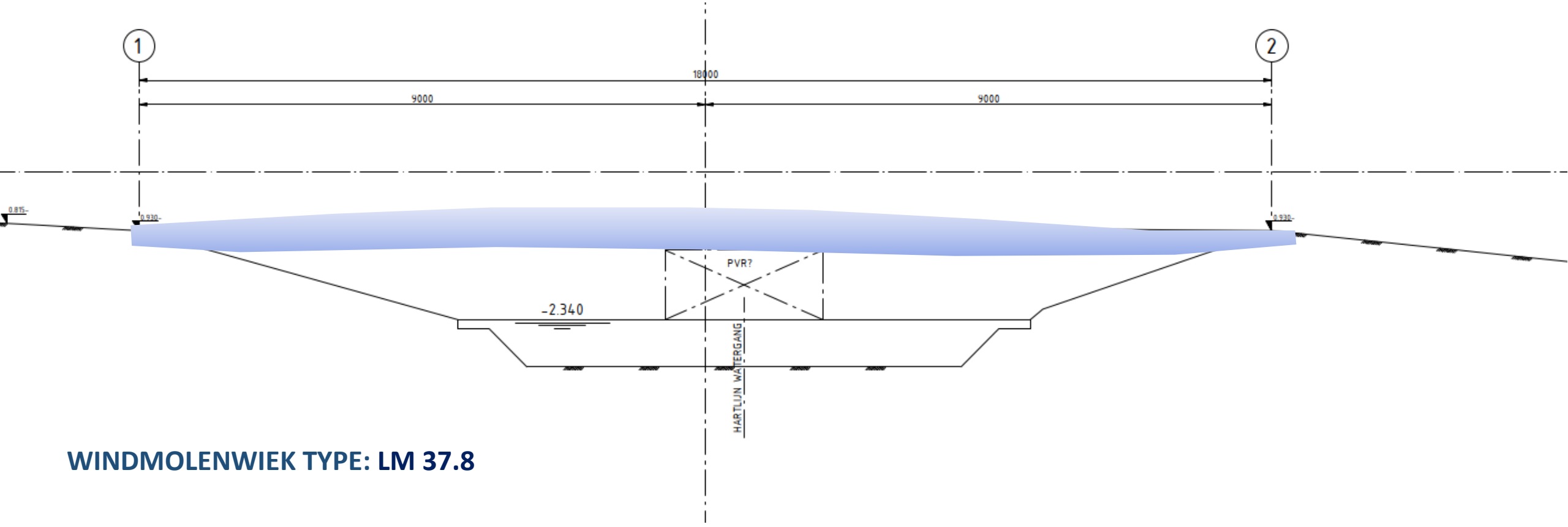
KRACHT



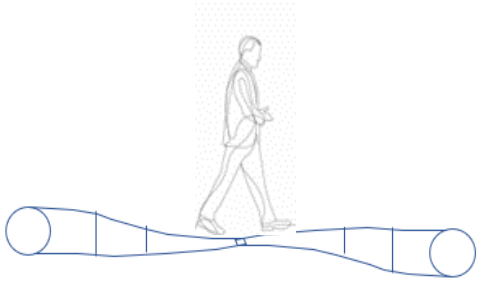
SLIM

CONCEPT *SLIM* MAAKT OPTIMAAL GEBRUIK VAN DE KRACHT DIE IN DE WIEKEN VERSTOPT ZIT. DOOR DE JUISTE DELEN UIT DE WIEKEN TE SELECTEREN WORDEN STERKE DEKKEN GEOOGST DIE, AAN ELKAAR BEVESTIGD, EEN EIGENWIJS EN LICHT GLOOIIEND PAD VORMEN



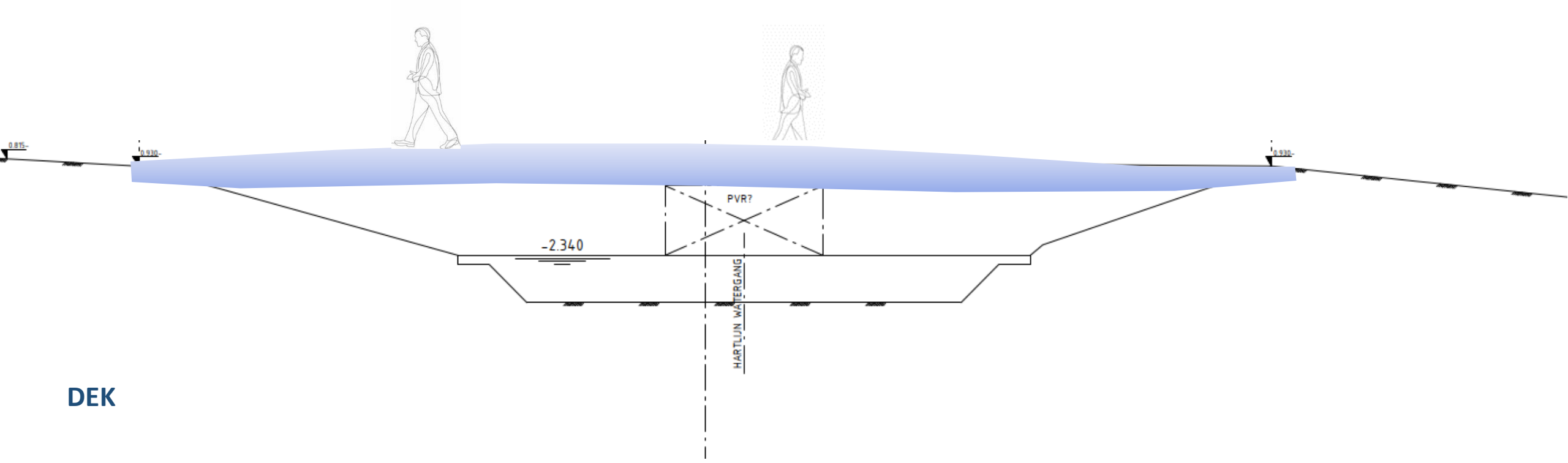


WINDMOLENWIEK TYPE: LM 37.8

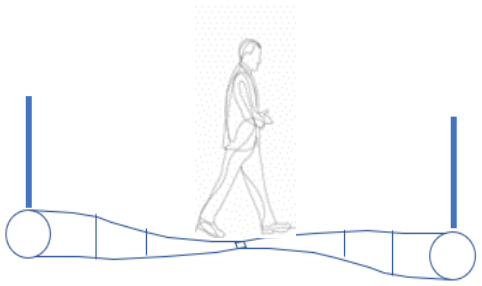




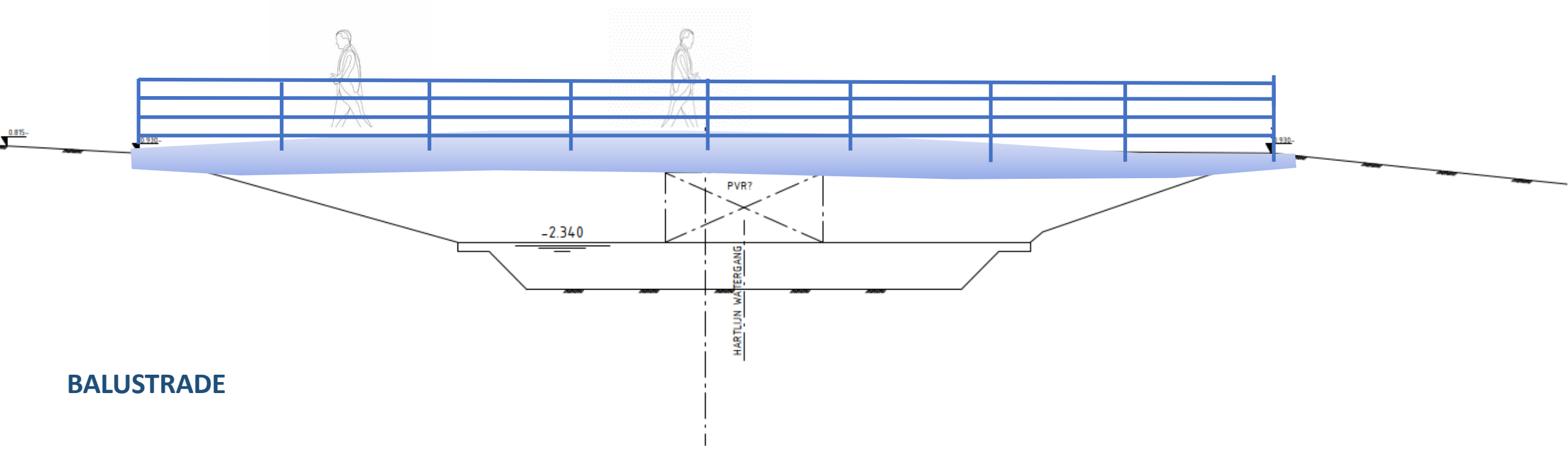




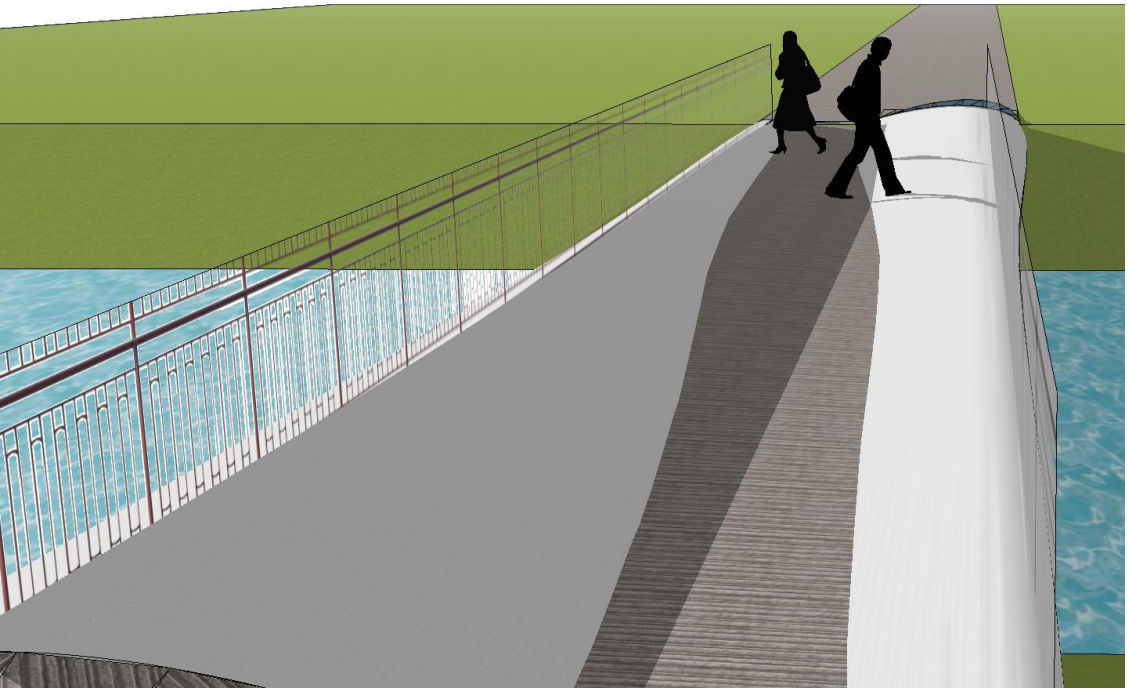
DEK

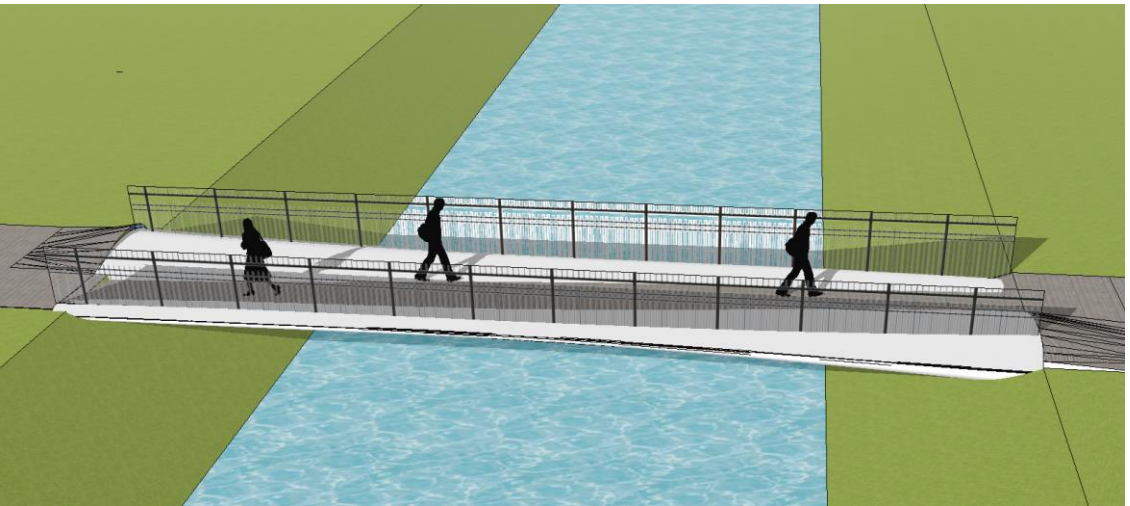


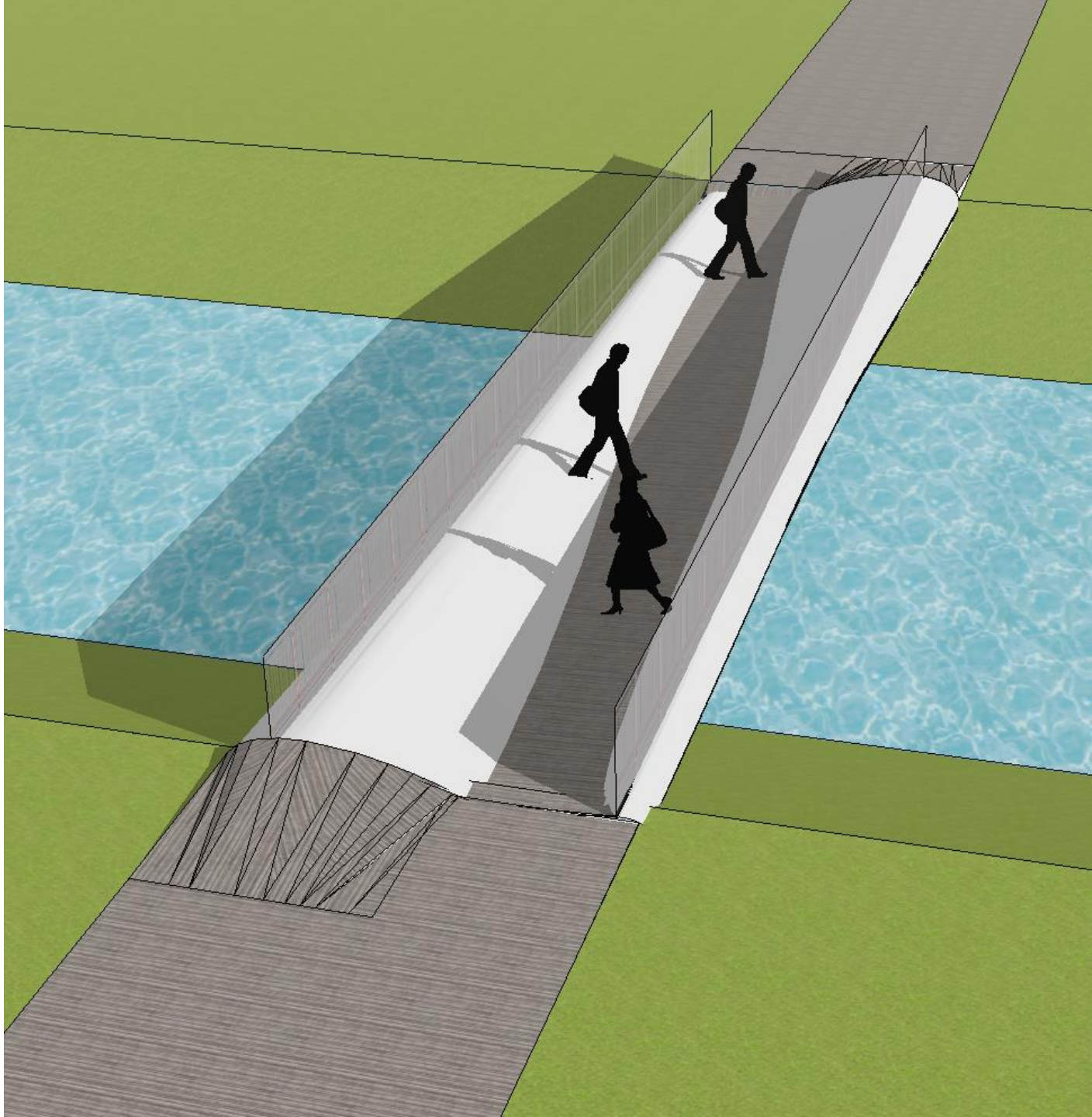




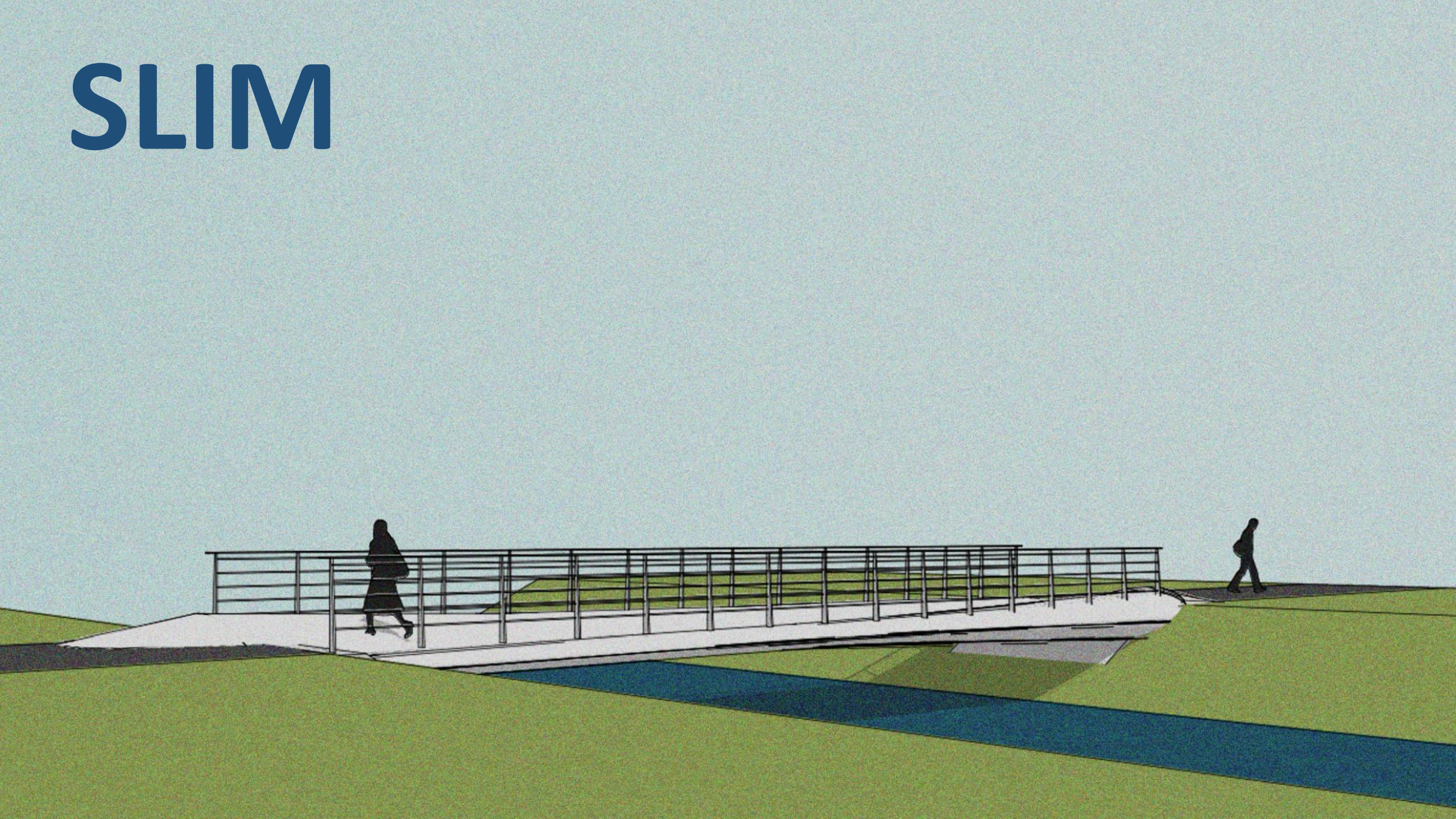
BALUSTRADE





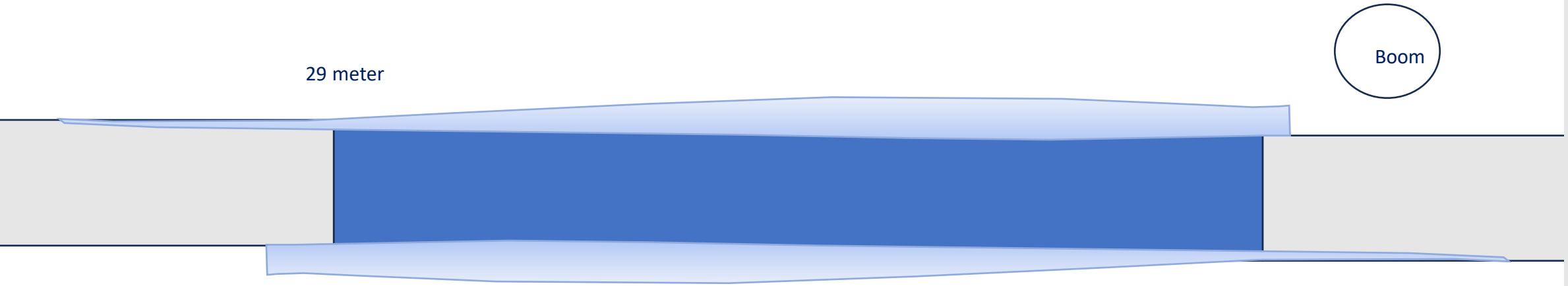


SLIM

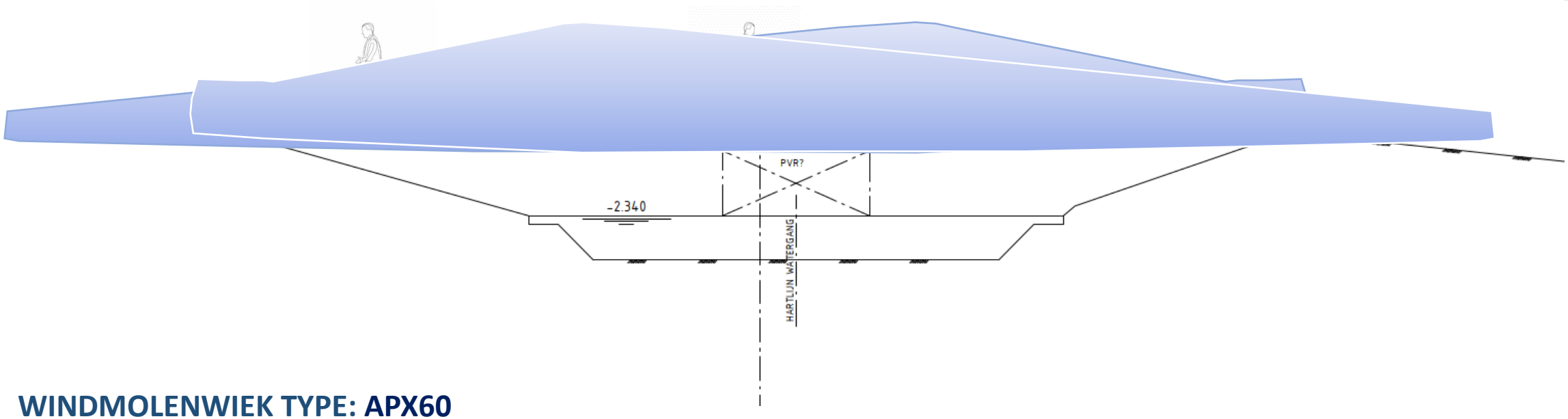


LANG

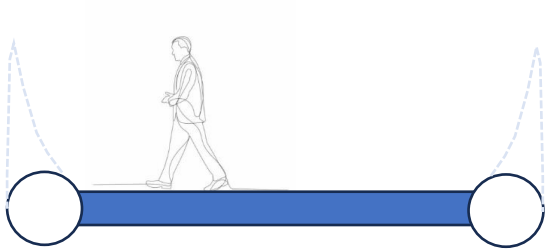
CONCEPT *LANG* MAAKT GEBRUIK VAN DE WIEKEN ZOALS ZE ZICH AANDIENEN. TE LANG BETEKENT BENUTTEN VAN DIE OVERLENGTE. DE WIEKEN OVERSPANNEN DE WATERGANG MAAR LOPEN IN HET LANDSCHAP DOOR. ZE LEIDEN DE WANDELAARS NAAR DE BRUG..

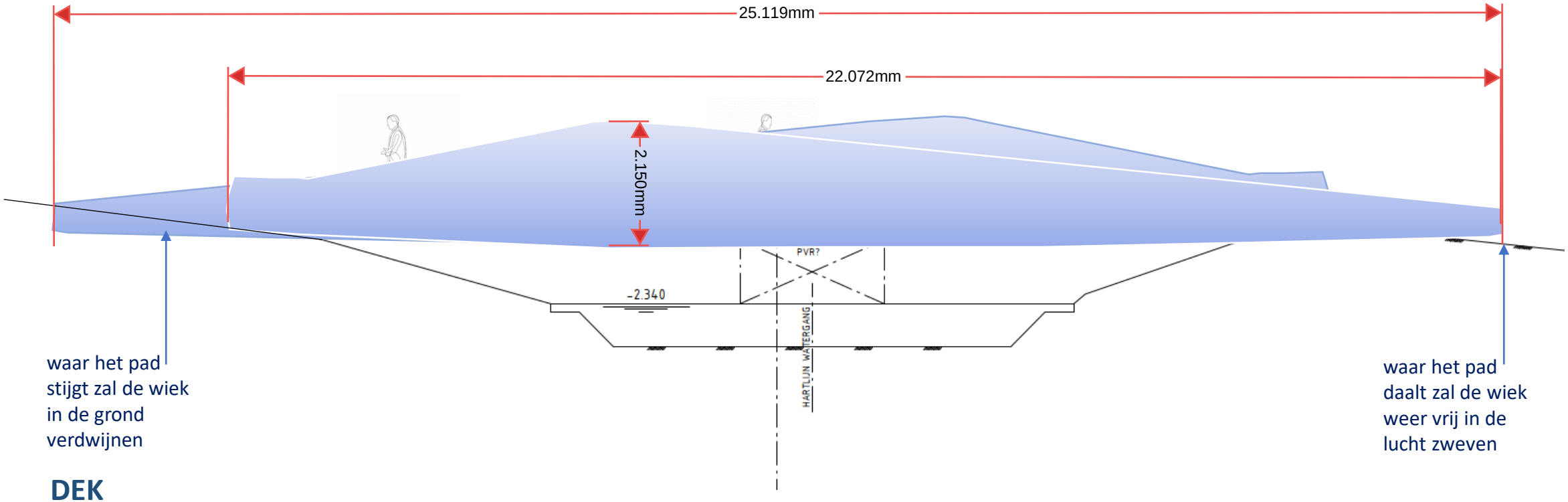


wandelpad



WINDMOLENWIEK TYPE: **APX60**





waar het pad stijgt zal de wiek in de grond verdwijnen

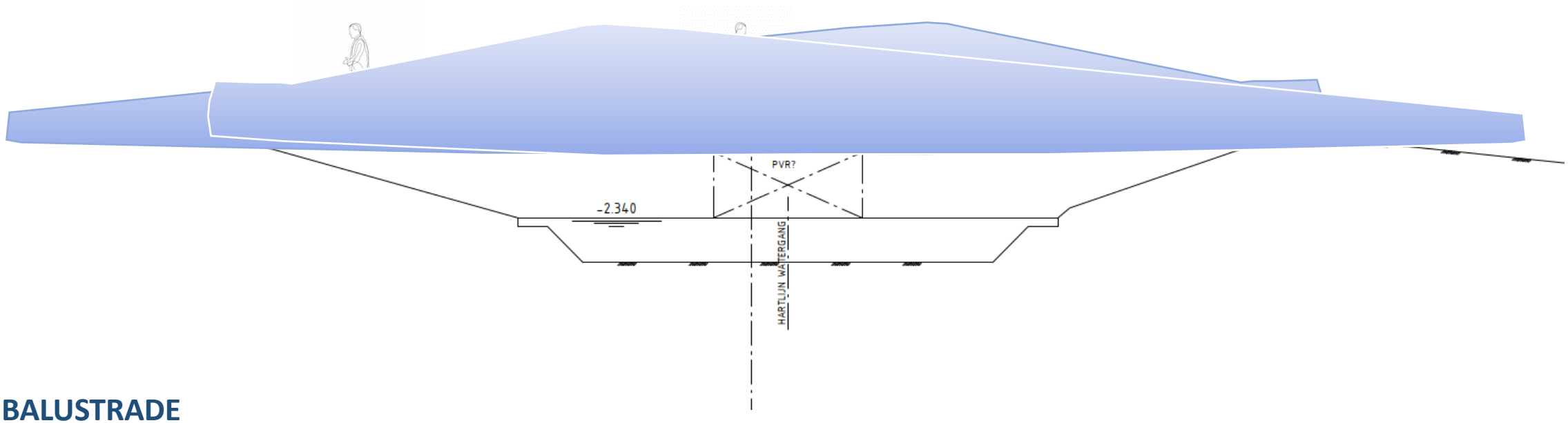
waar het pad daalt zal de wiek weer vrij in de lucht zweven

DEK

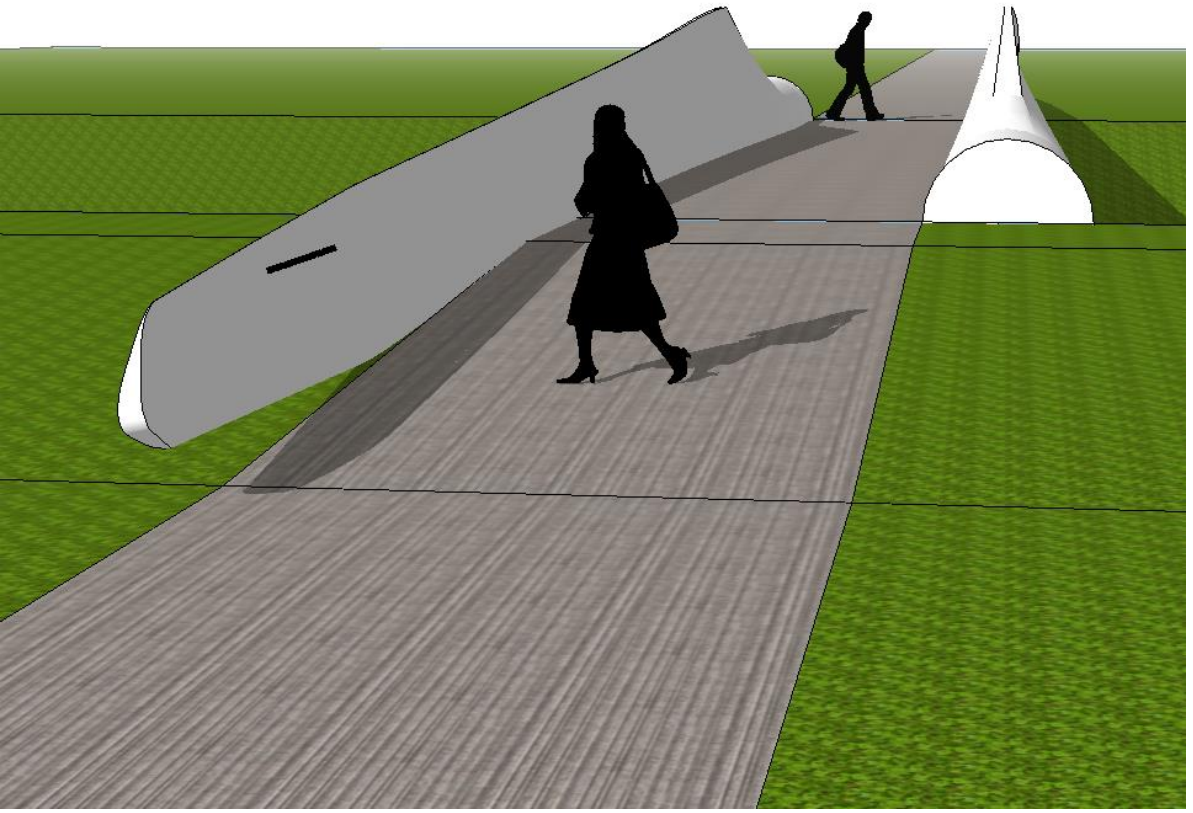


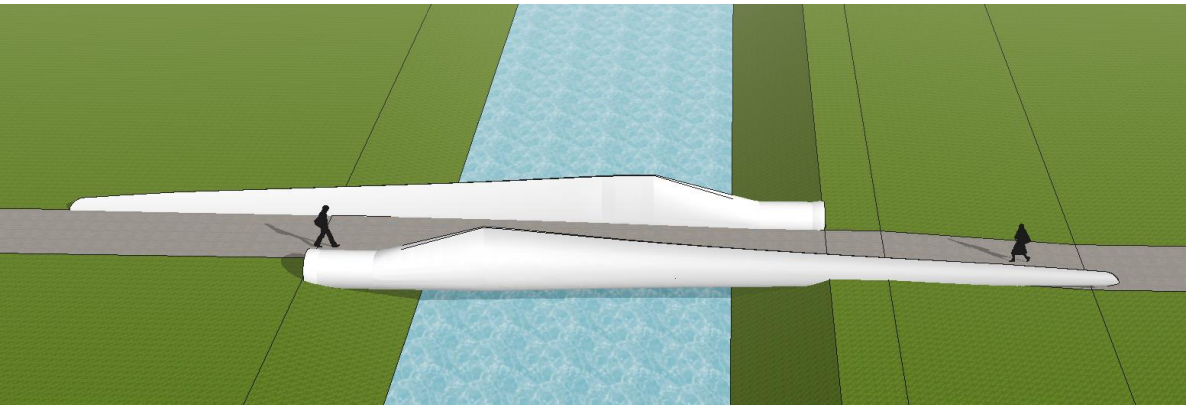


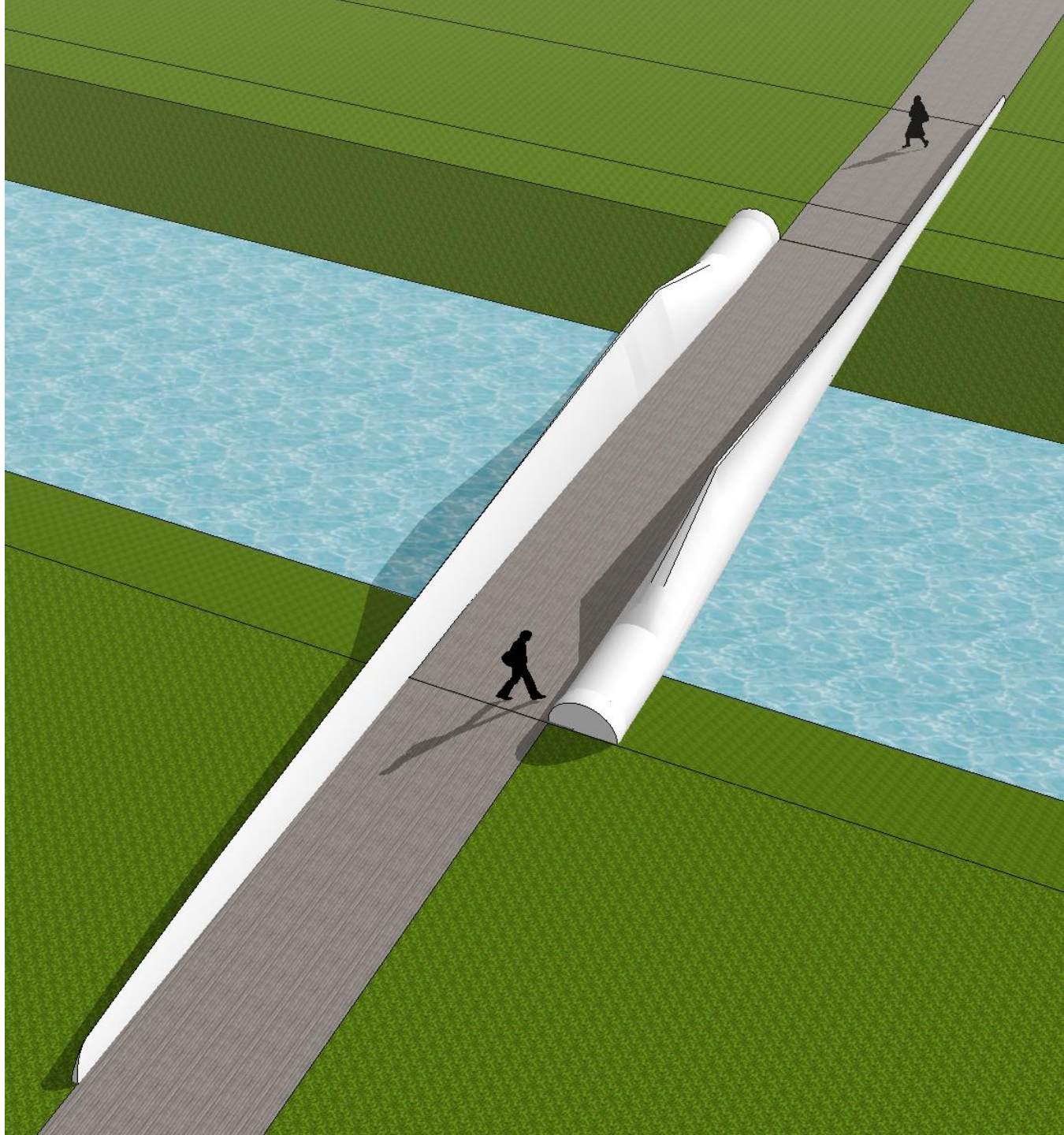




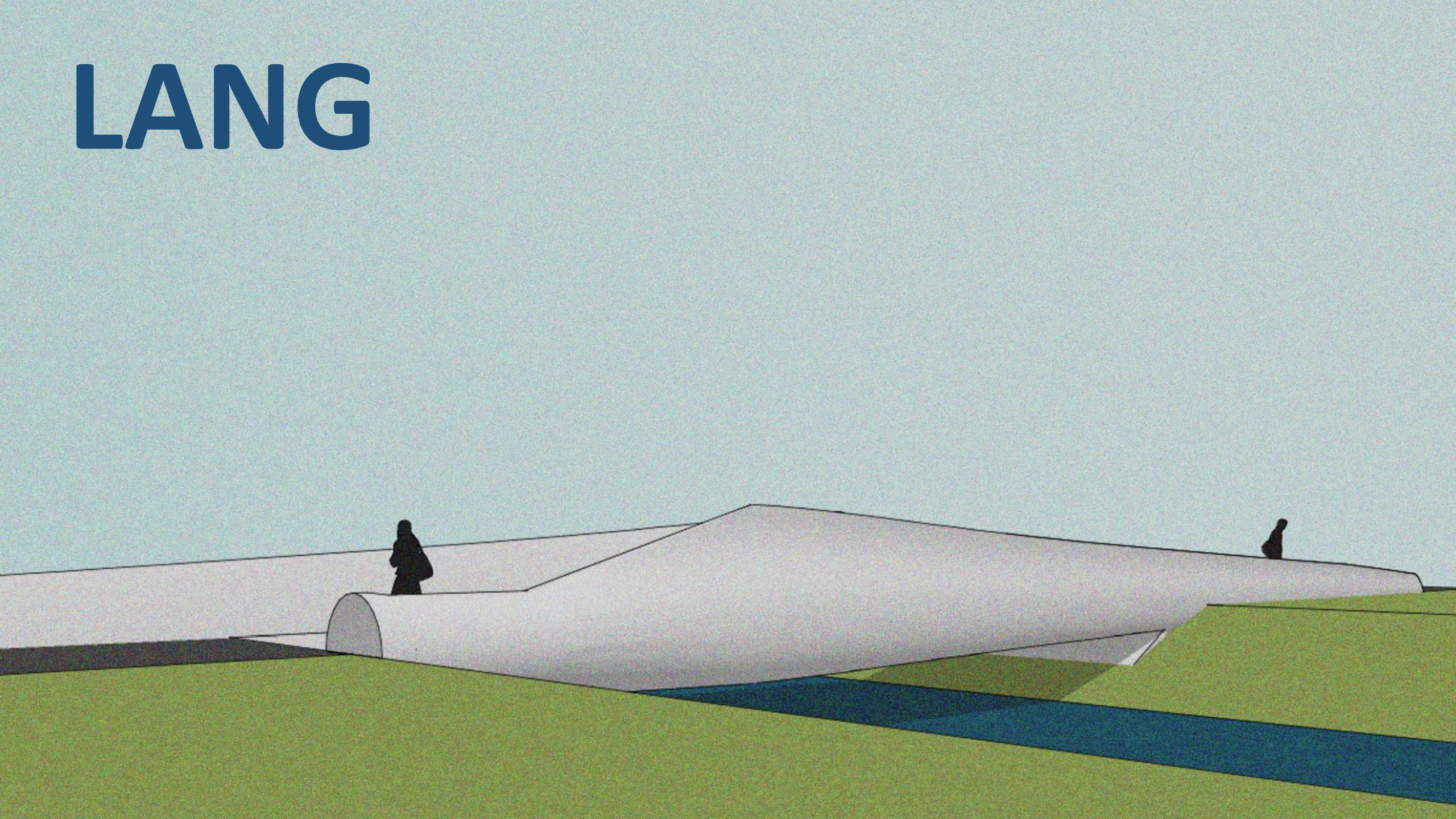
BALUSTRADE

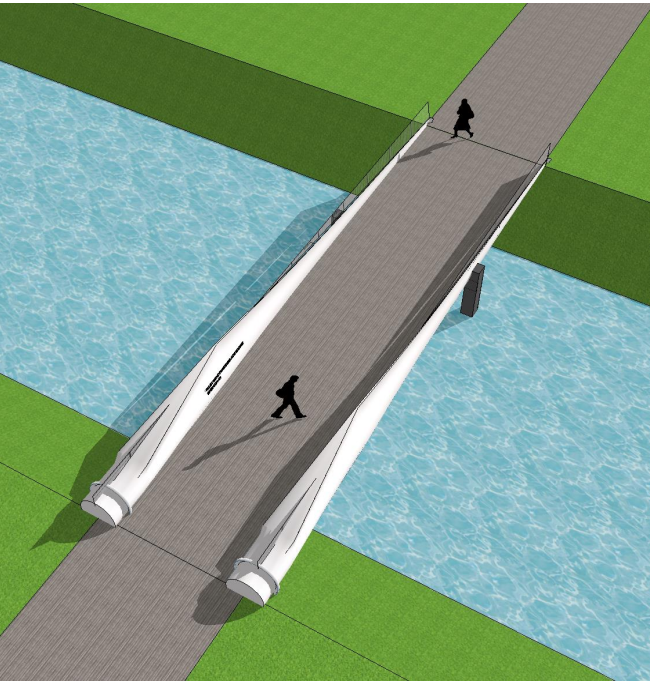






LANG

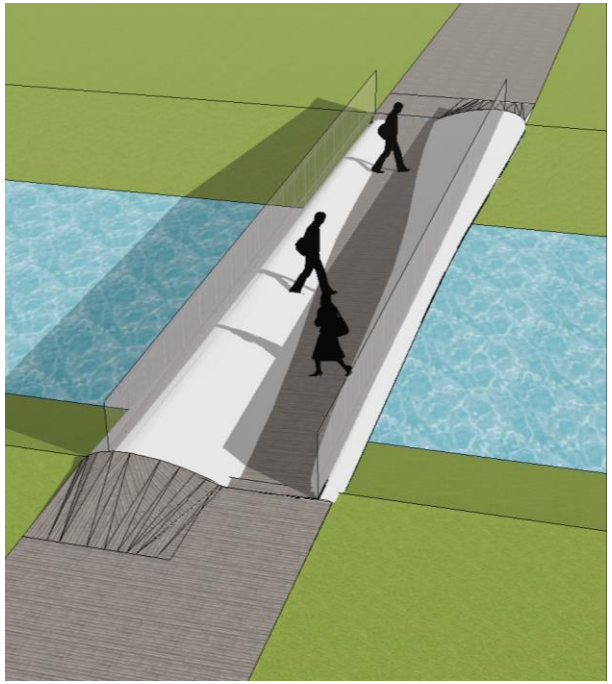




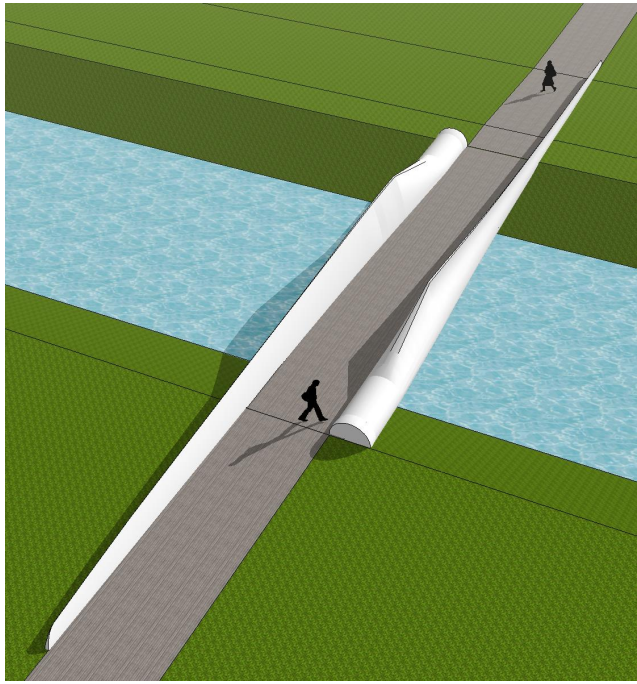
PUUR



KRACHT



SLIM



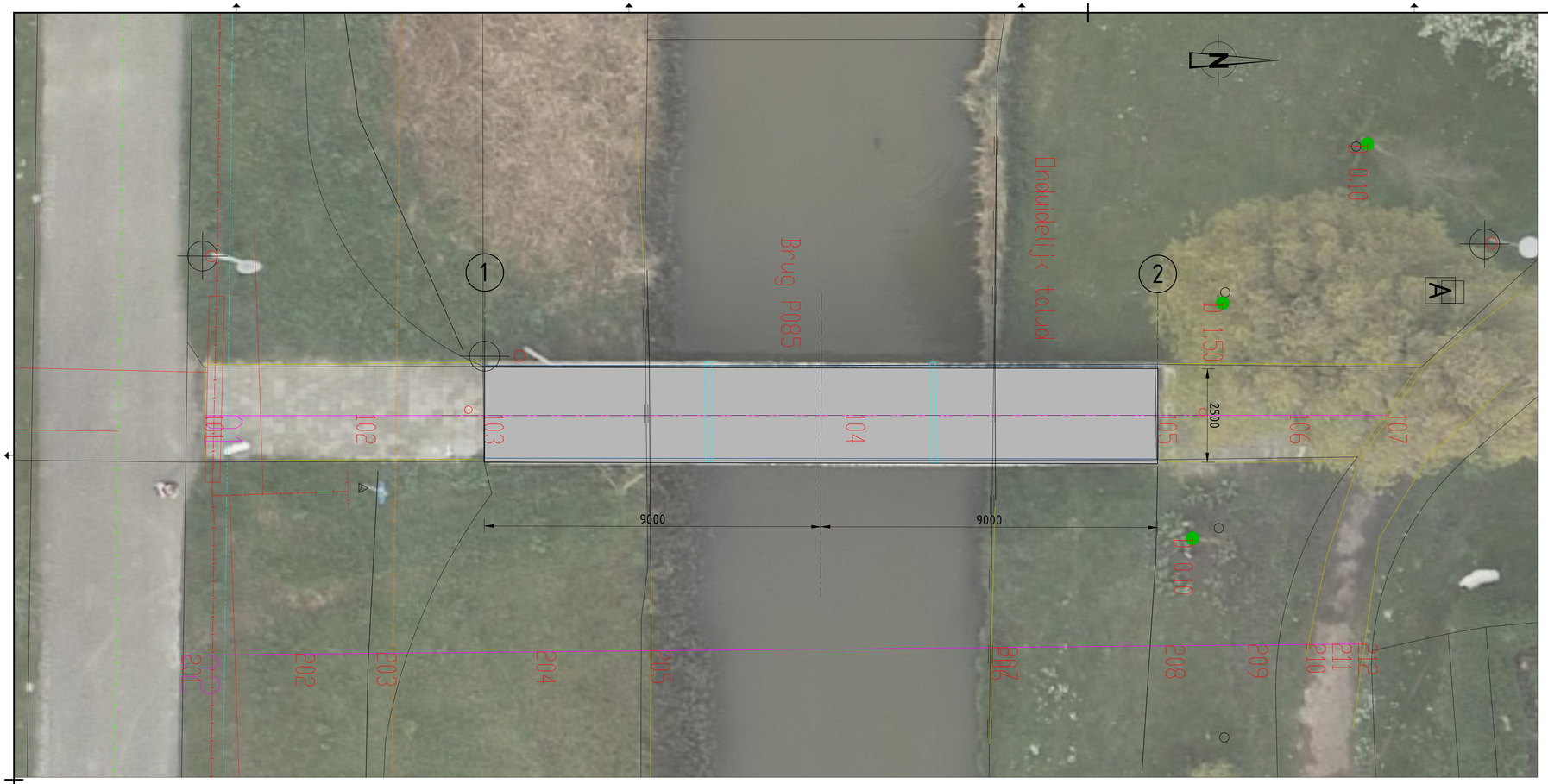
LANG

RESUME

HET BETREFT VIER CONCEPTEN. HET ZIJN GEEN ONTWERPEN MAAR VERBEELDINGEN VAN DE WIJZE WAAROP DE WIEKEN GEBRUIKT KUNNEN WORDEN VOOR VIER TOTAAL VERSCHILLENDE VOETGANGERSBRUGGEN

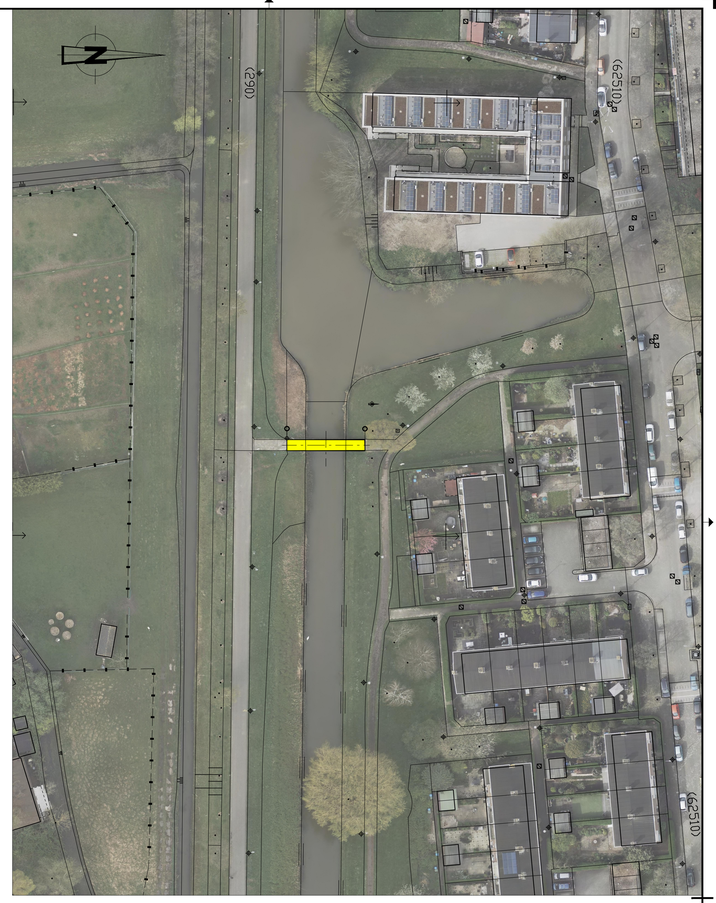
REEFBRUG

Bijlage D – SO-tekening



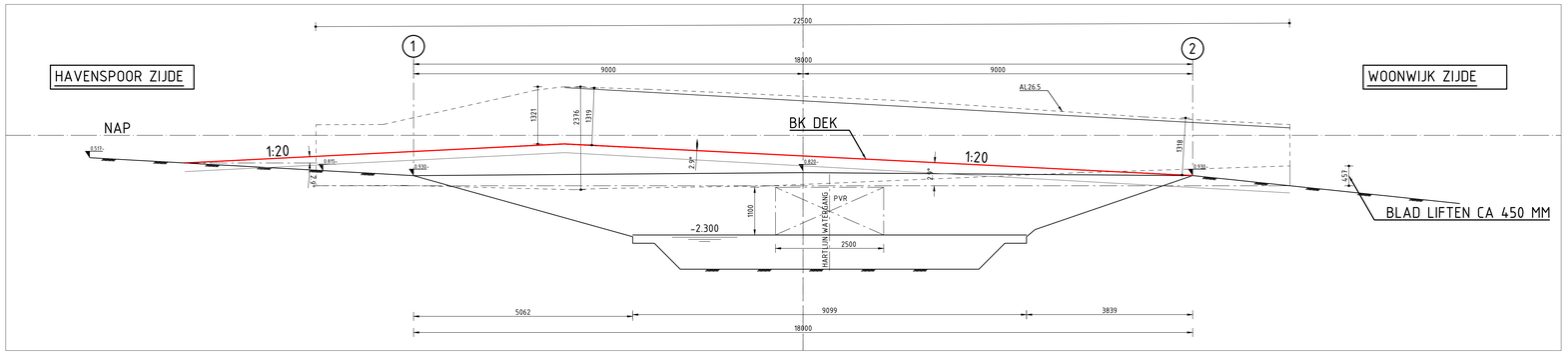
BOVENAANZICHT

SCHAAL 1 : 50



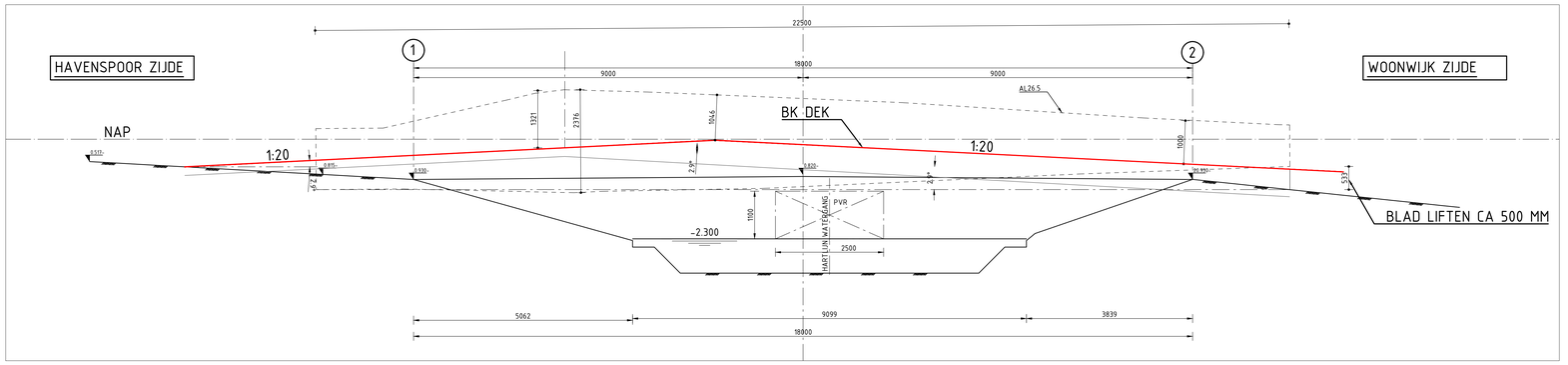
SITUATIE

SCHAAL 1 : 500



AANZICHT BRUG AL26 FIETS

SCHAAL 1 : 50



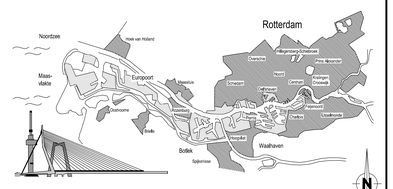
AANZICHT BRUG AL26 VOETGANGERSBRUG

SCHAAL 1 : 50

Opmerkingen

- Maten in millimeters, tenzij anders vermeld
- Peilmaten in meters t.o.v. N.A.P., tenzij anders vermeld

Situatie



Versie

f			
e			
d			
c			
b			
a			
Versie	Omschrijving	Tekenaar	Datum
Bestandsnaam VT001 AL26_5.pdf.dwg	Projectcode:	Verwijzing:	

Gemeente Rotterdam

Stadsontwikkeling
Bureau Ingenieursmanagement en Engineering
de Rotterdam
Wilhelminakade 179
Postbus 6575 3002 AN Rotterdam
www.rotterdam.nl/ingenieursbureau
Telefoon:
...
E-mail:
...

REEFBRUG

PROFIEL WATERGANG
WINDBLADEN TYPE AL26
VARIANT VOET EN FIETS

-

Behoort bij:	Nummer:	Documentsoort: Tekening	
Geografische code:			
Formaat: A0	Blad 1 van		
Schaal: 1	bladen		
Getekend: - Parraf	Gecontroleerd: - Parraf/Datum	Geautoriseerd: - Parraf/Datum	Tekeningnummer: VT001 AL26_5.pdf
			Wijk/Projectcode - Soort - Volgnummer: 0 Versie

P:\GIO\RBM\WW-REEFBRUG\ACAD\VO