



**Gemeente
Rotterdam**

P085 - Reefbrug

Bureaustudie gebruik oude windturbinebladen als
hoofddraagconstructie

Versie 1.1



Van:

L. Tromp, P. Dinai, MPAM. Verheijen, WD. Schutte

Datum:

12 augustus 2024

Cluster

Stadsontwikkeling



Inhoudsopgave

1	Inleiding	3
2	Samenvatting	4
3	Project & scope	6
4	Ambitie	7
5	Basisinformatie turbinebladen	10
5.1	Materialen	10
5.2	Dwarsdoorsnede vormen	10
5.3	Overzicht van de verschillende maten	11
6	Speelveld afgedankte turbinebladen	13
7	Kennis & ervaring binnen-, en buitenland	15
7.1	Polen	15
7.2	Ierland	16
7.3	Simon Pronk; MSc afstudeeronderzoek TU Delft, 2022	19
7.4	Superuse & GKB Barendrecht	20
8	Verkennde constructieve analyse	21
8.1	Typische opbouw en materialen	21
8.1.1	Materiaaleigenschappen na gebruik	22
8.1.2	Conclusie voor de Reefbrug	24
8.2	Materiaaleigenschappen van een gebruikt windturbineblad	25
8.3	Constructieve uitvoering	26
8.4	Verkennde berekeningen windturbineblad als brugligger	26
8.5	Referenties	33
9	Duurzaamheid	34
9.1	MKI-score brug van windturbinebladen	36
9.2	Discussie	37
9.2.1	Controle aanname o.b.v. referentie LCA-Gemeente Rotterdam	37
9.2.2	Controle aanname o.b.v. referentie Royal Haskoning DHV	39
10	Kosten	41
10.1	Testprotocol	42
10.2	Uren engineering VO t/m uitvoering	43
10.3	Totaalkosten	43



1 Inleiding

De Reefbrug (beheercode P085) is een houten fietsvoetgangersbrug in Rotterdam-zuid. De brug dient in 2026 te worden vervangen, omdat de bestaande constructie technisch einde levensduur is. De vervanging van de brug wordt namens Stadsbeheer gebruikt als casus voor het hergebruiken van afgeschreven windturbinebladen uit de windenergiesector als hoofddraagconstructie-elementen.

Windturbinebladen bestaan uit composiet (vezelversterkt kunststof), omdat composiet voldoende vermoeiingsbestendig is voor deze toepassing. Composiet heeft vandaag de dag het nadeel dat het zich moeilijk laat recycleren. Er zijn significante ontwikkelingen op het vlak van recycling. Maar de resulterende producten zijn vaak nog van lage kwaliteit en/of het systeem is financieel niet sluitend. Ondertussen is er een snel groeiende hoeveelheid composietafval, welke voor een belangrijk deel wordt gevoed door de windenergiesector. Het ontwikkelen van nieuwe mogelijkheden voor hergebruik van bestaande composietelementen is dus zeer gewenst. Het algemene beeld is dat de bladen na gebruik in de windturbine nog afdoende sterkte zouden moeten bezitten om dienst te doen in andere toepassingen. Het gebruik als hoofddraagconstructie in niet aan vermoeiing onderhavige bruggen is in het verleden aangewezen als kansrijke optie¹.

Het hergebruik van turbinebladen biedt een kans voor gemeente Rotterdam om haar gebruik van primaire grondstoffen te reduceren. Bovendien scoort het hoog op de R-ladder, welke wordt gebruikt om verschillende benaderingen van circulair handelen te duiden². De realisatie van de Reefbrug op basis van turbinebladen wordt idealiter niet als 'one-off' gezien. De grote hoeveelheid beschikbare turbinebladen en de grote potentiële veelzijdigheid van deze elementen rechtvaardigen een bredere beschouwing naar de toepassingsmogelijkheden binnen de gemeente. Zo zijn in het verleden in Rotterdam turbinebladen al gebruikt om bankjes en speelelementen te maken. Dit valt echter wel buiten de scope van dit rapport.

Dit rapport dient als eindproduct van de bureaustudiefase voor de Reefbrug, zoals gedefinieerd in het Plan van Aanpak (P085_PvA_28-02-2024_def) Aan de hand van beschikbare informatie in literatuur, congres-artikelen en contact met deskundigen is bepaald of het concept haalbaar is. Naast dit rapport worden de bevindingen toegelicht aan het projectteam en de opdrachtgever middels een mondelinge presentatie. Op basis van deze bureaustudie wordt op basis van deze eerste verkenning van de technische en economische mogelijkheden en criteria besloten of naar de volgende fase kan worden overgegaan. Volgens het Plan van Aanpak is dat de schetsontwerpfase.

¹ Stijn speksnijder – Bridge of Blades

² Zie hoofdstuk 9



2 Samenvatting

Het voornaamste doel van de bureaustudie was om te bepalen of het daadwerkelijk haalbaar is om afgeschreven windturbinebladen te gebruiken als hoofddraagconstructie voor de Reefbrug. Er is bij aanvang van de studie een lijst met vragen opgesteld waaronder:

- Is een gebruikt windturbineblad technisch geschikt om te hergebruiken als brugligger?
- Zijn er reeds ervaringen in binnen- / buitenland waar gebruik van kan worden gemaakt?
- Hoe en waar kunnen bladen worden geoogst ten behoeve van het project?

Windturbinebladen blijken een constructie te hebben die in hoofdzaak uit twee elementen bestaat. Uitwendig is er de aerofoil. Dat is de vleugelvorm die zorgt dat het blad gebruik kan maken van de wind. Inwendig wordt de (buig)sterkte geleverd door een balkconstructie in de vorm van een I-ligger of twee I-liggers die samen met een deel van de huid van het blad (de schaal) een kokerconstructie vormen. De volledige constructie is opgebouwd uit composiet. De voornaamste reden daarvan is dat composiet vermoeiingsbestendig is waardoor de bladen een technische levensduur van 20-25 jaar hebben. Turbinebladen worden om één van twee redenen afgeschreven. Ze kunnen wegens accumulatie van vermoeiingsschade als technische einde levensduur zijn aangemerkt of ze kunnen vroegtijdig vervangen worden om plaats te maken voor een effectiever blad zodat het windpark meer energie oplevert. In beide gevallen hebben de bladen afdoende statische sterkte om als hoofddraagconstructie te dienen voor een fietsvoetgangersbrug.

In het buitenland is al ervaring op gedaan met gebruik van oude bladen als brugliggers. In Polen en in Ierland zijn bruggen gemaakt en opengesteld voor publiek. Dit betreft ook in beide gevallen fietsvoetgangersbruggen met lengtes variërend van 5m tot ca. 15m lang. Beide partijen bleken behulpzaam en positief tegenover het Rotterdamse initiatief. Opvallend zijn twee overeenkomsten tussen de bruggen in beide landen. Beide gebruiken de bladen rechttop staand dominant in beeld. Dit terwijl de meeste bladen (afhankelijk van het type) om de horizontale as in principe sterker en stijver zijn. Ook hebben beide partijen ondervonden dat de bladen worden geleverd zonder technische documentatie, hetgeen reverse engineering noodzakelijk maakt.

In Nederland zijn – zover bekend - nog geen grotere dragende elementen gemaakt van oude windturbinebladen. Wel zijn er diverse kleinere initiatieven geweest, vooral in de regio Rotterdam. Zo zijn er speeltoestellen en bankjes gemaakt, welke in Rotterdam staan. Hierbij blijkt telkens een en dezelfde partij een belangrijke rol te spelen; Architectenbureau Superuse en daaruit voortgekomen het bedrijf Blade-Made. Blade-Made blijkt een belangrijke en niet te negeren partij te zijn als link tussen de civiele/bouwkundige wereld en die van de windenergie. Blade-Made wordt dan ook betrokken in het verdere verloop van dit project.

Op basis van literatuurstudie is een eerste verkenning gedaan naar wat voor formaat blad er nodig is om de Reefbrug te maken. Uitgaande van twee bladen voor de brug wijst de verkenning op bladen van ca. 30-40m lang, waar dan een gedeelte van wordt benut. Typisch kan ca. 2/3 deel van de lengte van een blad constructief worden benut om te overspannen. Dit zal in de volgende fase nader worden onderzocht, met in achtneming van de inpassing van de bladen in de omgeving en de beschikbare bladen die via Blade-Made zullen worden geoogst.



De duurzaamheid van het concept is ook beschouwd tegenover een betonbrug van ongeveer gelijke afmetingen die als referentie is genomen. Hieruit volgt dat de toepassing van tweedehands bladen een duidelijk positief effect heeft op de MKI-score van de brug, hoofdzakelijk door geringer grondstofgebruik.

De kosten van het project zijn significant hoger ingeschat dan de referentiebrug. Dat komt hoofdzakelijk door de benodigde reverse-engineering die op de bladen moet worden toegepast. Voor deze meerkosten is subsidie aangevraagd in de SPUK-KCI van de rijksoverheid. Opgemerkt wordt dat bij deze begroting uitgebreider onderzoek en kennisdeling is voorzien dan minimaal noodzakelijk, hetgeen bijdraagt aan snellere opschaling en bredere inzet van hergebruikte windturbinebladen.

Het projectteam concludeert dat de bureaustudie voortzetting van het project naar de volgende fase rechtvaardigt.



3 Project & scope

De Reefbrug met beheercode P085 is een houten parkbrug in Rotterdam-Zuid tussen een woonwijk (straat = Ellemare) en het Havenspoorpad. De brug valt onder verantwoordelijkheid van de afdeling Assetmanagement Openbare Ruimte (Stadsbeheer) en is in 2023 als zijnde technisch einde levensduur aangemerkt. Als dusdanig dient de brug te worden vervangen. Hiervoor is bij het Ingenieursbureau van de gemeente Rotterdam (PM&E) een uitvraag gedaan ten behoeve het voorbereiden en uitvoeren van de vervanging van de brug door een functioneel gelijkwaardige brug. In samenspraak is besloten om de brugvervanging aan te grijpen om als pilot te gebruiken voor de toepassing van afgeschreven windturbinebladen als hoofddraagconstructie.

Het ingenieursbureau zal het werk technisch en inhoudelijk voorbereiden, uitzetten in de markt en in de uitvoering begeleiden. Voor dit werk is specifieke kennis benodigd. Rotterdam werkt daarom samen met RHDHV. Alle werkzaamheden ten behoeve het verkrijgen van bladen, het beoordelen en ontwerpen met de bladen, afstemming met bevoegd gezag en de uiteindelijke realisatie van de brug vallen binnen de scope van dit project. De verantwoordelijkheid voor de brug wordt overgedragen aan Stadsbeheer na realisatie en het afwerken van alle restpunten tot voldoening van de opdrachtgever.



4 Ambitie

De aanleiding voor het ontwikkelen van een toepassing van in onbruik geraakte windturbinebladen is duidelijk: voorkomen van afval en waardevermindering van materiaal. Daarmee wordt invulling gegeven aan één van de hoogste circulaire principes: re-use. Deze verkenning is gericht op het ontdekken en verkennen van de mogelijkheid om in onbruik geraakte windturbinebladen te gebruiken als hoofdconstructie voor bruggen. In Rotterdam bestaat de traditie om kennisontwikkeling en experimenten (pilotprojecten) uit te voeren in de praktijk van alle dag. De vervanging van de Reefbrug is daarvoor in dit geval de ideale casus.

Waar de bovenliggende ambitie van dit project gelegen is in het versnellen van de transitie naar circulair bouwen is voor dit project tevens van belang in deze verkennende fase een project ambitie te formuleren. De brug die ontworpen en gebouwd gaat worden met windturbinebladen komt namelijk op een echte locatie in de openbare ruimte en wordt echt gebruikt en moet echt onderhouden worden. Uiteraard dient het ontwerp te voldoen aan het technisch- en functioneel programma van eisen (wordt later vastgesteld). Daarop aanvullend is het in Rotterdam gebruikelijk ruimte- en beeldambities te formuleren met als doel niet enkel een goed technisch/functioneel object te realiseren maar een object dat bijdraagt aan de kwaliteit van de directe omgeving en waarde creëert voor de stad als geheel. Deze projectambitie is ingedeeld naar welstand, bruggenvisie, omgeving en stad:

Welstand

In de welstandsnota zijn eisen geformuleerd waaraan een bouwwerk in Rotterdam moet voldoen. Afhankelijk van aard, type en locatie gelden verschillende welstandseisen. De brug bevindt zich op een grens woonwijk(stempel strokenbouw)- groengebied(randpark) waarop welstandniveau 'regulier' van toepassing is. Voor beide welstandsgebieden gelden criteria die relevant zijn voor bouwwerken zijnde gebouwen. Een brug is een bouwwerk niet zijnde gebouwen waarvoor de welstandscriteria niet of onvoldoende van toepassing zijn.

Bruggenvisie

Het ontbreken van duidelijk welstandscriteria voor met name kleinere bruggen geschikt voor fietsers en voetgangers is onderkend. Om die reden is in 2010, ten behoeve van een grootschalige vervangingsoperatie van fiets- en voetgangersbruggen, een bruggenvisie opgesteld. Hiervoor zijn de hierboven genoemde *welstandsnota* en *koepelnota de Rotterdamse stijl* als uitgangspunt genomen. In de bruggenvisie wordt onderscheid gemaakt tussen families van bruggen en unica's. Onder families van bruggen worden bruggen verstaan die op basis van een eenduidig ontwerp zijn gebouwd, op maat gemaakt voor de specifieke plek waar ze geplaatst zijn. Onder unica's worden bruggen geschaard waarvoor een uniek ontwerp gemaakt is. In de bruggenvisie is de woonwijk ten noorden van de locatie van de Reefbrug gekenmerkt als het gebied waar fiets- en voetgangersbruggen behoren tot het cluster 'singels tuindorp idylle'. Het ontwerp is een unica, maar dient op een aantal punten wel in lijn met deze cluster te worden ontworpen.



Omgevingswaarde

De Reefbrug is gesitueerd aan de rand van een woonwijk en biedt bewoners de mogelijkheid het randpark te bereiken. Daarmee is de Reefbrug een belangrijke schakel in een recreatief netwerk.

Niet belangrijk in aantal gebruikers, maar wel belangrijk in de kwaliteit die de brug biedt qua route in een daily urban system voor de bewoners. Het gebruik is extensief en voornamelijk recreatief.

Stadswaarde

Rotterdam streeft goede groei na. Het aantal inwoners neemt jaar na jaar toe. Die groei wordt opgevangen binnen bestaande stad door te verdichten en gebruik te intensiveren. Dit legt een grotere claim op de beschikbare ruimte en vraagt om kwalitatieve ruimtes die de toename aan gebruikers kunnen faciliteren. In de omgevingsvisie zijn daarvoor vijf pijlers geformuleerd: circulair, compact, productief, inclusief en gezond. Met name *circulair* (transitie naar duurzame energie, circulaire productie en recycling) en *gezond* (meer groen, klimaatadaptatie en wandel- fietsroutes) en compact (toename aantal woningen in samenhang met mobiliteit, groen en voorzieningen) zijn relevant voor dit project.

Voor de Reefbrug komen meerdere Rotterdamse ambities en beleidsdoelen samen. Vandaar dat de Reefbrug als pilot gezien wordt waarmee grenzen verlegd en bakens verzet gaan worden. Daarom is voor de Reefbrug gekozen een specifieke beeldverwachting te formuleren, aanvullend op de geldende criteria uit welstandnota, koepelnota Rotterdamse stijl en de bruggenvisie. De ambitie voor het ontwerp van de Reefbrug op basis van windturbinewieken is als volgt:

De Reefbrug

- is een brug in de categorie ‘unica’, maar houdt rekening met basis principes uit de bruggenvisie;
- is een toonaangevend en inspirerend voorbeeld van circulair bouwen;
- is specifiek ontworpen en gebouwd vanuit de principes van re-use;
- ontleent zijn identiteit aan windturbinewieken die specifiek voor dit project geoogst worden;
- is zo ontworpen dat de windturbinewieken een herkenbaar hoofdbestanddeel vormen;
- heeft windturbinekenmerken die zowel van afstand (vorm, volume) als van dichtbij (detaillering, codes, nummering, vezelstructuur, etc) als windturbinewieken (-onderdelen) herkenbaar zijn;
- Deze ambitie is doorvertaald in een set aan criteria die als **uitgangspunten** genomen moeten worden voor het ontwerp van de Reefbrug;



Deze uitgangspunten zijn als volgt:

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.



5 Basisinformatie turbinebladen

5.1 Materialen

Glasvezel: Lichtgewicht en duurzaam, glasvezel wordt vaak gebruikt in windturbinebladen vanwege de uitstekende sterkte-gewichtsverhouding en weerstand tegen vermoeiing en corrosie. Dit in combinatie met een gunstige kostprijs.

Koolstofvezel: Koolstofvezel staat bekend om zijn hoge sterkte en stijfheid en wordt vaak gebruikt in combinatie met glasvezel om de structurele integriteit en prestaties van windturbinebladen te verbeteren ten behoeve van de toepassing van grotere bladen.

Epoxyhars: Epoxyhars wordt gebruikt als matrixmateriaal om de vezels samen te binden in composietmaterialen zoals glasvezel en koolstofvezel, wat voor sterkte en stabiliteit zorgt. Epoxyhars biedt de mogelijkheid om glas- en koolstofvezels te combineren, omdat de interface op beide vezels past bij deze hars. Epoxyhars heeft van de verschillende mogelijke harssystemen de beste chemische en mechanische eigenschappen. Daar tegenover staat dat het ook het duurste harssysteem is.

5.2 Dwarsdoorsnede vormen

Aerofoil: Windturbinebladen hebben vaak de vorm van een vleugelprofiel, vergelijkbaar met die van een vliegtuigvleugel, om windenergie efficiënt op te vangen. Deze vorm heeft doorgaans een gebogen oppervlak aan de voorzijde (bolle zijde) en een vlakker oppervlak aan de achterzijde (concave zijde), zie figuur 1.

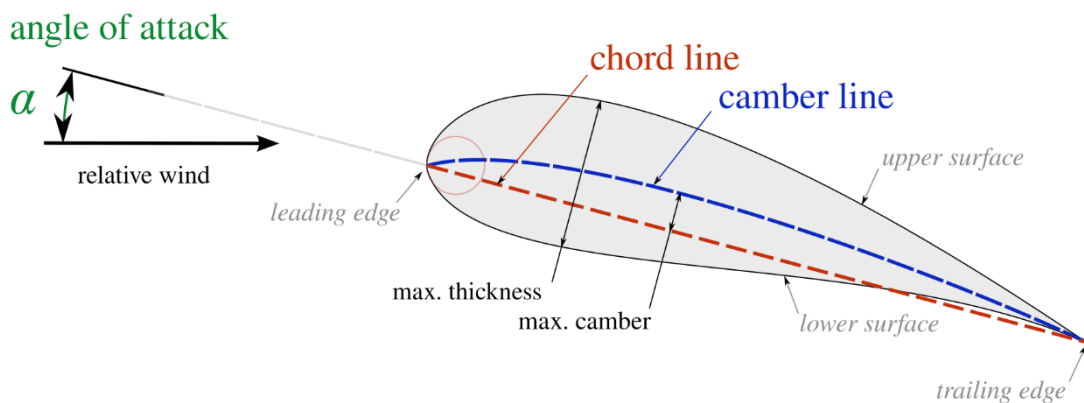


Fig. 1 – Generiek vleugelprofiel

Tweevlaksvorm: Sommige windturbinebladen hebben een 'tweevlaksvorm', waarbij het blad over de lengte naar boven buigt. Dit ontwerp kan de aerodynamische prestaties en stabiliteit verbeteren.

Draai: Windturbinebladen kunnen ook over hun lengte draaien, waarbij de aanvalshoek varieert van de wortel tot de punt. Deze draai helpt de prestaties bij verschillende windsnelheden en aanvalshoeken te optimaliseren.



Taps toelopend: Taps toelopende windturbinebladen hebben een geleidelijk afnemende breedte van de wortel tot de punt. De doorsnede van het blad verloopt ook over de lengte, qua breedte, hoogte en dikte. Dit taps toelopende ontwerp helpt de luchtweerstand te verminderen en de aerodynamische efficiëntie te verbeteren.

5.3 Overzicht van de verschillende maten

Kleinschalige turbines:

Bladlengte: varieert doorgaans van enkele meters tot ongeveer 20 meter.

Toepassing: Kleinschalige turbines worden vaak gebruikt voor residentiële, agrarische of kleinschalige commerciële doeleinden, waarbij elektriciteitsopwekking voor lokaal gebruik is of als aanvulling op de netstroom.

Middelgrote turbines:

Bladlengte: Typisch tussen 20 meter en 50 meter.

Toepassing: Middelgrote turbines worden vaak ingezet in landelijke of semi-stedelijke gebieden, maar ook voor gemeenschapswindprojecten. Ze kunnen een grote bijdrage leveren aan de elektriciteitsopwekking voor lokale gemeenschappen of kleine bedrijven.

Grootschalige onshore turbines:

Bladlengte: Typisch tussen 50 meter en 80 meter.

Toepassing: Grootschalige onshore turbines worden veel gebruikt in windparken op het land. Ze worden geïnstalleerd in gebieden met gunstige windomstandigheden en kunnen aanzienlijke elektriciteit opwekken voor elektriciteitsproductie op nutsschaal.

Offshore-turbines:

Bladlengte: Kan variëren van 80 meter tot meer dan 100 meter.

Toepassing: Offshore-turbines worden geïnstalleerd in waterlichamen, zoals oceanen of grote meren. Ze zijn doorgaans groter dan onshore-turbines om sterkere en consistentere offshore-winden op te vangen. Offshore-turbines kunnen aanzienlijke hoeveelheden elektriciteit produceren voor kustgebieden en offshore-windparken.

Extra grote offshore-turbines (volgende generatie):

Bladlengte: meer dan 100 meter.

Toepassing: De volgende generatie offshore-turbines zijn in ontwikkeling en worden ingezet, met nog grotere bladlengtes en hogere vermogens. Deze turbines zijn bedoeld om de efficiëntie van de energie afvang verder te vergroten en de kosten van offshore windenergie terug te dringen.

Figuur 2 toont enkele typische doorsnedes van windturbinebladen.

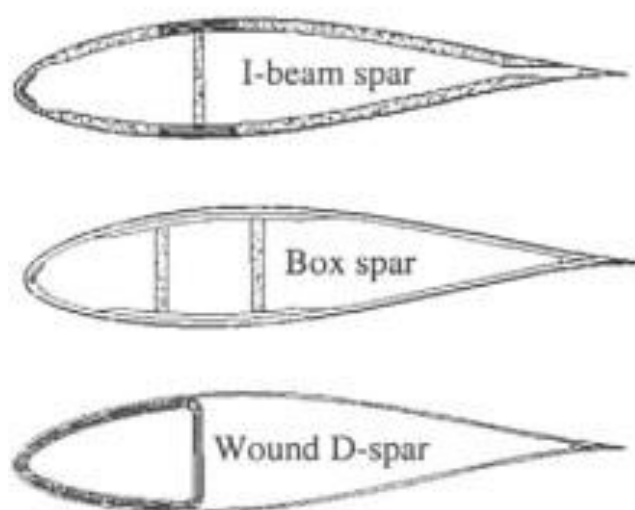


Fig. 2 – Typische constructieve doorsnede windmolenbladen³

³ R.P.L. Nussen, D.R.V. Van Delft, in [European Structural Integrity Society](#), 2003



6 Speelveld afgedankte turbinebladen

Voor het project is het van belang dat tijdig geschikte bladen beschikbaar komen. Tijdig is in dit geval vanaf de schetsontwerpfase. De bladen vormen namelijk de basis van het ontwerp. Een aantal factoren zijn van belang:

Lengte

Het is de ambitie om de ca. 18m lengte van de brug in één keer te overspannen. Ervan uit gaande dat de uiteindes van de bladen niet gebruikt kunnen worden (typisch kan 2/3 deel worden gebruikt) zou een geschikt blad orde grootte minstens 1,5 keer zo lang moeten zijn (ca. 30m) als de vereiste overspanning. Uiteindelijk hangt de keuze af van de stijfheid en sterkte van de doorsnede. Deze heeft een relatie met de lengte van een blad. Dit wordt nader beschouwd in hoofdstuk 8.

Beschikbaar aantal

In eerste aanzet lijkt het logisch om uit te gaan van minimaal twee liggers voor de brug. Eén extra blad is nodig om (destructieve) tests op te kunnen doen. Deze bladen dienen allemaal van exact hetzelfde type te zijn en ook van dezelfde batch om variaties in gebruiksgeschiedenis en productievariaties te voorkomen.

Huidige staat

Om kostenefficiënt te kunnen werken dienen de bladen in een zo goed mogelijke staat zijn. Onshore bladen schijnen daartoe beter te zijn dan offshore bladen wegens het minder zware klimaat waaraan ze zijn blootgesteld. Ook zijn jongere bladen in betere staat dan oudere bladen.

Gebruikshistorie

Om een goede inschatting te kunnen maken van de restcapaciteit van een blad dient de gebruikshistorie globaal bekend te zijn. Hoe minder er bekend is, des te meer de constructie conservatief moet worden ontworpen.

Beschikbaarheid technische informatie

Het specifieke ontwerp van een turbineblad is in principe altijd geheim. Het ontwerp is van invloed op de efficiëntie van het blad en dus op de energieopbrengst. De nieuwste bladen zijn gebouwd op basis van de nieuwste technieken/inzichten en zijn dus ontworpen aan de strengste geheimhouding. Hoe ouder een blad in de tijd hoe minder relevant het ontwerp is. Daarmee is het waarschijnlijker dat het projectteam ontwerpdata kan ontvangen. Merk echter op dit uit interviews met ervaren partijen tot nu toe is gebleken dat er geen informatie wordt verstrekt. Algemeen geldt dat bladen voor één van twee redenen kunnen worden afgeschreven:

1. Technisch einde levensduur
2. Voortijdig vervangen door een nieuw en efficiënter ontwerp.

In geval een oud blad rechtstreeks van de turbine komt is de kans groot dat het blad vermoeiingsschade heeft. Vanaf een zeker niveau kan dit de statische draagkracht aantasten. Maar van zo'n blad is de kans groter dat er wel de technische data verkrijgbaar is. Een kwalitatief beter blad is een blad dat voortijdig is vervangen. Sommige bladen kunnen al langer op een werf hebben gelegen. Zo'n blad verdient de voorkeur want het is ouder en dus is technische data beter beschikbaar, maar het heeft niet zoveel vermoeiingsschade als een blad dat wegens einde levensduur is afgeschreven.



Merk op dat men in Ierland voor de brug in Ierland ook bladen heeft gebruikt die lang op een werf hebben gelegen. De bladen waren voor het zicht in slechte staat. Maar schoonmaken en netjes maken koste weinig inspanning.

Het blijkt bijzonder moeilijk om voor het verkrijgen van afgeschreven bladen met de juiste personen in contact te komen terwijl Rotterdam en RHDHV geen onderdeel zijn van de windenergiesector. Daardoor wordt het oogsten en van de juiste bladen een risico. Er is een intermediair benodigd met de juiste contacten en die het speelveld van afgedankte bladen goed kent. Voordeel is daarbij dat deze partijen ook alle procedures kennen voor transport en materiaalafhandeling en een netwerk hebben van transporteurs, verwerkers (als er gezaagd moet worden) en opslagplaatsen. Het blijkt dat Blade-Made, een Rotterdams bedrijf dat voortkomt uit architectenbureau Superuse de beste partner is. Blade-Made/Superuse heeft een bewezen track record van hergebruik van bladen. In Rotterdam zijn door deze partijen speeltoestellen en bankjes gerealiseerd. Blade-made is gecontacteerd en zal in de voorbereidingsfase deelnemen aan het project.. Blade-Made zal zorg dragen voor het verkrijgen, opslaan, transporteren en onderzoeken van de bladen. Of Blade-Made ook in de uitvoering een rol zal krijgen wordt in een later stadium bepaald.



7 Kennis & ervaring binnen-, en buitenland

7.1 Polen

Recyclingbedrijf Anmet in Szprotawa, Polen heeft in samenwerking met GP-Renewables Group in oktober 2021 zijn eerste voetgangers- en fietsbrug gerealiseerd. Deze brug is gemaakt van hergebruikte composiet windturbinebladen. Er is drie jaar onderzoek gedaan om deze brug te realiseren, ook staat er een patent voor commercialisering op. Het doel van dit project is geweest om het probleem van buiten gebruik gestelde turbinebladen aan te pakken en een alternatief te bieden voor storten. De bladen krijgen een tweede leven. Deze aanpak vermindert ook de behoefte aan nieuwe grondstoffen en de uitstoot die gepaard gaat met de productie ervan. Anmet, opgericht door Andrzej Adamcio, is al vijf jaar gespecialiseerd in het hergebruik en upcycling van windturbinebladen, inclusief diensten voor het snijden en recyclen van bladen. Het bedrijf werkte samen met GP Renewables en de Rzeszów University of Technology om het gebruik van windbladen als vervanging voor traditionele brugmaterialen te valideren. De voetgangersbrug over de rivier de Szprotawa werd van 2014-2020 gefinancierd door het European Funds – Intelligent Development-programma. Anmet maakt ook buitenmeubilair onder het merk 'Wings for Living' met behulp van hergebruikte windbladen.

Anmet zou ook in Nederland kunnen werken, maar de bladen van Anmet komen altijd uit Duitsland of Polen. In het kader van de MKI-score is dat onwenselijk omdat (grote) transportafstanden dominant kunnen worden in de totale MKI-score. Wel moet rekening worden gehouden met het IP op het toepassen van bladen dat GP-Renewables zegt te hebben. Het is niet geheel duidelijk geworden wat dat IP precies behelst. GP-R zegt geen blokkade te willen opwerpen voor de Reefbrug, maar indien er mogelijk sprake is van een conflict met het IP dan moeten ze wel worden geïnformeerd over het Rotterdamse ontwerp.

Ook Anmet/GP-Renewables onderkent de noodzaak om reverse-engineering toe te passen op de verkregen turbinebladen. Figuur 3 hieronder toont een drie-punts buigproef op een stuk turbineblad. Opmerkelijk hierin is de zadelvorm van twee drukcilinderkoppen. Dit is gedaan om de krachten gelijkmatig verdeeld in te leiden in het blad. Merk echter op dat men niet-destructief test. Men test alleen of een blad sterk genoeg is voor een bepaald ontwerp. Uit het EU-gesubsidieerd project kwam destijds naar voren dat een 20-30 jaar oud blad nog zo ongeveer 100 jaar dienst moet kunnen doen als brugligger (niet aan vermoeiing onderhevig).



Fig. 3 – Driepunts buigproef op een sectie van een windturbineblad

Volgens Anmet kunnen de bruggen prijscompetatief zijn met andere bruggen van beton, staal en composiet. Dat valt wel samen met het hebben van goede kennis van de welke bladen er beschikbaar zijn. Anmet weet uit ervaring welke types bladen dominant zijn in het huidige windlandschap in Duitsland en Polen. Het aantal producenten neemt af, maar het aantal verschillende types turbinebladen is nog hoog. Anmet kiest enkel uit een beperkte selectie van bladen.

Vestas en LM, twee belangrijke producenten hebben beiden een verschillende benadering tot het ontwerp van de bladen. Hier wordt in hoofdstuk 8 meer aandacht aan besteed. Het verschil tussen de bladen kan bepalend zijn voor de oriëntatie waarin het blad kan worden toegepast.

Als de bladen de status 'afval' hebben dan is verwerken een probleem. Maar als bladen worden aangekocht voordat ze de afvalstatus heeft kan dit probleem volgens Anmet worden vermeden. Anmet zegt daarnaast ook een manier te hebben waarmee kan worden aangetoond dat de turbinebladen niet meer als afval moeten worden gecategoriseerd maar als bouw materiaal (mogelijk een soort van certificaat?).



Fig. 4 – gerealiseerde brug



Fig. 5 – Brug in bouwfase

Voor zover bekend is er één brug gerealiseerd, zie figuren 4 en 5.

7.2 Ierland

In Ierland en de VS is het Re-Wind Network actief. Re-Wind richt zich, net zoals Anmet / GP-Renewables op de upcycling van afgeschreven windturbinebladen. Beide partijen kennen elkaar en zijn feitelijk concurrenten van elkaar ware het niet dat ze geografisch dusdanig ver van elkaar weg zitten en er zo weinig vraag is naar hun producten dat er praktisch geen sprake is van concurrentie. In Ierland heeft Re-Wind een 5m lange brug gerealiseerd welke geschikt is voor langzaam verkeer en hulpdiensten. Re-Wind heeft een uitgebreide presentatie over het bedrijf en de gerealiseerde brug gegeven. Een opname ervan is op de k-schijf (intern archief) opgeslagen. Hieronder worden kort de vragen met antwoorden weergegeven die zijn besproken.



- Zijn er tests gedaan en zo ja welke?
 - De bladen zijn aan full-scale buigproeven onderworpen. De brug als geheel is aan een full scale test belasting onderworpen geweest. Uit de bladen zijn verschillende coupons genomen waarvan volgens een niet nader genoemde Amerikaanse norm middels een 'uitbrandtest' de vezel lay-up is bepaald.
- Waarom zijn de bladen edgewise gebruikt (rechtopstaand)?
 - Een rechtopstaand blad geeft valt meer in het zicht dan een plat liggend blad. Het geeft meer mogelijkheden om aan gebruikers te laten zien dat de brug is gebaseerd op turbinebladen. Dit draagt bij aan bewustwording.
 - In reactie op de vraag of het blad niet veel kwetsbaarder is voor instabiliteit stelt Kieran dat er geen problemen gevonden zijn tijdens tests en dat als er instabiliteit was die slechts lokaal optrad en niet globaal tot falen leidde.
- Hoe zijn bevestigingen aan de bladen vormgegeven?
 - Structurele bevestigingen zijn gemaakt in de spar cap. Er zijn geen speciale versterkingen toegepast, omdat de spar cap sterk genoeg is. Voetplaten op het composiet om verdere metalen delen aan te bevestigen moeten wel op maat worden gemaakt om de ongebruikelijke vormen van de bladen te kunnen volgen.
 - Merk op dat de leuning niet aan de bladen zijn bevestigd.
- Gaten ten behoeve van bevestigingen werden geboord en geseald om inwerking van vocht te voorkomen
- Hoe zijn de opleggingen vormgegeven?
 - Voor de brug in Ierland zijn betonnen landhoofden in contravorm van de bladen gemaakt.
- Is met de hele doorsnede gerekend of alleen de spar cap sectie?
 - De gehele doorsnede, zoals blijkt uit de buigtests
- DO's & Dont's / Lessons Learned?
 - Geometrie goed op orde krijgen is heel erg belangrijk. Bedrijven geven weinig tot niks aan informatie over de turbinebladen.
 - Dus zijn 3D scans en materiaaltests belangrijk
- Hoe omgegaan met de schades in de +/-45 gr laminaten?
 - Gedekt door de tests?
- Hoe is de toestand van de bladen vastgesteld
 - Tests
- Hoeveel % van levensduur houden ze aan als limiet?
 - 20 jaar leven
 - Zelfde benadering als Liesbeth had van dynamische belasting vs statische belasting
- Hoe ga je ermee om dat je zo weinig voorkennis hebt van het blad?
 - Reverse engineering
 - Coupontests
 - Full scale tests
 - 3D-scan
- Op basis waarvan heb je je blad geselecteerd?
 - Zie opname
- Wat heb je moeten doen om het blad uiteindelijk bruikbaar te maken?
 - Enkel schoonmaken, deze bladen hebben lang steil gelegen op een werf, maar lijken tot die tijd weinig gebruikt te zijn. Er was een beetje erosie op de bladen.
 - Leading en leading edges kunnen behoorlijk geërodeerd zijn bij bladen die lang zijn gebruikt
 - Mogelijk schuren en eventueel een gelcoat erop (?)
- Waar ben je op gebied van acceptatie tegenaan gelopen (vergunning/welstand/bewoners/gebruikers ed.)?
 - Geen; gebruikers vinden het leuk
 - Cork heeft wel 17x de leuning herontworpen
- In welke toestand wordt een blad geleverd
 - Zie eerder punt + opname

- Welke kosten aanschaf/transport en wie betaalde dat?
 - In Ierland kost het E5.000,- om een blad weg te laten halen
 - Re-Wind doet dat voor E3.000,-
 - Re-Wind krijgt dus geld voor het weghalen van de bladen. Mogelijk verandert dat als de waarde van turbinebladen ooit omhoog gaat.
- Is het waarschijnlijk dat je de ontwerpgegevens krijgt? Of moet je alles testen? Afhankelijk van hoe oud blad is?
 - Ervaring Re-Wind = geen info!
- Totaalprijs brug? Kan het concurreren met beton/staal?
 - Niet besproken

Los van de vragen zijn nog enkele zaken naar voren gekomen:

De bladen die Re-Wind voor de brug heeft gebruikt hebben jarenlang op een werf gelegen. De bladen bleken hoofdzakelijk vies te zijn. Schoonmaken bleek tamelijk eenvoudig. De bladen zelf waren nog in goede conditie. In Ierland worden maar ca. zeven verschillende types bladen gebruikt. Dat geeft te denken dat als van twee of drie types veel bekend is dat die data kan worden toegepast op een groot deel van het areaal. In de opbouw zoals Re-Wind de bladen heeft gebruikt in combinaties met een dek dat tussen de bladen is geplaatst konden de bevestigingen van het dek-blad in de sparcap worden gemaakt. Dit is het sterkste deel van het composietblad. Bij het testen bleken de bouten eerder te falen dan het composiet, zie figuur 6.

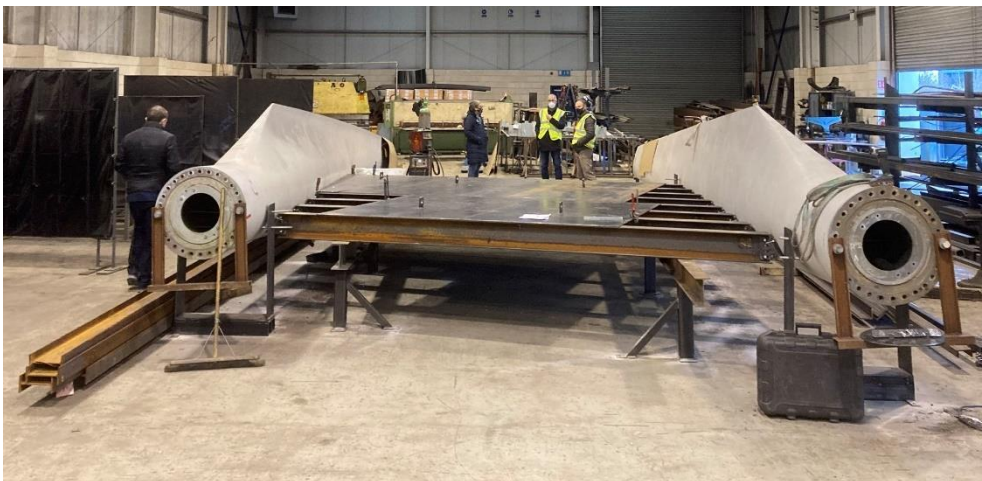


Fig. 6 – Dwarsdoorsnede brug Re-Wind

Bij het testen van de bladen is er daadwerkelijk één blad tot en met falen getest. Ook zijn er burn-out tests gedaan om de laminaatopbouw te achterhalen. De resultaten zijn verwerkt in een 3D FEM model. Tot slot is er ook een fullscale testbelasting gedaan zoals in Rotterdam in het verleden ook vaker is gedaan, zie figuur 7.

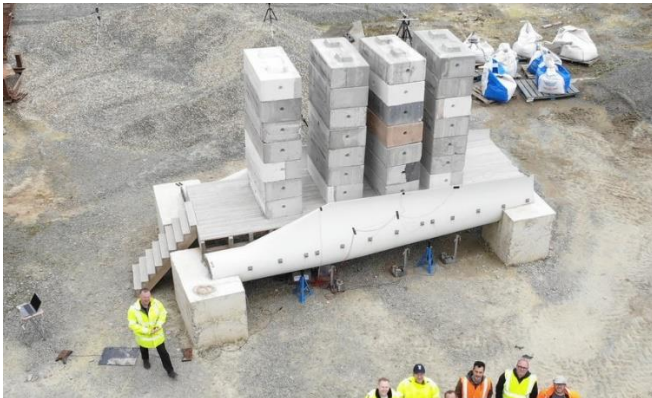


Fig. 7 – Overzichtsfoto fullscale belastingtest

In de ervaring van Re-Wind kan ongeveer maximaal 2/3 deel van een blad worden gebruikt voor de brug. Veel bladen in Europa zijn ongeveer 15 jaar oud en ca. 26m lang.

7.3 Simon Pronk; MSc afstudeeronderzoek TU Delft, 2022

Simon Pronk heeft in 2022 zijn masterscriptie van TU-Delft afgerond bij Arcadis en richtte zich op de 'repurpose' van turbinebladen met toepassing in gebouwen. De grootste limitering daarbij was de kromming van het blad. Simon werkt inmiddels als adviseur bij de Rebel group, te Rotterdam.

Volgens Simon zouden zowel Eneco als Vattenfall zeer welwillend zijn om bladen te leveren.

Simon heeft in zijn onderzoek ook ondervonden dat technische data niet beschikbaar wordt gesteld. Het projectteam moet daar voor de Reefbrug ook vanuit gaan. Hij heeft daarom samengewerkt met Re-Wind uit Ierland. Zij hadden een blad waarvan zij een leidar scan hadden gemaakt. Die heeft Re-Wind gedeeld met Simon. Zo kon hij in ieder geval van betrouwbare data een model voor de externe vorm maken. Hij heeft dat met de software 'Grasshopper' gedaan.

Betreffende het binnenwerk van het blad heeft hij aannames gedaan op basis van beschikbare foto's en enkele referentiematen. Daarbij heeft hij aangenomen de diktes van de laminaten lineair verlopen richting de tip van het blad. Desgevraagd gaf hij aan de dikte van het shearweb over de lengte gelijk aangenomen te hebben. Over de mechanische eigenschappen heeft Simon ook aannames moeten doen. Uit diverse papers heeft hij gegevens over laminaateigenschappen opgehaald. Hij heeft dat geprojecteerd op het blad dat hij van Re-Wind had. Er is – bij gebrek aan beter - dus geen goede match tussen de gehanteerde laminaateigenschappen en het gebruikte blad.

Het Deense DUT heeft een database van studiebladen waarvan wel alle informatie bekend is. Deze informatie is vrij toegankelijk. Merk op dat dit bladen zijn die nooit zijn gebouwd. De database zou nuttige informatie kunnen leveren voor de bureaustudie en/of de schetsontwerpfase.

https://orbit.dtu.dk/files/55645274/The_DTU_10MW_Reference_Turbine_Christian_Bak.pdf

Simon ziet tijdelijke opslag van de bladen als grootste belemmering om redenen van ruimte en kosten. Verder is Simon van mening dat de bladen meer reststerkte hebben dan de meeste mensen verwachten en hij is hoopvol dat project Reefbrug tot een goed einde kan worden gebracht.

7.4 Superuse & GKB Barendrecht

Zoals in hoofdstuk zes reeds gemeld heeft het Rotterdamse architectenbureau Superuse al ervaring met het hergebruik van turbinebladen in andere constructies. In Rotterdam zijn er bij de opstapplaats van de Spido rondvaartboten bankjes gemaakt, zie figuur 9. Ook is de Meidoorn Speeltuin opgebouwd uit turbinebladen. Dit zou gezien kunnen worden als een semi-constructieve toepassing, zie figuur 10.

Superuse heeft in deze beide projecten samengewerkt met de Barendrechtse aannemer GKB. In de ervaring van GKB zijn de noodzakelijke bewerkingen aan de bladen te doen met regulier materieel. Daarbij dient wel te worden aangemerkt dat zagen en boren sneller kunnen slijten door de glasvezels en dat stofvorming dient te worden beperkt/voorkomen. Het is dus in principe mogelijk om een aanbesteding te houden waarbij bekende partijen – civiele aannemers – als hoofd opdrachtnemer worden uitgenodigd om in te schrijven. Het verdient de aanbeveling om een voorselectie te maken van partijen die in het verleden bewezen te hebben goed met innovatieve projecten om te kunnen gaan.



Fig. 9 - Bankjes Spido



Fig. 10 – Speeltuin Meidoorn

8 Verkennende constructieve analyse

De beoogde Reefbrug heeft een overspanning van ongeveer 19m en een breedte van 2,5m.

Voor de beoordeling van de haalbaarheid wordt bekeken:

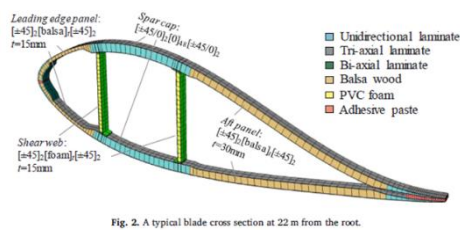
- Of dit kan met een repurposed windturbineblad
- Wat voor blad ongeveer nodig is.
- Welke orientatie van het blad het best passend is (verticaal of horizontaal⁴)

Hierbij wordt gebruik gemaakt van eigenschappen en informatie over turbinebladen uit literatuur.

8.1 Typische opbouw en materialen

Een windturbineblad heeft een vleugelvormige doorsnede (aerofoil) en wordt ontworpen om buiging om de dwarsas (koorde) te weerstaan. Typisch heeft een blad 1 of 2 lijven (shear webs) en een stijve boven en onderflens, ook wel spar cap genoemd, zie figuur 11. De voor-, en achterzijde van het blad zijn vaak zeer licht uitgevoerd en hebben als belangrijkste doel de aerodynamische vorm te creëren.

Het lijf/de lijven en de spar caps tezamen zijn het constructieve deel van het blad.



blade



Fig. 11 - Typische doorsnede en materiaalopbouw - 2 lijven (links) en 1 lijf (rechts)

In sommige modellen, bijvoorbeeld van producent LM, is ook de voorzijde dikker uitgevoerd en constructief.

Deze doorsnede is niet constant, maar alle maten en belangrijke parameters zoals de hoogte van de doorsnede, de dikte van de spar cap en de lengte van de koorde variëren over de lengte van het blad, zie figuur 12.

⁴ Verticaal staat ook bekend als 'edge-wise', horizontaal staat ook bekend als 'flap-wise'



Fig. 12 - De doorsnede en materiaalopbouw van de doorsnede varieert over de lengte van het blad (GE37 blad).

8.1.1 Materiaaleigenschappen na gebruik

Met de eigenschappen van de gebruikte materialen kan met de klassieke laminatentheorie een inschatting gemaakt worden van de eigenschappen voor het blad aan het begin van het gebruik. De windturbine bladen die we voor de brug willen gebruiken zullen al een aantal jaren gebruikt zijn. De materiaaleigenschappen die we voor het ontwerp moeten gebruiken zijn de eigenschappen na gebruik, rekening houdend met de invloed van veroudering en gebruik.

Een windturbine blad wordt voornamelijk belast op vermoeiing. In het onderzoek van Chen [1.] is voor een blad de degradatie van het materiaal over de levensduur bepaald. Figuur 13 toont de testopstelling, figuur 14 toont het spanningsniveau over de bladlengte .

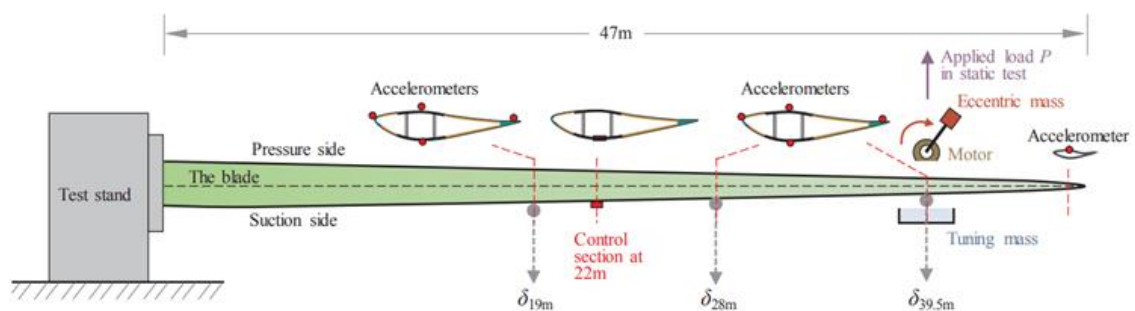


Fig. 13 - Testopstelling Ref Chen

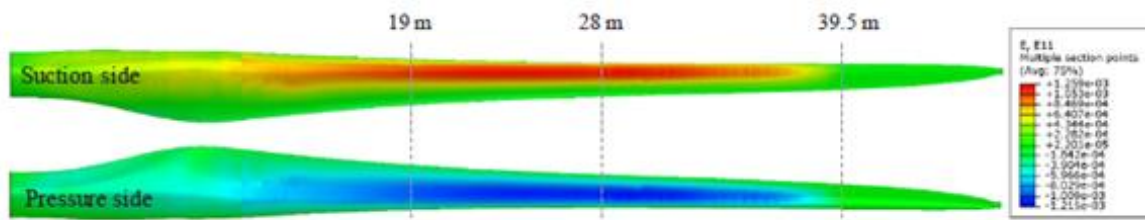


Fig. 5. The distribution of longitudinal strains of the blade.

Fig. 14 - Spanningsniveau verloop over de lengte Ref Chen

Het typische degradatie van composiet materiaal onder vermoeiing is weergegeven in figuur 15.

Composite Structures 212 (2019) 547–551

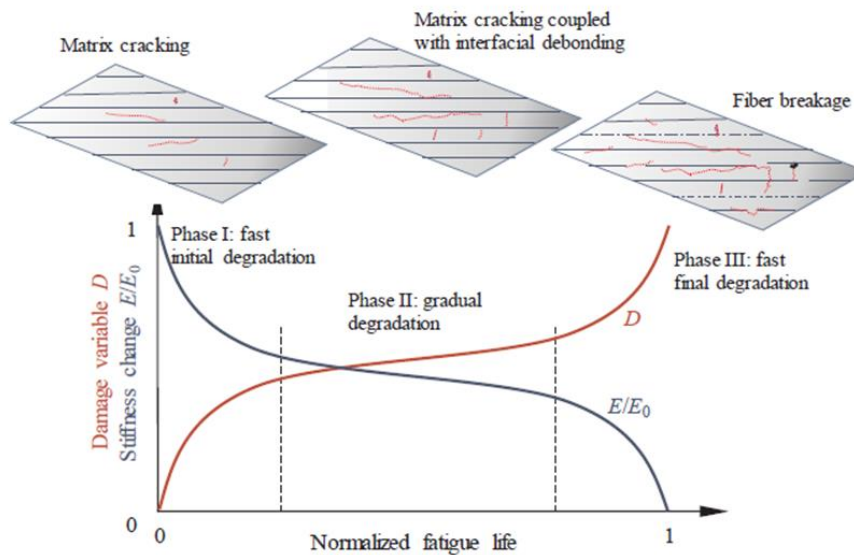


Fig. 15 - Typisch degradatie verloop (stijfheid) over de vermoeiingslevensduur

Voor drie snedes op 19, 28 en 39 m van de inklemming aan de wortel van het blad is de stijfheid gemeten, zie figuur 16.

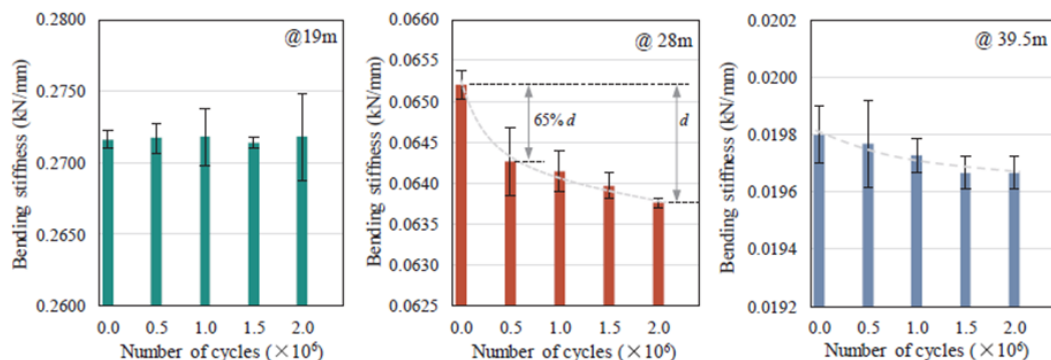


Fig. 16 - Gemeten degradatie (buigstijfheid) drie snedes

Te zien is dat de mate van degradatie toeneemt met het aantal wisselingen en varieert over de doorsnede, omdat het spanningsniveau over de lengte van het blad in de test en het gebruik varieert. De stijfheidsafname is gering.

De studie concludeert :

- Dat de schade aan de test overeenkomt met phase I en phase II degradatie (figuur 15)
- Dat de stijfheidsafname gering is (orde 2-3%).
- Dat deze niet goed meetbaar is aan de verandering in eigenfrequentie, maar wel aan de damping en met name de torsie modes.
- Dit duidt erop dat de meeste schade in gebruik optreedt in de +/-45 laminaten.

In Ref Alshannaq [3] is ook de typische degradatie onderzocht, ook op basis van andere onderzoeken. Hierin wordt geconcludeerd dat de stijfheid en sterkte ongeveer 10 – 20% afneemt over de levensduur met een plotselinge sterke afname van de sterkte en stijfheid aan het einde van de levensduur. Deze afname is dus significant groter dan de afname in Ref Chen [1].

Een verdere conclusie is dat het niet persé nodig is de details van het exacte gebruik van het blad te kennen, maar dat een ontwerp gebaseerd kan worden op (uitgebreide) materiaaltesten van het blad.

8.1.2 Conclusie voor de Reefbrug

Conclusie voor het Reefbrug project is dat hoe dichter een blad bij einde levensduur is, des te onzekerder de materiaaleigenschappen zijn. Een voetgangersbrug wordt niet belast op vermoeiing. Gedurende het tweede leven gebruik van een windturbine blad wordt de vermoeiingsschade niet groter. Een blad dat een geringer deel van de levensduur heeft gebruikt is naar verwachting minder risicovol. Hoe dichter een blad bij einde-levensduur op vermoeiing is belast, zal een uitgebreider materiaalonderzoek nodig zijn.



8.2 Materiaaleigenschappen van een gebruikt windturbineblad

De lijven en spar caps vormen het constructieve deel van het blad. In ref Alshannaq et al. zijn de eigenschappen van het spar cap materiaal bepaald, van een GE37 blad, zie tabel 1, Zie ref Alshannaq [2.] Dit blad is 37 m lang en 11 jaar gebruikt. Een typische ontwerp levensduur van een windturbine blad is 20 – 25 jaar.

Table 1. Summary of results.

Property	<i>N</i>	Strength (MPa)	Modulus (GPa)	Strain at Failure (%)
Tension (L)	53	597±54.4	36.8±1.95	1.94±0.15
Tension (T)	13	33.6±3.58	10.7±0.45	0.29±0.02
Compression (L)	74	504±39.8	42.7±2.54	1.22±0.05
Compression (T)	11	114±2.05	-	-
Open-Hole (L)	11	584±29.5	-	-
Open-Hole (T)	16	22.4±2.33	-	0.24±0.02
V-Notch Shear (L)	26	60.8±2.26	4.57±0.12	-
V-Notch Shear (T)	10	27.9±2.47	-	-
Short-Beam Shear (L)	14	55.0±3.57	-	-
Bearing – 19.1 mm pin (L)	10	302±17.4	-	-
Bearing – 19.1 mm pin (T)	10	212±9.50	-	-
Bearing – 25.4 mm pin (L)	10	296±32.2	-	-
Bearing – 25.4 mm pin (T)	10	246±10.3	-	-
Pull-though – Thin BB	10	65.6±6.50	-	-
Pull-though – Thick BB	10	84.5±2.62	-	-
Pull-though – Thin RS	10	130±6.48	-	-
Pull-though – Thick RS	10	132±5.90	-	-

Tabel 1: Eigenschappen van de spar caps GE37 blad na 11 jaar gebruik

8.3 Constructieve uitvoering

De brug kan in verschillende uitvoeringen uitgevoerd worden, zie de Inspiratie catalogus van project Rewind⁵. Het is mogelijk de brug met twee liggers uit te voeren aan de zijkant van de brug (Rewind project) of er kan 1 centrale brugligger toegepast worden, zoals de brug die in Polen gerealiseerd is (project Anmet).



Fig. 17 - Brug configuratie: 2 liggers aan de zijkant (links) en enkele centrale brugligger met uitragend dek links/rechts.

De turbinebladen zijn bij deze bruggen liggend, verticaal georiënteerd (edge-wise), zie figuur 17.

De windturbine bladen kunnen ook liggend, horizontaal georiënteerd (flap-wise) worden, zie figuur 18 (Inspiratie catalogus van project Rewind).

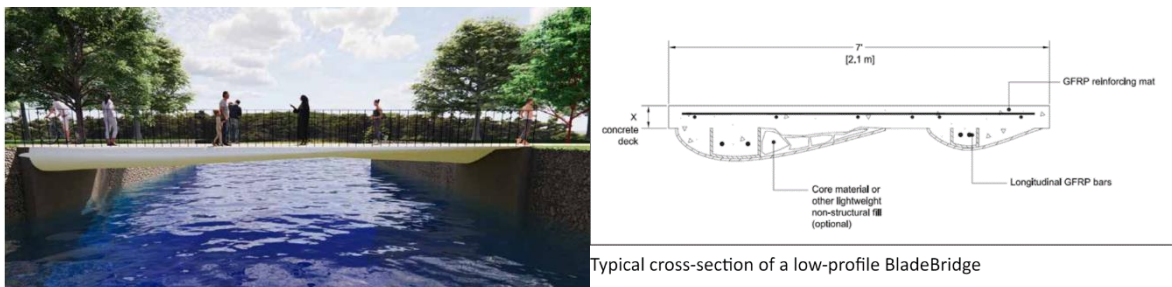


Fig. 18 - Voorbeelden brug configuratie liggend, horizontaal (Rewind project)

Met verkennende berekeningen wordt nader beschouwd welke oriëntatie mogelijk is of passend is voor de situatie van de Reefbrug.

8.4 Verkennende berekeningen windturbineblad als brugligger

Met de gevonden materiaaleigenschappen van het GE37 -blad wordt een verkennende berekening uitgevoerd. Hierbij moet gebruik gemaakt worden van representatieve afmetingen. Hetzelfde GE37 blad is nader onderzocht in het afstudeeronderzoek van Simon Pronk, TU Delft, ref [5]. Uit de geometrische informatie genoemd in dat rapport kunnen de afmetingen afgeleid worden.

⁵ [Re-Wind+Design+Catalog+Fall+2022+Nov+9+2022+\(low+res\).pdf \(squarespace.com\)](https://www.squarespace.com/Re-Wind+Design+Catalog+Fall+2022+Nov+9+2022+(low+res).pdf)

Voor composiet bruggen is de stijfheid maatgevend. De belangrijkste parameter hiervoor is het comfort. Dit is een meer complexe berekening. Als vereenvoudiging wordt in deze fase de zakking onder voetgangersbelasting gebruikt als haalbaarheidstoets.

Het GE37 blad is nader onderzocht in het afstudeeronderzoek van Simon Pronk, TU Delft, ref [5]. Hieruit kunnen de afmeting afgeleid worden, zie figuur 19):

De koorde-lengte verloopt van 0.9 m – 1.22m.

De hoogte van het profiel verloopt van 150mm– 1.22m.

De verdeling over de lengte van het blad wordt ingeschat in hoogtezones als:

- $H_1 = 1.22 \text{ m}$ ($< 1/10 L$)
- $H_2 = 0.8 - 0.6 \text{ m}$ ($1/5 L$)
- $H_3 = 0.3 \text{ m}$ ($1/5 L$)
- $H_4 = 0.15 \text{ m}$ ($1/3 L$)

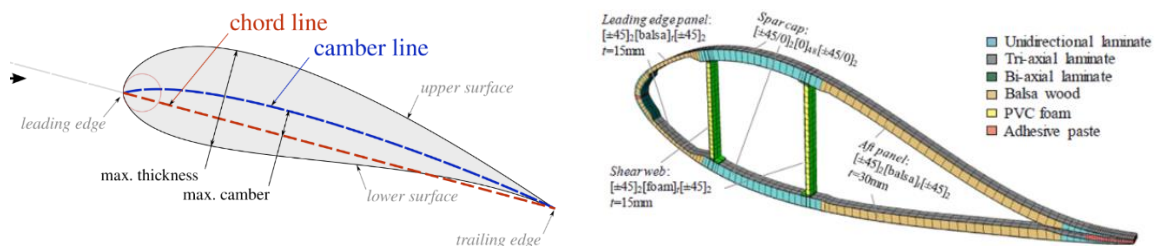


Fig. 19 – Areofoil (links) en typische doorsnede (rechts)

Voor de eerste 3 hoogtezones is op basis van deze inschatting de gewogen profielhoogte bepaald als 644 mm. De dikte van de spar cap is ongeveer 30 mm.

Uit de doorsnede is af te leiden dat de breedte van de spar cap ongeveer gelijk is aan de (koorde/4.5). De breedte van de spar cap verloopt dan van 0.2 – 0.5m.

Met de ingeschatte afmetingen wordt als eerste vereenvoudigde inschatting de zakking berekend op basis van 1 gemiddelde doorsnede met een hoogte van 450 mm, een spar cap breedte van 350 mm en een spar capdikte van 30mm. Als stijfheid wordt aangehouden 36.8 GPa, gelijk aan het 11 jaar gebruikte GE37 blad (zie hst 8.2). Voor de lijfplaten wordt de wanddikte ingeschat op 2 mm per huid, met een stijfheid van 11.5GPa.

Indien de stijfheid $> L/250$ wordt ingeschat dat de brug voldoende stijf zal zijn. Ook wordt de optredende spanning getoetst aan de sterkte van zoals gelijk aan het 11 jaar gebruikte GE37 blad (zie hst 8.2). De grenswaarde van doorbuiging $< 1/250$ is redelijk. Een eerdere composietbrug met een vrije overspanning van 17,2m werd ontworpen op een eigenfrequentie van $> 3\text{Hz}$. Het resulterende ontwerp had een bijkomende doorbuiging van ca. $1/248$.



Orientatie Horizontaal (plat)



Fig. 20 – GE37 flapwise

Inschatting buigstijfheid

Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden wordt de buigstijfheid voor buiging om de dwars-as wordt ingeschat op $1.79 \cdot 10^5 \text{ kNm}^2$, zie figuur 20.

sectie geïnspireerd op GE37

$$h_{web} := 450 \text{ mm}$$

$$t_f := 30 \text{ mm}$$

$$b_f := 350 \text{ mm}$$

$$t_w := 2 \cdot 2 \text{ mm}$$

$$E_w := 11.5 \text{ GPa}$$

$$E_f := 36.8 \text{ GPa}$$

$$EI := E_f \cdot \left((2) \cdot b_f \cdot t_f \cdot (h_{web} + t_f)^{(2)} + \frac{2}{(12)} \cdot b_f \cdot t_f^{(3)} \right) + E_w \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_w \cdot h_{web}^3 \right) = (1.785 \cdot 10^5) \text{ m}^2 \cdot \text{kN}$$

Zakking

Uitgaande van een brugbreedte van 2.5m en 2 bladen als ligger, draagt 1 ligger een dekbreedte van 1.25 m.

De zakking kan dan worden berekend als volgt:

$$L := 19 \text{ m} \quad b := 1.25 \text{ m}$$

$$q := 5 \frac{(\text{kN}) \cdot b}{\text{m}^2}$$

$$\delta := \frac{5}{(384)} \cdot \frac{q \cdot L^4}{(EI)} = 59.428 \text{ mm}$$

$$\delta_{limiet} := \frac{L}{250} = 0.076 \text{ m}$$

$$UC_{zakking} := \frac{\delta}{\delta_{limiet}} = 0.782$$

Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden is de ingeschatte zakking onder voetgangerbelasting van 5 kN/m^2 gelijk aan 59 mm (excl. conversiefactoren). Dit is geringer dan de toetswaarde van $L/250$. De unity check is $UC = 0.78$.



Indien de conventionele conversiefactoren uit CUR96 of de TS19101 worden toegepast (0.9 – 0.8), dan voldoet het blad juist (UC = 0.98).

In een voorontwerp houdt men liever een iets grotere marge aan. Omdat de zakking bij een frequente belasting van 0.8 x 5 kN/m bepaald mag worden is er nog enige ontwerpmarge aanwezig. De aangehouden afmetingen zijn de minimum waarden die men gemiddeld over de lengte van de brug nodig heeft.

Sterkte

Er wordt ook een inschatting gemaakt van de maximaal optredende spanning onder buiging:

$$\begin{aligned}\gamma_F &:= 1.35 \\ M_{max} &:= \frac{\gamma_F \cdot q \cdot L^2}{(8)} = (3.807 \cdot 10^5) \text{ J} \\ \sigma_{max} &:= \frac{(E_f) \cdot M_{max} \cdot \frac{h_{web}}{2}}{EI} = 17.665 \text{ MPa} \\ f_{xRk} &:= 504 \text{ MPa} \\ \text{Voor druksterkte wordt o.b.v. typische partiele veiligheidsfactor voor druksterkte van de TS19101 aangehouden, van 5.} \\ f_{xRd} &:= 504 \frac{\text{MPa}}{5} = 100.8 \text{ MPa} \\ UC_{sterkte} &:= \frac{\sigma_{max}}{f_{xRd}} = 0.175 \quad +\end{aligned}$$

Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden is de optredende spanning 18MPa. Dit is laag t.o.v. de karakteristieke druksterkte van orde 504MPa en de op basis hiervan ingeschatte ontwerpsterkte van orde 100 MPa. Het blad is met deze aannames sterk genoeg.

Orientatie Vertikaal

Het blad kan ook verticaal (edge-wise) toegepast worden als brugligger, zie figuur 21.



Fig. 21 – GE37 edge-wise

Dezelfde berekening wordt uitgevoerd voor dezelfde afmetingen, maar dan dus verticaal georiënteerd.



Inschatting buigstijfheid

Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden wordt de buigstijfheid voor buiging om de dwars-as wordt ingeschat op $7.9 \cdot 10^3 \text{ kNm}^2$. Merk op dat de aerofoil niet is meegerekend.

maximale sectie GE37

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

$$t_f := 30 \text{ mm}$$

$$b_f := 350 \text{ mm}$$

$$t_w := 2 \cdot 2 \text{ mm}$$

$$E_w := 11.5 \text{ GPa}$$

$$E_f := 36.8 \text{ GPa}$$

GE 37 - 1 web

$$EI_{dwars} := 1 E_w \cdot \left(h_{web} \cdot t_w \cdot \left(81 \frac{\text{mm}}{2} \right)^{(2)} + \frac{2}{(12)} \cdot h_{web} \cdot t_w^{(3)} \right) + 2 E_f \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_f \cdot b_f^3 \right) = (7.915 \cdot 10^3) \text{ m}^2 \cdot \text{kN}$$

$$\frac{EI}{EI_{dwars}} = 22.546$$

De stijfheid in geval van staande toepassing is bij de aangenomen afmetingen maar liefst 22.5 maal lager. De spar caps worden nu niet toegepast als flenzen maar als 2 staande lijven. Dit is constructief veel minder gunstig. Uit de interviews is gebleken dat bijvoorbeeld een LM blad over een veel groter deel constructief laminaat heeft. Het verschil zal dan geringer zijn of de verticale oriëntatie kan dan zelfs stijver zijn dan de horizontale oriëntatie, omdat de hoogte van het constructieve deel zeer bepalend is voor de buigstijfheid.

Zakking

De resulterende zakking bij een gelijke overspanning, breedte en belasting is dan te groot. Als we alleen de spar cap-zone als constructief beschouwen is een overspanning van 19 m in deze oriëntatie niet goed mogelijk.

Een overspanning van 6.5 m is wel mogelijk.

Bridge of Blades berekening sectie - dwars

$$L := 6.5 \text{ m} \quad b := 1.25 \text{ m}$$

$$q := 5 \frac{(\text{kN}) \cdot b}{\text{m}^2}$$

$$\delta := \frac{5}{(384)} \cdot \frac{q \cdot L^4}{(EI_{dwars})} = 18.353 \text{ mm}$$

$$\delta_{limiet} := \frac{L}{250} = 26 \text{ mm}$$

$$UC_{zakking} := \frac{\delta}{\delta_{limiet}} = 0.706$$



Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden is voor een vrije overspanning de ingeschatte zakking onder voetgangerbelasting van 5 kN/m² gelijk aan 18 mm (excl. conversiefactoren). Dit is geringer dan de toetswaarde van L/250. De unity check is UC = 0.70. Indien de conventionele conversiefactoren uit CUR96 of de TS19101 worden toegepast (0.9 – 0.8), dan voldoet het blad juist (UC = 0.98).

Sterkte (overspanning 6.5 m)

De verticale orientatie is wel mogelijk met een kleinere overspanning – dus eventueel aanbrengen van tussensteunpunten. Er wordt ook een inschatting gemaakt van de maximaal optredende spanning onder buiging bij een overspanning van 6.5m.

$$\gamma_F = 1.35$$
$$M_{max} = \frac{\gamma_F \cdot q \cdot L^2}{(8)} = (4.456 \cdot 10^4) \text{ J}$$
$$\sigma_{max} = \frac{(E_f) \cdot M_{max} \cdot \frac{h_{web}}{2}}{EI_{dwars}} = 36.254 \text{ MPa}$$
$$f_{xRd} = 504 \text{ MPa}$$

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

$$f_{xRd} = 504 \frac{\text{MPa}}{5} = 100.8 \text{ MPa}$$
$$UC_{sterkte} = \frac{\sigma_{max}}{f_{xRd}} = 0.36$$

Met voorgaande aannames voor afmetingen en stijfheden is de optredende spanning 36MPa. Dit is laag t.o.v. de karakteristieke druksterkte van orde 504MPa en de op basis hiervan ingeschatte ontwerpsterkte van orde 100 MPa. Het blad is met deze aannames sterk genoeg.

Orientatie vertikaal 19 m overspanning

Uit de interviews is gebleken dat bijvoorbeeld een LM blad over een veel groter deel constructief laminaat heeft. Het verschil zal dan geringer zijn of de verticale oriëntatie kan dan zelfs stijver zijn dan de horizontale oriëntatie, omdat de hoogte van het constructieve deel zeer bepalend is voor de buigstijfheid. Het LM blad heeft ook 2 lijven, zie figuur 22.

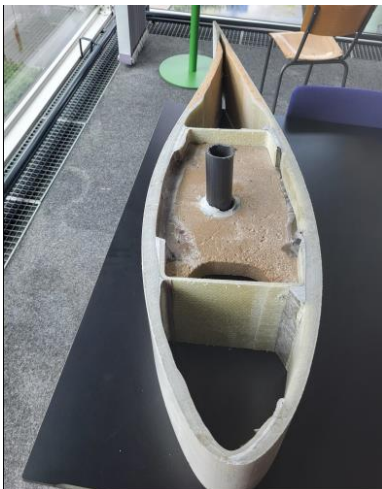


Fig. 22 - Sectie van een LM- blad met 2 lijven en een groter constructief deel.



Indien we een koorde van 1.7 m aanhouden waarvan 2/3 constructief meedoet. Lijven op 1/3 en 2/3 van de koorde. Lijfdikte van 5 mm, en sparcapdikte van 20 mm over 2/3 van de koorde, is de stijfheid van de verticale oriëntatie gelijk aan de beschouwde horizontale oriëntatie.

GE 37 - stel 2 webs en hele sectie

$koorde := 1.7 \text{ m}$

$b_{fLM} := \frac{2}{3} \cdot koorde = 1.133 \text{ m}$

$t_{fLM} := 20 \text{ mm}$

$t_{wLM} := 5 \text{ mm}$

$$EI_{dwaars} := 2 E_w \cdot \left(h_{web} \cdot t_{wLM} \cdot \left(\frac{koorde}{3} \cdot \frac{1}{2} \right)^{(2)} + \frac{2}{(12)} \cdot h_{web} \cdot t_{wLM}^{(3)} \right) + 2 E_f \cdot \left(\frac{1}{12} \cdot t_{fLM} \cdot b_{fLM}^3 \right) = (1.818 \cdot 10^5) \text{ m}^2 \cdot \text{kN}$$

$\frac{EI}{EI_{dwaars}} = 0.982$

In dat geval zou een verticale oriëntatie bij een overspanning van 19 m ook kunnen.

Conclusie voor de Reefbrug

De eigenschappen van een windturbineblad na gebruik zijn voldoende om te kunnen fungeren als brugligger. De horizontale oriëntatie is in veel gevallen gunstiger dan de verticale oriëntatie.

Het GE37 blad dat 11 jaar gebruikt is, kan gebruikt worden als brugligger met een overspanning van 19 m en een meedragende dekbreedte van 1.25 m. Met twee van deze bladen kan een brug van 19 m met een breedte van 2.5 m gerealiseerd worden.

Deze oriëntatie maakt maximaal gebruik van de spar caps. De spar caps hebben naar verwachting in het gebruik de minste vermoeiingsschade opgelopen, omdat de spar caps vooral bestaan uit UD-materiaal in de lengte richting van het blad. Voor de brug is deze oriëntatie daarmee het meest voor de hand liggend.

In geval van verticale oriëntatie is een overspanning van 19 m met het GE37 blad niet mogelijk en is nader onderzoek nodig. De verticale oriëntatie is wel mogelijk met een kleinere overspanning – dus eventueel aanbrengen van tussensteunpunten. Indien we de overspanningslengte reduceren tot 6.5m voldoet de verticale oriëntatie wel aan de referentie doorbuiging.

Er zijn bladen, zoals o.a. LM bladen die inwendig in de areofoil een veel constructievere opbouw hebben. In dat geval is een overspanning van 19 m zonder tussenpunten wel mogelijk, mits de spar caps een gemiddelde dikte van ongeveer 20 mm hebben en de grootte (lengte) van het constructieve deel orde 1.15 m is, uitgaande van stijfheden en sterktes zoals beschreven in 8.2.



8.5 Referenties

- [1.] X. Chen. Experimental observation of fatigue degradation in a composite wind turbine blade. *Composite Structures*, 212:547–551, 3 2019. ISSN 0263-8223. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2019.01.051. 5
- [2.] A. Alshannaq, J. Respert, L. Bank, T. Gentry, and D. Scott. Properties of a 37m long FRP wind turbine blade after 11 years service. 2022a.
- [3.] A. Alshannaq, S. Asce, J. A. Respert, L. C. Bank, D. Asce, M. Asce, T. Russell Gentry, and A. Profes[1]sor. As-Received Physical and Mechanical Properties of the Spar Cap of a GE37 Decommissioned GFRP Wind Turbine Blade. 2022b. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004410.
- [4.] A. Alshannaq, L. C. Bank, D. W. Scott, and T. R. Gentry. Structural Analysis of a Wind Turbine Blade Repurposed as an Electrical Transmission Pole. *Journal of Composites for Construction*, 25(4), 8 2021. ISSN 1090-0268. doi: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001136.
- [5.] S.Pronk, Repurposing wind turbine blades as a construction material, master thesis rapport, Civiele Techniek, TU Delft, Nederland, 2021.



9 Duurzaamheid

Duurzaamheid en circulariteit zijn begrippen die door elkaar heen worden gebruikt. Duurzaamheid gaat feitelijk over het werken binnen planetaire grenzen zodat de mogelijkheden van toekomstige generaties om in behoeften (in de breedste zin) te voorzien niet worden aangetast. Circulariteit kan gezien worden als een middel tot dat doel. Circulariteit betreft de inzet om het winnen van nieuwe grondstoffen en het creëren van nutteloos afval te verminderen. In principe zou meer circulair werken moeten leiden tot een duurzame samenleving.

Circulair werken kan op meerdere manieren en niveaus worden benaderd. Rotterdam hanteert de zogenoemde R-ladder⁶:

- R1. Refuse en Rethink (afwijzen en heroverwegen)
- R2. Reduce (verminderen)
- R3. Re-use (hergebruiken)
- R4. Repair, Refurbish, Remanufacture en Repurpose (repareren, opknappen, reviseren en hergebruiken)
- R5. Recycling
- R6. Recover (terugwinnen)

Een veelgebruikte manier om de milieu-impact van een bepaalde activiteit te duiden is de MKI-score, welke wordt bepaald door middel van een LCA-studie. Circulair werken zou moeten leiden tot een lagere MKI-score dan een traditionele lineaire werkwijze. Typisch heeft composiet een belangrijk zwaktepunt als het gaat om LCA-analyses. LCA-analyses zijn opgedeeld in verschillende fases.

A1 = Ruwe materialen winnen	
A2 = Transport	
A3 = Productie	<i>Productfase</i>
A4 = Transport	
A5 = Realisatie constructie	<i>Realisatiefase bouwwerk</i>
B1 = Gebruik	
B2 = Onderhoud	
B3 = Reparaties	
B4 = Vervanging	
B5 = Vernieuwing	
B6 = operationeel energieverbruik	
B7 = operationeel watergebruik	<i>Gebruiksfase</i>
C1 = Sloop	
C2 = Transport	
C3 = Afvalbewerking	
C4 = Afvalverwerking (kwijt raken van het afval)	<i>Einde leven fase</i>
D = Hergebruik, terugwinning, recyclepotentieel	<i>Hergebruik</i>

⁶ [R-ladder - Strategieën van circulariteit \(rvo.nl\)](https://www.rvo.nl/nl/onderwerpen/circulariteit/strategieen)



In de meeste vergelijkende LCA-studies komt composiet relatief slecht naar voren met een hoge MKI-score. Onderstaande voorbeeld is illustratief voor het probleem waar composiet mee worstelt. Tabel 2 toont de uitkomsten van een vergelijkende LCA-studie naar verschillende opties voor sluisdeuren zoals te vinden in de Nationale Milieu Database (NMD). Dat is de database waar de meeste LCA rekenprogrammatuur op aansluit.

	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D	Totaal
hout 3m	3136,2	131,4	126,47	80,39	0	3710,66	0	9,2	119,5	189,204	26,279	-2569,85	4959,45
hout 6m	4752,86	210,64	183,54	80,39	0	5670,14	0	9,2	192,72	306,298	42,471	-3942,02	7506,23
staal 3m	9644,09	89,4	312,6	10,82	0	997,72	0	9,2	34,29	35,308	3,829	-4703,63	6433,62
staal 6m	13980,91	130	444,49	10,82	0	1032,42	0	9,2	49,4	37,618	5,484	-6869	8831,33
VVK 3m	6370,51	43,25	289,2	0	0	347,44	0	9,2	41,89	2570,82	0,392	-358,82	9313,88
VVK 6m	10230,76	68,58	453,26	0	0	375,8	0	9,2	67,14	4128,451	0,652	-486,86	14846,98
hybride 3m	12623,9	89,5	500,4	0	0	280,28	0	9,2	59,8	2678,954	2,108	-2698,24	13545,9
hybride 6m	25651,98	179,76	993,68	0	0	301,22	0	9,2	124,68	5936,306	3,634	-4903,94	28296,5

De resultaten liggen in lijn met de eerder uitgevoerde studie Multiwater Werken in opdracht van Rijkswaterstaat (1). Hoewel in de MWW studie gebruik is gemaakt van enkele producent specifieke

C3 is pijnpunt VVK
C3 = Afvalbewerking

Tabel 2 – Rapportage NMD cat. 3 data puntsluisdeuren

Wat opvalt is dat composiet vrij gunstig scoort over de gehele linie, behalve bij item C3 – afvalbewerking. Afvalverwerking van composiet is complex en vereist specialistische technieken. Er vindt een goede ontwikkeling plaats op het gebied van afvalbewerking van composiet. De resulterende producten nemen toe in kwaliteit en de kostprijs van het proces wordt lager. De verwachting is dat er in toenemende mate recyclingtechnieken beschikbaar komen voor composiet. Op het moment van schrijven van dit rapport staat men nog aan de vooravond van deze verdere ontwikkeling. De vigerende manier van het omgaan met composietafval is verbranden of storten. Of verbranden in een cementoven, waarbij de glasvezel wordt hergebruikt (down-cycling).

Waar de LCA-studies en de navenante MKI-scores weinig tot geen zicht op geven is het potentieel tot hergebruik. Volgens de R-ladder is het hergebruik op product-, of elementniveau het hoogst haalbare niveau wanneer een product of element eenmaal is gemaakt. De keerzijde van het afvalprobleem van composiet is een zeer lange levensduur en vaak goede resterende mechanische eigenschappen na een eerste leven. Dit in combinatie met het lage eigengewicht maakt composietconstructies ideaal om te hergebruiken. Mede omdat vanwege het onderhoudsarme karakter zeer weinig investering nodig is voor hergebruik. In het geval van windturbinebladen kunnen ze in de regel niet worden hergebruikt in de originele toepassing als turbineblad wegens de eerder in dit rapport genoemde vermoeiingsschade. Toepassing in een zo hoogwaardig mogelijk alternatieve toepassing biedt milieuvoordeel. Het voordeel is tweeledig. Door de bladen aan de afvalstatus te onttrekken wordt de categorie C3 milieuschade voorkomen. Voor de nieuwe constructie die wordt gerealiseerd is veel minder nieuw materiaal nodig terwijl er wel een brug met een zeer lange levensduur kan worden gerealiseerd. Uiteindelijk aan het einde van de levensduur van de nieuwe brug (Reefbrug) de kwestie van het omgaan met het composietafval alsnog relevant worden. Deze aanpak moet dan ook vanuit het blad worden gezien als 'slowing the loop'. Dit in de verwachting dat over enkele decennia er betere recyclingtechnieken voorhanden zijn, evenals de bijbehorende industrie. Op basis van de hier gegeven informatie zal in het PvE een paragraaf worden gewijd aan duurzaamheid.



Voor dit project is bij Rijkswaterstaat een subsidie aangevraagd. Dit betreft de SPUK-KCI. Bij de aanvraag voor de subsidie diende te worden aangetoond dat het concept van het hergebruik daadwerkelijk tot een MKI-reductie leidt ten opzichte van een referentie. Hieronder volgt een korte samenvatting van de onderbouwing van de SPUK-KCI aanvraag.

9.1 MKI-score brug van windturbinebladen

Betreffende de MKI-score van het hergebruik van windturbinebladen is de volgende aanpak gehanteerd:

Als referentie is een betonnen parkbrug genomen van min of meer gelijke afmetingen als de Reefbrug. De MKI-score van de betonbrug kon goed worden berekend met beschikbare data uit de NMD. Er is geen goede data beschikbaar op basis waarvan het gebruik van een afgeschreven blad als brugligger met behulp van MKI kan worden opgegeven. Er is alternatieve benadering gekozen waarbij zorgvuldig is bewaakt dat aannames die zijn gedaan conservatief zijn:

In 2013 is door BECO een onafhankelijk rapport uitgebracht waarin met DuboCalc een vergelijking is gemaakt tussen hout, beton, staal en composiet voor zowel een parkbrug als een verkeersbrug. Dit is destijds gedaan met vertegenwoordigers vanuit alle opgenomen industrieën. Hoewel het rapport binnen de composiet-industrie op veel weerstand is gestuit biedt het een unieke kans beton en composiet met elkaar te vergelijken. De Reefbrug wordt beschouwd als een composietbrug. Dit is redelijk omdat de windturbinebladen volledig van composiet zijn gemaakt.

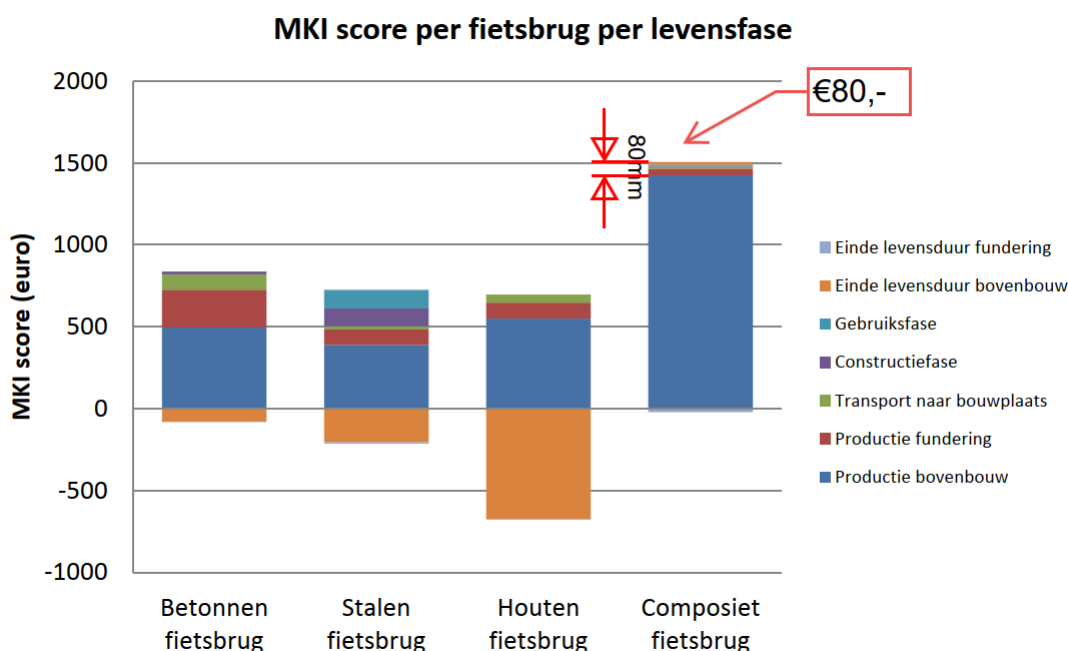


Fig. 23 – Verhouding MKI beton-composietdek in donkerblauw zoals genomen uit BECO rapport

De verhouding tussen de MKI van een betondek en die van een composietdek is geprojecteerd op de Reefbrug, zie figuur 23.



Bij hergebruikt materiaal mag voor alle levensfasen 20% van de normale MKI waarde (voor nieuwbouw) worden gehanteerd.

Uiteindelijk volgen uit de berekening de volgende waardes:

MKI-score betonbrug: €25.841,-

MKI-score windturbinebrug: €17,778,-

MKI-score betondek: €1.794,-

MKI-score turbinedek: €2.298,-

Als de MKI-scores van de dekken één op één met elkaar worden vergeleken dan blijkt de MKI-score van het betondek als geheel nog lager dan die van het composiet. Maar voor de brug als geheel geldt wel een reductie. Dat komt doordat voor composiet een gereduceerde onderbouw kan worden gerekend wegens het lage eigengewicht.

9.2 Discussie

Is de geschetste reductie van MKI-score redelijk en in lijn met realiteit? De MKI-score van €2.298,- is op basis van 20% van de MKI-score van een composietdek van nieuw composietmateriaal. De waarde voor een nieuwe komt dus neer op $5 \times €2.298,- = \underline{11.490,-}$

Is deze waarde redelijk en conservatief afwijkend van de realiteit?

Om dat te bevestigen worden navolgende andere MKI-berekeningen vergeleken met de hiervoor genoemde waarde van €11.490,-

9.2.1 Controle aanneme o.b.v. referentie LCA-Gemeente Rotterdam

Gemeente Rotterdam heeft in 2013 een eigen geparametriseerde LCA studie gedaan naar voetgangersbruggen. Dit is geïnitieerd vanuit en ten behoeve van de gemeente met financiële ondersteuning van Agentschap NL⁷.

Hier zijn op basis van globale ontwerpregels voor diverse varianten parkbruggen in staal, beton, hout & composiet ecokosten [€] opgesteld. Per brugbreedte is een grafiek opgesteld waarin bruglengte is afgezet tegen ecokosten. Merk op dat de gebruikte database de ID-mat database van TU-Delft is.

In het rapport zijn twee types composietbruggen beschouwd. De ecokosten liggen voor een brug van 20m*2,5m tussen:

€3.900,- < ecokosten < €9.000,-, zie figuur 24

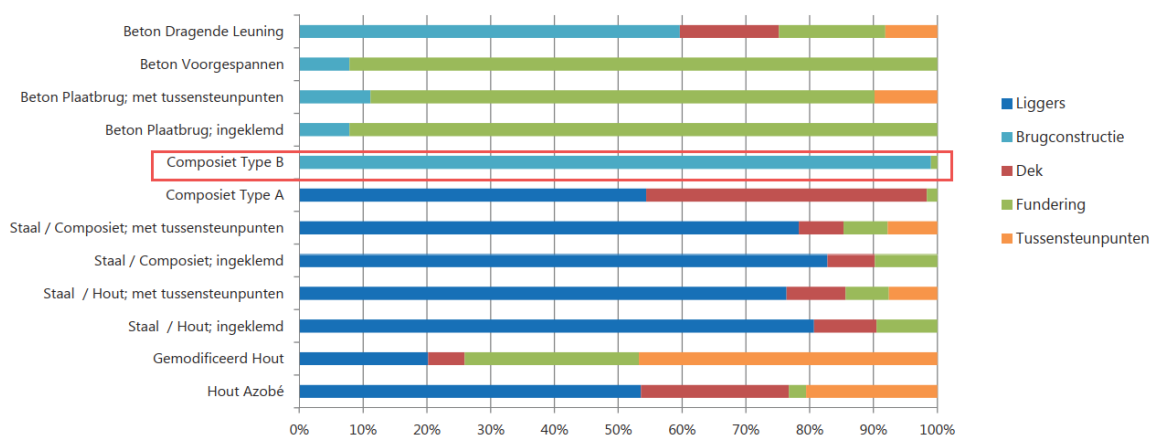
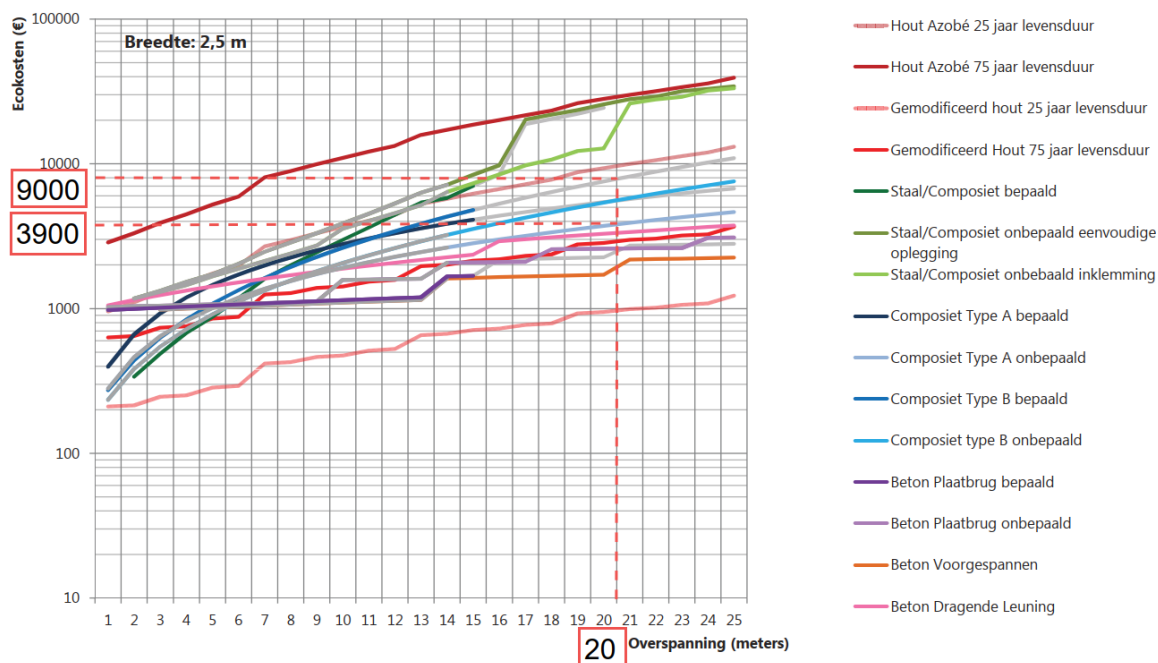
Volgens figuur 25 - eveneens genomen uit hetzelfde rapport – vertegenwoordigt de bovenbouw van de brug ca. 98% van de totale ecokosten

Volgens het rapport van Rotterdam zijn de ecokosten maximaal ca. €9.000,-. Dit is in dezelfde orde grootte als de in alinea 10.1 bepaalde €11.490,-. Dit onderschrijft dat de gehanteerde benadering conservatief is.

⁷ Ontwerpen van duurzame bruggen, Gemeente Rotterdam; 2013



De ecokosten van een betonnen brug (beton voorgespannen) zijn geschat op €2.000,-. De aangehouden verhouding nieuw composiet/beton valt binnen deze bandbreedte.





9.2.2 Controle aannname o.b.v. referentie Royal Haskoning DHV

RHDHV heeft met een eigen rekensheet een schaduwberekening gemaakt. Deze rekensheet is in 2020 opgesteld, echter niet nader gevalideerd. De sheet baseert zich op data uit:

- Ecoinvent
- Dubocalc
- EuCIA database.

Zie tabel 3.

End of life scenario VVK brug: Na 50 jaar hergebruik . Na 100 jaar verbranden

VI VVK Brug	Hv	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1-C4	D	MKI
Glasvezel	4,36 ton	€ 927,49	€ 3,40	€ 84,07		€ 106,20	€ 17,29	€ 1.138
UP hars	2,15 ton	€ 2.015,02	€ 1,68	€ 41,55		€ 668,19	-	€ 2.726
Vacuüm infusion	2,26 ton	€ 318,72						€ 319
Glasvezel (na 50 jaar)	0,00 ton							
UP hars		€ -	€ -	€ -		€ -	€ -	€ -
PIR Schuim	1,04 ton	€ 781,96	€ 0,81	€ 20,15		€ 25,45	€ 360,18	€ 1.189
PIR Schuim (na 50 jaar)		€ -	€ -	€ -		€ -	€ -	€ -
Gelcoat	0,24 ton	€ 323,00	€ 0,19	€ 4,58	€ 1.620,44	€ 5,79	€ 81,94	€ 2.036
Slijtlaag (Epoxy)	0,20 ton	€ 315,46	€ 0,15	€ 3,82	€ 1.531,03	€ 4,83	€ 68,31	€ 1.924
Slijtlaag (bauxite)	0,36 ton	€ 0,64	€ 0,28	€ 6,95	€ 70,48	€ 8,78	€ 1,43	€ 89
Totaal	8,35	€ 4.682,29	€ 6,51	€ 161,12	€ 3.221,95	€ 819,23	€ 529,15	€ 9.420,26

Levensduur	100 jaar
Hergebruik verlies	0%
MKI per jaar (100 jaar)	€ 94,20

Tabel 3 – MKI-score composiet brugdek volgens rekentool RHDHV

Uitgangspunten:

Hoeveelheden voor VVK brug:

- Glasvezel 121 kg/m², 18m x 2 m
- Hars: 59 kg/m² , 18m x 2 m
- Schuim: 29 kg/m² , 18m x 2 m

Onderhoud VVK:

De conservering bestaat uit een topcoating van ISO-NPG polyester met een dikte van 0,3 mm. Deze wordt bij de inspecties visueel gecontroleerd. Aangenomen is dat de coating om de 15 jaar met behulp van lokaal bijwerken wordt onderhouden, tenzij er incidenten zijn opgetreden. De coating krijgt na de eerste 15 jaar een gedeeltelijk nieuwe laag (20%). Na de 50 jaar wordt aangenomen dat er een volledig nieuwe laag aangebracht wordt (conservatief). De VVK-variant maakt gebruik van een slijtlaag bestaand uit epoxyhars (in praktijk PMMA-hars) en bauxietkorrels met een dikte van 4 mm voor voetgangersdek. Deze wordt om de 15 jaar met behulp van lokaal bijwerken onderhouden. De slijtlaag krijgt na de eerste 15 jaar een gedeeltelijk nieuwe laag (30%). Na de tweede 15 jaar (jaar 30 vanaf jaar 0) wordt de laag in zijn geheel verwijderd en wordt een nieuwe slijtlaag aangebracht. Het onderhoudsproces van de slijtlaag start na 30 jaar opnieuw zie Tabel 4.

	15 jaar	30 jaar	45 jaar	60 jaar	75 jaar	90 jaar
Beton	100%	100%	100%	100%	100%	100%
VI VVK en 3D geprint VVK	30%	100%	30%	100%	30%	100%

- De slijtlaag in het betonnen brugdek wordt 6 keer vervangen tijdens de levensduur
- De slijtlaag in de VVK brugdekken wordt 3.9 keer vervangen tijdens de levensduur

Tabel 4 – Slijtlaag vervanging tijdens levensduur



End of use/life scenario:

Hergebruik na 50 jaar. Na 100 jaar verbranding en hergebruik in cement via de cement-oven route. Onderstaande waarden zijn gebruikt (tabel 5):

End of life data	MKI per	Bron	Opmerkingen
Polyester	€ 0,29	SBK verbranden kunststoffen in cementoven aangepast voor PET (C+D)	
Polyurethane	€ 0,35	SBK verbranden kunststoffen in cementoven aangepast voor PIR (C+D)	
Glass fibre	€ 0,00	SBK verbranden kunststoffen in cementoven aangepast voor mixed glas (C+D)	
Epoxy	€ -0,17	SBK verbranden kunststoffen in cementoven aangepast voor mixed plastics (C+D)	
Mixed plastics	€ -0,17	SBK verbranden kunststoffen in cementoven aangepast voor mixed plastics (C+D)	
Waste concrete (Europe without Switzerland) treatment of waste concrete, inert material landfill Cut-off, U)			

Tabel 5 – MKI-score verbranden composiet grondstoffen

Er zijn hierbij in het model van 2020 geen credits opgenomen in kolom D. De verwachting is dat alternatieve verwerkingsmodellen op basis van recente inzichten tot credits kunnen leiden. Dus ook deze benadering is conservatief. Hetzelfde beeld was zichtbaar bij de sluisdeuren, namelijk een negatieve score in categorie D.

Daarmee komt voor het composietdek binnen de fase A1 D een MKI-score van ca. €9.400,26. Ook dit is in dezelfde orde grootte en lager als in alinea 10.1 bepaalde waarde van €10.490,-. Dit onderschrijft wederom dat de benadering zoals gehanteerd conservatief is.

De in alinea 10.1 beschreven conclusies blijven overeind. Voor een gedetailleerdere analyse wordt verwezen naar de onderbouwing voor de SPUK aanvraag⁸

⁸ "Onderbouwing MKI & Meerkosten"; WD. Schutte, L. Tromp; 1-7-2024



10 Kosten

Bij de kostenonderbouwing van de Nieuwe Situatie zijn de volgende uitgangspunten genomen:

- Afmetingen tussen de betonnen referentiebrug tbv van de subsidieaanvraag en de Reefbrug zijn gelijk. Dit is niet helemaal accuraat. In realiteit is de referentiebrug ca. 2m langer, bij gelijke breedte. Omwille van het vergelijk is de lengte aangenomen als identiek
- Onderbouw zoveel mogelijk gelijk als bij het referentieproject;
 - Minder funderingspalen (bij de Reefbrug) wegens lichte gewicht van composiet vergeleken met beton;
- Geen steunpunten, want doel is om in één keer te overspannen;
 - Minder deuvels en voegovergangen als gevolg van één overspanning
- De kosten t.b.v. oogsten, transporteren, opslaan zijn opgenomen in de kosten van Blade-Made en zijn als zodanig ook in hun offerte opgenomen. Daarbij zijn voor Blade-Made kosten opgenomen voor advieswerk en optimalisatiewerkzaamheden. Deze zijn apart benoemd in de kostentabel. De offerte is toegevoegd aan de bijlagen;
- De gehanteerde opslagen zijn aangepast ten opzichte van het referentieproject, dit heeft de volgende redenen:
 - Van het referentieproject is al een VO beschikbaar, van de nieuwe situatie nog niet. Daarom is 'nader te detailleren' opgehoogd naar 20%;
 - De risicoreservering is opgehoogd naar 20% wegens het innovatieve karakter van het werk;
 - De engineering is hoger omdat er meer afstemming benodigd is dan bij een regulier proces en ook om te helpen de kosten van de 3D scan te dekken (dat wordt in-huis gedaan), zie alinea 10.2;

||

Merk op dat de opslagen zijn berekend als percentage van de direct benoemde kosten exclusief de kosten van het testprotocol en monitoring. Anders zouden de opslagen onevenredig hoog oplopen doordat Tests + monitoring verantwoordelijk is voor €105.000,-

||

Verdere meerkosten komen voort uit het te volgen testprotocol. Dit protocol is opgenomen in paragraaf 10.1. Dit testprotocol dient om de mechanische eigenschappen van de bladen te bepalen. Deze informatie is benodigd om constructieve analyses te maken ten einde het ontwerp te valideren. Daaraan gekoppeld wordt een monitoringsplan voorzien voor de brug. Hier is nog geen nadere informatie over bekend. Het genoemde bedrag betreft een schatting. Door deze brug compleet uit te voeren inclusief het grondige testprogramma wordt veel waardevolle informatie verkregen- zowel over windturbinebladen als bouw materiaal als ook het benodigde testprogramma om deze in te zetten in lijn met de regelgeving (Eurocode). Door deze informatie te delen in een technisch artikel wordt bredere inzet van windturbine bladen als bouw materiaal gestimuleerd: de informatie kan gebruikt worden om een (voor)ontwerp te maken en afgeleid kan worden welke testen nodig zijn in de bewijsvoering – waardoor men kan komen tot een meest efficiënte aanpak. Inzet van windturbine bladen zal daardoor steeds economisch interessanter worden.



10.1 Testprotocol

Zoals eerder in dit rapport aangegeven zal van de bladen die worden geoogst geen technische documentatie beschikbaar zijn. Dit is een sterk hinderende factor voor het constructief hergebruiken van windturbinebladen. Helaas zijn producenten op dit moment nog niet bereid om deze data vrij te geven om daarmee het circulair hergebruik een impuls te geven. Dit leidt ertoe dat de afnemer veel extra werk moet doen om tot validatie van de nieuwe constructie te komen, zoals vereist in EN1990 (Eurocode 0).

Het testprotocol zoals nu voorzien is, 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 inclusief een onderzoeker die ook een paper kan schrijven ten behoeve van de kennisoverdracht. Verder zijn de tests breed opgezet zodat er een beter basis ontstaat voor opvolgende initiatieven die gebruik zullen kunnen maken van de hier ontwikkelde kennis. In geval de subsidie niet wordt toegekend dan zal het testprotocol worden gereduceerd tot het strikt noodzakelijke om de brug te realiseren.

Ook is het protocol zo dat een aantal tests uiteindelijk misschien niet nodig blijken te zijn, maar dat is afhankelijk van wat wordt aangetroffen in de te oogsten bladen.

Onderstaande testprogramma is door RHDHV en Marko Pavlovic van TU-Delft opgesteld.

1. **Burn out tests 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) x 4h/stuk = 36h = €3.000,-
2. **Coupons snijden tbv materiaaltests (watersnijden?)**
 - See item 3. Voor hoeveelheden.
 - Extractie van 9 platen, 1-2m²/stuk, van het blad (on site), derden = €1.000,-
 - Watersnijden 12 platen om 400 coupons te maken (35 stuks van elke plaat) = €2.000,-
3. **Materiaaltests op coupons – spar cap / web – per verschillende geconstateerde layup – voor ten minste 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(layups/diktes) x 1,5 richtingen (niet elke keer 0° en 90° benodigd) x 3,5 test types (niet elke keer afschuiving en Tg benodigd) x 7h/stuk (voor 6-8 monsters) = 50 tests x 7h/stuk = 350h = €32.000,-
4. **Component tests voor bevestigingen aan de bladen (optioneel) 3x3**
 - **Optie 1: Eenvoudige test connecties: 3 types laminaten, elke 3 monsters 38h = €3.000,-**
 - **Optie 2 (zo nodig): Component tests op bevestigingen: 2 technici + 1 onderzoeker gedurende 3 weken tbv voorbereiding, uitvoering en verwerking van de tests: 3 man x 3 weken x 38h = 324h = €29.000,-**

