Lectoraat Kunststoftechnologie

Doorvaren naar een Circulaire Economie

Verende wrijfstrook

hogeschool Windesheim

Colofon

Titel: Doorvaren naar een Circulaire Economie: Verende wrijfstrook

Publicatie nummer: LKT-CE-108637-2201

Publicatie datum: 2022

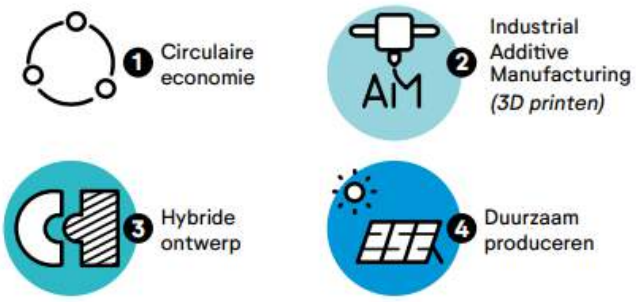
Auteurs: Ir. P.G.F. Bosman, P. Schreuder B.Sc.

Subsidieverstrekker: Provincie Overijssel

In samenwerking met: Witteveen+Bos, Altena, SavePlastics

Fotografie: Windesheim

Onderzoekslijnen:



Deze publicatie van Windesheim valt onder een Creative Commons Naamsvermelding 4.0 Internationaal-licentie. Dit betekent dat de kennis uit deze publicatie hergebruikt mag worden als basis voor de ontwikkeling van nieuwe kennis mits de naam van de auteur en/of Windesheim hierbij vermeld wordt.

Deze publicatie wordt uitgebracht door het Lectoraat Kunststoftechnologie, een praktijkgerichte onderzoeksgroep op Hogeschool Windesheim die zijn basis heeft in Engineering & Design. Zoals passend bij lectoraten in combinatie met de gebruikte subsidieregeling, is het onderzoek uitgewerkt tot een TRL niveau van maximaal 7: demonstratie systeemprototype in operationele omgeving. Het werk is zo opgeschreven dat het na-werkbaar is, maar bedrijfsspecifieke data is soms weggelaten.

Voorwoord

Voor de transitie naar de circulaire economie zijn systeemveranderingen nodig voor de lange termijn. Maar tegelijk moeten er op de korte termijn 'circulaire' alternatieven komen voor bestaande producten en activiteiten. In dit onderzoeksproject zijn wrijfstroken van circulaire kunststoffen ontworpen, ontwikkeld, geplaatst, getest en gemonitord als beter alternatief voor tropisch hardhouten wrijfstroken bij waterwerken, zoals sluizen en bruggen. Als extra uitdaging voor de nieuwe wrijfstroken, is naast de circulaire ontwerpprincipes, een verende werking meegenomen. Van de wrijfstroken zijn de effectiviteit en duurzaamheid bepaald.

Het lectoraat Kunststoftechnologie heeft hiervoor onderzoekers uit haar onderzoeksthema's Hybride ontwerp en Circulaire economie ingezet met als achtergronden Duurzaamheid, Civiele Techniek, Werktuigbouw en Chemie.
Het lectoraat Kunststof technologie wil provincie Overijssel bedanken voor de subsidie van dit project, alsmede voor het mogelijk maken om de demonstator van de verende wrijfstrook ook in de praktijk uit te proberen bij Ronduite.
Bij het onderzoek en de ontwikkeling van de verende wrijfstroken hebben ook diverse (regionale) bedrijven en partijen een rol gespeeld. Bij ingenieursbureau Witteveen+Bos in Deventer zijn twee civieltechnische studenten afgestudeerd op dit onderwerp. SavePlastics uit Arnhem heeft gerecycled PE/PP kunststof balken en kennis ter beschikking gesteld. Altena Kampen heeft UHMPE kennis en ervaring gedeeld. Bij Vilton Lelystad en EKI Nijmegen zijn rubber producten betrokken. Verder is kennis van TUDelft (milieukosten), Rijkswaterstaat (kunststof) en Universiteit Twente (rubber) betrokken in dit onderzoek. Alle partijen worden bedankt voor hun medewerking.

Het lectoraat heeft in dit onderzoeksproject ook gebruik gemaakt van een nevenonderzoek in het RAAK-Project naar Hybride hergebruik kunststoffen. Hierbij zijn andere hybride toepassingen met hergebruikt vezel versterkt kunststof, poreus mixed PE/PP uit consumentafval en rubber uit autobanden onderzocht. (Busschen, 2022)

Samenvatting

Wrijfstroken van geleidewerken bij recreatievaart tegen gladde betonnen wanden van brug- en sluishoofden zijn onderzocht. De wrijfstroken zijn niet zoals gebruikelijk star maar verend ontworpen en toch compact gehouden. Er zijn drie verende varianten beschouwd in een Total Cost of Ownership (TCO) vergelijking waarvan er van twee demonstrators zijn gemaakt die zijn getest onder een drukbank en bij een bestaande brug van de Provincie Overijssel. De TCO vergelijking omvat:

- bij ongelijke levensduren meerdere levensduurcycli,
- per cyclus alle levenscyclus fasen,
- zowel de economische kosten ofwel de Life Cycle Costs (LCC),
- als de milieu-impact ofwel de Life Cycle Analysis (LCA) eveneens uitgedrukt in kosten.

Als referentie voor de verende varianten zijn ook starre varianten in de TCO-vergelijking meegenomen. Van de starre varianten scoort Azobé het minste als biodiversiteit in de LCA wordt meegenomen en zodra niet al het Azobé met FSC kan worden geleverd. Bij LCA-Idemat wordt biodiversiteit meegenomen, maar bij LCA-MKI niet. Dit terwijl MKI gebruikt wordt in de GWW sector. Van de massieve, thermoplastische kunststof varianten is regeneraat UHMPE technisch het beste en kan goed meekomen in de TCO vergelijking met recyclaat PE/PP mix die er net als meest gunstige uitkomt. Dit technisch het beste zijn, uit zich onder meer in mate van volkern, slagvastheid, gladheid en slijtgevoeligheid.

De verende wrijfstrook varianten zijn opgebouwd uit een thermoplastische kunststof voorzijde dat door tussenkomst van een EPDM rubber profiel aan de betonnen wand is bevestigd. In het ontwerp zijn lange levensduur, losneembaarheid en mogelijke circulariteit van de materialen uitdrukkelijk meegenomen.
Met celrubber wordt de gunstigste vering verkregen, maar met geprofileerd rubber is er uitzicht op recycling. Ten aanzien van de materialen van de kunststof voorzijde geldt hetzelfde als bij de starre kunststof varianten.
Bij korte betonwanden kunnen de verende stroken zonder dilataties worden uitgevoerd. Bij lange betonwanden zullen dilataties met kleine tussenafstand nodig zijn, vanwege grote uitzettingscoëfficiënt van de thermoplasten. In de TCO vergelijking zijn verende wrijfstroken circa 50% duurder ten opzichte van starre wrijfstroken. Met die 50% lijkt er uitzicht te zijn op minder maatschappelijke schade aan recreatieve schepen. Dilataties vromen vanwege de grote temperatuuruitzetting nog een uitdaging.

Doorvaren naar een circulaire en duurzame economie voor geleidewerken op betonwanden, vertaald zich naar een toekomst met:

- dunne, recyclaat wrijfstroken met lange levensduur die opnieuw recyclebaar zijn; én
- gladde en liefst ook verende wrijfstroken met minder reparaties voor de recreatievaart.

Inhoudsopgave

Voorwoord **3**
Samenvatting **4**
1. Inleiding **7**
2. Onderzoeksmethode **10**
3. Functionele eenheid en Varianten **14**
3.1 Functionele eenheid wrijfstroken recreatievaart 14
3.2 Varianten 16
3.2.1 Algemeen 16
3.2.2 Diktes (d) 17
3.2.3 Levensduur (L) 17
3.3 Polyethyleen 18
3.4 Rubber 19
3.5 Verbindingen 21
4. Resultaten en analyse TCO vergelijking wrijfstroken **22**
4.1 Total Cost of Ownership 22
4.1.1. Circulaire kansen 23
4.2 Gevoeligheidsanalyse voor FSC gehalte 24
4.3 Gevoeligheidsanalyse voor Levensduur (L) 25
4.4 Gevoeligheidsanalyse voor Netto Contante Waarde 26
4.5 Gevoeligheidsanalyse voor LCA methode: MKI vs. Idemat 27
4.6 Gevoeligheidsanalyse voor wrijfstrook dikte (d) 28
4.7 LCC per fase 29
4.8 LCA per fase 30
5. Demonstrators **31**
5.1 Dimensionering Demonstrators 31
5.2 Full Scale drukbank beproeving Demonstrators 32
5.3 Pilotproject Demonstrators 33
6. Conclusies en aanbevelingen **36**
7. Bibliografie **38**
8. Afkortingen **40**

Bijlagen

Bijlage A - Achtergrond Fast track Life cycle assessment 41
Bijlage B - Gehanteerde LCC kosten-kengetallen 48
Bijlage C - Uitloging en levensduur kunststoffen 49
Bijlage D - Ontwerp starre versus verende wrijfstrook 52
Bijlage E - Energieopname bij Schampen 53
Bijlage F - Dimensionering verende varianten 58
Variant 5 - Celrubber Re-PE/PP U-balk 58
Variant 6 - Geprofileerd rubber Re-PE/PP strip 60
Bijlage G - Slijtgevoeligheid kunststoffen en hout 62
Bijlage H - Wrijvingsonderzoek kunststoffen en hout 64
Bijlage I - Rubber selectie 69
Bijlage J - Bestaande energie absorberende producten voor afmeren 71
Bijlage K - Circulariteit van materialen en producten in de GWW 74
Bijlage L Drukproeven beddingmaterialen 79
EPDM rubber 79
Geprofileerd-rubber: 79
Cel-rubber: 80
Gegranuleerd rubber 81
Bijlage M - Dilataties en beëindigingen verende wrijfstroken 82
Bijlage N - Mechanische eigenschappen kunststoffen balken 84
re-UHMPE 84
SavePlastics Re-PE/PP met aanvullende buigproeven 85
Bijlage O - Samenstellingstekeningen Demonstrators 86
Bijlage P Drukproeven Demonstrators 87
Bijlage Q - Schortvariant 94

1. Inleiding

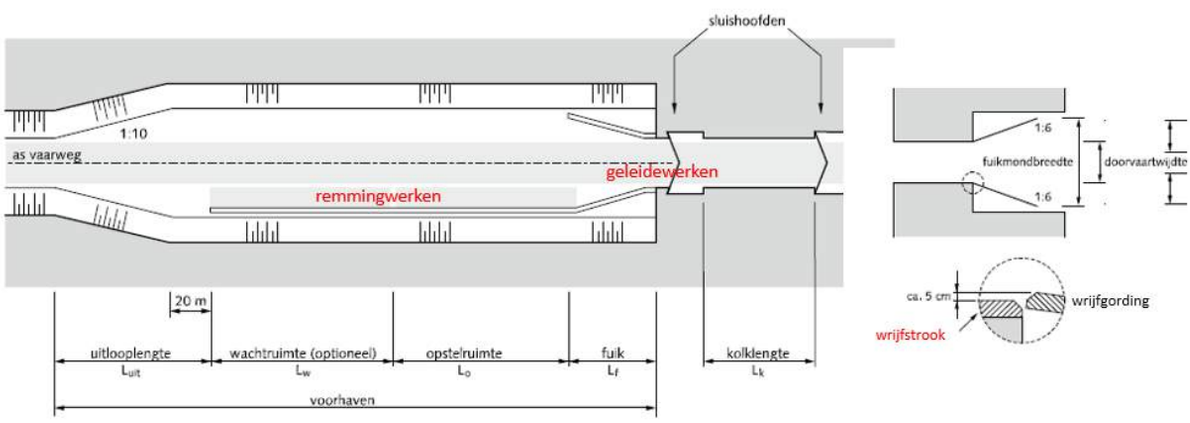
Geleidewerken worden aan weerszijden van bruggen en sluizen toegepast als fuikconstructies, en worden daartussen doorgezet op betonnen brug- en sluiswanden. Geleidewerken bieden visuele en mechanische geleiding. Remmingwerken worden voor bruggen en sluizen toegepast om af te kunnen meren als wachtplaatsen voor de scheepvaart.

Remming- en geleidewerken worden vaak in één adem genoemd en/of verward, hetgeen logisch is omdat ze op elkaar lijken. Remming- en geleidewerken bestaan uit horizontale wrijfgordingen/stroken, vaak aangevuld met verticale wrijfstijlen/stroken om te voorkomen dat schepen tussen de gordingen/stroken kunnen komen. Soms worden wrijfschorten toegepast, waarmee het contactoppervlakte tijdens scheepscontact wordt gemaximaliseerd en daarmee de contactdruk wordt geminimaliseerd.

Horizontale wrijfelementen wordt toegepast bij:
- flexibele paalconstructies,
- starre beton/damwanden.

Bij flexibele paalconstructies brengt een (houten) wrijfgording de scheepskracht ook zelf door naar de palen en kan dan met recht gording worden genoemd, of geven (houten/kunststoffen) starre wrijfstroken de scheepsdruk door aan achterliggende separate (stalen) balken die de kracht naar de palen brengt.
Bij starre beton- of damwandconstructies geven starre wrijfstroken de scheepsdruk door aan achterliggende wandconstructie.

Vervangbare wrijfstroken beperken lokale aanvaarschade aan schepen en constructies.



Figuur 1-1: Remmingwerken, geleidewerken (RVW, 2020) en wrijfstrook.

Figuur 1-1 geeft een voorbeeld van de locatie van remmingwerken, geleidewerken en wrijfstroken bij een sluis.

Figuur 1-2: Geleidewerk voorbeeld

Traditionele wrijfstroken worden gemaakt van massief hout: omwille van de levensduur veelal tropisch hardhout in duurzaamheidsklasse I (veelal Azobé).

Wrijfstroken worden steeds vaker ook gemaakt van massief kunststof: veelal PE, soms gerecycled, omdat het ten opzichte van hardhout:

- minder wrijving kan hebben,
- taaier en niet versplinterbaar kan zijn,
- dunner uitgevoerd kan worden,
- geen tropische bomen voor worden gekapt.

Figuur 1-2 geeft voorbeeld van de toepassing van enerzijds houten wrijfstroken op een starre betonnen wandconstructie en anderzijds kunststof wrijfstroken op een flexibele stalen fuikconstructie.
Dit rapport beschrijft het onderzoek naar de mogelijkheden van verende wrijfstroken tegen starre betonwanden met gebruik making van circulaire kunststoffen.
Het onderzoek is eenvoudigheidshalve beperkt tot verende wrijfstroken:

- voor recreatievaart bij een constant waterpeil,
- die net zo compact zijn als starre wrijfstroken.

Compacte wrijfstroken beïnvloeden de doorvaartbreedte niet nadelig, en maken voorts het vervangen van een bestaand stuk star wrijfstrook mogelijk in een pilotproject.

Als voorzijde van de verende wrijfstrook was in het projectplan recyclaat GVK (glasvezel versterkt kunststof met thermoharder) voorzien. Dit blijkt alleen uitvoerbaar in niet-compacte uitvoering. Zie Figuur 2-3. (Heun, 2021). Thermoplast on-versterkte PE-kunststoffen blijken als voorzijde technischer gunstiger (dun, lagere stijfheid, grotere slagvastheid) en daarmee ook gunstiger wat betreft kosten, milieu-impact en circulariteit (omsmelten).

Als verende medium van de verende wrijfstrook was in het projectplan recyclaat, granulair PE/PP uit consumentenplastic voorzien, zie Figuur 1-3. Herhaalde indrukbaarheid zonder afbrokkeling van dit poreuze kunststof blijkt echter (nog) onvoldoende te garanderen. (Grolleman, Vink, & Wijnbergen, 2021) (Bijker & Selles, 2019)

Rubber blijkt voor deze toepassing technischer gunstiger (dun, vormvast, gedempte vering). Binnen rubber is dan ook gezocht naar gunstige kosten, milieu-impact en circulariteit (de- en re-vulkanisatie).

Figuur 1-3 recyclaat, granulair PE/PP uit consumentenplastic

De vraagstelling voor het onderzoek is daarom omgezet om voor geleidewerken de economische kosten (LCC) en de milieu-impact (LCA) kosten op een rij te krijgen om daarmee de Total Cost of Ownership (TCO) te bepalen. Dit voor een aantal verschillende uitvoeringen van geleidewerken, zowel met traditionele materialen en opgebouwd met nieuwe, deels hergebruikte kunststofmaterialen. Doel is om hiermee op basis van de TCO de kunnen vaststellen welke uitvoering over het gehele leven van het geleidewerk de meest voordelige keuze is en om te bezien of een verende wrijfstrook in de praktijk ook werkt. Doel is voorts om aan de hand hiervan de circulariteit van waterbouwkundige materialen en producten te bevorderen.

In Hoofdstuk 2 wordt de onderzoeksmethode TCO beschreven en voorts de gebruikte ontwerpfilosofie om tot varianten van verende wrijfstroken te komen.

In Hoofdstuk 3 worden de verende varianten en (ter referentie) starre varianten beschreven die met de TCO worden vergeleken. De varianten vervullen hierbij, behoudens het al dan niet verend zijn, een gelijkwaardige functie.

In Hoofdstuk 4 zijn de resultaten van de TCO vergelijking opgenomen, alsmede de resultaten van enkele gevoeligheidsanalyses opgenomen.

In Hoofdstuk 5 zijn ontwerp, productie en testen van demonstrators van verende wrijfstroken beschreven, alsmede een beschrijving van de praktijkproef bij de brug Ronduite bij Giethoorn waarbij twee nieuwe uitvoeringen zijn geïnstalleerd die ook zijn opgenomen in de TCO analyses.

In Hoofdstuk 6 zijn de conclusies en aanbevelingen opgenomen.

2. Onderzoeksmethode

De gekozen onderzoeksmethode is een vergelijking van de Total Cost of Ownership (TCO) van verschillende varianten met dezelfde functie - van wrijfstrook- over een lange periode.

De totale kosten betreffen hierbij de economische kosten over de fasen: productie, bouw, gebruik, sloop en afdanking incl. transporten plus de milieu-impact uitgedrukt in geld over dezelfde fasen.
De totale economische kosten wordt ook wel Life Cycle Costing (LCC) genoemd. De totale milieu-impact wordt ook wel Life Cycle Assessment (LCA) genoemd. Voor de LCA is gekozen om deze evenals de LCC uit te drukken in geld, zodat beiden gemakkelijk opgeteld en vergeleken kunnen worden. De LCA is verricht met de fast track Idemat en als gevoeligheidsanalyse ook met MKI via Idemat, zie tevens bijlage A.

De gehanteerde economische kostenkengetallen in de LCC voor materialen zijn opgenomen in Bijlage B.
Door meenemen van jaarlijkse waardevermeerdering worden toekomstige kosten, uitgedrukt in huidig prijspeil, relatief geringer. Het meenemen hiervan wordt ook wel Netto Contante Waarde (NCW) genoemd.
Voor infrastructuur is een economische discontovoet van 1,6% aangehouden, als gevoeligheidsanalyse ook van 1,2% & 2,0%, e.e.a. zoals vanaf 2021 aanbevolen (RWS, 2021).
Als ecologische discontovoet is 0,0% aangehouden, als gevoeligheidsanalyse 1,6%.

Bij varianten met ongelijke levensduren (L) is gekozen voor een eerlijke, lange tijdsperiode (T) van vergelijking. Deze periode betreft de kleinste gemeenschappelijke veelvoud van hele levensduren van alle varianten. De ene variant wordt binnen deze periode van vergelijking dan vaker vervangen dan de andere variant.
De levensduren van verschillende varianten zijn ingeschat op basis van literatuur. Als gevoeligheidsanalyse zijn deze levensduren hetzelfde aangehouden voor alle varianten.

Bovengenoemde multi-cycle benadering laat bovendien nadenken over de circulaire bouw en economie. Een voorbeeld van circulaire bouw is in het ontwerp al meenemen van eenvoudig uitneembaarheid van verschillende materialen: design for disassembly (D4D). Een voorbeeld van circulaire economie is eventuele terugnameplicht van materialen in de GWW sector.

In de vergelijking zijn starre en verende varianten van wrijfstroken meegenomen. Alle varianten moeten een voorgeschreven aanvaarbelasting bij een calamiteit op kunnen nemen over een voorgeschreven aanvaarbreedte (0,5 meter) waarbij de scheepshuid mag bezwijken.

Binnen de starre houten varianten is onderscheid gemaakt tussen:
- Azobé met en zonder FSC bijv. van Wijma.

Als FSC% is de bestaande handelsmix aangehouden, ingeschat op 50% op basis van literatuur, en voorts een gevoeligheidsanalyse van het FSC gehalte.
Binnen de starre kunststof varianten is onderscheid gemaakt tussen:
- recyclaat PE/PP mix uit consumentenplastic bijv. van SavePlastics of Lankhorst,
- regeneraat UHMPE bijv. van Altena.

De starre varianten dienen als referentie voor de verende varianten, maar kunnen ook onderling worden vergeleken. De verende varianten betreffen innovatieve wrijfstroken waarvan eerst een ontwerpfilosofie is opgesteld, die visueel is samengevat in Figuur 2-2. De verende varianten bestaan uit twee delen: een voorzijde en een achterzijde. De achterzijde, tussen de voorzijde en de betonwand, bestaat uit een doorlopend verend medium: in mechanica termen de bedding. Bij normaal manoeuvreren - schampen- treedt maximale indrukking in slechts één punt op, waarbij de scheepshuid niet ingedeukt mag worden. Bij een calamiteit - aanvaren- treedt de maximale indrukking over de voorgeschreven aanvaarbreedte, waarbij de voorzijde alsnog star tegen de betonwand aanligt en de scheepshuid mag bezwijken.

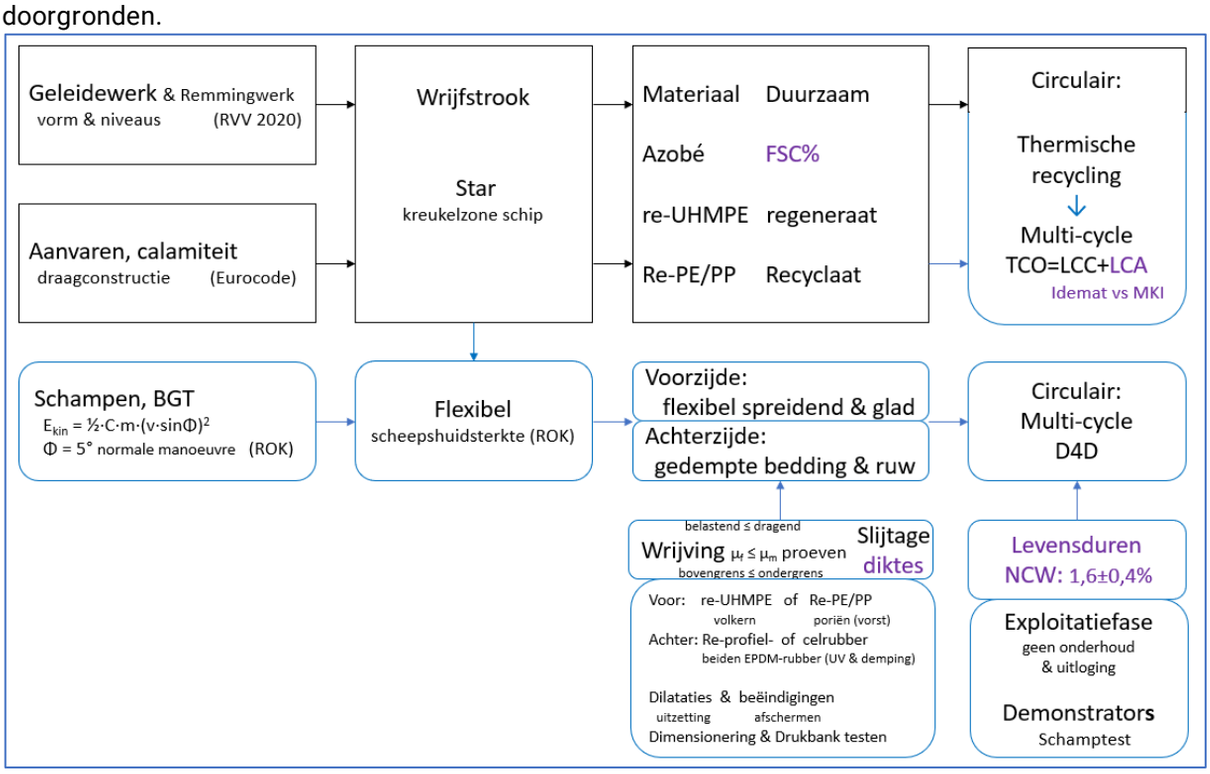
De voorzijde van de verende varianten bestaat uit gladde en taaie thermoplast. Dezelfde materiaalvarianten als waar starre varianten van gemaakt worden: regeneraat UHMPE of recyclaat PE/PP mix.

Het verende medium bestaat uit rubber. Rubber wordt ook vaak in fenders toegepast om energie op te nemen. Er zijn twee verschillende compacte rubberprofielen geselecteerd. Een van geprofileerd massief rubber, de ander van celrubber. Voor massief rubber geldt dat dit uit recyclaat gemaakt kan worden, voor celrubber is dat niet zeker. Van de rubberen tussenlaag is onderzocht of deze een grotere dragende wrijving kan bieden dan belastende wrijving tussen schepen en voorzijde.

Ten aanzien van de gebruiksfase is ontworpen op varianten zonder onderhoud en uitloging (zie Bijlage C). Van alle (front)materialen is in de TCO daarom wel een extra slijtdikte meegenomen op basis van literatuur. Als gevoeligheidsanalyse zijn de totale diktes hetzelfde aangehouden voor alle varianten.

Bij alle varianten is gebruik gemaakt van dezelfde database voor milieukosten, te weten de Idemat 2021 database voor materialen, processen en afdanken die publiek beschikbaar is via Idemat. Voor MKI (Milieu Kosten Indicator) is deze zelf omgezet. Er is geen gebruik gemaakt van MKI via Dubocalc omdat deze alleen geschikt is voor bekende materialen en producten. Vele leveranciers van grondstoffen hebben vaak zelf ook data beschikbaar. Opvallend is dat die vaak gunstiger zijn dan de Idemat database[a]. Om objectief te blijven zijn deze niet aangehouden, maar is het effect waar beschikbaar wel bepaald.

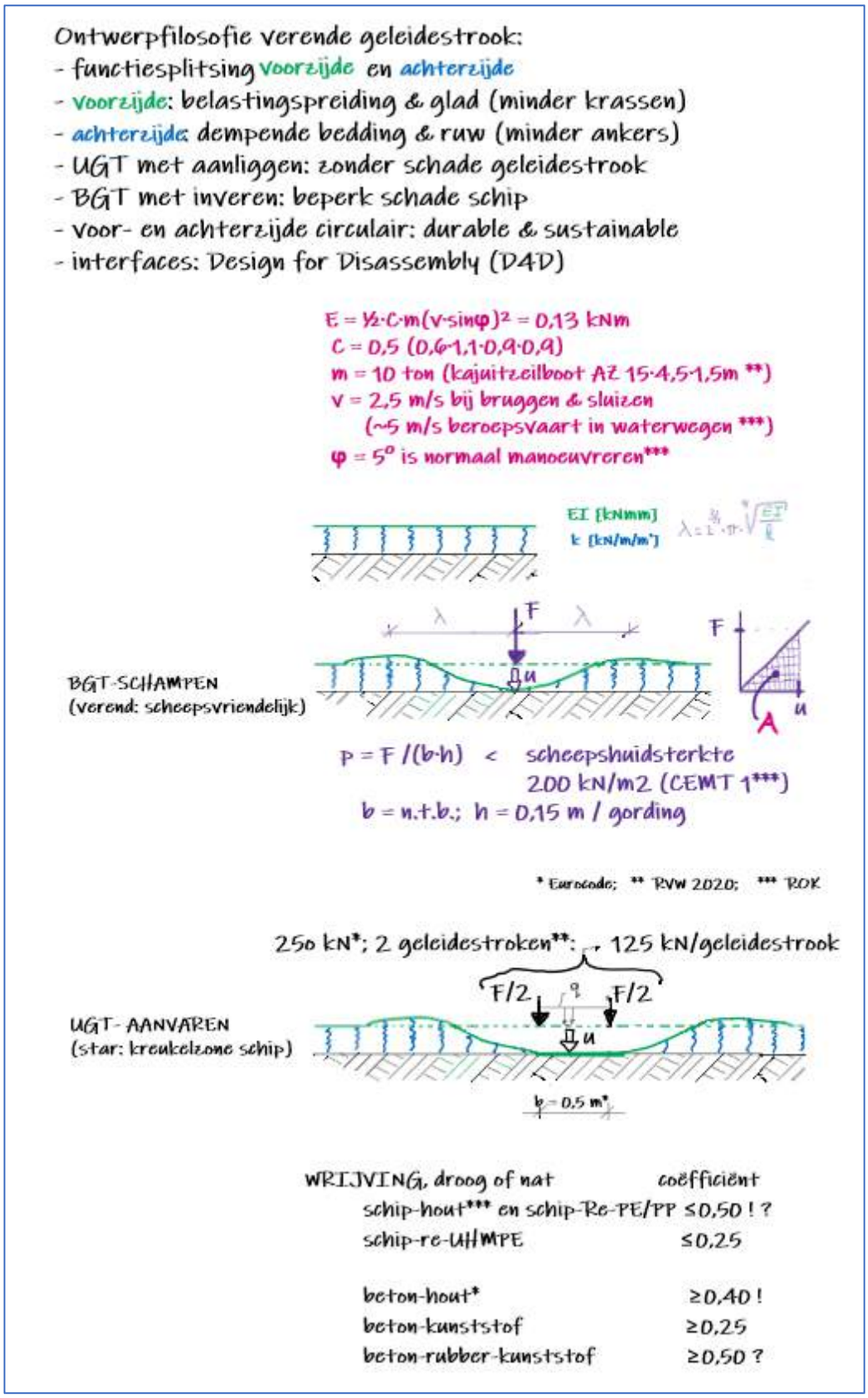
Figuur 2-1 Conceptueel onderzoeksmodel en Figuur 2-2 Mechanicamodel en ontwerpfilosofie verende wrijfstrook zijn visualisaties om de in dit rapport gehanteerde verbanden gemakkelijker te kunnen doorgronden.



Figuur 2-1: Conceptueel onderzoeksmodel

In Figuur 2-1 zijn traditionele processen omlijnd in zwarte kleur, en aanvullende processen omlijnd in blauwe kleur. Aspecten waar gevoeligheidsanalyses in de Total Cost of Ownership (TCO) naar zijn uitgevoerd zijn paars gekleurd.

[a] Dit geldt bijvoorbeeld voor SavePlastics. De milieukosten van Re-PE/PP omvatten overigens een beperkt aandeel van de TCO (zie hiervoor Figuur 4.1).



Figuur 2-2: Mechanicamodel en ontwerpfilosofie verende geleidestrook

In Figuur 2-2 is de voorzijde groen gekleurd, de achterzijde blauw gekleurd, de scheepsenergie roze en de scheepshuidvriendelijke aspecten paars gekleurd.

Afstudeerstudenten hebben hybride, gerecyclede varianten onderzocht (zie ook Figuur 2-3), die geschikt zijn voor starre fuikconstructies (damwanden/betonwanden) van geleidewerken:
- Re-PE/PP-mix voorzijde met gegranuleerd rubber achterzijde (Fuld & Pee, 2021)
- Re-GVK profiel met Re-autoband-kern (Heun, 2021) (Dörenberg, Dominic, & Wesseling, 2021)

Figuur 2-3 Gegranuleerd rubber-kern achter Re-PE/PP-mix; Re-autoband-kern in vormgesloten Re-GVK profiel

Beide varianten hebben een dikte van 250 mm, hetgeen ze als minder compacte niet geschikt maakt tegen de betonwanden van brughoofden of sluishoofden. Overigens wel voor starre fuikwanden. Fuikconstructies kunnen zelf ook verend worden uitgevoerd, voorbeeld hiervan is te zien aan de rechterzijde van Figuur 1-2.

3. Functionele eenheid en Varianten

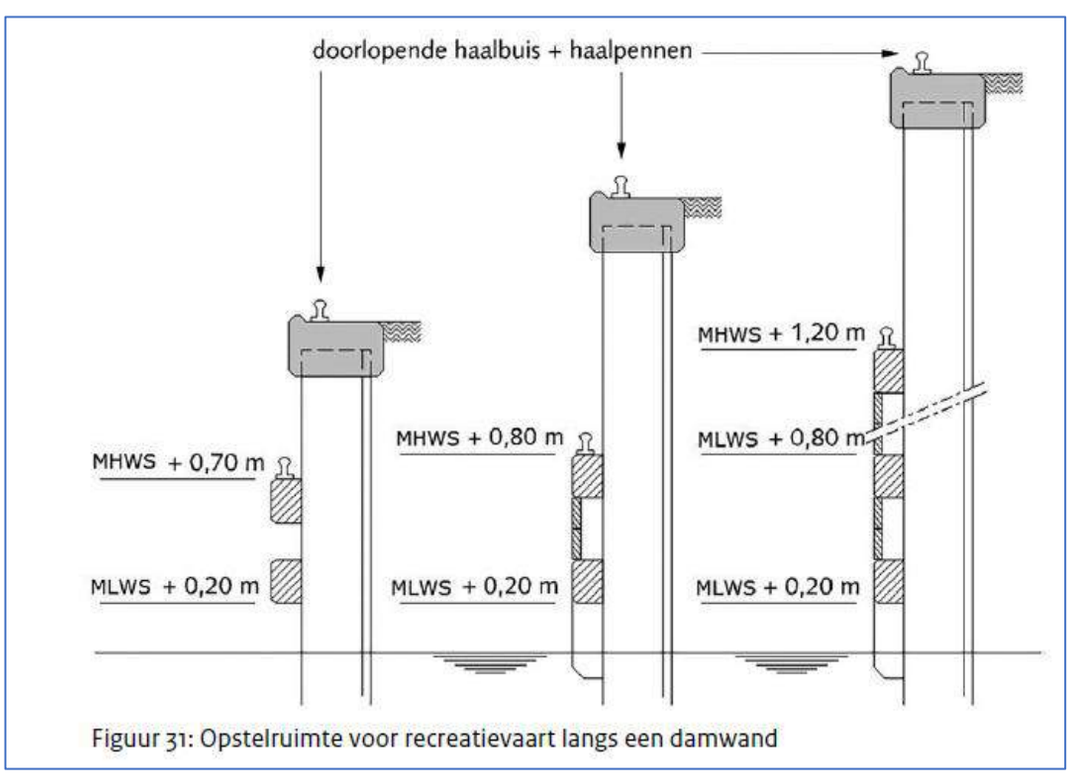
3.1 Functionele eenheid wrijfstroken recreatievaart

De binnenvaart in Europa is opgedeeld in CEMT-klasses om de afmetingen van vaarwegen in West-Europa op elkaar af te stemmen. De klasse-indeling werd in 1992 bepaald door de 'Conférence Européenne des Ministres de Transport'. Vandaar de term CEMT-klasse. Per klasse zijn de maximale afmetingen van een schip vastgelegd. CEMT I t/m CEMT VI betreffen beroepsvaart (RVW, 2020).

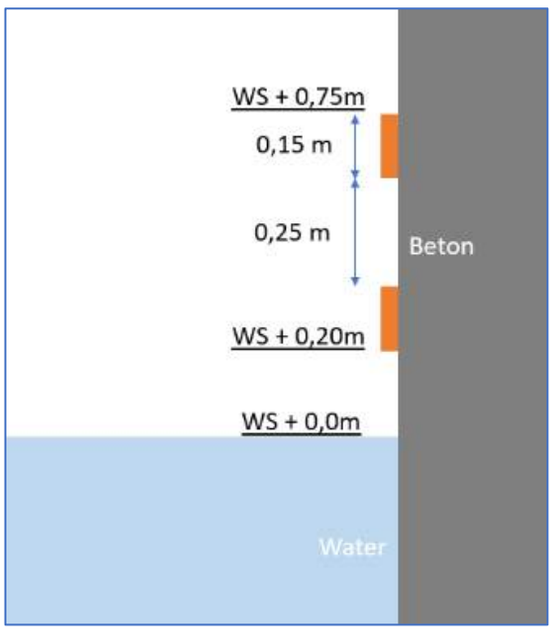
De kleine en recratievaart wordt ook wel CEMT 0 genoemd (ROK, 2017).
Functionele eenheden worden gebruikt om verschilllende varianten onderling zo objectief mogelijk te vergelijken, in dit rapport op basis van kosten en milieu-impact. Het is dus belangrijk om een functionele eenheid vast te leggen.

Functionele eenheid. De gekozen functionele eenheid betreft 1,0 m wrijffunctie in een compacte uitvoering voor kleine en recreatievaart op betonnen wanden evenwijdig aan de vaar-as. Vaste posten worden uitgesmeerd over een projectlengte van 100 m (2 stroken aan 2 zijden à 25 m) . De varianten functioneren bij dezelfde waterstanden, geometrie en scheepsbelasting bij aanvaren en schampen, die in de volgende alinea's zijn vastgesteld. Scheepsbelasting bij aanvaren betreft een calamiteit met de extreme belasting. Speciaal voor de flexibele varianten is aanvullend schampen gedefinieerd: een kleinere belasting die zo scheepsvriendelijk mogelijk opgenomen moet worden.

Waterstanden en Geometrie. Eenvoudigheidshalve is uitgegaan van een constant waterniveau. Daarbij zijn 2 wrijfstroken nodig met een verticale tussenafstand van 0,25 m. Bij deze tussen-afstand geraken schepen niet tussen wrijfstroken. (RVW, 2020) Zie Figuren 3-1 en 3-2.
De wrijfstroken zijn gemonteerd op een starre betonwand (landhoofd of sluishoofd). De wrijfstroken hebben dus overal ruggesteun. De hoogteafmeting van de wrijfstrook betreft 0,15 m.



Figuur 3-1: Remmingwerk (RVW, 2020).



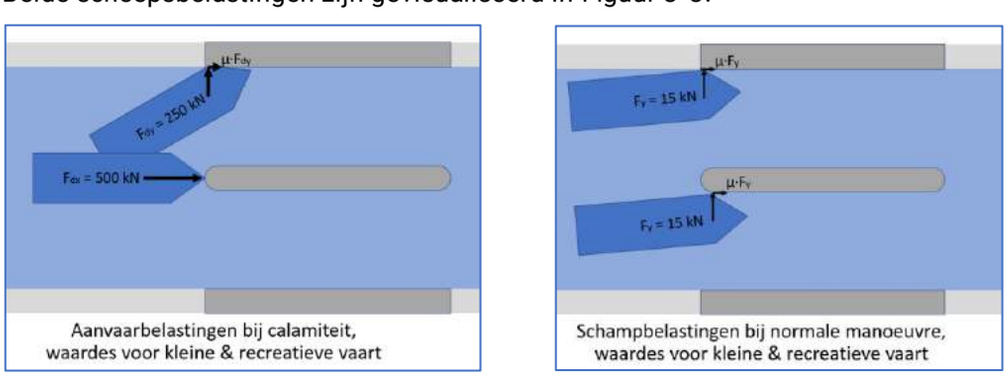
Figuur 3-2: Geleidewerk bij constant waterniveau.

Aanvaren. De zijdelingse aanvaarbelasting voor de betonconsructie betreft 250 kN over een breedte van 0,5 m en een hoogte van 1,0 m tegen een ondersteuningsconstructie conform (NEN-EN1991-1-7/NB, 2011) & (ROK, 2017). Deze wordt opgenomen via de wrijfstroken op de wand, het schip kan daarbij beschadigen.

Schampen. Als een zijdelingse schampstoot bij normale manoeuvres tot 5° ten opzichte van de as van de vaarweg zonder schade kan worden opgenomen wordt gesproken van een scheepvaartvriendelijke constructie (ROK, 2017). De scheepshuidsterkte zonder indeuken bedraagt 200 kN/m^2 conform ROK voor CEMT I, deze is ook aangehouden voor CEMT 0. Met behulp van ROK is voorts de frontale aanvaarbelasting van 500 kN om te zetten naar schampen onder willekeurige hoeken. Bij 5° resulteert dit voor CEMT 0 tot 15 kN.

Eén wrijfstrook kan schampen scheepsvriendelijk opnemen zodra deze 15 kN over een breedte van 0,50 m wordt verdeeld. Immers 0,15 m x 0,50 m x 200 kN/m^2 = 15 kN. Zie tevens Bijlage D.
Voldoende flexibel veren faciliteert het verdelen. Op basis van een energiebeschouwing blijkt dat een flexibele wrijfstrook met 0,0175 m indrukking bij 15 kN, schade kan beperken tot de zwaarste recreatievaartschepen van circa 10 ton, zie Bijlage E.

Beide scheepsbelastingen zijn gevisualiseerd in Figuur 3-3.



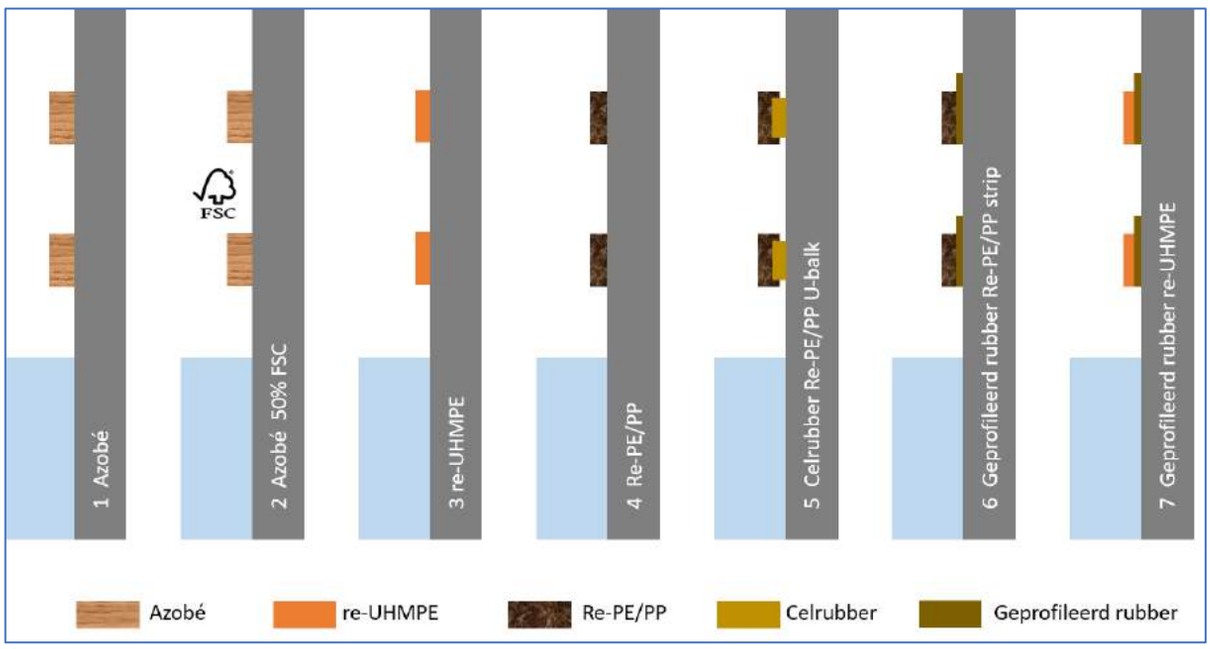
Figuur 3-3: Visualisatie scheepsbelastingen op ondersteuningsconstructies.

Voor geleidewerken geldt dat schepen een relatief grote snelheid hebben in de richting evenwijdig aan de vaarweg ten op zichte de snelheid haaks op de vaarweg. Omdat men bij geleidewerken tegen eventuele verticale wrijfstijlen/stroken kan aanvaren, zijn deze niet aan te raden. Dit in tegenstelling tot wat Figuur 1-2 laat zien. De consequentie is dat de horizontale wrijfgordingen/stroken relatief dicht bij elkaar moeten komen. Hier is dan ook voor gekozen voor allle varianten.

3.2 Varianten

3.2.1 Algemeen

De beschouwde varianten zijn gevisualiseerd in Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Varianten.

Hedendaagse wrijfstroken op betonwand worden massief uitgevoerd, in tropisch hardhout of in kunststof. Dit omvat de varianten 1 t/m 4 die star reageren bij een schampstoot van een schip. Variant 1 en 2 zijn beiden van Azobé, al dan niet met FSC.

Varianten 3 en 4 zijn beiden van kunststof. Variant 3 (regeneraat UHMPE) wordt gemaakt van bedrijfsafval van UHMPE en is technisch zeer hoogwaardig. Leveranciers zijn bijvoorbeeld Altena en WVS. Variant 4 (recyclaat PE/PP) is gemaakt van afval van consumentenplastic is mede daardoor minder hoogwaardig. Leveranciers zijn Lankhorst (materiaal KLP) en SavePlastics (materiaal Q3). In §3.3 wordt nader ingegaan op de eigenschappen van polyethyleen-materialen.

Deze starre varianten zijn eigenlijk slechts ter referentie van de verende varianten, maar kunnen ook onderling worden vergeleken. Variant 3 is als technisch hoogwaardigste bestaande, starre product bij de multi-cycle TCO-vergelijking als referentieniveau op 100% gesteld. Voor dimensionering van de starre varianten zie Bijlage A.

Varianten 5 t/m 7 zijn innovatieve, verende varianten. De verende varianten bestaan uit twee samenwerkende delen: een voorzijde en een verend deel tussen de voorzijde en de betonwand. De voorzijde is gemaakt van dezelfde circulaire kunststoffen als in de starre kunststofvarianten 3 & 4.
Het verende deel is gemaakt van bestaande, compacte rubberproducten. In §3.4 wordt nader ingegaan welke rubberproducten/materialen dit betreft.
Voor dimensionering van de verende varianten zie Bijlage D & Bijlage F.

In §3.5 wordt ingegaan op de verbindingen van zowel starre als verende varianten.
Bij het ontwerp van de verbindingen rekening is gehouden met circulariteit: uitneembaarheid van de te verbinden materialen alsmede behoud en recyclebaarheid van de verbindingsmiddelen.
Bij alle wrijfstrook varianten is uitgegaan van vlakke betonwanden, zonder inkassingen. Horizontale (wrijf)belasting wordt dus volledig overgebracht door wrijving en verbindingsmiddelen.

3.2.2 Diktes (d)

De afstand tussen de wrijfstroken moet voldoen aan de vereiste doorvaartbreedte. Met compacte wrijfstroken op vlakke betonwanden worden goedkope, eenvoudige en duurzame betonconstructies verkregen die relatief dicht bij elkaar staan. Het effect van eventule kortere overspanningen tussen de betonconstructies is overigens buiten beschouwing gelaten in de TCO.

In Tabel 3-1 staan de aangehouden diktes van de varianten weergegeven. De maten zonder slijtage zijn in Figuur 3-4 op schaal ingetekend.

#	variant beschrijving	dikte	ingedrukt	na slijtage
1	Azobé zonder FSC	70 mm	n.v.t. (star)	40 mm
2	Azobé met 50% FSC	70 mm	n.v.t. (star)	40 mm
3	re-UHMPE (volkern)	40 mm	n.v.t. (star)	40 mm
4	Re-PE/PP	50 mm	n.v.t. (star)	40 mm
5	celrubber Re-PE/PP U-balk	35+50[b]= 85 mm	67,5 mm	57,5 mm
6	geprofileerd rubber Re-PE/PP strip	20+40 = 60 mm	50 mm	40 mm
7	geprofileerd rubber re-UHMPE strip	20+30 = 50 mm	40 mm	40 mm

Tabel 3-1 Diktes van de Varianten.

Over de minimale functionele dikte is geen literatuur gevonden. Daarom is uitgegaan van een ingenieursinschatting vermeerderd met een dikte-toeslag voor slijtage die afhankelijk is van het toegepaste materiaal aan de voorzijde. Als minimale maat die de wrijfstrook uit moet steken voor de betonwand is 40 mm aangehouden in ingedrukte toestand na slijtage. Dit moet samen met tussenruimtes van maximaal 250 mm voorkomen dat recreatievaartschepen de betonwand onder, tussen en boven de wrijfstroken raken. In aanvulling op deze 40 mm is een toeslag aangehouden bij:

- re-UHMPE van 0 mm i.v.m. slijtage (0,1 mm [c]) i.c.m. volkern
- Re-PE/PP van 10 mm i.v.m. slijtage (1 mm [c]) i.c.m. luchtinsluitingen, zie tevens Figuur 3-6
- Azobé van 30 mm i.v.m. slijtage (20 mm [c]) i.c.m. rotten.

Bij kunststof front-delen is voorts een minimale dikte van 30 mm aangehouden in verband met mogelijkheden tot bevestiging.

Ter vergelijking:
- de minimale dikteafmeting van KLP-kunststof wrijfstroken is 80 mm, dit lijkt gebaseerd op gebruikelijke houtafmetingen;
- bij Ronduite is de bestaande, toegepaste houtdikte tegen de betonwand bijvoorbeeld 75 mm in een betonsponning van 20 mm. De Azobé wrijfstrook steekt hier dus 55 mm uit voor de betonwand.

Om de gevoeligheid van aangehouden diktes te bepalen, is in een gevoeligheidsanalyse nagegaan wat het voor de TCO betekent om voor alle diktes 70 mm aan te houden.

3.2.3 Levensduur (L)

Voor Azobé in een voortdurend vochtige omgeving zoals in contact met grond geldt een minimale levensduur van 25 jaar (NEN5461, 2000); bij de TCO-vergelijking is de levensduur op 30 jaar ingeschat. Voor Azobé komt >50 jaar overeen met onbeschutte buitentoepassingen die drogend zijn gedetailleerd (RWS, 2004). Bij varierende waterstanden zijn meer dan twee wrijfstroken nodig en zullen de onderste regelmatig nat worden. Ook bij een constant waterniveau -zoals hier aangehouden- zal de onderste wrijfstrook regelmatig nat worden door langsvarende schepen. Alle wrijfstroken worden regelmatig nat bij regen. Op de wrijfstrook en tegen de betonwand blijven vuil en vocht lang aanwezig. In Fguur 3-5 is te zien dat de achterzijde van de bestaande houten wrijfgording bij Ronduite (pilotproject voor verende wrijfstrook, zie §5.3) sterk vervuild is.

[b] Het lijf van de U-balk moet na slijtage 40 mm dik blijven om de scheepsdruk naar de flenzen te brengen.
[c] Zie bijlage G Slijtgevoeligheid Kunststoffen en Hout

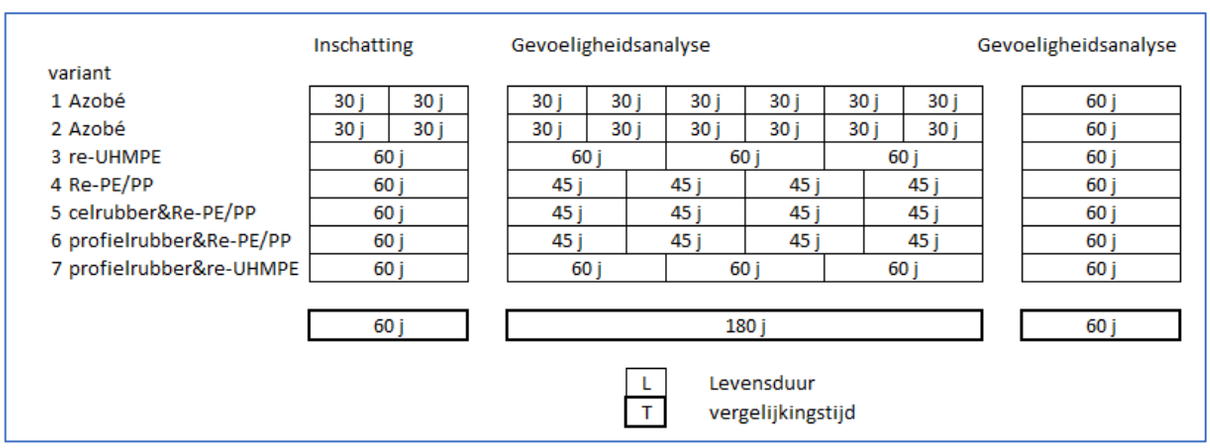
Figuur 3-5 Vervuilde achterzijde bestaande houten wrijfgording Ronduite

Voor alle kunststof onderdelen wordt een minimale levensduur verwacht van 50 jaar (zie Bijlage C); bij de TCO-vergelijking is de levensduur op 60 jaar ingeschat.

Regeneraat UHMPE is al langer bewezen geschikt voor remmingwerken (weinig slijtage bij vaak afmeren) en/of beroepsvaart (zwaarder). Re-PE/PP betreft geen vol-kern kunststof, maar is zeker ook geschikt voor geleidewerken voor recreatievaart. Re-PE/PP leveranciers verwachten dezelfde levensduur als bij volkern kunststof. Mogelijk is de levensduur van Re-PE/PP – bijvoorbeeld omdat het vorstgevoeliger is- toch korter dan die van re-UHMPE. Het effect hiervan is bezien in een gevoeligheidsanalyse waarin de levensduur van niet volkern Re-PE/PP op 45 jaar is gesteld.

Om de gevoeligheid van aangehouden levensduren te bepalen, is in een gevoeligheidsanalyse nagegaan wat het voor de TCO betekent als voor alle levensduren 60 jaar wordt aangehouden, ook die van hout.

Voor een overzicht alle aangehouden vergelijkingtijden en (multi-)levensduren zie Figuur 3-6.



Figuur 3-6 Overzicht levensduren (L) en vergelijkingstijden (T)

3.3 Polyethyleen

Beide starre kunststof varianten zijn van thermoplast polyethyleen (PE) of een mix daarvan.

Variant 3 is van regeneraat van fabrieksafval van hele lange PE-moleculen, genaamd ultra hoog moleculair polyetheen (re-UHMPE). Variant 4 van recyclaat van polyethyleen en polypropyleen wat als consumenten-afvalmix wordt ingezameld. Zowel PE als PP horen tot de groep polyolefinen ("PO").

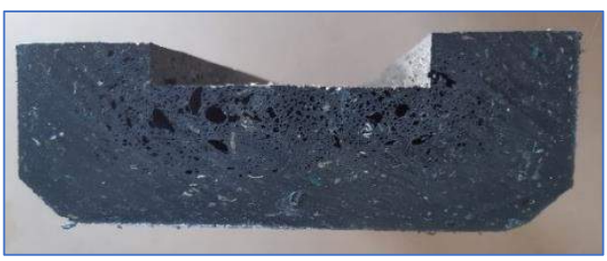
UHMPE (al dan niet regeneraat) is al langer bewezen zeer geschikt bevonden voor remmingwerken, ook voor beroepsvaart. Het heeft als eigenschappen:

- het slijt heel weinig, zelfs bij vaak afmeren;
- het heeft zeer weinig wrijving, circa 50% van Azobé[d];
- het is zeer slagvast / taai;
- het krijgt met UV-stabilisatoren (zoals 2% roet) een lange levensduur;
- het is volkern (geen poriën, niet doorlatend).

[d] Zie Bijlage D Wrijvingsproeven

In Figuur K-2b zijn de Circulariteitmogelijkheden van on- en weinig vertakte polyethyleen weergegeven. PE is een thermoplast die als afval weer gesmolten kan worden, en daarna opnieuw gebruikt. Bij gebruik en smelten worden de molecuulketens korter en treedt enig kwaliteitsverlies op, wat bij smelten enigszins kan worden gecorrigeerd met additieven. UHMPE kan worden gerecycled, zodra de ketens te kort worden, valt het materiaal onder HMPE. HMPE kan worden gerecycled, zodra de ketens te kort worden, valt het materiaal onder HDPE. De precieze terugval van bijvoorbeeld wrijving is onbekend.

Recyclaat PE/PP is gemaakt van consumentenplastic waaraan roet wordt toegevoegd. Ten opzichte van re-UHMPE is Re-PE/PP minder glad (vergelijkbaar met Azobé[4]), beperkt slagvast en er kunnen bij de productie holtes ontstaan, zie Figuur 3-7. Vanwege de holtes kan het gevoeliger zijn voor vorst. Omdat recreatievaart nauwelijks plaatsvindt in de winter is Re-PE/PP is zeker geschikt voor recreatievaart.



Figuur 3-7 Foto Re-PE/PP U-balk met luchtinsluitingen

3.4 Rubber

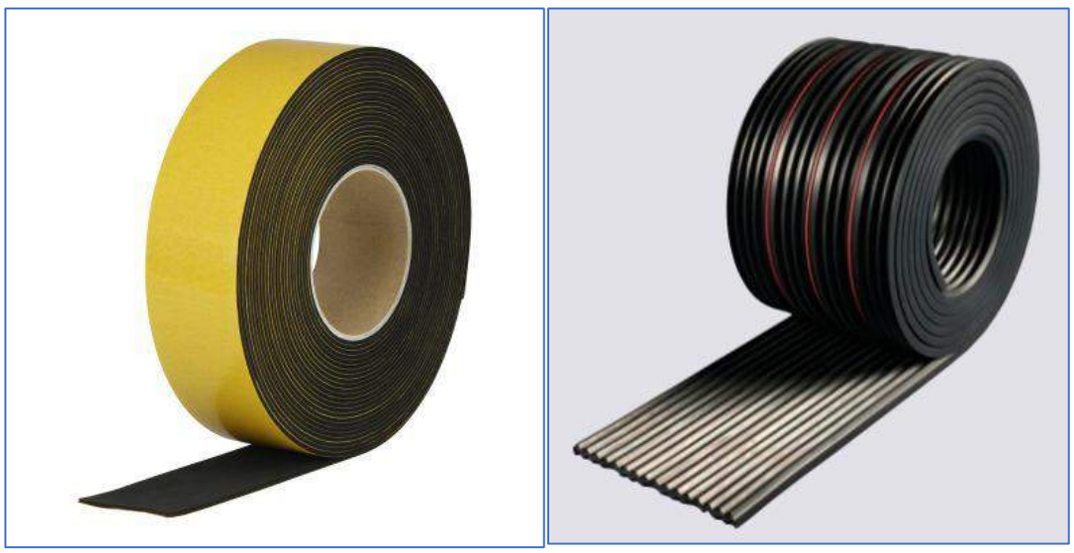
Het rubber bij Variant 5 betreft 35 mm poreus celrubber waarbij na 50% rubberindrukking de kunststof voorzijde gaat aanliggen tegen het beton, bij Varianten 6 en 7 betreft het 20 mm golvend geprofileerd massief rubber waarvan de golven na circa 50% indrukking platgedrukt zijn. Variant 5 kent dus een veerweg van 17,5 mm en Varianten 6 en 7 dus een veerweg van 10 mm.
Met celrubber is maar één variant beschouwd omdat een combinatie met UHMPE indirect afgeleid kan worden.

Als rubber is gekozen voor EPDM omdat dit, evenals in de toepassing van dakbedekking, lang meegaat in een omgeving met veel vocht en UV, en voorts omdat EPDM dempend terugveert. Zie tevens Bijlage I. In Bijlage J zijn bestaande, verende afmeerproducten (fenders) voor remmingwerken van recreatievaartuigen samengevat. Om in een compacte, verende wrijfstrook te functioneren en ook de 250 kN te kunnen doorgeven zijn de twee rubber producten uit Figuur 3-8 geselecteerd:

- EPDM celrubber: EKI 490, 475 kg/m^3, E = 0,4 N/mm^2, 50% indrukbaar waarna aanliggen volgt;
- geprofileerd EPDM rubber: Vilton/Calenberg: E = 1,8 N/mm^2, f_{druk} = 17,4 N/mm^2, 50% indrukbaar achter kunststof strip waarbij fors oplopende stijfheid.

Beide producten zijn in virgin EPDM beschikbaar. EPDM rubber wordt al deels herwonnen uit regeneraat van bedrijfsafval en kan deels uit End of Life afval worden gewonnen. Regeneraat EPDM is gunstiger in materiaalkosten en milieu-impact dan virgin EPDM, naar verwachting geldt dat ook voor gerecycled EPDM, associate professor Dierkes van UT beaamt dat. Geprofileerd, massief rubber is gunstiger dan celrubber ten aanzien van circulariteit. EPDM in beide vormen is bij End of Life in principe geschikt om als recyclaat EPDM mee te maken in vergelijkbare compound. Voor het maken van celrubber is echter gebruik van geëxpandeerd, virgin rubber noodzakelijk.

Over de beddingseigenschappen van de rubber producten wordt verwezen naar Bijlage L.



Figuur 3-8 Celrubber en geprofileerd rubber.

Granulaatrubber zoals weergegeven in Figuur 3-9 is niet geselecteerd. De granulaire rubberkorrels worden niet met rubber maar met een PU binder verbonden hetgeen niet D4D is. Bovendien is granulaatrubber niet te recycleren (voor circulariteit van GWW-materialen en producten zie tevens Bijlage K).
Bovendien is in de markt geen EPDM granulaatrubber beschikbaar. En beschikbare SBR granulaatrubbers (bijv. Vilton RR-43: E = 2 à 6 N/mm^2 statisch resp. dynamisch; f_{druk} = 0,3 à 3 N/mm^2 statisch resp. dynamisch; 50% indrukbaar) hebben een te grote / te snel oplopende dynamische stijfheid voor toepassing met een verende wrijfstrook.

Figuur 3-9 Granulaatrubber

3.5 Verbindingen

Bij alle varianten zijn RVS 3.16 verbindingsmiddelen voorzien. Bij de starre varianten is één rij ankers voorzien op halve wrijfstrook-hoogte die een deel van de scheepswrijving moeten afdragen naar het beton. Bij de celrubber variant zijn de ankers wisselend aan de boven- en onderzijde van de wrijfstrook voorzien, overigens evenveel als bij de starre varianten.

Bij geprofileerd rubber varianten zijn geen ankers maar schroeven voorzien (zie tevens Figuur 3-10): aan de voorzijde zichtbare betonschroeven die het er boven uitstekende rubber aan de betonwand ophangen en aan de achterzijde zichtbare schroeven die het rubber met het kunststof verbinden. De schroeven hoeven slechts het eigen gewicht te dragen. Dit omdat het ruwe rubber achter de gladde voorzijde zorg kan dragen voor directe afdracht van scheepswrijving naar het beton, zie Bijlage H.

Figuur 3-10 Betonschroeven rubber-beton (links) en schroeven rubber-Re-PE/PP strip (rechts).

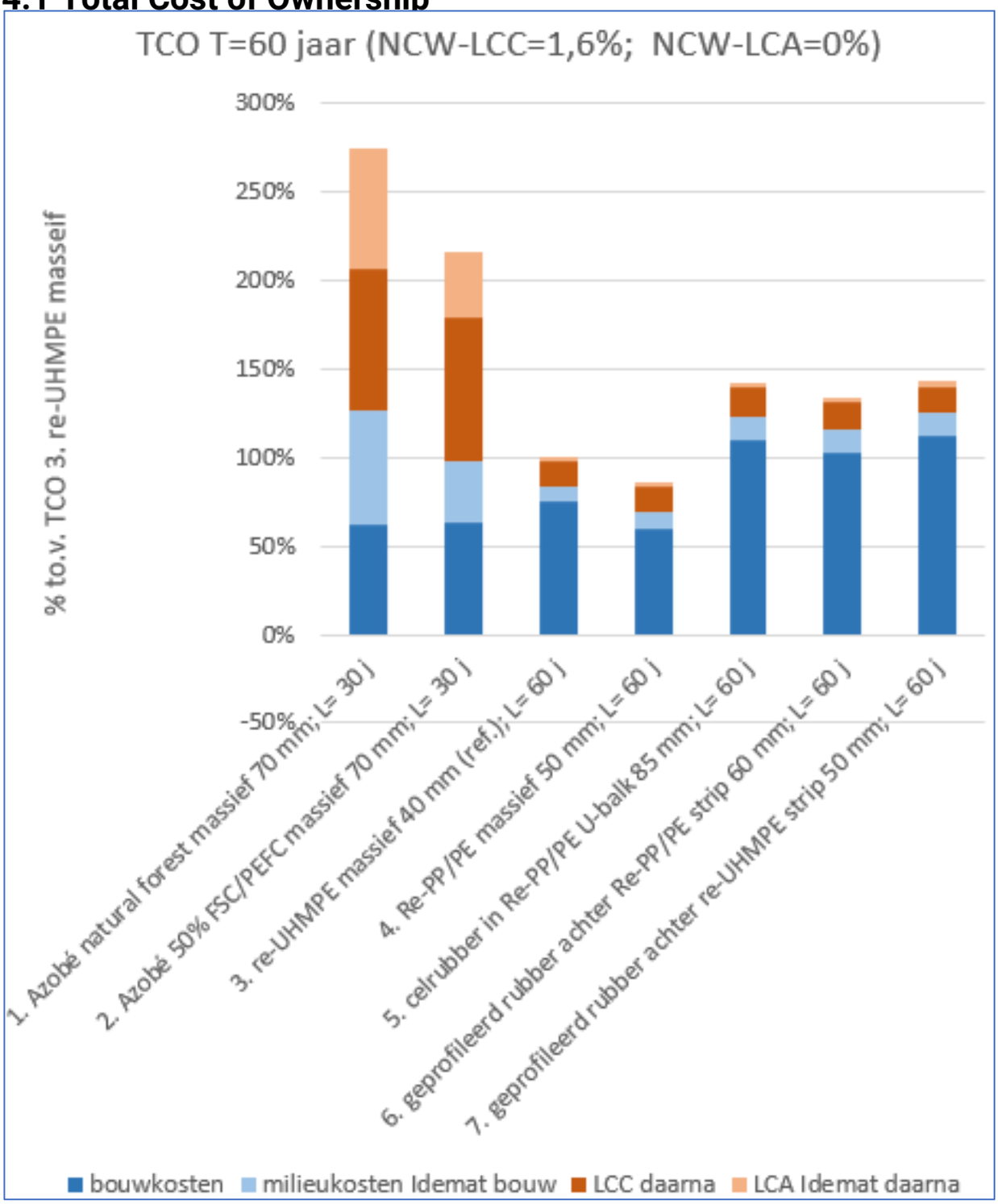
Bij alle varianten geldt dat met het losdraaien van ankers en/of schroeven voldaan kan worden aan losneem- en scheidbaarheid van materiaalstromen ook wel “design for disassembly” (D4D).

Naast de ophanging aan de wand, zijn er bij de verende wrijfstroken ook verbindingen aan de uiteinden van de wrijfstroken nodig én tussen de verende frontdelen onderling bij dilataties. Deze beide verbindingen zijn in Bijlage M beschouwd. Vanwege de grote uitzettingscoëfficiënt van de kunststof frontdelen blijken er veel dilataties nodig te zijn: hart op hart circa 1,0 meter.

In de TCO is de ophanging wel meegenomen, maar beëindigingen en dilataties niet.

4. Resultaten en analyse TCO vergelijking wrijfstroken

4.1 Total Cost of Ownership



Figuur 4-1 TCO resultaten

De resultaten van de Total Cost of Ownership (TCO) vergelijking in Figuur 4-1 betreffen de economische kosten plus de milieu-impact uitgedrukt in geld over de fasen: productie, transport, bouw, sloop, transport en afdanken over een vergelijkingsperiode (T) van 60 jaar.

In figuren 4-1 tot en met 4-6 wordt met bouw bedoeld alle fasen tot en met bouw (winning grondstoffen, productie, transport en bouw). Met daarna wordt bedoeld zowel de fasen sloop, transport en afdanken van de eerste cyclus plus de volledige eventuele volgende cycli. Hiermee wordt dus onderscheid gemaakt tussen directe en toekomstige kosten.

De economische kostencomponent Life Cycle Costing (LCC) zijn per fase in §4.7 gepresenteerd.
De ecologische kostencomponent Life Cycle Analysis (LCA) zijn per fase in §4.8 gepresenteerd.
In de paragraven 4.2 tot en met 4.6 zijn gevoeligheidsanalyses opgenomen.

De vier massieve, starre varianten aan de linkerzijde in Figuur 4-1 zijn in chronologische volgorde van eerste toepassing weergegeven. Vroeger werd vaak alleen naar bouwkosten gekeken: dan is de keuze voor Azobé zonder FSC logisch. De varianten 1 & 2 met Azobé blijken bij de TCO-vergelijking het minst gunstig. Dit wordt veroorzaakt door de korter ingeschatte levensduur én door hogere milieukosten (voornamelijk biodiversiteit). De milieukosten voor Azobé-FSC zijn aanzienlijk bij de ingeschatte marktmix van 50% FSC in NL (Oldenburger, Groot, & Benthum, 2015). Zie tevens de gevoeligheidsanalyse voor FSC waarbij het gehalte is gevarieerd van 0 tot 100% in stappen van 10% in §4.2 hiervoor.

Van de starre kunststof varianten 3 & 4 is mixed kunststof recyclaat (Re-PP/PE) bij de TCO-vergelijking beperkt gunstiger dan hoogwaardig PE regeneraat (re-UHMPE). Met name de inschatting voor de levensduren is daarbij van belang, zie ook de gevoeligheidsanalyse in §4.3 hiervoor.

De drie verende varianten aan de rechterzijde in Figuur 4-1 kennen invering bij schampen. Deze zijn onderling niet echt onderscheidend in de TCO vergelijking. Ze blijken circa 50% duurder dan de starre varianten, voornamelijk vanwege de component bouwkosten van (virgin) rubber.

In de TCO-vergelijking zijn de baten van het beperken van maatschappelijke schade aan schepen bij schampen door de verende werking niet meegenomen, dit omdat deze baten lastig te kwantificeren zijn. Het beperken van schade zou gunstig zijn voor alle verende varianten en het gunstigste voor Variant 5, die met celrubber de meeste/gunstigste invering kent, zie hiervoor Bijlagen D, E & F.

De gladde voorzijde van Varianten 3 en 7 met re-UHMPE kent ongeveer de helft wrijving ten opzichte van Azobé en Re-PE/PP van de overige varianten, zie hiervoor Bijlage H. Hoe minder wrijving, hoe gladder de wrijfstrook, hoe minder krasschade op de boten te verwachten zijn. Deze baten zijn om dezelfde redenen buiten beschouwing gelaten bij de TCO-vergelijking.

Omdat bij recreatievaart relatief veel onervaren schippers varen, zijn er realatief vaak dergelijke maatschappelijke baten te verwachten.

4.1.1. Circulaire kansen

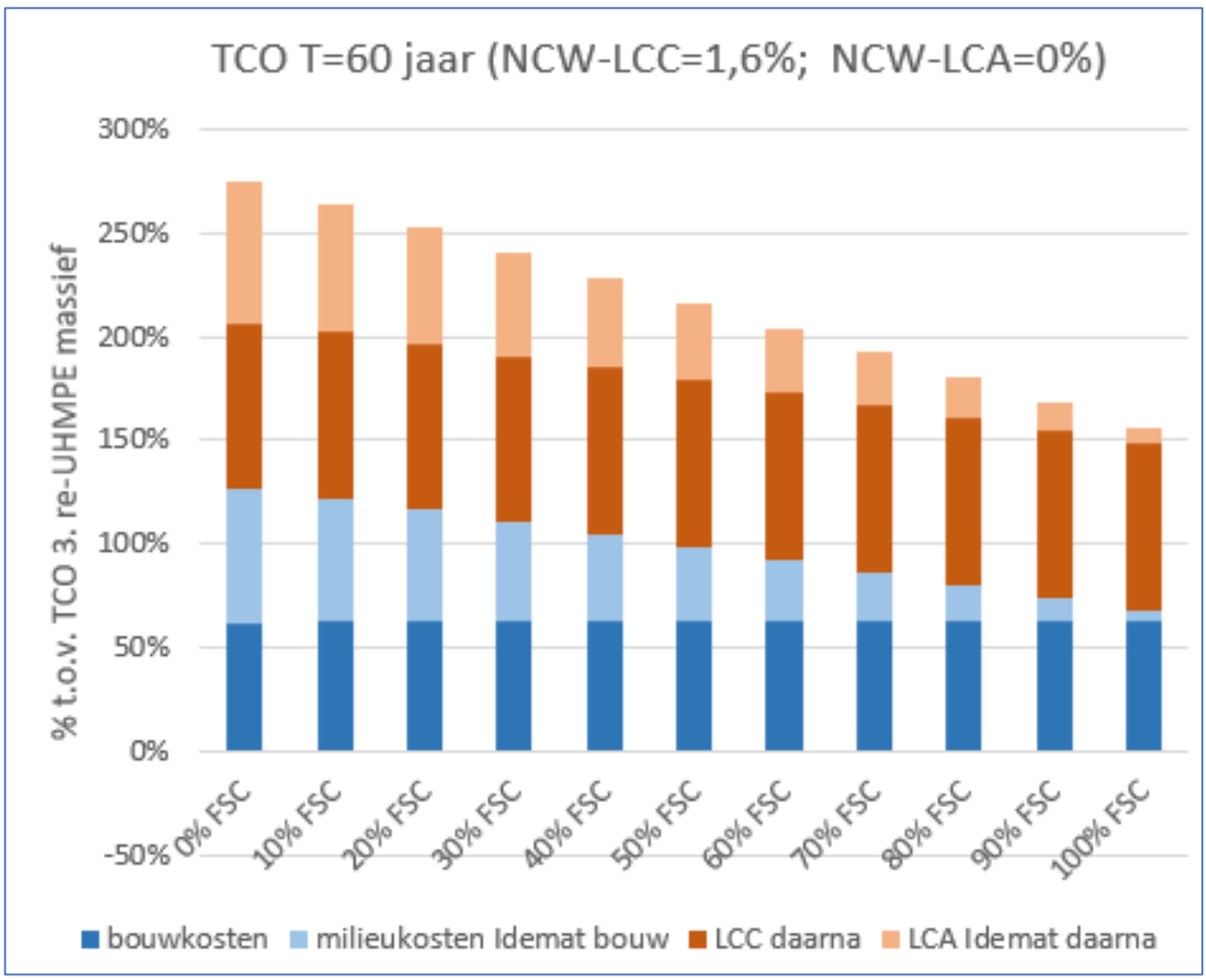
Als de economische en milieukosten voor inzamelen, scheiden en schoonmaken van End of Life EPDM in de toekomstige circulaire economie niet te hoog oplopen, kunnen Varianten 6 en 7 met Re-EPDM wellicht concurrerender worden.

Het massieve UHMPE degenereert alleen aan het oppervlak, waardoor de voorzijde minder glad kan worden. Een optie is om bij de UHMPE varianten aan het einde van de gladde levensduur een nieuwe gladde huidlaag te creëren door deze te schillen: er een dunne laag af te frezen/schaven.

Regeneraat UHMPE wordt uit bedrijfsafval gemaakt. Als de technische bruikbaarheid van gerecycled UHMPE uit End of Life afval massief UHMPE voldoende is aangetoond, kunnen Varianten 4 & 7 met Re-UHMPE wellicht concurrerender worden.

4.2 Gevoeligheidsanalyse voor FSC gehalte

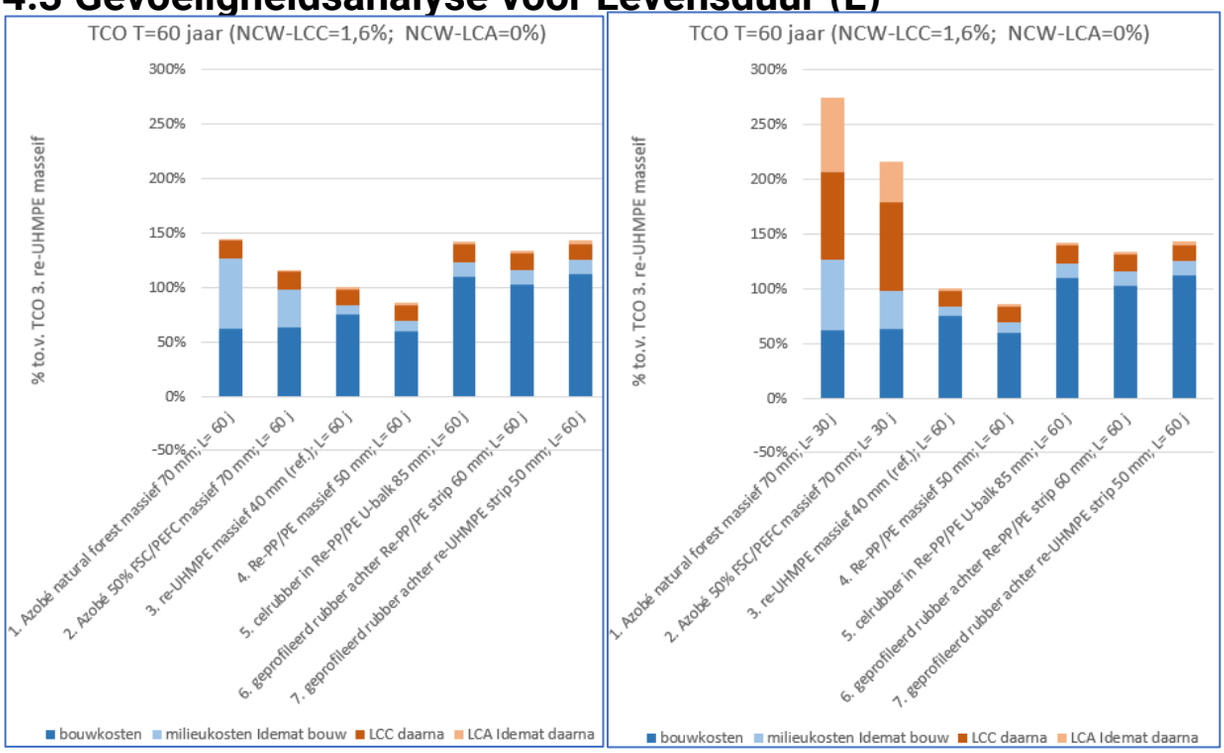
De gevoeligheidsanalyse voor FSC gehalte is in Figuur 4-2 gevisualiseerd van 0 tot 100% FSC in stapgroottes van 10%. De TCO resultaten met waarden 0 en 50% FSC zijn ook in Figuur 4-1 afgebeeld als Variant 1 respectievelijk Variant 2.



Figuur 4-2 Gevoeligheidsanalyse voor FSC-gehalte (N.B. 0% FSC = Variant 1; 50% = Variant 2)

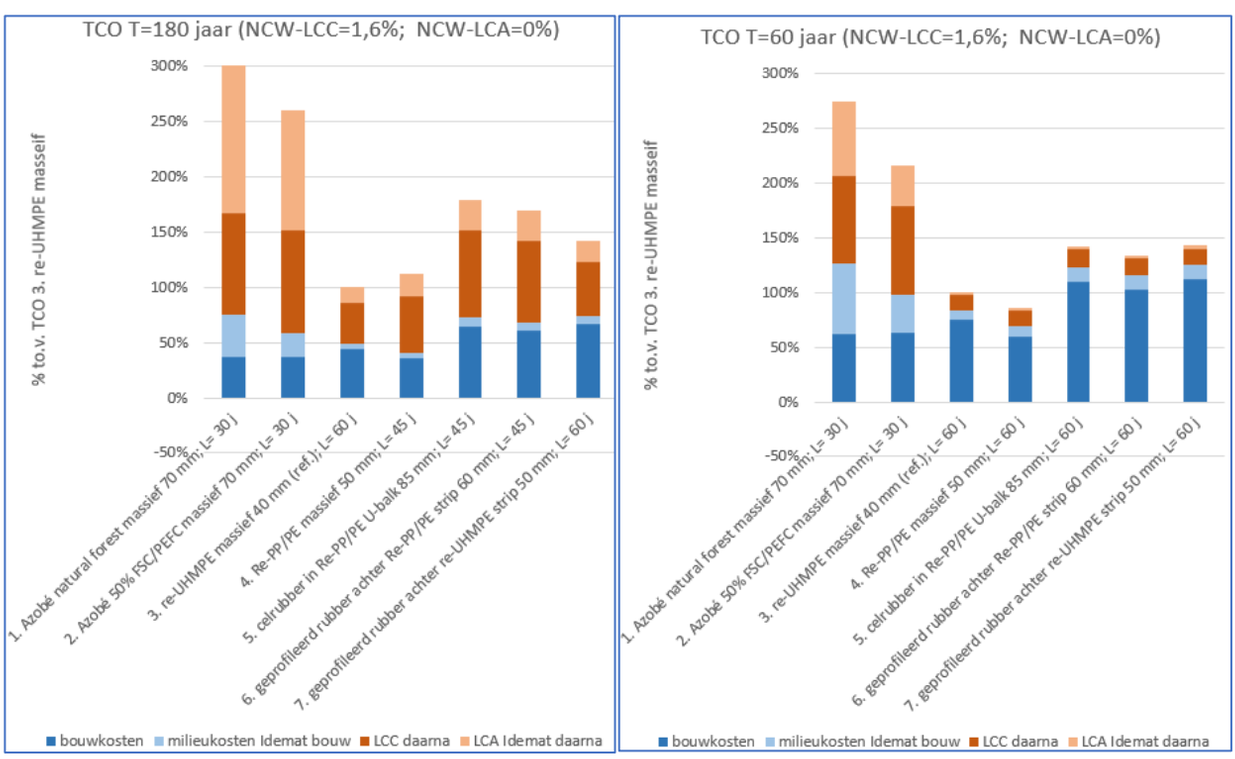
Opvallend is dat zelfs met een garantie van 100% FSC Azobé niet concurrerend wordt in de TCO t.o.v. Variant 3 (vormt als referentie 100%) & Variant 4. Een wereldwijd FSC garantiesysteem is bovendien onzeker. Voor meer achtergronden over de invloed van FSC bij LCA zie (Roetman, 2022).

4.3 Gevoeligheidsanalyse voor Levensduur (L)



Figuur 4-3a Gevoeligheidsanalyse gelijke levensduur L (links) en ongelijke L (rechts) = Figuur 4-1.

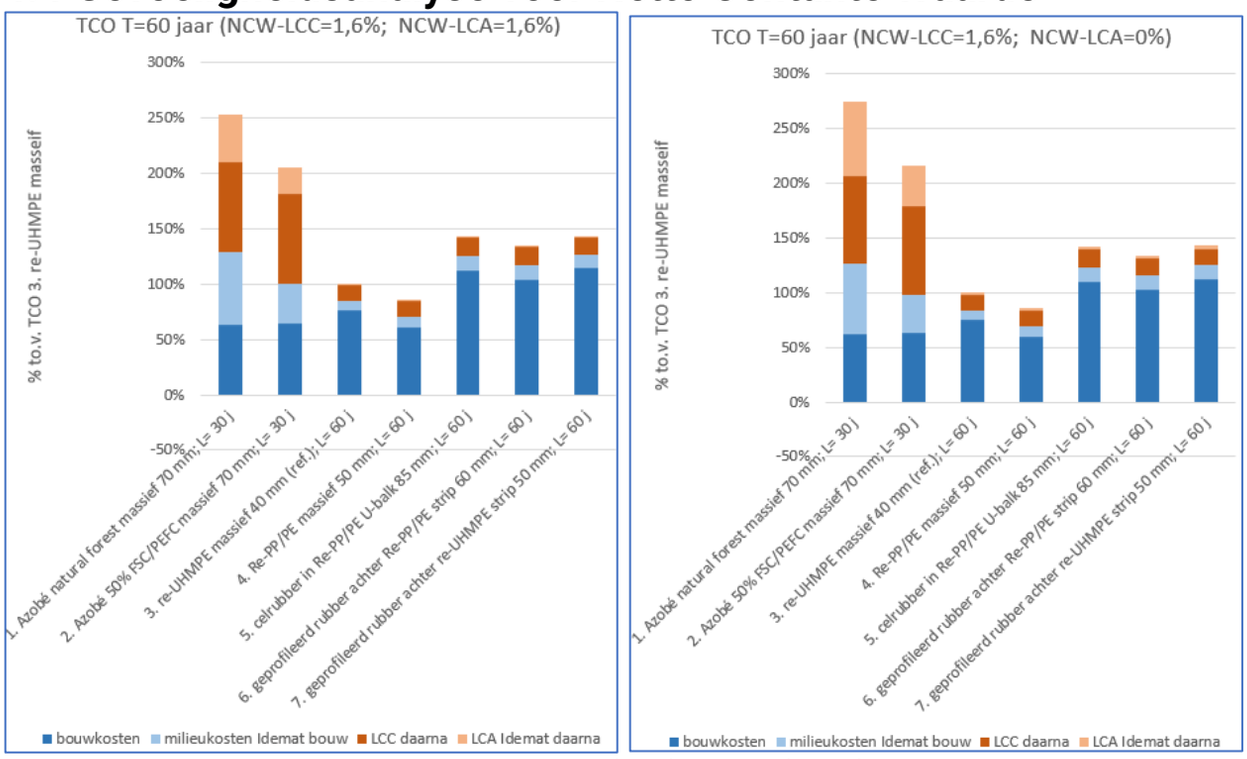
Opvallend is dat bij gelijke levensduur van 60 jaar bij Azobé het aandeel daarna beperkt is bij LCC (mede door NCW) en LCA. Dit komt doordat er maar 1 levensduur L = 60 jaar in de vergelijkingsduur van T = 60 jaar zit en daarna dan slechts de fasen verwijderen & afdanken behelst in de eerste en enige cyclus.



Figuur 4-3b Gevoeligheidsanalyse 45 jaar niet volkern-varianten (links) vs. 60 j. (rechts) = Figuur 4-1.

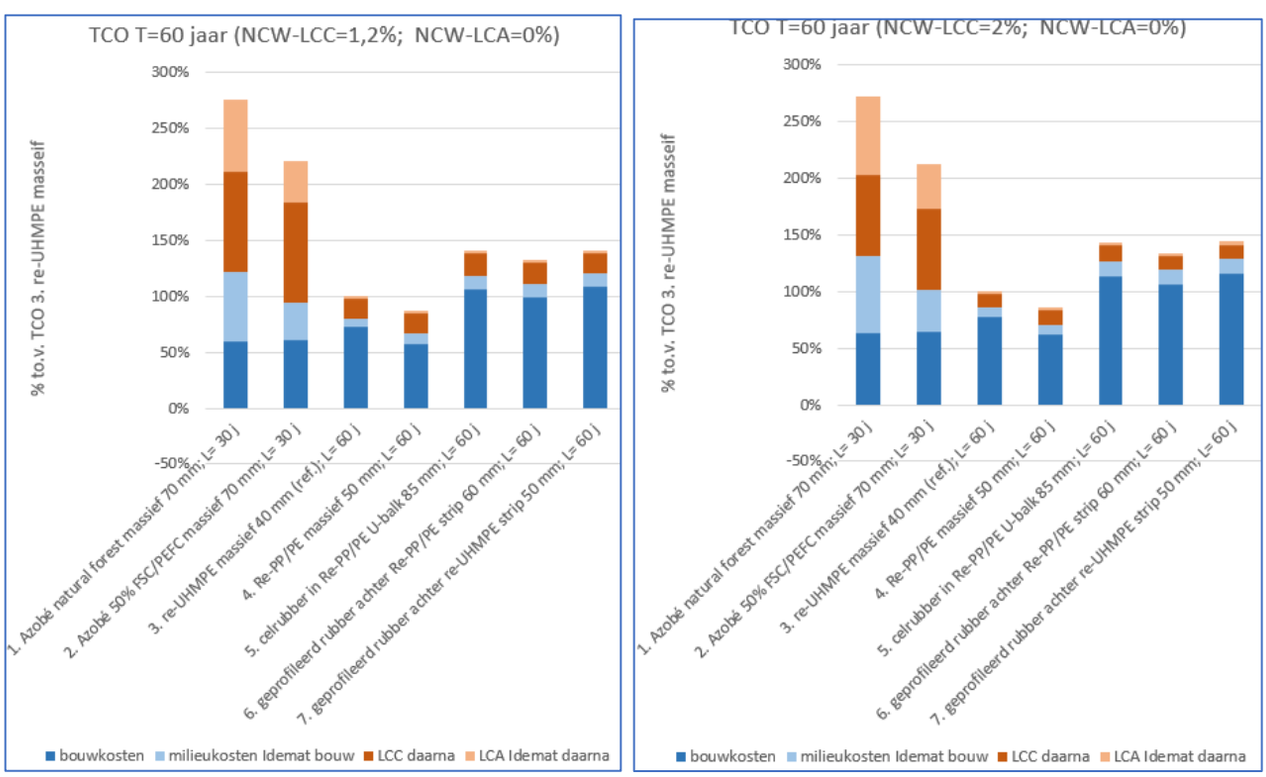
Opvallend is dat als Re-PE/PP (niet volkern) varianten wijzigen van 60 naar 45 jaar levensduur, de re-UHMPE (volkern) varianten 3 en 7 de gunstigste worden.

4.4 Gevoeligheidsanalyse voor Netto Contante Waarde



Figuur 4-4a Gevoeligheidsanalyse ook NCWLCA = 1,6% (links) vs. 0,0% (rechts) = Figuur 4-1.

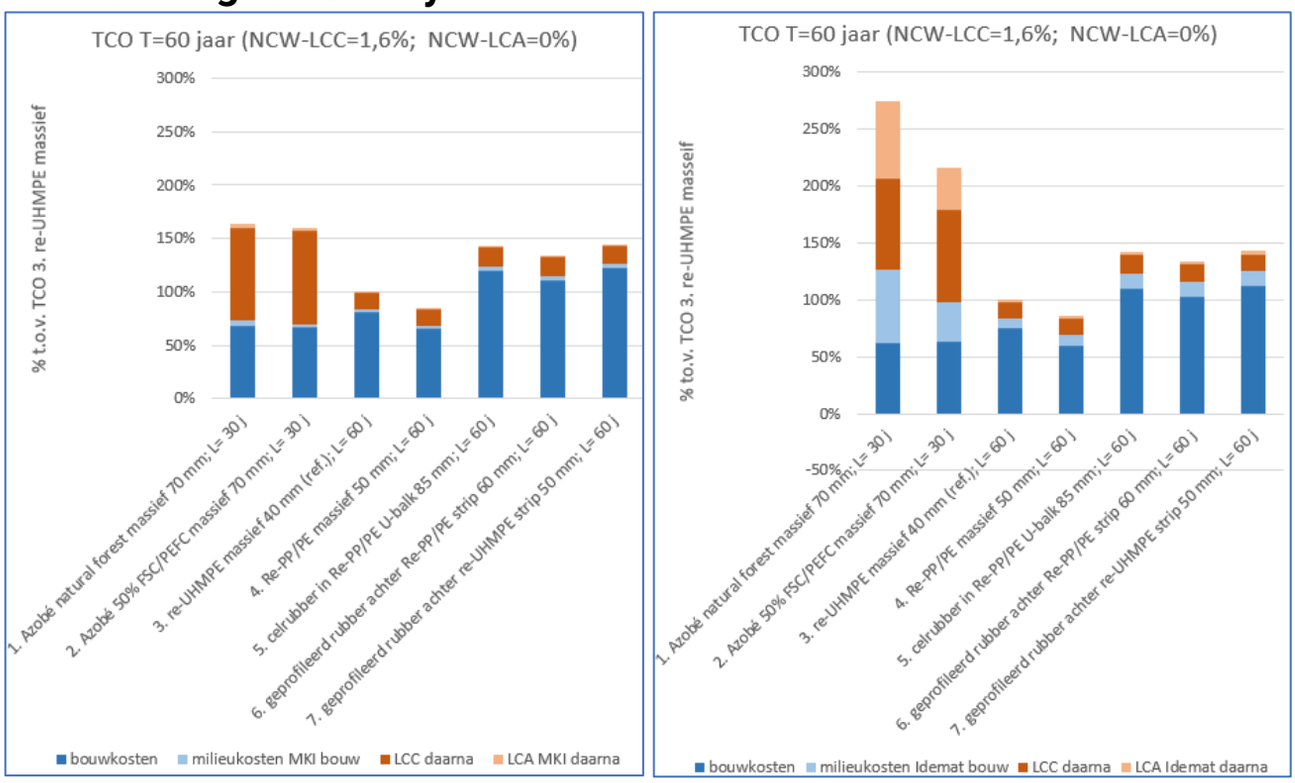
Opvallend is dat bij beide NCW's = 1,6% dat "LCA daarna" uiteraard afneemt, echter bescheiden.



Figuur 4-4b Gevoeligheidsanalyses NCWLCC= ±0,4% (links en rechts) t.o.v. 1,6% (Fig. 4-4a rechts).

Opvallend is dat een ±0,4% afwijkende NCW_{LCC} weinig invloed heeft op de TCO.

4.5 Gevoeligheidsanalyse voor LCA methode: MKI vs. Idemat



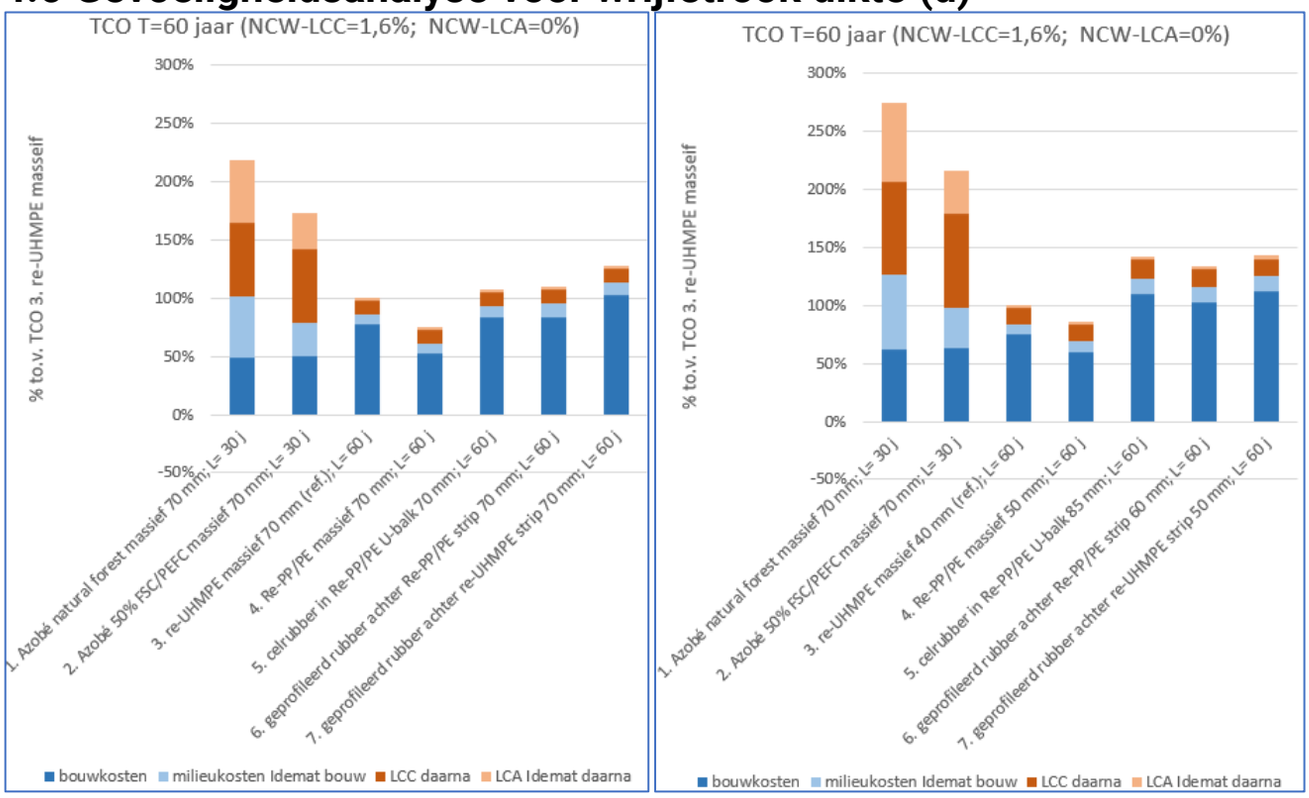
Figuur 4-5 Gevoeligheidsanalyse LCA methode: MKI (links) vs. Idemat (rechts) = Figuur 4-1.

Opvallend is dat de milieukosten aanzienlijk lager uitvallen met MKI t.o.v. Idemat, waardoor Azobé er minder ongunstig uitkomt en FSC er nauwelijks toedoet.

Zie bijlage A voor de deels verschillende milieu-impact criteria en verschillende financiële weegfactoren per criterium. De verschillen in financiële weegfactoren komen deels omdat MKI werkt met zogeheten schaduwkosten en Idemat met zogeheten preventiekosten voor de monetarisering van de milieu-impact. Onder schaduwkosten wordt verstaan de kosten voor emissiebestrijding en met preventiekosten de kosten voor emissievoorkoming. En de kosten om iets te voorkomen liggen normaal gesproken lager dan de kosten om iets te repareren.

Het komt echter ook omdat MKI werkt met milieucriteria en weegfactoren die gebaseerd zijn op twee decennia oude adviezen van het Centrum voor Milieuwetenschappen Leiden (CML) en die sindsdien niet meer zijn aangepast aan nieuwe wetenschappelijke inzichten. Professor Vogtländer van Idemat/TUDelft geeft dit ook aan als verklaring.

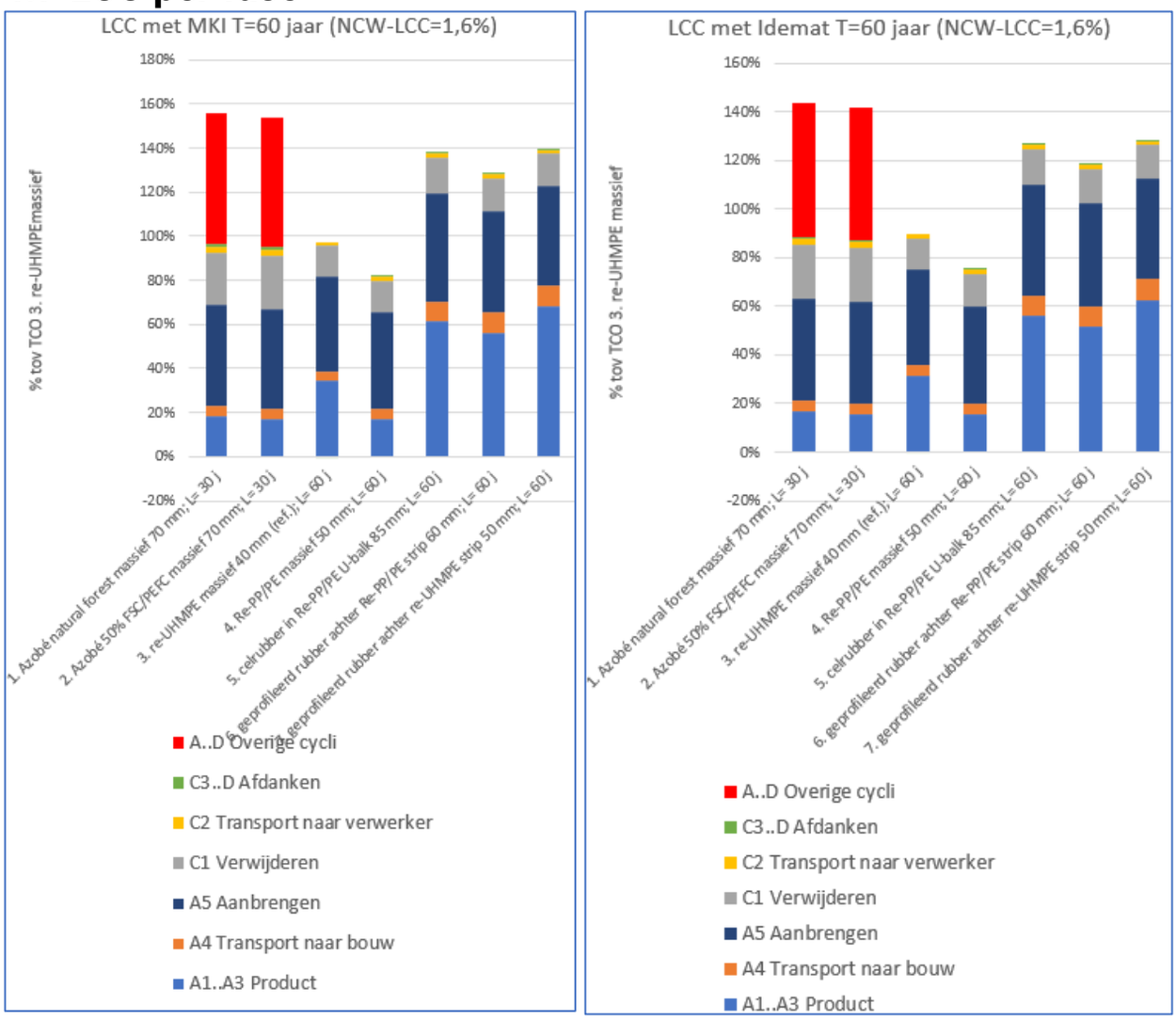
4.6 Gevoeligheidsanalyse voor wrijfstrook dikte (d)



Figuur 4-6 Gevoeligheidsanalyse voor gelijke dikte d (links) vs. ongelijke d (rechts) = Figuur 4-1.

Opvallend is dat Azobé er bij gelijke diktes gunstiger uitkomt in de TCO, maar nog steeds niet als de gunstigste.

4.7 LCC per fase



Figuur 4-7 LCC opgesplitst per fase, in combinatie met MKI (links) vs. Idemat (rechts)

Let op: De verticale schaal in deze LCC figuren is een factor 2 kleiner dan in voorgaande TCO figuren.

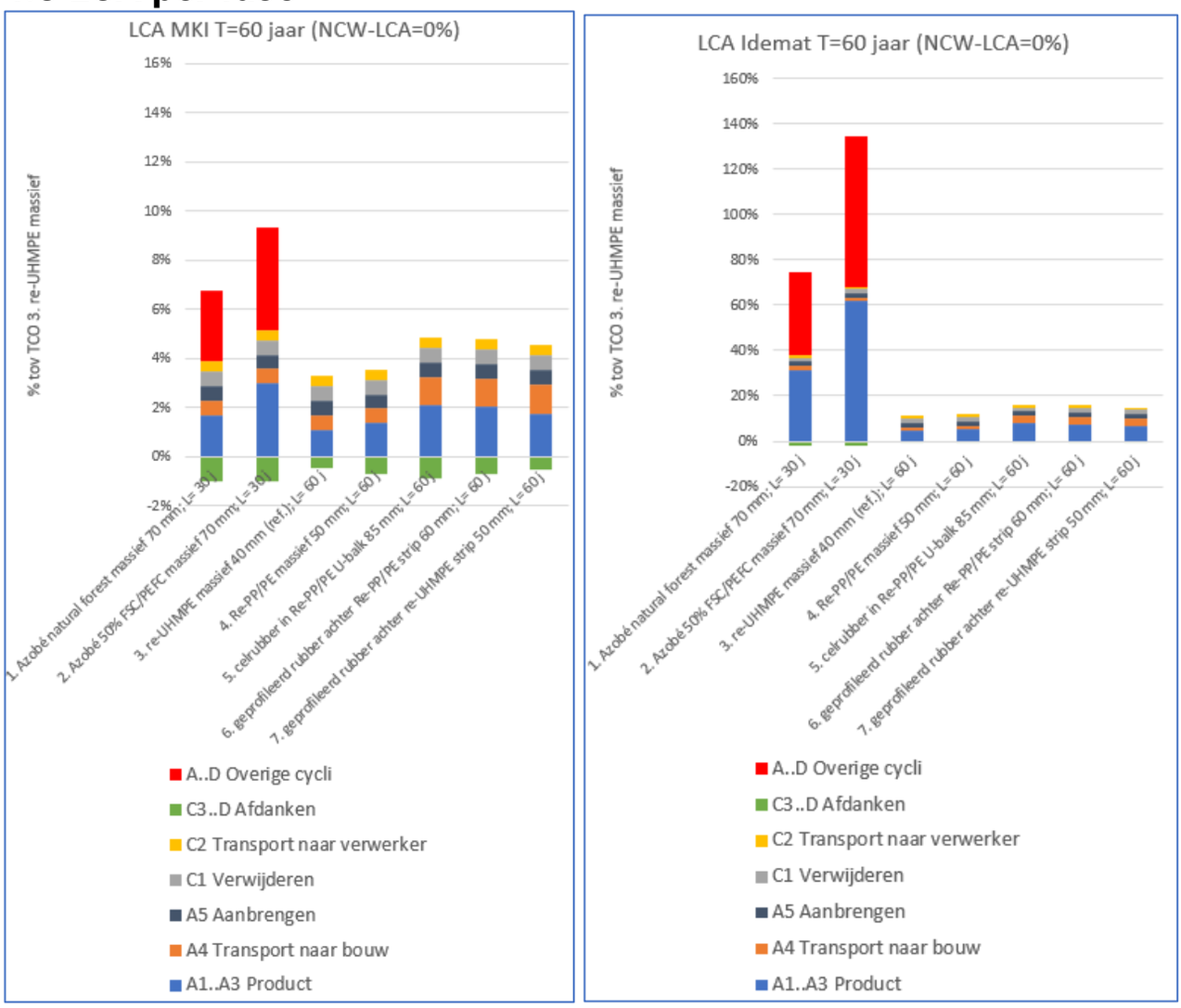
In Figuur 4-7 is de LCC opgesplitst per fase binnen de eerste Levensduurcyclus. De cycli daarna zijn niet opgesplitst, en worden Overige cycli genoemd. Dit betreft de tweede levensduurcyclus van 30 jaar bij de Varianten 1 & 2 waarover NCW is toegepast.

In de linker en rechter figuur zijn de relatieve LCC waarden weergegeven, de absolute waarden van de LCC zijn identiek. Als bij de LCC de LCA kosten worden bijgeteld met Idemat (links) en met MKI (rechts) leidt dat bij Variant 3 tot een TCO van 100%.

Opvallend is hierbij ten aanzien van de fase(n):

- Aanbrengen aanzienlijk meeweegt, maar niet onderscheidend is;
- Verwijderen minder meetelt en alleen onderscheidend is bij ongelijke levensduren vanwege NCW;
- Transport en Afdanken verwaarloosbaar zijn;
- Alleen Product en Overige cycli echt onderscheidend zijn.

4.8 LCA per fase



Figuur 4-8 LCA opgesplitst per fase, gemonetariseerd met MKI (links) vs. Idemat (rechts)

Let op: De verticale schaal in de linker LCA figuur is een factor 10 kleiner dan in de rechter LCA figuur.
In de rechter LCA figuur is dezelfde schaal gehanteerd als in de LCC figuren in §4.7.

In Figuur 4-8 is de LCA opgesplitst per fase binnen de eerste Levensduurcyclus. De cycli daarna zijn niet opgesplitst, en worden Overige cycli genoemd. Dit betreft de tweede levensduurcyclus van 30 jaar bij de Varianten 1& 2. De tweede cyclus is net zo groot als de eerste, alleen C3..D laat baten zien.

Opvallend is hierbij ten aanzien van de fase(n):
- Afdanken baten oplevert (circulariteit: recover / recycle / re-use);
- Aanbrengen, Verwijderen en Transport verwaarloosbaar zijn;
- Alleen Product en Overige cycli echt onderscheidend zijn.

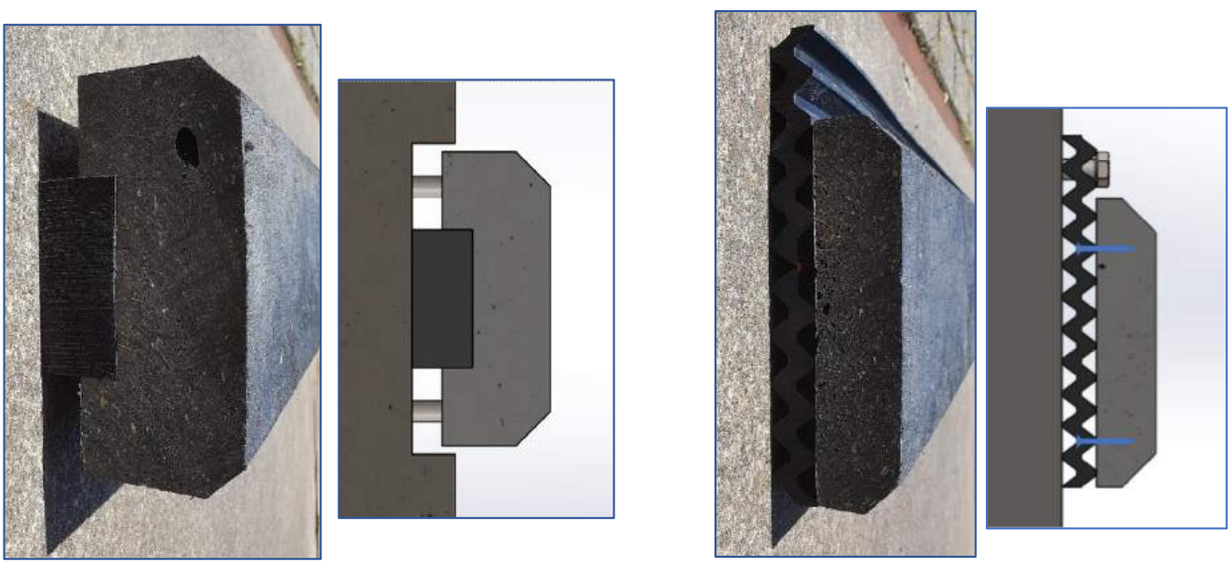
Opvallend is voorts evenals in §4.5 dat de milieukosten aanzienlijk lager uitvallen met MKI dan met Idemat. Zie §4.5 voor de toelichting hierop.

Kijkend onder de motorkap van de LCA, kan worden opgemerkt dat voor productie van het materiaal:
- Azobé uit het regenwoud volgens Idemat 90 % van de LCA-kosten zit in landgebruik (biodiversiteit in regenwoud), wat met MKI niet meegenomen wordt;
- Re-PE/PP volgens Idemat 80% van de LCA-kosten zit in CO_2;
- EPDM volgens Idemat 70% van de LCA-kosten zit in energiedragers.

5. Demonstrators

Van de Varianten 5 & 6 is een demonstrator gemaakt om deze naast te onderwerpen aan een drukproef ook in situ uit te kunnen proberen in een pilotproject. Dit betreft de verende varianten met recyclaat uit mixed consumenten plastic (Re-PP/PE), waarin meer onzekerheid zit dan bij toepassing van regeneraat UHMPE (re-UMHPE). Beide zijn gemaakt met virgin EPDM rubber, omdat deze producten in recyclaat EPDM rubber helaas (nog) niet verkrijgbaar zijn. Geprofileerd rubber (Variant 6) maken uit Re-EPDM ligt binnen de technische mogelijkheden, terwijl geëxpandeerd, celrubber (Variant 5) maken uit Re-EPDM niet mogelijk lijkt. Celrubber kan wel worden gerecycled.

Voor een foto impressie van de dwarsdoorsnede van beide demonstrators zie Figuur 5-1.



Figuur 5-1 Dwarsdoorsnedes en foto's van de demonstrators Variant 5 & Variant 6
Celrubber Re-PE/PP U-balk (links) respectievelijk Geprofileerd rubber Re-PE/PP strip (rechts)

5.1 Dimensionering Demonstrators

Voor dimensionering van Varianten 5 & 6 zie Bijlage F. Hierin wordt gebruik gemaakt van:

- beddingsgegevens van rubberprofielen en aanvullende proeven hiervoor in Bijlage L,
- materiaalgegevens van PE en aanvullende proeven voor Re-PE/PP in Bijlage N,
- van wrijvingsonderzoek van beton en scheepshuid via tussenkomende materialen in Bijlage H.

Voor de samenstellingstekeningen zie Bijlage O.

5.2 Full Scale drukbank beproeving Demonstrators

Voor een foto impressie van de drukproef op demonstrator Variant 5 zie Figuur 5-2. De demonstrators zijn beproefd bij kamertemperatuur (circa 20°C). Beproeving bij extreme temperuren (zeg -20°C en +50°C) zou wenselijk zijn. Helaas beschikt Windesheim (nog) niet over drukbank in een klimaatkamer.
Zie Bijlage P voor de beschrijving van de beproeving onder de drukbank. De hierin gebruikte belasting is afgeleid in §3.1.

Kort samengevat hebben de demonstrators de voorgeschreven belastingen succesvol doorstaan:

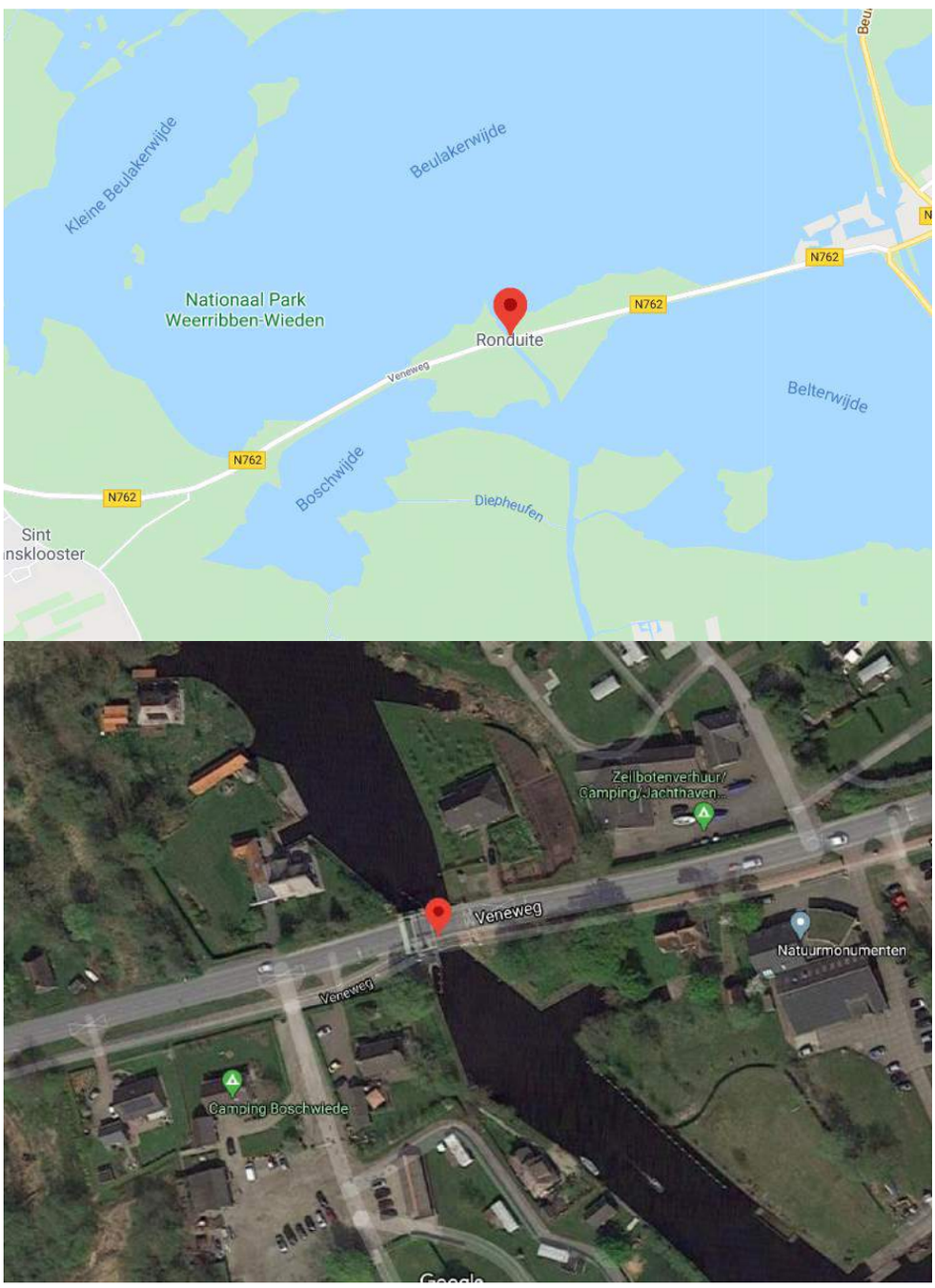
- met een volledige indrukking over 0,5 m kan de calamiteitsbelasting door aanvaring van recreatievaart ter grootte van 250 kN bij 20°C op twee wrijfstroken worden opgenomen;
- 50% indrukking van het rubber wordt onder een puntlast bij 20°C bereikt bij ruwweg 15 kN voor celrubber (indrukking 17,5 mm) en voor 25 kN geprofileerd rubber (indrukking 10 mm). 50% rubber indrukking betreft de maximale indrukking: bij celrubber wordt overgegaan tot aanliggen, bij geprofileerd rubber is het profiel plat gedrukt. Dit bepaalt daarmee het maximaal haalbare in termen van bots-energie / bots-vriendelijkheid voor deze compacte wrijfstroken.

Figuur 5-2 Drukproef van demonstrator Variant 5 bij 20°C (celrubber Re-PE/PP U-balk)

5.3 Pilotproject Demonstrators

In het nationale park Weerribben-Wieden loopt de Overijsselse provinciale weg N726, die de scheiding vormt tussen de Beulakerwijde en Belterwijde. Door het eiland Ronduite is een vaarwegverbinding voor recreatievaart tussen deze beide meren, die bij de kruising met de N726 is voorzien van een ophaalbrug. Zie tevens Figuur 5-3. De N762 en de vaarweg kruisen elkaar niet haaks, de ophaalbrug ligt wel haaks op de N762. Het vaarverkeer heeft bij de brug niet alleen een versmalling maar moet ook een S-bocht varen. Omdat het vaarverkeer hier nogal eens gebruik maakt van mechanische geleiding, zijn hier de demonstrators geplaatst. Het bestaande geleidewerk onder de brug betreft aan de:

- westzijde twee houten wrijfstroken tegen het betonnen landhoofd (hamei zijde),
- oostzijde één houten wrijfstrook tegen het betonnen landhoofd (voorhar-zijde).



Figuur 5-3 Locatie pilot project (Brug Ronduite N726)

De onderste wrijfstrook aan de westzijde is identiek aan de wrijfstrook aan de oostzijde, zowel wat betreft het niveau als dat beiden in een inkassing in het beton zitten. De bovenste wrijfstrook aan westzijde zit niet in een inkassing van het beton. Zie tevens Figuur 5-4.

Figuur 5-4 Foto's pilot locatie bestaande situatie oostzijde links en westzijde rechts

In Figuur 5-5 is het ophangen van de demonstrator van geprofileerd rubber Re-PE/PP strip (Variant 6) in juli 2021 te zien. Deze is met een tussenafstand van circa 0,25 m boven de bestaande houten wrijfstrook opgehangen aan de oostzijde van de brug. De circa 2,5m lange demonstrator steekt evenveel voor de betonwand uit als de bestaande houten wrijfstrook.

Figuur 5-5 Ophangen demonstrator geprofileerd rubber Re-PE/PP strip (Variant 6)

De demonstrator is circa 2 maanden nadat deze is opgehangen van de betonnen wand gevaren. Omdat het rubber horizontaal is uitgescheurd bij de ophangschroeven, lijkt het erop dat een schip de wrijfstrook aan de kopse zijde heeft geraakt. In Bijlage M zijn beëindigingsmogelijkheden weergegeven waarmee dit probleem verholpen kan worden. Daarmee zijn de beëindigingen van de wrijfbalk echter niet langer verend. Dat demonstrator van de wand is gevaren laat zien dat een tweede wrijfstrook (bij gelijke waterstand) inderdaad een functie vervult. Bovendien is het Re-PP/PE niet bezweken.

In Figuur 5-6 is het ophangen van de Demonstrator Celrubber en Re-PE/PP U-balk (Variant 5) in maart 2022

te zien. De demonstrator vervangt 2,0 meter van de bestaande hardhouten wrijfstrook aan de oostzijde van de brug, en zit in de bestaande beton-inkassing. In de 2,0 meter lengte zijn sparingen opgenomen bij de bestaande 3 ankers, zodat het vervangen houten wrijfgordingdeel zo nodig weer teruggebracht kan worden. De demonstrator steekt in niet-ingeveerde stand evenveel voor de betonwand uit als de bestaande houten wrijfstroken (links en rechts). Aan het begin en einde van de 2,0 meter demonstrator is de demonstrator niet-inveerbaar uitgevoerd om aanvaring tegen het kopse hout links en rechts van de verende wrijfstrook te voorkomen.

Figuur 5-6 Ophangen Demonstrator Celrubber Re-PE/PP U-balk (Variant 5)

Conform het projectplan was het de bedoeling om één demonstrator te maken en deze uit te rusten met een sensor om scheepstoten te signaleren. Bij nader inzien is het minder belangrijk om te weten wanneer de demonstrator wordt geraakt, maar belangrijker om te zien hoe de demonstrator er op reageert tijdens een schampstoot. Daarom is ervoor gekozen om twee verschillende demonstrators te maken, te plaatsen en te onderwerpen aan een schampstoot. Demonstrator van Variant 6 was er helaas al afgevaren voordat deze onderworpen is aan de schampstoot.

In het voorjaar van 2022 is een schampstoot op de demonstrator van Variant 5 (celrubber Re-PE/PP strip) voorzien met een zware stalen werkboot die de provincie uit de vaart gaat nemen. De beoogde schampenergie bedraagt:

$E_{kin} = ½·m·v^2 = ½·23ton·(sin(10°)·0,83m/s)^2 = 0,24$ kNm (met 0,83m/s = 3 km/h)

overeenkomstig de gewenste schampcapaciteit voor recreatievaart:

$E_{kin} = ½·m·v^2 = ½·10ton·(sin(5°)·2,5\ m/s)^2 = 0,24$ kNm (zie Bijlage E)

De schampstoot moet aantonen of schip en wrijfstrook onbeschadigd blijven, maar deze was bij het drukken van dit document nog niet uitgevoerd.

6. Conclusies en aanbevelingen

Herhaalde indrukbaarheid zonder afbrokkeling blijkt voor granulaire mixed kunststof kern uit gerecycled consumentenplastic (nog) in een verende wrijfstrook onvoldoende te garanderen.
Als rubber kern is EPDM het gunstigst vanwege lange levensduur en dempende vering. Geprofileerd, massief rubber is gunstiger dan celrubber vanwege circulariteit. Beiden vormen kunnen worden gerecycleerd, echter celrubber kan alleen gemaakt uit geëxpandeerd virgin rubber.

Een deels gerecyclede GVK (glasvezel versterkt kunststof met thermoharder) voorzijde van een verende wrijfstrook kan alleen worden toegepast in een niet-compact vormgesloten profiel.
Niet-versterkte thermoplast PE kunststoffen blijken voor deze toepassing technischer gunstiger (lage stijfheid in combinatie met grotere impact capaciteit) en daarnaast ook gunstiger wat betreft kosten, milieu-impact en circulariteit (omsmelten). Uitdaging vormen dilataties vanwege de grote temperatuuruitzetting.
Op basis van Total Cost of Ownership zijn binnen de bestaande starre wrijfstroken op betonnen geleidewanden voor recreatievaart, de Azobé wrijfstroken (Variant 1: geen FSC & Variant 2: marktmix 50% FSC) ongunstiger dan de kunststof wrijfstroken. Regeneraat UHMPE uit bedrijfsafval (re-UHMPE / Variant 3) is technisch gunstiger, en Recyclaat mixed kunststof uit consumentenafval (Re-PE/PP / Variant 4) lijkt ietwat gunstiger in de totale kosten over langere tijd waarin de milieu-impact is meegenomen.

Op basis van Total Cost of Ownership zijn verende wrijfstroken (Varianten 5, 6 & 7) op betonnen geleidewanden voor recreatievaart ongeveer 50% duurder dan de starre kunststof wrijfstroken. Tegenover deze extra kosten staan ook extra baten: scheepsvriendelijk schampen bij normale manoeuvres. Alleen liggen de kosten en baten bij verschillende partijen: infrabeheerder vs. recreanten.
Voor de kunststof voorzijde van de verende wrijfstroken geldt het zelfde als voor starre, kunststof wrijfstroken: re-UHMPE is technisch gunstiger, en Re-PE/PP lijkt ietwat gunstiger in de totale kosten.
Voor de EPDM kern geldt dat het gedrag bij schampstoten van celrubber met 17,5 mm indrukking gunstiger is dan van geprofileerd rubber met 10 mm indrukking. Geprofileerd rubber is daarentegen gunstiger ten aanzien van circulariteit.

Van de verende wrijfstrook varianten met Re-PE/PP is een demonstrator gemaakt. Omdat Re-PE/PP technisch minder hoogwaardig is als re-UHMPE zijn juist deze onderworpen aan een drukproef in het laboratorium worden deze in situ uitgeprobeerd als pilotproject bij Ronduite. De drukproeven werden prima doorstaan, het pilotproject wordt nog in situ beproefd met een schamptest en de komende maanden gemonitord.

Aanbevolen wordt om nader onderzoek te doen:

- naar maatschappelijke kosten- en baten analyse (MKBA) bij schampschade;
- naar de kosten en milieu-impact kosten van End of Life EPDM rubber recyclaat;
- naar de mogelijkheden tot levensduur verlengend schillen van massief UHMPE;
- naar de technische eigenschappen van End of Life UHMPE recyclaat;
- middels aanvullende drukproeven (liever nog impactproeven) op verende wrijfstroken met rubber en Re-PE/PP bij -20°C en +50°C.

Dit onderzoek beperkt zicht tot toepassing voor alleen recreatievaart. Voor een wrijffunctie die (ook) geschikt is voor beroepsvaart wordt aanbevolen om wrijfschorten van geprofileerd rubber afgedekt met regeneraat UHMPE te onderzoeken (zie Bijlage Q). Vanwege grotere impact- en vorstbestandheid wordt bij beroepsvaart vooralsnog alleen gedacht aan volkern re-UHMPE.

Geadviseerd wordt om bij milieu-impact afwegingen de milieu-impact met een methode die breder en actueler is dan MKI. Dan wel om de MKI milieu-impact-criteria en weegfactoren te actualiseren, zodat bijvoorbeeld landgebruik en daarmee biodiversiteit ook wordt meegenomen.

Geadviseerd wordt om bij nieuwe projecten met wrijfstroken op betonnen land- of sluishoofden:

- beton zonder inkassing uit te voeren, en de wrijfstrook dun te houden;
- beton achter de wrijfstroken uit te voeren met een ruwe bekisting.

Dan worden de verbindingsmiddelen niet of nauwelijks op afschuiving belast. De uitvoering wordt daarmee eenvoudiger, goedkoper, zekerder en met beperkte milieu-impact voor zowel gewapend beton, wrijfstrook als de interface tussen beide.

Geadviseerd wordt aanvullend in de RVW op te nemen voor geleidewerken:

- dat toepassing van (verticale) wrijfstijlen/stroken wordt afgeraden;
- een minimale functionele horizontale afmeting dat (horizontale) wrijfgordingen/stroken uit moeten steken voor achterliggende constructies;
- een minimale functionele horizontale afmeting dat wrijfschorten uit moeten steken voor achterliggende constructies.

7. Bibliografie

Bijker, R., & Selles, K. (2019). *Van Afval naar schuimkern.* Zwolle: Projectverslag Minor Production Windesheim, 14 november.

Busschen, t. A. (2022). *Hybride hergebruik kunststoffen.* Zwolle: Lectoraat Kunststoftechnologie Windesheim.

Centrum Hout. (2011). *HTO dictaat Houtconstructies.* TUDelft, TUEindhoven, Centrum Hout.

Dörenberg, D., Dominic, B., & Wesseling, Y. (2021). *Respons rubberkernen.* Zwolle: Minor Applied Mechanics, Windesheim.

EC. (2014). *Life Cycle Costing*. Retrieved from European Commision - Environment - Green Public Procurement: https://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm

EN1995-2. (2005). Ontwerp en berekening van houtconstructies - Deel 2: Bruggen.

Fuld, F., & Pee, T. d. (2021). *Elastische Geleidewerken voor het beperken van schade voor recreactievaart.* Zwolle: Afstudeerverslag Civiele Techniek Windesheim & Witteveen+Bos 16 juli.

Goli, e. a. (2019). Thermal expansion of wood at different equilibrium moisture contents. *Journal of Wood Science*, (pp. 1-7).

Grolleman, P.-J., Vink, T., & Wijnbergen, F. (2021). *Beïnvloeden materiaaleigenschappen mixed plastic kern.* Zwolle: Projectverslag Minor Production Windesheim, 14 januari.

Heun, T. v. (2021). *Ontwerp van een circulair hybride ligger met autoband-kernen.* Zwolle: Afstudeerverslag Werktuigbouwkunde Windesheim, 5 juli.

Honselaar, A. (1993). *Tribotechnische eigenschappen kunststoffen en hout - invloed ruwheid contramal.* Apeldoorn: TNO.

NEN5461. (2000). *Kwaliteitseisen voor hout KVH2000.* Delft: NEN.

NEN-EN1991-1-7/NB. (2011, 12). EN1991 Algemene belastingen Deel 1-7: Buitengewone belastingen: stootbelastingen en ontploffingen. NEN.

Oldenburger, J., Groot, C. d., & Benthum, M. v. (2015). *Marktvraag beschikbaarheid en prijs van aantoonbaar duurzaam geproduceerd tropisch hout.* Wageningen: Probos.

Plagge J, K. M. (2017). International Journal of Plasticity 89. *A physically based model of stress softening and hysteresis of filled rubber including rate- and temperature dependency* (pp. 173-196). Elsevier.

Roetman, A. (2022). *Studie naar de financiële en ecokosten van demonstrators van hergebruikt composiet.* Zwolle: Lectoraat kunststoftechnologie Windesheim.

ROK. (2017, 4). Richtlijnen Ontwerp Kunstwerken. *ROK1.4 Richtlijn voor het Ontwerpen van Kunstwerken*. Rijkswaterstaat.

Ros, D. (2001). *Eisen Kunststoffen – Technische leveringsvoorwaarden voor overwegend glijdend belaste kunststoffen in de waterbouw en de werktuigbouw waaronder regeneraat- en recyclingkunststoffen.* RWS.

RVW. (2020, 7 31). Richtlijn Vaarwegen. Rijkswaterstaat.

RWS. (2004). *Referentiedocument Houtconstructies versie 3.1.* Bouwdienst Rijkswaterstaat.

RWS. (2004). *Referentiedocument Kunststoffen van RWS.* Bouwdienst Rijkswaterstaat.

RWS. (2021). *Discontovoet*. Retrieved from RWSeconomie.nl: https://www.rwseconomie.nl/discontovoet

RWS Ros D. (2003, 5 27). Technische innovaties voor het verlagen van integrale kosten en milieubelasting. Rijkswaterstaat.

SBK, B. S. (2019). Bepalingsmethode Mileupresatie Gebouwen en GWW-werken 3.0., (p. 82). Rijswijk.

Stein, H. L. (1999). UHMWPE. In *Engineered Materials Handbook.*

TUD, V. (2021). *https://www.ecocostsvalue.com/*. Retrieved from https://www.ecocostsvalue.com/.

USDA. (2010). *Wood Handbook - Wood as an Engineering material.* Madison, Wisconsin.

Vögtlander. (2010). *LCA. a practical guide for students, designers and business managers.* Delft: VSSD uitgever.

Waterrecreatieadvies. (2005). *Onderzoek aantal recreatievaartuigen in Nederland.* Lelystad: Ministerie LNV.

Waterrecreatieadvies. (2014). *Actualisatie aantal recreatievaartuigen in Nederland 2005 - 2014.* Lelystad.

8. Afkortingen

Afkortingen, betekenis		hier gehanteerde betekenis
D4D	Design for disassembly	ontworpen om uiteen te nemen
FSC	Forest Stewardship Council	hout% uit milieuvriendelijk beheerd bos
LCC	Life Cycle Costing	economische kosten multi-cycle
LCA	Life Cycle Analysis	milieu-impact kosten multi-cycle met Idemat of MKI
Idemat	materialen	gemonetariseerde milieu-impact voor materialen & processen
MKI	Milieu Kosten Indicator	gemonetariseerde milieu-impact voor bouwsector
NCW	Netto Contante Waarde disconto	% waarmee toekomstige econ. kosten zijn verrekend
TCO	Total Costs of Ownership	economische + milieu-impact kosten multi-cycle TCO = LCC + LCA
re-	regeneraat	materiaal van fabrieksafval
Re-	Recyclaat	materiaal van einde levensduur (EoL[e]) afval
d	dikte	dikte van wrijfstrook (niet ingedrukt)
L	Levensduur	levensduur van 1 cyclus, kan per variant verschillen
T	Tijdsduur ter vergelijking	multi-cycle vergelijkingsduur bij verschillende levensduren
EPDM	Etheen-Propeen-Dieen-Monomeer	rubber
GVK	Glasvezel Versterkt Kunststof	
PE	Polyetheen, waaronder sub-soorten	HDPE, HMPE, UHMPE, LDPE & LLDPE
PP	Polypropeen	
PO	Polyolefine: PE en/of PP	gemend PE & PP
RVS	Roestvast Staal	
BGT	Bruikbaarheidsgrenstoestand	toestand waarin bijvoorbeeld doorbuiging wordt beschouwd
UGT	Uiterste grenstoestand	toestand waarin bijv. sterkte & stabiliteit worden beschouwd met extra factoren voor voldoende veiligheid
(ROK)	Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK, 2017)	
(RVW)	Richtlijn Vaarwegen (RVW, 2020)	

[e] EoL: End of Life

Bijlage A - Achtergrond Fast track Life cycle assessment

Een Levenscyclus assessment (LCA) is een onderzoeksmethode om de totale milieu-impact van een product over alle fasen in de levenscyclus te bepalen en te vergelijken met andere producten. De milieu-impact in een LCA betreft inschatting van alle emissies en de uitputting van de aarde. Onderdeel hiervan betreft de CO_2 voetafdruk. De CO_2 voetafdruk is het totaal aan broeikas-emissies die wordt uitgestoten, naast koolstofdioxide (CO_2) bijvoorbeeld ook methaan (CH_4). Deze emissies worden uitgedrukt in een CO_2 equivalent. Door de milieu-impact uit te drukken in kosten kunnen verschillende producten (en diensten) vergeleken worden met dezelfde functionaliteit. (Vögtlander, 2010)

Een LCA onderzoek wordt vaak gecombineerd met een Life Cycle Costing (LCC) onderzoek waarin de totale kosten worden geraamd van een product tijdens de levenscyclus. Het gaat daarbij, net als bij een LCA, niet alleen om de aanschaf- en plaatsingskosten maar ook de kosten voor inspectie en onderhoud, plus de kosten aan het einde van de technische levensduur, zoals bijvoorbeeld slopen en recycling. (EC, 2014)

Door de kosten te ramen door middel van een LCC, kunnen producten worden vergeleken met dezelfde functionaliteit. Bovendien kunnen de milieu-impact kosten worden vergeleken met de financiële kosten en zo beter worden beoordeeld. Hiervan wordt bijvoorbeeld gebruikt gemaakt bij aanbestedingen op basis van economisch meest voordelige inschrijving (EMVI) waarin naast (totale) financiële kosten bijvoorbeeld ook de milieu-impact wordt gewogen.

Methodiek

Een LCA bestaat uit verschillende stappen die na elkaar worden doorlopen zodat de analyse op een systematische wijze wordt uitgevoerd. Deze stappen worden één-voor-één langslopen.
Eerst wordt het doel bepaald en wordt de analyse afgebakend door het vastleggen van de functionele eenheid en de systeemafbakening. Bij een functionele eenheid worden de belangrijkste kenmerken van een product zo vastgelegd dat verschillende varianten kunnen worden uitgewerkt. Daarna worden de systeemgrenzen vastgelegd; hierin wordt op basis van de doelstelling bepaald welke fases en welke vergelijkingsduren worden onderzocht.

Vervolgens worden hiermee de technische gegevens systematisch omschreven en aan de hand van databases de milieu-impact resultaten bepaald.

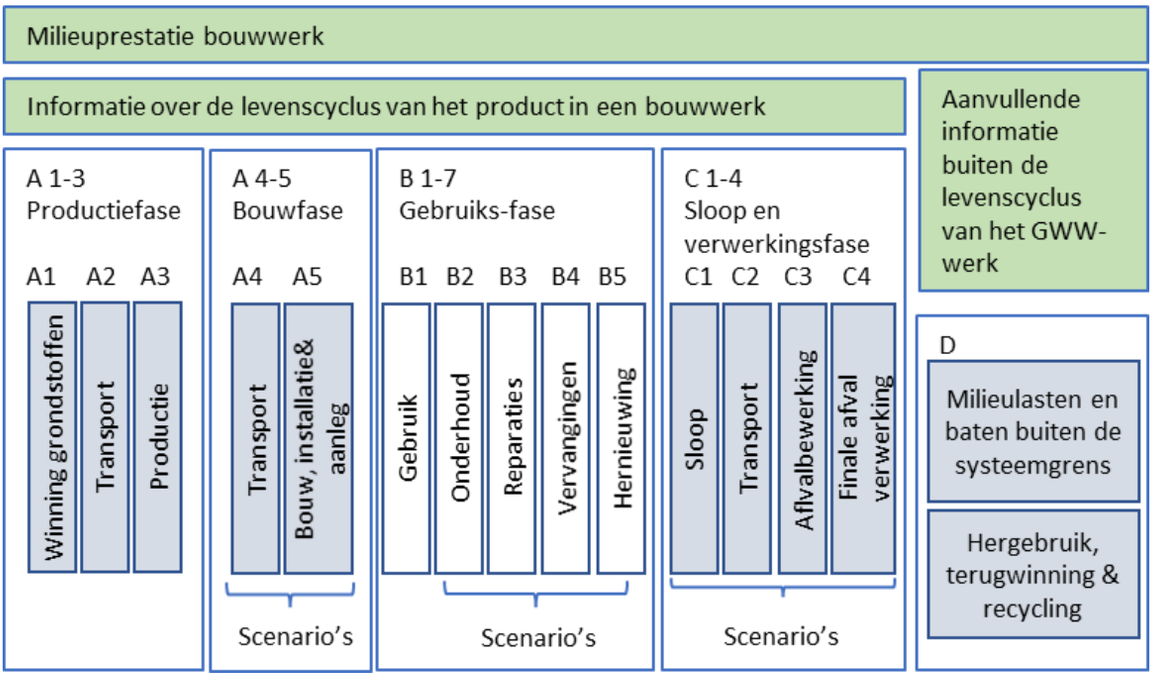
In de impact analyse worden de resultaten van varianten vergeleken en geïnterpreteerd naar verdeling van de totale impact over de fasen en levensduren en de herkomst van grootste milieu-impact bijdragen. Voor de interpretatie worden tevens gevoeligheidsanalyses uitgevoerd, waarbij wordt onderzocht wat de invloed is van verschillende factoren op de resultaten. Dit is voor de wrijfstroken te lezen in Hoofdstuk 4.

Toelichting functionele eenheid

De functionele eenheid is beschreven in §3.1.

Toelichting systeemgrenzen

De systeemgrenzen zijn bepaald aan de hand van de Bepalingsmethode Milieuprestatie gebouwen en GWW-werken, zoals opgesteld door Stichting Bouwkwaliteit (SBK, 2019, p. 11). Deze methode is gestoeld op de bepalingsmethode zoals deze is vastgelegd in NEN-EN 15804:2012 en de EN 15804. Deze uitwerking is schematisch weergegeven in Figuur A-1.



Figuur A-1 Systeemafbakening van het onderzoek

Bij verschillende levensduren per variant is gebruik gemaakt van een vergelijkingstijd die de kleinste veelvoud is van alle levensduren. Er is dan sprake van een multi-cycle benadering.
Per levensduur zijn Productie- en Bouwfase (A), Sloop- en verwerkingsfase (C) en Afdankfase (D) meegenomen.

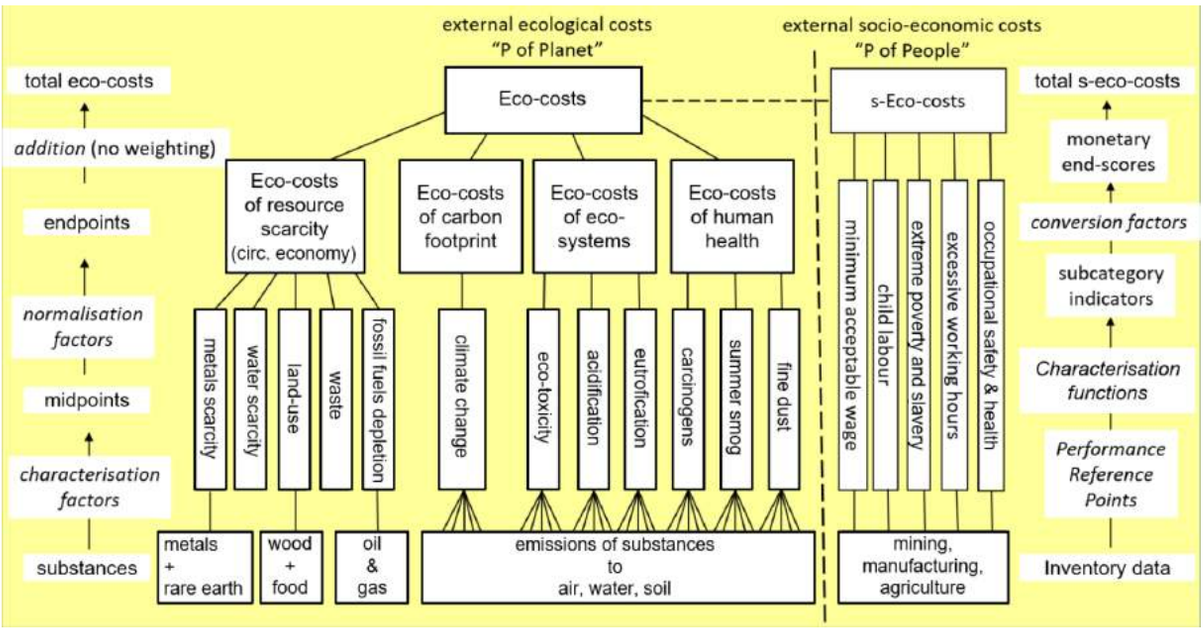
De gebruiksfase (B) is niet meegenomen, dit omdat bij alle varianten geldt:

1. het gebruik van wrijfstroken heeft nagenoeg geen invloed op de milieu-impact (B1), zo is nagegaan dat uitloging van de kunststoffen nihil is (zie Bijlage C);
2. aan starre wrijfstroken van geleidewerken worden in de praktijk nagenoeg geen onderhoudswerk verricht, de verende wrijfstroken zijn ook zo ontworpen (B2);
3. wrijfstroken worden in de praktijk niet gerepareerd of individueel vervangen. Als de eerste defect raken, worden alle wrijfstroken vervangen (B3-5).

In de Afdankfase (D) is gebruik gemaakt van de verdeling van huidige forfaitaire afdankscenario's conform (SBK, 2019, pp. 62,63), zie hiervoor Tabel A-2. Nadeel van forfaitaire afvalscenario's is dat dit de huidige stand van afdanken betreft, terwijl na 1 of meerdere levensduur cycli de scenario's meer circulair kunnen zijn.
Voor alle transporten (A2,A4,C2) zijn forfaitaire afstanden aangehouden conform SBK, zie Tabel A-4.
Voor een indruk van de milieu-impact kosten van fase A1+D bij Idemat in één levenscyclus voor diverse materialen zieTabel A-3. Hierin is zowel de huidige stand van circulariteit (uit recyclaat en afdanken) weergegeven, als een inschatting van de maximaal haalbare circulaire situatie.

Toelichting milieu-impact bepaling

In de bouw wordt de milieu-impact veelal uitgedrukt in kosten met de methode milieukosten indicator (MKI). Zo wordt bij aanbestedingen in GWW vaak het programma Dubocalc gebruikt. In dit programma kunnen echter alleen bestaande producten met elkaar kunnen worden vergeleken en geen nieuwe producten.
In dit onderzoek is de milieu-impact daarom bepaald met behulp van fast track LCA Idemat, waarbij de milieu-impact ook in kosten worden uitgedrukt maar dan op basis van gebruikte materialen en energie voor productieprocessen en transporten. Dit is een methode die is ontwikkeld door Niels Vögtlander van de Technische Universiteit Delft. Idemat versie 1.8 is gebuikt. Deze methode is inmiddels naast ecologische kosten voor uitputting en emissies ook uitgebreid met de mogelijkheid tot socio-economische kosten. Voor het model van deze methode zie Figuur A-2. (TUD, 2021)
In dit onderzoek zijn socio-economische kosten overigens niet meegenomen.



Figuur A-2 Idemat Ecocost model voor uitputting en emissies

Idemat en MKI nemen niet dezelfde milieu-impact-categorieën mee om deze uit te drukken geld, en voor milieu-categorieën die ze wel beide meenemen worden verschillende financiële weegfactoren gebruikt. Om de gevoeligheid te bekijken is de fast track LCA milieu-impact van Idemat niet alleen omgezet naar Idemat-milieukosten maar ook naar MKI milieukosten.

Voor een overzicht van de bij Idemat en MKI gebruikte milieu-categorieën met financiële weegfactoren zie Tabel A-1.

Weegfactoren volgens →:	Ecocost 2017	MKI 2014
↓Milieu-impact-categorieën	Preventie kosten 2021 TUDelft Idemat (TUD, 2021)	Schaduw kosten 2004 RWS voor MKI (SBK, 2019, p. 39)
Global warming	€0,116/CO_2 eq	€0,0500/kg CO_2 eq
Acidification	€8,75/SO_2 eq €8,75/SOx eq	€4,00/kg SO_2 eq
Eutrophication, fresh water	€4,70/PO_4^{3-} eq	€9,00/kg PO_4^{3-} eq
Eutrophication, marine water in air	€6,36/NO_2 eq	n.v.t.
Photochemical oxidiation, s.smog	€9,08/C_2H_4 eq €5,35/N0x eq	€2,00/C_2H_4 eq
Abiotic depletion, fuel	€0,440/oil €21,89/Sb eq € 0,0105/MJ	€0,160/Sb eq € 0,000077/MJ
Abiotic depletion, non-fuel	variable/material €2702/kg Sb eq	€0,160/kg Sb eq
Ozone layer depletion	n.v.t.	€30,0/kg CFC-11 eq
Human toxicity (air)	€3754/$C_{20}H_{12}$ eq €0,167/ 1,4-DCB eq	€0,0900/kg 1,4-DCB eq
Aquatic eco-toxicity, fresh water	€0,0337/ 1,4-DCB eq €340/Cu eq	€0,0300/kg 1,4-DCB eq
Aquatic eco-toxicity, marine water	n.v.t.	€0,0001/kg 1,4-DCB eq
Terrestrial eco-toxicity	€0,000593/ 1,4-DCB eq	€0,0600/kg 1,4-DCB eq
Fine dust	€35,0/PM2.5 eq	n.v.t.
Waste / landfill	€0,118/m³	n.v.t.
Water scarcity (NL)	€0,900/m³	n.v.t.
Land use change (in NL)	€1,88/m²	n.v.t.
	Ecocost haalt data uit Ecoinvent 3.6	DuboCalc haalt data uit Ecoinvent 3.5

Tabel A-1 Milieu-impact categorieën en weegfactoren bij Idemat en MKI

Tabel 1 — Forfaitaire waarden voor afvalscenario's

		Verdeling over fracties [%]				
Stroom	Specificatie	Laten zitten	Stort	AVI	Recycling	Product - hergebruik
hout, 'schoon'	o.a. balken, planken	0	5	80	10	5
hout, 'schoon'	waterbouw, o.a. palen, damwanden	10	0	30	10	50
polyolefinen (o.a. pe, pp)	o.a. leidingen, folies	0	10	85	5	0
kunststoffen, overig	o.a. profielen, platen, leidingen	0	0	90	10	0
elastomeren (o.a. epdm)	o.a. dakbedekkingen, folies	0	10	85	5	0
metalen, overig	o.a. bevestiging, hulpstukken	0	5	5	90	0
pvc, leidingen		0	10	20	70	0
Azobé			5%	80%	10%[f]	5%
re-UHMPE			10%	85%	5%	
Re-PE/PP				100%		
EPDM			10%	85%	5%	
RVS			5%	5%	90%	

Tabel A-2 Forfaitaire waarden voor Afdankscenario's (SBK, 2019, pp. 62,63) en aangehouden waarden.

[f] Recycling van hout: netto 10% verzaagd voor andere functie, zaagafval valt onder 80% Afvalverbrandingsinstallatie (AVI)

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.160.02.107	kg	Azobé FSC/PEFC 1060 (kg/m3)	€ 0,03
A.160.02.109	kg	Azobé natural forest 1060 (kg/m3)	€ 4,45
F.020.01.106	kg	Hardwood, 12% MC, co-firing in electrical power plant	€ -0,18
F.130.01.107	kg	landfill organic waste without CH_4 emission prevention	€ 0,27
F.130.01.110	kg	Scrap, separation	€0,002

Met gestimuleerd FSC volgt in lijn met (Oldenburger, Groot, & Benthum, 2015) als FSC-mix:
50%x€4,45 + 50%x€0,03 = €2,24
Huidige marktsituatie (met EoL% conform SBK, zie tabel A2)
1 kg Azobé: €2,24 + 5%x€0,27 + 80%x€-0,18 +(10%+5%)x€0,002 = € 2,11/kg
(Met verplicht FSC wordt in lijn met (Goede en slechte praktijken met FSC) de max. haalbare marksituatie:
1 kg Azobé: 10%x€4,45 +90%x€0,03 + 5%x€0,27 +80%x€-0,18 +15%x€0,002 = € 0,34/kg)

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.100.05.101	kg	Stainless Steel (secondary), average, estimate	€ 0,45
A.100.05.111	kg	X2CrNiMo1712 (316L)	€ 2,79
F.130.01.116	kg	Scrap, collection & sorting (stainless steel)	€ 0,01
F.130.01.106	kg	landfill (inert waste, not biodegradable)	€ 0,12
	kg	Waste incineration (landfill aangehouden)	€ 0,12

Huidige marktsituatie (met EoL% conform SBK, zie tabel A2)
1 kg RVS: €2,79 + 5%x€0,12 + 5%x€0,12 + 90%x€0,01 = € 2,81/kg
(Bij volledig circulaire marktsituatie - een situatie die niet voor 2150 te verwachten is- volgt :
1kg RVS: €0,45 + 100%x 0,01 = € 0,46/kg)

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.130.04.111	kg	PE (Polyethylene as HDPE)	€ 1,08
A.130.02.110	kg	PE (Polyethylene) upcycled (estimate)	€ 0,53
F.030.01.109	kg	PE (Polyethylene) co-firing in electrical power plant	€ -0,09
F.130.01.109	kg	plastic waste, collection & sorting	€ 0,02

Trademix = 94% x € 1,08 + 6[g]% x € 0,53 = € 1,05
Huidige marktsituatie (met EoL% conform SBK, zie tabel A2)
1kg PE: €1,05 + 10%x€0,12 + 85%x-€0,09 + 5%x€0,02 = **€ 0,98/kg**
(Bij volledig circulaire marktsituatie en 10x recyclebaar volgt met 90% secundair & 10% primair:
1kg PE: 10%x€1,08 + 90%x€ 0,53 + 10%x-€0,09 + 90%x€0,02 = € 0,60/kg)

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.130.02.110	kg	Re-PE upcycled (estimate)	€ 0,53
A.130.02.117	kg	Re-PP upcycled (estimate)	€ 0,53
F.030.01.109	kg	PE (Polyethylene) co-firing in electrical power plant	€ -0,09
F.130.01.109	kg	plastic waste, collection & sorting	€ 0,02
	kg	Re-PE/PP zwart upcycled [afgeleid uit SavePlastics data]	€ 0,23

Huidige marktsituatie (met EoL% in lijn met SBK, zie tabel A2)
1kg Re-PE/PP: €0,53 + 100%x-€0,09 = € 0,44/kg
(€0,23 + 100%x-€0,09 = met fabrikant data € 0,14/kg)
(Bij opnieuw recycleren van Re-PE/PP (circulair), in plaats van verbranden, zou volgen:
1kg Re-PE/PP: €0,53 + 100%x€0,02 = € 0,55/kg
hetgeen bij deze rekenmethodiek niet gunstig werkt omdat bij verbranden warmte wordt terug gewonnen)

Tabellen A-3 Idemat milieukosten in één levenscyclus bij huidige marktsituatie en bij mogelijk circulaire situatie van verschillende materialen (2 bladzijden)

[g] 6% secundair is gemiddelde voor alle kunststoffen in 2019 conform https://doi.org/10.1787/c0821f81-en

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.130.04.132	kg	PVC (Polyvinylchloride, trade mix)	€ 0,69
A.130.02.122	kg	PVC (Polyvinylchloride) upcycled (estimate)	€ 0,39
F.030.01.121	kg	PVC (Polyvinylchloride) co-firing in electrical power plant	€ -0,02
F.120.01.122	kg	PVC (Polyvinylchloride), upcycling credit	€ -0,65
F.130.01.109	kg	plastic waste, collection & sorting	€ 0,02
F.130.01.106	kg	landfill (inert waste, not biodegradable)	€ 0,12

Trade mix = 46% x € 1,04 + 54[h]% x € 0,39 = € 0,69 (1.04 = 0,39 – -0,65)

Huidige marktsituatie (met EoL% conform SBK, zie tabel A2)

1 kg PVC buis: €0,69 + 10% x € 0,12 + 20% x- 0,02 + 70% x €0,02 = € 0,71/kg

N.B.: Met BIS (Buizen Inzamel Systeem - Recycling) worden PVC buizen/leidingen gratis ingezameld, waarmee meer dan 60% van het hard PVC buisafval gerecycled wordt.

N.B. PVC is niet van toepassing, maar is toegevoegd omdat PVC reeds volop gerecycleerd wordt.

(Bij volledig circulaire marktsituatie en 10x recyclebaar volgt met 90% secundair & 10% primair:

1 kg PVC buis: 10%x1,04 + 90%x€0,39 + 10%x- 0,02 + 90%x€0,02 = € 0,47/kg)

Idemat2021 #	unit	Material/process	Eco cost
A.100.14.101	kg	Aluminum (primary)	€ 2,60
A.100.14.102	kg	Aluminum (secondary)	€ 0,36
A.100.14.103	kg	Aluminum trade mix (66% prim 33% sec)	€ 1,83
F.110.01.101	kg	Aluminum, recycling credit closed loop (66% virgin part trade mix)	€ -1,48
F.130.01.111	kg	Scrap, collection & sorting (alum.)	€ 0,01
F.130.01.106	kg	landfill (inert waste, not biodegradable)	€ 0,12
	kg	Waste incineration (landfill aangehouden)	€ 0,12

Trade mix 66% x € 2,60 + 34% x € 0,36 = € 1,83

Huidige marktsituatie (met EoL% conform SBK)

1kg Aluminium: €1,83 + 3% x €0,12 + 97% x €0,01 = € 1,84/kg

(Bij volledig circulaire marktsituatie - een situatie die niet voor 2150 te verwachten is- volgt :

1kg Aluminium: €0,36 + 100% x €0,01 = € 0,37/kg)

N.B. Aluminium is niet van toepassing, maar puur ter illustratie toegevoegd.

Tabellen A-3 Idemat milieukosten in één levenscyclus bij huidige marktsituatie en bij mogelijk circulaire situatie van verschillende materialen (2 bladzijden)

Idemat2021 #	unit	Transport	Eco cost
C.060.01.104	tkm	Truck + trailer 24 tons net (min weight/volume ratio 0,32 ton/m3)	€0,0240
C.070.01.106	tkm	Container ship (min weight/volume ratio 0,41 ton/m3)	€0,0013

Transport materiaal	naar NL haven	container schip	reisafstand 10.000km	alleen voor Azobé
	naar werkplaats	24 ton truck	reisafstand 2x150km	gevuld schip/truck
Transport bouw	naar bouw	24 ton truck	reisafstand 2x150km	alleen projectlading
Transport sloop	naar sorteer	24 ton truck	reisafstand 2x2x50km	alleen projectlading
	naar afdank	24 ton truck	reisafstand 2x100km	gevuld afvalcontainer

Factoren 2: 1x met lading + 1x leeg;
1x neerzetten + 1x ophalen afvalcontainers.

Tabel A-4 Idemat milieukosten voor transport & forfaitaire reisafstanden conform (SBK)

[h] 54% secundair is indirect afgeleid uit Idemat parameters; terwijl 12% gevonden wordt voor EU in https://zerowasteeurope.eu/wp-content/uploads/2021/08/2021-06-22-PVC-briefing-FINAL.pdf

Bijlage B - Gehanteerde LCC kosten-kengetallen

Uitgangspunten: prijspeil: 2019
inkoop: 1.000 m' wrijfstrook
uitvoering: 100 m' wrijfstrook

Materiaal	Kosten		Bron	Dichtheid
Azobé regenwoud	€ 900/m^3		Wijma	1.060 kg/m^3
Azobé FSC	€ 1.000/m^3		Wijma	1.060 kg/m^3
Re-PE/PP Q1/Q3	€ 1.300/m^3	€ 1,5/kg	SavePlastics	875 kg/m^3
re-UHMPE	€ 3.700/m^3	€ 4,0/kg	Altena & WVS	930 kg/m^3
EPDM-profiel	€ 9.500/m^3	€ 14,0/kg	Vilton[i]	683 kg/m^3
EPDM-schuim	€13.000/m^3	€ 27,5/kg	EKI	475 kg/m^3

Het "Referentiedocument Kunststoffen van RWS" (RWS, 2004) vermeldt als kostenkengetallen voor diverse kunststoffen:

Re-PE UV	€1,2/liter
re-HDPE 250 UV	€2,4/liter
re-HMPE 500 UV	€3,6/liter
re-UHMPE 1000 UV	€4,8/liter
UHMPE 1000 UV	€7,2/liter
PETP	€14/liter
PTFE	€39/liter
PC	€48/liter
PMMA	€39/liter
GVK	€24/liter

Transport bouw €400,- voor 24 ton truck, reisafstand 2x150km duur 8h incl. laden en lossen
Transport sloop 2x€200,- voor 24 ton truck, reisafstand 2x2x50km duur 4h incl. laden en lossen
Transport afdank €200,- voor 24 ton truck, tot. reisafstand 2x100km duur 4h incl. laden en lossen

Aanbrengen: vast (de)mobilisatie ponton €1.000 voor alle varianten + var. ref: €30/m' voor azobé
Verwijderen: vast (de)mob. ponton €1.000 voor alle varianten + var. ref 80%X€30/m' voor azobé

Afdanken Materiaal	Kosten	Bron	Dichtheid
Azobé regenwoud	€ 0,12/kg	van Werven afval	1.060 kg/m^3
Re-PE/PP Q1/Q3	€ 0,09/kg	Gemeentelijk afval	875 kg/m^3
re-UHMPE	€ -0,03/kg	vanmunster.com	930 kg/m^3
EPDM	€ 0,20/kg	Gemeentelijk afval	683 kg/m^3
RVS	€ -1,40/kg	de Visser metaal	475 kg/m^3

[i] Vooruitlopend op de toekomst is rekening gehouden met het feit dat Vilton zelf een goedkoper, geëxtrudeerd EPDM profiel van 20 mm kan maken en het niet meer inkoopt bij Calenberg uit Duitsland. Dit doet Vilton nu reeds voor een vergelijkbaar profiel met een dikte van 10 mm.

Bijlage C - Uitloging en levensduur kunststoffen

Uitloging kunststof

Uitlogen is een proces waarbij hulpstoffen (katalysatoren, regulatoren, stabilisatoren, vulstoffen, weekmakers, additieven, reststoffen, verweringsstoffen, etc.) uit een vaste kunststof worden onttrokken door middel van oplossing in een vloeistof. In de waterbouwkundige omgeving betreft deze vloeistof water. De onttrokken materialen kunnen een nadelige:

a) werking van de kunststof opleveren (UV-stabilisator, weekmaker, etc.)
b) milieu-impact vormen voor de omgeving (toxisch, overbemesting, etc.).

(re-)UHMPE

Ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMPE) is een thermoplastische polymeer uit monomeer etheen (CH_2=CH_2), afgekort PE ($n \cdot (C_2\text{-}H_2)$) met zeer grote molecuullengtes. De ketenlengte van de moleculen kan meer dan een miljoen koolstofatomen zijn.
Massief UHMPE heeft de volgende kenmerkende eigenschappen:

- geurloos, smaakloos, en niet toxisch
- zeer lage wrijving (zelf-smerend) zowel droog als nat
- zeer hoge weerstand tegen slijtage en slagvastheid
- inert: zeer lage aanhechting van vuil of aangroei van algen en wieren.

UHMPE wordt gemaakt met een katalysator.
NOOT: Low-density-polyethylene (LD-PE) wordt gemaakt door vrije radicaal polymerisatie bij een hoge druk, high-density-polyethylene (HD-PE) wordt gemaakt met een katalysator bij een lage druk. (wikipedia)

Zuivere PE is wit en uit zichzelf zeer beperkt zonlicht-bestendig. Met behulp van (UV-)stabilisatoren kan UHMPE zonlicht bestendig gemaakt worden. De waterabsorptie van UHMPE is nihil. De meeste gebruikte UV-stabilisator is roet (carbon black), waarmee zwart UHMPE wordt verkregen. De kwaliteit van UHMPE met 2,0% carbon black heet UV bestendig, met 6,5% antistatisch en met 16,7% elektrisch geleidend. (Stein, 1999)
Het document “Eisen Kunststoffen Rijkswaterstaat” geeft aan dat (re-)UHMPE onvernet moet zijn.

De toevoeging uv bij (re-)UHMPE 1000 uv, re-HMPE 500 uv, re-HDPE 250 uv & Re-(LD)PE uv wil zeggen “uv bestendig” door een toevoeging van 2,0 à 2,5% roet (Ros, 2001). Daarmee is de kleur zwart.
De minimale levensduur van UV bestendig (re-)UHMPE voor wrijfstroken van geleidewerken is 25 jaar. (Altena)

De getalstoevoeging (bijv. 500) is een maat voor het moleculair gewicht (bijv. 500.000 g/mol).
Het “Referentiedocument Kunststoffen” van RWS stelt ”De in dit document genoemde thermoplasten - mits besteld volgens de Eisen Kunststoffen Rijkswaterstaat - verouderen nauwelijks merkbaar. In de praktijk heeft dit - voor zover bekend - nooit tot voortijdig falen van een constructie geleid. Daarom wordt geen falen door verouderen verwacht. Wel kan de bedrijfsduur van thermoplastische producten zoals glijgeleidingen worden begrensd door slijtage.” (RWS, 2004)

RWS geeft aan minimaal levensduur van 25 jaar aan. UV leidt tot oppervlakte-verbrossing en oppervlakkige scheurvorming. Langer dan 25 jaar laten zitten is alleen esthetisch ongewenst maar geeft geen veiligheidsissue (dhr. Krabbe).

Technisch directeur van Ingenieursbureau Westenberg (gespecialiseerd in beheer en onderhoud), geeft aan dat zij 60 jaar levensduur aanhouden voor kunststoffen die voldoen aan de eisen van RWS (dhr. Hoogterp).
De levensduur van UV bestendig Re-PE steigerplanken is 50 jaar en wordt afgegeven met een garantie. (Trelleborg Ecoboard)

In West-Europa zal de UV-levensduur van re-UHMPE met 2,0% carbon black derhalve minimaal 50 jaar zijn. Omdat waterabsorptie in UHMPE nihil is, zal de uitloging van roet eveneens nihil zijn.

Re-PE/PP

Er zijn voor zover bekend in 2021 twee fabrikanten in Nederland van geregenereerde waterbouwkundige kunststofproducten, te weten Lankhorst en SavePlastics. Het door hen hergebruikte kunststof is een mengsel van PE/PP (verzamelnaam polyolefine). Dit betreffen de meest voorkomende kunststoffen.
Het enige wat SavePlastics aan haar gerecyclede waterbouwkundige producten toevoegt naast gerecycled PE/PP mengsel is UV stabilisator carbon black (roet) bij de zwarte uitvoering. Het NIBE heeft voor zwart SavePlastics een MKI opgesteld. Voor de gebruiks- en onderhoudsfase (B1 t/m B3) in de minimale referentie levensduur van 40 jaar is de milieu-impact nihil. (SavePlastics / NIBE)
Uitloging maakt deel uit van de gebruiksfase B1. (SBK, 2019)

Daarnaast heeft SavePlastics onderzoek laten doen naar micro-plastics. Bij een groot oppervlak van een gerecycled PE/PP-mengsel dat gedurende 120 dagen werd blootgesteld aan zeewater in combinatie met UV, regenwater en een droogstadium (Q-UV-testen) bij een temperatuur van 50°C, kwamen slechts kleine hoeveelheden natrium, magnesium, aluminium en silicium vrij, ver beneden de wettelijke drempelwaarden. (K. Mennink, "Uitlogen van Recyclaten", TPAC, juli 2018 in opdracht van SavePlastics).

Op basis van wat momenteel bekend is, wordt het effect van polyolefine afvalproducten op het milieu verminderd wanneer deze worden gerecycled. Het vrijkomen van sporen in het milieu wordt met dikwandige gerecyclede producten beperkt. (SavePlastics)

De waterabsorptie van Re-PE/PP betreft <0,01%, en er is geen uitloging van chemische stoffen naar het grondwater. De verwachte levensduur van Re-PE/PP (KLP) is minimaal 50 jaar. (Lankhorst)

De milieueffecten van uitloging toepassingen van Re-PE/PP naar bodem/water bij (dikke) waterbouwkundige zal derhalve nihil zijn. De uv-levensduur van zwart Re-PE/PP kan met toevoegen van roet evenals Re-PE uv minimaal 50 jaar zijn.

EPDM-mengsels

EPDM is de afkorting van Etheen-Propeen-Dieen-Monomeer: een groep van synthetische rubbers of elastomeren. Het wordt verkregen door de polymerisatie van etheen (CH_2=CH_2), propeen (CH_2=CH-CH_3) en een dieen (een koolwaterstof met twee dubbele bindingen).

Na de polymerisatie verkrijgt men een thermoplastische polymeer en blijft er één van de twee dubbele bindingen van het dieenmonomeer intact. Dat laat toe om het polymeer nadien te vulkaniseren, waarbij er zwavelbruggen tussen de polymeermoleculen gevormd worden.

De verhouding tussen de gebruikte hoeveelheden van de verschillende monomeren, bepaalt in grote mate de eigenschappen van het EPDM-polymeer. Het etheengehalte kan variëren van circa 45 tot 80 %. Lagere etheengehalten leveren een eerder amorf polymeer; hogere een meer kristallijn polymeer. Het dieengehalte kan variëren van circa 1 tot 12 %. Met een hoger dieengehalte kan een hogere vulkanisatiegraad en daarmee een “vaster” rubber worden verkregen.

Gemengd met carbon black (uit velerlei klassen), olieachtige weekmakers en vaak tot wel meer dan 10 andere hulpstoffen, verkrijgt men dan EPDM-mengsels die een aantal kenmerkende eigenschappen vertonen, zoals:

- een hoge elasticiteit tot 400%, over een temperatuurbereik van −35 °C tot +120 °C
- een goede bestendigheid tegen vele basen, zuren (waaronder vetzuren) en zouten
- een goede bestendigheid tegen weersinvloeden (waaronder ozon en uv-straling)
- een slechte bestendigheid tegen o.a. aardolieproducten
- een levensduur van ten minste 50 jaar. (wikipedia)

j EPDM dakbedekkingen Easy cover & Easy weld mf zijn beide homogene EPDM mengsels bestaande uit 25-40 % EPDM synthetisch rubber, 10-20 % minerale olie, 15-30 % carbon black, 15-25 % vulmiddel en 0-10 % additieven. (Hertalan / NIBE)

Het NIBE heeft een EPD opgesteld voor EPDM dakbedekkingen van Hertalan[j] (Kampen). Voor de gebruiks- en onderhoudsfase (B1 t/m B3) in de verwachte levensduur van 50 jaar is de milieu-impact nihil. Uitloging maakt deel uit van de gebruiksfase B1. Uit uitlogingsproeven van deze dakbedekking blijkt dat de uitloging nihil is. (Hertalan / NIBE)

Noot: De waterabsorptie van geprofileerd EPDM mengsels is nihil (Calenberg productbrochure).
Noot: De waterabsorptie van EPDM celrubber EKI-490 betreft <4% (ASTM D1056-14), terwijl het vanwege gesloten cellenstructuur waterdicht is (EKI490). Deze waterabsorptie vindt echter plaats in de cellen die aan de buitenzijde niet overal gesloten zijn.

Er zitten nogal wat verschillen in chemische samenstelling van EPDM-rubbers en mengsels, zowel qua producttype als qua fabrikant. De precieze samenstelling wordt veelal geheim gehouden door de fabrikanten, en is doordat carbon black wordt toegepast bovendien nauwelijks te analyseren.

Voor waterbouwkundige toepassingen kunnen EPDM-mengsels besteld worden met een minimale levensduur van 50 jaar die nihil uitlogen.

Bijlage D - Ontwerp starre versus verende wrijfstrook

Ontwerp starre wrijfstrook

Calamiteit Aanvaarbelasting 250 kN verdeeld over 0,50 m breedte en 1,0 m hoogte (EN1991-1-7)
waarin 2 wrijfstroken van elk 0,15 m hoogte
Contact-druk 250 kN / (2 · 0,50 m · 0,15 m) = 1,7 N/mm^2

Dit is als contactdruk door vele materialen al met een lage sterkteklasse opneembaar:

Materiaal	f_{druk} [N/mm^2]	E [N/mm^2]	Bron
Loofhout D18	7,5/1,3 = 5,8	630	EN 388
Azobé D70	13,5/1,3 = 10,4	1.330	EN 388
PE 80	8,0/1,25 = 6,4	825	NEN 3650-3
PE 100	10,0/1,25 = 8,0	975	NEN 3650-3
re-UHMPE	6,5/1,25 = 5,2 (ε=1%)	2.300	Ridderflex/Altena
Re-PE/PP Q3	3,0/1,25 = 2,4 (ε=1%)	262	
	18,6/1,25 = 14,9 (ε=20%)		SavePlastics
Beton C12/15	12,0/1,5 = 8,0		EN 1992-1-1

De indrukking van starre houten en kunststoffen wrijfstroken bij een druk van 1,7 N/mm^2 en een dikte van 70 mm bedraagt 0,1 tot 0,5 mm: verwaarloosbaar klein.

BGT Schampbelasting 15 kN verdeeld over 1 gording h = 0,15 m en geschat b = 0,10 m
Contact-druk 15 kN / (0,15 m · 0,10 m) = 1,0 N/mm^2
1,0 N/mm^2 = 1.000 kN/m^2 >> scheepshuidsterkte = 200 kN/m^2 (ROK).

Filosofie: de wrijfstoken van het geleidewerk bieden visuele en mechanische geleiding. Dit zonder dat beton lokaal beschadigd.

Ontwerp verende wrijfstrook

Calamiteit Aanvaarbelasting Zie boven, ontwerp starre wrijfstrook onder calamiteit.

BGT Schampbelasting 15 kN verdeeld over 1 gording h = 0,15 m en gewenst* b = 0,50 m
Contact-druk 15 kN / (0,15 m · 0,50 m) = 0,2 N/mm^2
0,2 N/mm^2 = 200 kN/m^2 = scheepshuidsterkte (ROK, 2017).

Filosofie: de wrijfstroken van het geleidewerk bieden visuele en mechanische geleiding. Dit zonder dat beton lokaal beschadigd. Waarbij schepen bovendien minder vaak schade varen.

* In Bijlage F blijkt dat voor Variant 5 bij de maximale invering van 17,5 mm, de scheepshuid belasting onder de 200 kN/m^2 blijft. Hierbij wordt de gewenste spreidingsbreedte van 0,5 m dus gehaald.

In Bijlage F blijkt dat voor Variant 6 (& 7) bij de maximale invering van 10,0 mm, de scheepshuid belasting boven de 200 kN/m^2 reikt. Hierbij wordt de gewenste spreidingsbreedte van 0,5 m niet gehaald.
Dit type lijkt echter redundanter indien er naast recreatievaart ook beroepsvaart plaats vindt.

Bijlage E - Energieopname bij Schampen

Zwaarste recreatievaartschip

(groot zeiljacht NL-klasse: AZ / EU-klasse: RD)

$m = C_{blokcoëfficiënt} \cdot L \cdot B \cdot D \cdot \rho = 0{,}10 \cdot 15m \cdot 4{,}5m \cdot 1{,}5m \cdot 1{,}0ton/m^3 = 10$ ton
bootafmetingen conform (RVW, 2020), zie tevens volgende bladzijde
diepte kajuitmotorboot AM aangehouden vanwege uitstekend zwaard
blokcoëfficiënt kajuitzeilboot aangehouden, zie laatste bladzijde van deze bijlage

v = 2,5 m/s bij bruggen en sluizen (5 m/s in open water, ROK)
$E_{kin} = ½ \cdot m \cdot v^2 = 32$ kNm in langsrichting

v = sin(5°)·2,5 = 0,22 m/s onder 5° schampen (normaal manoeuvreren = 5°, ROK)
$E_{kin} = 0{,}24$ kNm onder 5°

Deze energie wordt gecorrigeerd voor diverse effecten tot: (coëfficiënten, PIANC)
$E = C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c \cdot E_{kin} = 0{,}6 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}24$ kNm = 0,13 kNm onder 5°

Op te nemen Arbeid door verende wrijfstroken

A = ½ · 25kN · 0,0100m = 0,13 kNm met 20 mm dik geprofileerd rubber
(kracht · weg)
A = ½ · 15kN · 0,0175m = 0,13 kNm met 35 mm dik celrubber
(kracht · weg)

Schepen tot 10 ton kunnen onder 5° schampen zonder dat schade te verwachten is, mits de schampkracht voldoende gespreid wordt. Bij zwaardere schepen en/of grotere schamphoeken zal de scheepshuid sowieso plastisch of bros gaan inveren (schade).

Ter info: zwaarste charterschip/bruine vloot

(NL-klasse: BVA)

$m = C_{blokcoëfficiënt} \cdot L \cdot B \cdot D \cdot \rho = 0{,}15 \cdot 35m \cdot 7{,}0m \cdot 1{,}4m \cdot 1{,}0ton/m^3 = 51$ ton
Bootafmetingen uit (RVW, 2020); blokcoëfficiënt platbodem aangehouden

v = 0,22 m/s onder 5° schampen
$E_{kin} = 1{,}22$ kNm onder 5°

Deze energie wordt gecorrigeerd voor diverse effecten tot:
$E = C_e \cdot C_m \cdot C_s \cdot C_c \cdot E_{kin} = 0{,}6 \cdot 1{,}1 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}22$ kNm = 0,65 kNm onder 5°

Hieronder zijn de bootafmetingen van recreateivaart NL & EU alsmede van charterschepen uit Richtlijn Vaarwegen in tabelvorm overgenomen.

ZM-route		lengte	breedte	diepgang	masthoogte
verbindingswater	A	15,0	4,25 - 4,5	2,1	30,0
ontsluitingswater	B	15,0	4,25 - 4,5	1,9	30,0
ontsluitingswater met beperkingen	C*			1,7	30,0**
	D				-

* CZM alleen in Friesland
** volstaan kan worden met 15,0 m als op korte afstand een route beschikbaar is > 30,0 m

M-route		lengte	breedte	diepgang	boot-hoogte	brug-hoogte
verbindingswater	A	15,0	4,25 - 4,5	1,50	3,40	3,75
ontsluitingswater	B	15,0	4,25 - 4,5	1,50	2,75	3,00
	C	14,0	4,25	1,40	2,75	3,00
	D	12,0	3,75	1,10	2,40	2,60

Tabel 9: Maatgevende bootafmetingen (m) voor (Z)M-routes volgens het BRTN, met aanvulling van lengte- en breedtematen

type schip	categorie	lengte	breedte	diepgang	brughoogte
open boot	RA	5,5	2,0	0,50	2,00
kajuitboot	RB	9,5	3,0	1,00	3,25
motorjacht	RC	15,0	4,0	1,50	4,00
groot zeiljacht	RD	15,0	4,0	2,10	30,00

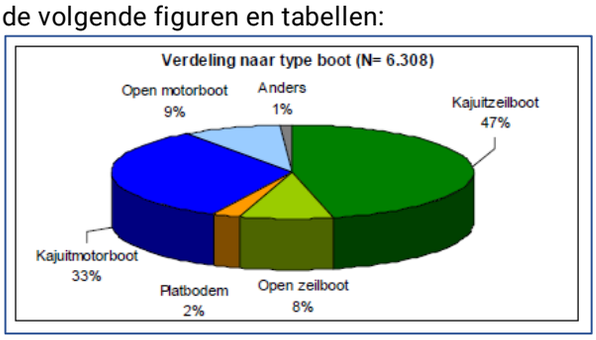
Tabel 10: Maatgevende bootafmetingen (m) volgens de ECE

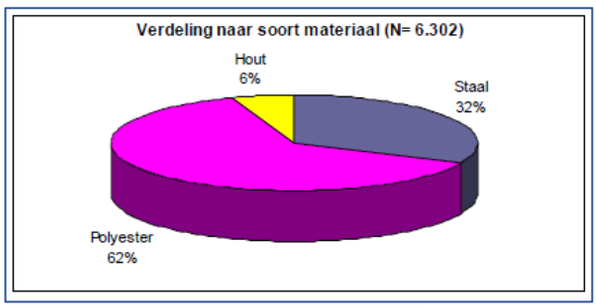
klasse	lengte	breedte incl. zwaarden	diepgang	masthoogte
BVA	35,0	7,0	1,4	30,0
BVB	25,0	6,0	1,2	30,0

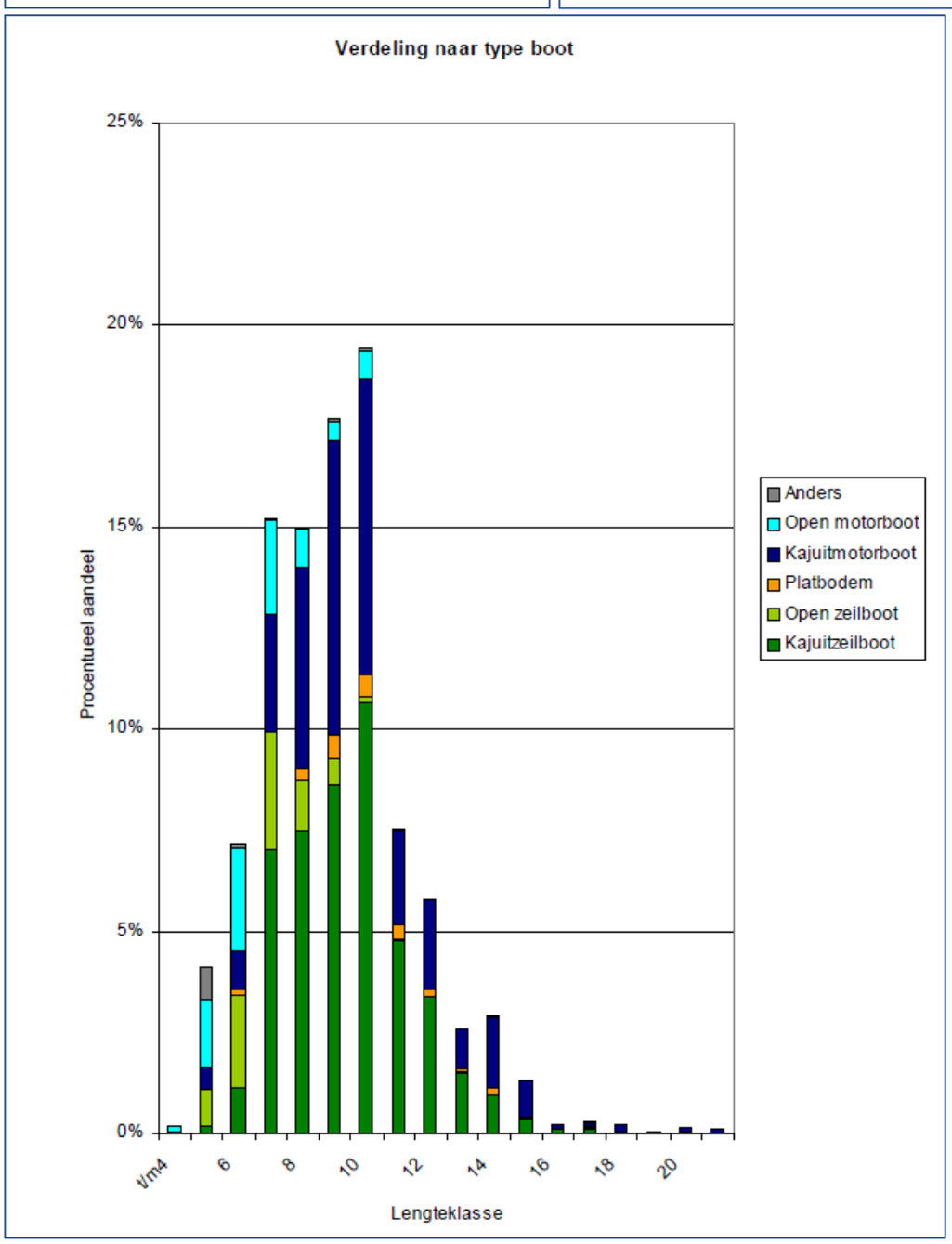
Tabel 11: Maatgevende afmetingen (m) van charterschepen

(RVW, 2020)

In 2005 Waterrecreatieadvies de samenstelling van de recreatievaartuigen geïnventariseerd in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit. Enkele hier relevante aspecten zijn samengevat in de volgende figuren en tabellen:







De gemiddelde lengte van de recreatievaartuigen is 9 meter (de meeste tussen de 7 en 11 meter).

Tabel 16: Bouwmateriaal en soort motor [%] per meter scheepslengte

Lengte	Bouwmateriaal			Motor		
Scheepslengte [m]	Staal [%]	Polyester [%]	Hout [%]	Bi. Motor [%]	Bu. Motor [%]	Geen [%]
t/m 4	0,2%	0,2%	0,0%	0,0%	0,6%	0,0%
4,01 t/m 5	4,0%	4,3%	3,9%	0,5%	12,1%	20,2%
5,01 t/m 6	2,2%	9,2%	12,9%	1,7%	21,6%	22,5%
6,01 t/m 7	6,2%	18,6%	28,1%	7,5%	34,4%	29,4%
7,01 t/m 8	13,5%	15,3%	20,5%	14,5%	16,8%	11,0%
8,01 t/m 9	23,5%	15,2%	11,8%	21,8%	6,8%	12,8%
9,01 t/m 10	21,7%	18,9%	12,6%	25,1%	5,4%	2,8%
10,01 t/m 11	9,2%	7,2%	2,5%	10,2%	1,2%	0,0%
11,01 t/m 12	7,1%	5,5%	2,2%	7,8%	0,9%	0,0%
12,01 t/m 13	2,8%	2,6%	1,7%	3,6%	0,1%	0,0%
13,01 t/m 14	5,8%	1,5%	1,7%	4,0%	0,1%	0,0%
14,01 t/m 15	2,2%	0,9%	0,8%	1,8%	0,0%	0,0%
15,01 t/m 16	0,4%	0,2%	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%
16,01 t/m 17	0,3%	0,3%	0,6%	0,3%	0,0%	1,4%
17,01 t/m 18	0,3%	0,2%	0,3%	0,3%	0,0%	0,0%
18,01 t/m 19	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
19,01 t/m 20	0,5%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
> 20	0,4%	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%
Totaal	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**

In principe zijn verder nog talloze kruistellingen en analyses mogelijk, die bijvoorbeeld voor watersportbedrijven interessant kunnen zijn. Het achterhalen van marketinggegevens was echter niet de bedoeling van het onderzoek, maar wel een leuke bijkomstigheid. Navolgend nog een tabel over eigenschappen van de verschillende soorten boten.

Tabel 17: Bouwmateriaal en soort motor [%] per type vaartuig

	Bouwmateriaal			Soort motor		
	Staal	Polyester	Hout	Binnen	Buiten	Geen
Kajuitzeilboot	13,2%	81,0%	5,8%	75,4%	24,2%	0,4%
Open zeilboot	4,8%	73,9%	21,3%	1,3%	62,3%	36,4%
Platbodem	89,1%	2,6%	8,3%	89,7%	10,3%	0%
Kajuitmotorboot	64,8%	34,0%	1,3%	90,5%	9,4%	0,1%
Open Motorboot	12,3%	82,5%	5,2%	46,6%	53,4%	0%
Overig	48,0%	44,0%	8,0%	6,8%	84,9%	8,2%

(Waterrecreatieadvies, Onderzoek aantal recreatievaartuigen in Nederland, 2005)
In 2014 heeft Waterrecreatieadvies het aantal recreatievaartuigen geactualiseerd in het kader van potentiële afvalstromen. Hieruit zijn de volgende tabellen overgenomen:

Soorten recreatievaartuigen in het water in Nederland						
	In jachthavens		Buiten jachthavens		Totaal afgerond	
	Aantal	Gem. lengte	Aantal	Gem. lengte	Aantal	Gem. lengte
Kajuitzeilboot	71.385	9,2	6.525	~ 9	78.000	9,2
Open zeilboot	12.770	6,7	8.700	~ 5	21.500	6,0
Platbodem	3.845	10	1.305	~ 6	5.000	9,0
Kajuitmotorboot	50.615	9,6	8.700	~ 8	59.500	9,4
Open Motorboot	13.540	6,5	13.050	~ 5	26.500	5,8
Anders	1.845	6	5.220	~ 4	7.000	4,5
Totaal	**154.000**	**8,9**	**43.500**	**~ 6,1**	**197.500**	**8,3**

Recreatievaartuigen in het water in Nederland: soort, bouwmateriaal en gewichtsverhouding								
Soort recreatie vaartuig	Materiaal	Aantal	Gem. lengte	Gem. gewicht kg/boot	Gewichtsverhouding			
					Motor	Romp	Kiel	Overig
Kajuitzeilboot	Staal/alu	10.294	9,2	6.000	8%	40%	35%	17%
	Polyester	63.124	9,2	4.500	8%	45%	35%	12%
	Hout	4.560	9,2	4.500	10%	50%	30%	10%
Open zeilboot	Staal/alu	1.028	6,0	750	5%	60%	30%	10%
	Polyester	15.866	6,0	500	5%	55%	35%	10%
	Hout	4.562	6,0	500	5%	60%	30%	10%
Platbodem	Staal/alu	4.559	9,0	9.500	10%	70%	0%	20%
	Polyester	131	9,0	5.000	10%	75%	0%	15%
	Hout	426	9,0	4.500	10%	80%	0%	10%
Kajuitmotorboot	Staal/alu	38.429	9,4	7.000	5%	75%	0%	20%
	Polyester	20.159	9,4	5.000	10%	70%	0%	20%
	Hout	745	9,4	5.000	10%	80%	0%	10%
Open motorboot	Staal/alu	3.266	5,8	1.500	20%	85%	0%	10%
	Polyester	21.904	5,8	1.000	20%	85%	0%	10%
	Hout	1.393	5,8	1000	20%	85%	0%	10%
Anders	Staal/alu	3.385	4,5	750	5%	85%	0%	10%
	Polyester	3.103	4,5	500	5%	85%	0%	10%
	Hout	564	4,5	500	5%	85%	0%	10%
Totaal		**197.500**						

(Waterrecreatieadvies, Actualisatie aantal recreatievaartuigen in Nederland 2005 - 2014, 2014)
Hiermee zijn de blokcoëfficiënten als volgt afgeleid.

Het gemiddelde gewicht van een stalen kajuitzeiljachten van gemiddeld 9,2 m is 6.000 kg.

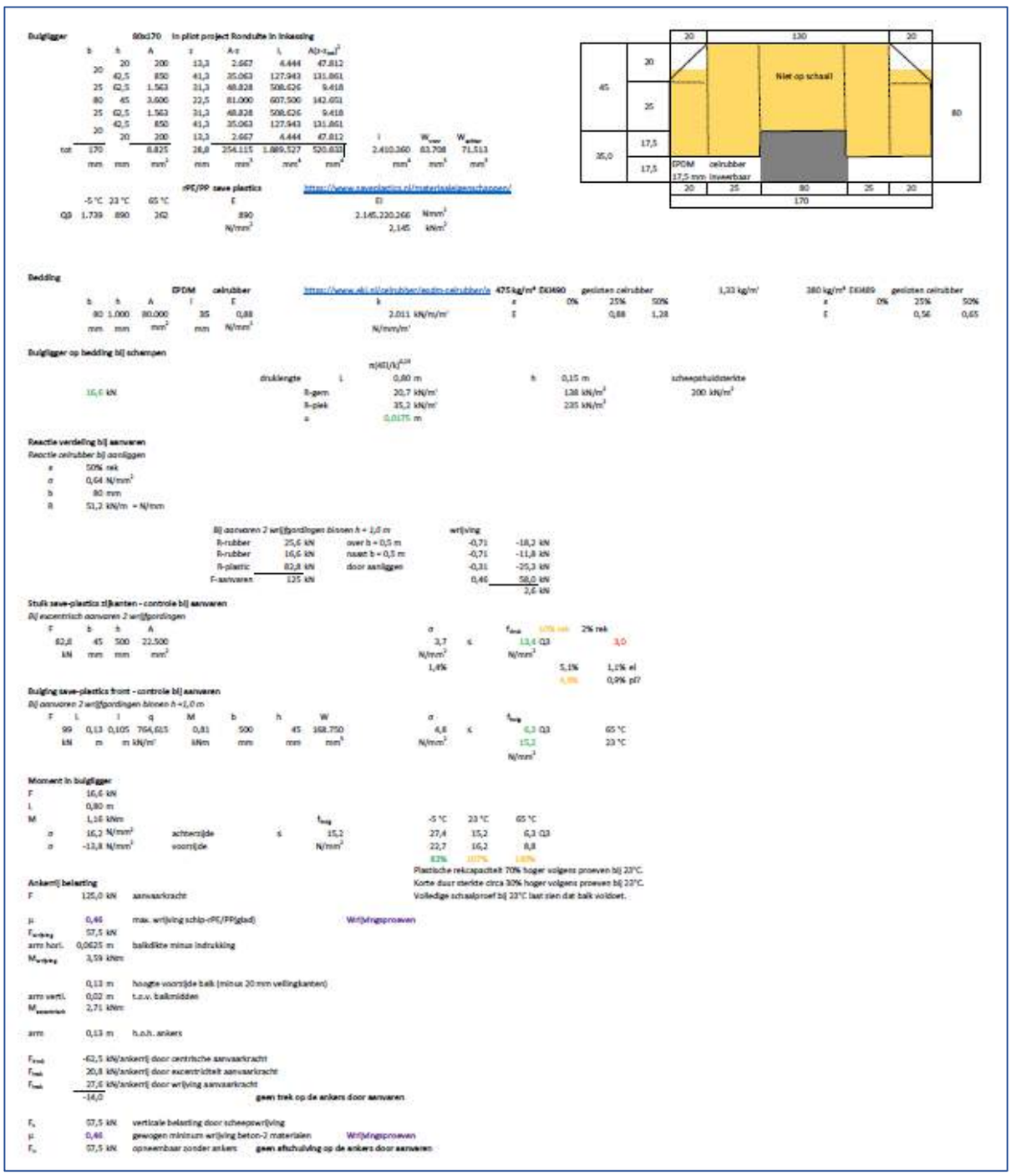
$m = C_{blokcoëfficiënt} \cdot L \cdot B \cdot D \cdot \rho = 0{,}07 \cdot 9{,}2m \cdot 3{,}0m \cdot 1{,}25m \cdot 1{,}0ton/m^3 = 6$ ton. Hier 0,07: neem 0,10.

Het gemiddelde gewicht van een stalen platbodem van gemiddeld 9,0 m is 9.500 kg.

$m = C_{blokcoëfficiënt} \cdot L \cdot B \cdot D \cdot \rho = 0{,}12 \cdot 9{,}0m \cdot 3{,}0m \cdot 1{,}0m \cdot 1{,}0ton/m^3 = 9{,}5$ ton. Hier 0,12: neem 0,15.

Bijlage F - Dimensionering verende varianten

Variant 5 - Celrubber Re-PE/PP U-balk



Bulgligger 80x170 in plot project Rondute in Inkassing

b	h	A	z	A·z	I	A(h-z)²
20	20	200	13,3	2.667	4.444	47.812
	42,5	850	41,3	35.063	127.943	131.861
25	62,5	1.563	31,3	48.828	508.626	9.418
80	45	3.600	22,5	81.000	607.500	142.031
25	62,5	1.563	31,3	48.828	508.626	9.418
20	42,5	850	41,3	35.063	127.943	131.861
	20	200	13,3	2.667	4.444	47.812
tot 170		8.825	26,8	254.115	1.889.527	520.633
mm	mm	mm²	mm	mm³	mm⁴	mm²

I 2.410.360 mm⁴ W_{mer} 83.708 mm³ W_{anker} 71.513 mm³

rPE/PP save plastics https://www.saveplastics.nl/materialeigenschappen/

	-5 °C	23 °C	65 °C	E	EI
Q0	1.739	890	262	890 N/mm²	2.145.220.266 Nmm²
					2,145 kNm²

Bedding

	EPDM	celrubber
b	80	1.000
h	mm	mm
A	80.000 mm²	
I	35 mm	
E	0,88 N/mm²	

https://www.ekl.nl/celrubber/vezels-celrubber/e 475 kg/m³ DX490 gesloten celrubber 1,33 kg/m' 380 kg/m³ DX489 gesloten celrubber

k 2.011 kN/m/m' N/mm/m'

ε	0%	25%	50%
E	0,88	1,28	

ε	0%	25%	50%
E	0,56	0,65	

Bulgligger op bedding bij schempen

n(4EI/k)^0,25

16,6 kN	druklengte L	0,80 m	b	0,15 m	schempshuidsterkte
	R-gem	20,7 kN/m'		138 kN/m²	200 kN/m²
	R-piek	35,2 kN/m'		235 kN/m²	
	a	0,0175 m			

Reactie verdeling bij aanvaren

Reactie celrubber bij aanliggen

ε	50% rek
σ	0,64 N/mm²
b	80 mm
R	51,2 kN/m = N/mm

Bij aanvaren 2 wrijfgordingen binnen h = 1,0 m			wrijving	
R-rubber	25,6 kN	over b = 0,5 m	-0,71	-18,2 kN
R-rubber	16,6 kN	naast b = 0,5 m	-0,71	-11,8 kN
R-plastic	82,8 kN	door aanliggen	-0,31	-25,3 kN
F-aanvaren	125 kN		0,46	58,0 kN
				2,6 kN

Stuik save-plastics zijkanten - controle bij aanvaren

Bij excentrisch aanvaren 2 wrijfgordingen

F	b	h	A	σ		f_{krip} 10% rek	2% rek
82,8	45	500	22.500	3,7	k	13,4 Q3	3,0
kN	mm	mm	mm²	N/mm²		N/mm²	
				1,4%		5,1%	1,1% el
						4,9%	0,9% pl?

Buiging save-plastics front - controle bij aanvaren

Bij aanvaren 2 wrijfgordingen binnen h = 1,0 m

F	L	I	q	M	b	h	W	σ		f_{krip}	
99	0,13	0,105	764,615	0,81	500	45	168.750	4,8	k	6,3 Q3	65 °C
kN	m	m	kN/m'	kNm	mm	mm	mm³	N/mm²		15,2 N/mm²	23 °C

Moment in bulgligger

					-5 °C	23 °C	65 °C
F	16,6 kN						
L	0,80 m						
M	1,16 kNm			f_{krip}			
σ	16,2 N/mm²	achterzijde	k	15,2	27,4	15,2	6,3 Q3
σ	-13,8 N/mm²	voorzijde		N/mm²	22,7	16,2	8,8
					83%	107%	140%

Plastische rekcapacitet 70% hoger volgens proeven bij 23°C.
Korte duur sterkte circa 30% hoger volgens proeven bij 23°C.
Volledige schaalproef bij 23°C laat zien dat balk voldoet.

Ankerij belasting

F	125,0 kN	aanvaarkracht
μ	0,46	max. wrijving schip-rPE/PP(glad) — Wrijvingsproeven
$F_{wrijving}$	57,5 kN	
arm hori.	0,0625 m	balkdikte minus indrukking
$M_{wrijving}$	3,59 kNm	
	0,13 m	hoogte voorzijde balk (minus 20 mm vellingkanten)
arm verti.	0,02 m	t.o.v. balkmidden
$M_{excentrisch}$	2,71 kNm	
arm	0,13 m	h.o.h. ankers
F_{trek}	-62,5 kN/ankerij door centrische aanvaarkracht	
F_{trek}	20,8 kN/ankerij door excentriciteit aanvaarkracht	
F_{trek}	27,6 kN/ankerij door wrijving aanvaarkracht	
	-14,0	geen trek op de ankers door aanvaren
F_v	57,5 kN	verticale belasting door scheepswrijving
μ	0,46	gewogen minimum wrijving beton-2 materialen — Wrijvingsproeven
F_h	57,5 kN	opneembaar zonder ankers — geen afschuiving op de ankers door aanvaren

Toelichting

De lengte waarbij tegendruk ontstaat bij een puntlast op een drukbedding bedraagt:

$L = \pi(4EI/k)^{0,25}$ [m] waarbij:

EI [kNm^2] de buigstijfheid van de ligger (kunststof) is

k [kN/m^2] de veerstijfheid van de bedding[k] (rubber) is

Met een wrijfstrookhoogte (=liggerbreedte = beddingbreedte) van 0,15 m bedragen de contactdrukken tussen kunststof ligger en rubberen bedding:

$p_{gem} = F/(L \cdot 0{,}15m)$ en $p_{max} = 1{,}7 \cdot p_{gem}$

Met een maximale scheepshuiddruk van 200 kN/m^2 kan voor een schampstoot van 15 kN worden afgeleid: L > 0,85 m. Daarbij is de verhouding tussen stijfheden van ligger en bedding dus van belang.

De indrukking bedraagt dan:

p_{max}/k

Deze is afgestemd op de maximale indrukking van 0,0175 m.

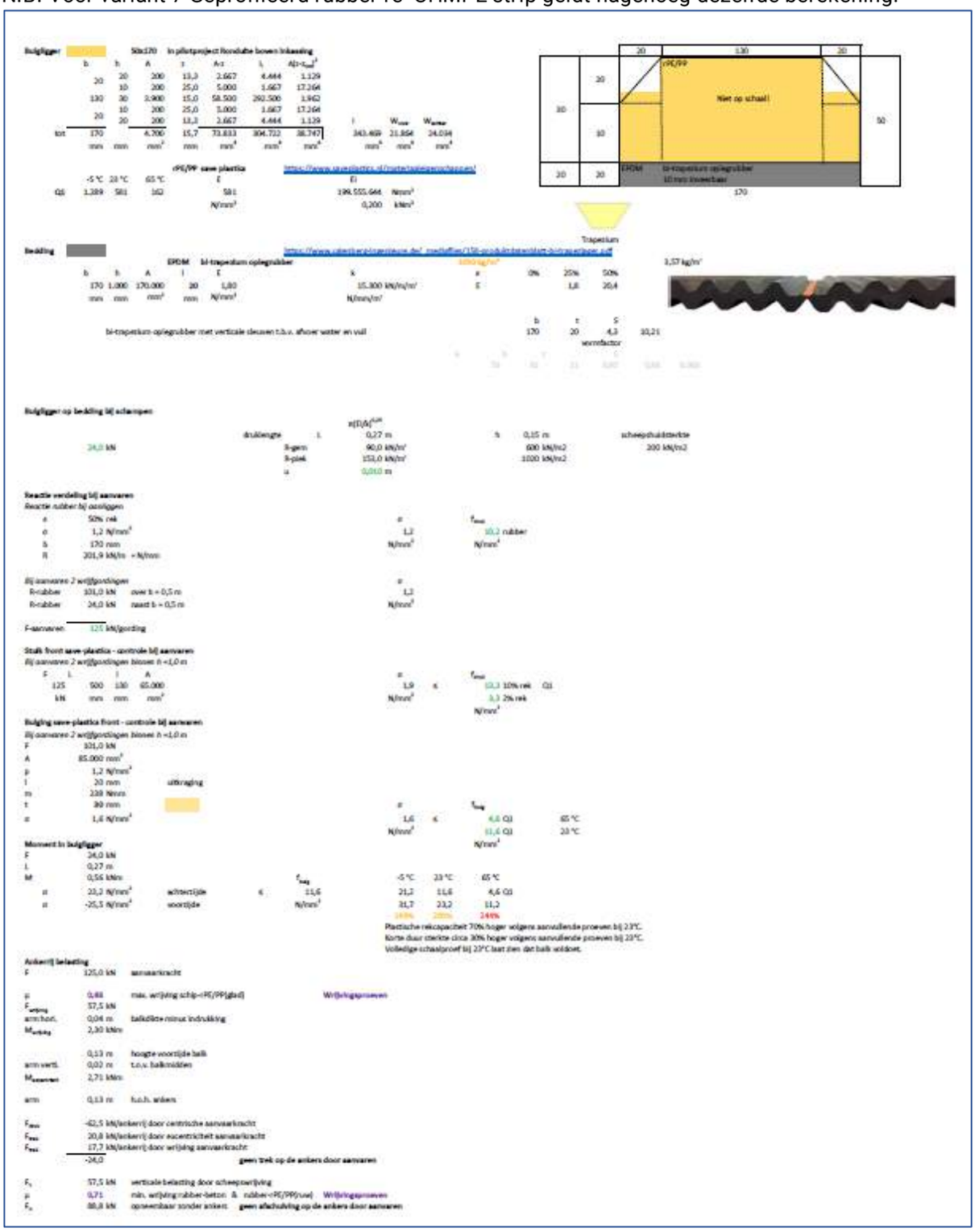
Daarbij volgt een opneembare energie van ½ · 15 kN · 0,0175 m = 0,13 kNm

Ofwel scheepstoten van schepen tot 10 ton onder een hoek van 5°.

[k] De veerstijfheid van de bedding kan worden bepaald met $k = EA/l = E_{rubber} \cdot 0{,}15m/d_{rubber}$
De eenheid kN/m^2 wil hier zeggen: "kracht per meter indrukking, per strekkende meter".

Variant 6 - Geprofileerd rubber Re-PE/PP strip

N.B. Voor variant 7 Geprofileerd rubber re-UHMPE strip geldt nagenoeg dezelfde berekening.



Bulgligger Stb170 In pilotproject Rondube boven inkassing

	b	h	A	z	A·z	I	A(h-z_tot)²
	20	20	200	13,3	2.667	4.444	1.129
		10	200	25,0	5.000	1.667	17.264
	130	30	3.900	15,0	58.500	292.500	1.962
		10	200	25,0	5.000	1.667	17.264
	20	20	200	13,3	2.667	4.444	1.129
tot	170		4.700	15,7	73.833	304.722	38.747
	mm	mm	mm²	mm	mm³	mm⁴	mm⁴

I = 343.469 mm⁴; W_{max} = 21.864 mm³; W_{min} = 24.034 mm³

rPE/PP save plastics https://www.saveplastics.nl/materialeigenschappen/

	-5 °C	23 °C	65 °C	E	EI
QS	1.289	581	162	581 N/mm²	199.555.644 Nmm²
					0,200 kNm²

Bedding https://www.rubberprofielenonline.de/_medialibrary/150-profielbrochures-bi-trapezium.pdf

EPDM bi-trapezium oplegrubber 1000 kg/m³

	b	h	A	l	E	k	ε	0%	25%	50%
	170	1.000	170.000	20	1,80	15.300 kN/m/m²	E		1,8	20,4
	mm	mm	mm²	mm	N/mm²	N/mm/m²				

1,57 kg/m'

bi-trapezium oplegrubber met verticale deuven t.b.v. afvoer water en vuil

b	t	S	
120	20	4,3	10,21

vormfactor

Bulgligger op bedding bij schampen

$\kappa(EI/k)^{0,25}$

24,0 kN	drukkenge	L	0,27 m	h	0,15 m
		B-gem	90,0 kN/m²		600 kN/m2
		B-piek	153,0 kN/m²		1000 kN/m2
		u	0,010 m		

scheepshuidsterkte 200 kN/m2

Reactie verdeling bij aanvaren

Reactie rubber bij oeslagen

ε	50% rek	σ	f_{max}	
σ	1,2 N/mm²	1,2 N/mm²	10,2 N/mm²	rubber
b	170 mm			
R	201,9 kN/m = N/mm			

Bij aanvaren 2 wrijfgordingen

			σ
R-rubber	101,0 kN	over b = 0,5 m	1,1 N/mm²
R-rubber	24,0 kN	naast b = 0,5 m	

F-aanvaren 125 kN/gording

Stalk front save-plastics - controle bij aanvaren

Bij aanvaren 2 wrijfgordingen binnen h <1,0 m

F	L	I	A	σ		f_{max}	
125	500	130	65.000	1,9	x	10,3 10% rek	QS
kN	mm	mm	mm²	N/mm²		3,3 2% rek	
						N/mm²	

Bulging save-plastics front - controle bij aanvaren

Bij aanvaren 2 wrijfgordingen binnen h <1,0 m

			σ		f_{bug}	
F	101,0 kN					
A	65.000 mm²					
p	1,2 N/mm²					
l	20 mm	uitbraging				
m	238 Nmm					
t	30 mm					
σ	1,6 N/mm²		1,6 N/mm²	x	4,6 QS	65 °C
					11,6 QS	23 °C
					N/mm²	

Moment in bulgligger

F	24,0 kN						
L	0,27 m						
M	0,56 kNm			f_{bug}	-5 °C	23 °C	65 °C
σ	23,2 N/mm²	achterzijde	x	11,6	21,2	11,6	4,6 QS
σ	-25,5 N/mm²	voorzijde		N/mm²	31,7	23,2	11,2
					149%	200%	244%

Plastische reserve 70% hoger volgens aanvullende proeven bij 23°C.
Korte duur sterkte circa 30% hoger volgens aanvullende proeven bij 23°C.
Volledige schaalproef bij 23°C laat zien dat balk voldoet.

Ankerij belasting

F	125,0 kN	aanvaarkracht
μ	0,88	max. wrijving schip-rPE/PP(glad) — Wrijvingsproeven
$F_{wrijving}$	57,5 kN	
arm hor.	0,04 m	balkdiepte minus indrukking
$M_{wrijving}$	2,30 kNm	
	0,13 m	hoogte voorzijde balk
arm vert.	0,02 m	t.o.v. balkmidden
$M_{aanvaren}$	2,71 kNm	
arm	0,13 m	t.o.h. ankers
F_{max}	-62,5 kN/ankerij door centrische aanvaarkracht	
F_{max}	20,8 kN/ankerij door excentriciteit aanvaarkracht	
F_{max}	17,7 kN/ankerij door wrijving aanvaarkracht	
	-24,0	geen trek op de ankers door aanvaren
F_v	57,5 kN	verticale belasting door scheepswijving
μ	0,71	min. wrijving rubber-beton & rubber-rPE/PP(ruw) — Wrijvingsproeven
F_h	88,8 kN	opneembaar zonder ankers — geen afschuiving op de ankers door aanvaren

Toelichting

De lengte waarbij tegendruk ontstaat bij een puntlast op een drukbedding bedraagt:

$L = \pi(4EI/k)^{0,25}$ [m] waarbij:

EI [kNm^2] de buigstijfheid van de ligger (kunststof) is

k [kN/m^2] de veerstijfheid van de bedding[i] (rubber) is

Met een wrijfstrookhoogte (=liggerbreedte = beddingbreedte) van 0,15 m bedragen de contactdrukken tussen kunststof ligger en rubberen bedding:

$p_{gem} = F/(L \cdot 0,15m)$ en $p_{max} = 1,7 \cdot p_{gem}$

Met een scheepshuiddruk van 1.000 kN/m^2 zou voor een schampstoot van 25 kN kunnen worden afgeleid: L > 0,28 m.

De indrukking bedraagt dan:

p_{max}/k

Deze is afgestemd op de maximale indrukking van 0,010 m.

Daarbij volgt een opneembare energie van ½ · 25 kN · 0,01 m = 0,13 kNm

Bij een maximale scheepshuiddruk 200 kN/m^2, geldt dat zowel kracht als verplaatsing tot 20% gereduceerd worden.

Ofwel scheepstoten van schepen tot 10 ton onder een hoek van 1°.

Bijlage G - Slijtgevoeligheid kunststoffen en hout

Figuur G-1 met slijtfactor-eisen met betrekking tot kunststoffen is overgenomen uit Eisen Kunststoffen van RWS. (Ros, 2001). Deze figuur is gebaseerd op TNO onderzoek naar kunststoffen en hout (Honselaar, 1993).

Bouwdienst Rijkswaterstaat
Rijkswaterstaat Steunpunt Opdrachtgeverschap (R.S.O.)

titel: **EISEN KUNSTSTOFFEN**
Technische leveringsvoorwaarden voor overwegend glijdend belaste kunststoffen in de waterbouw en de werktuigbouw waaronder regeneraat- en recycling kunststoffen

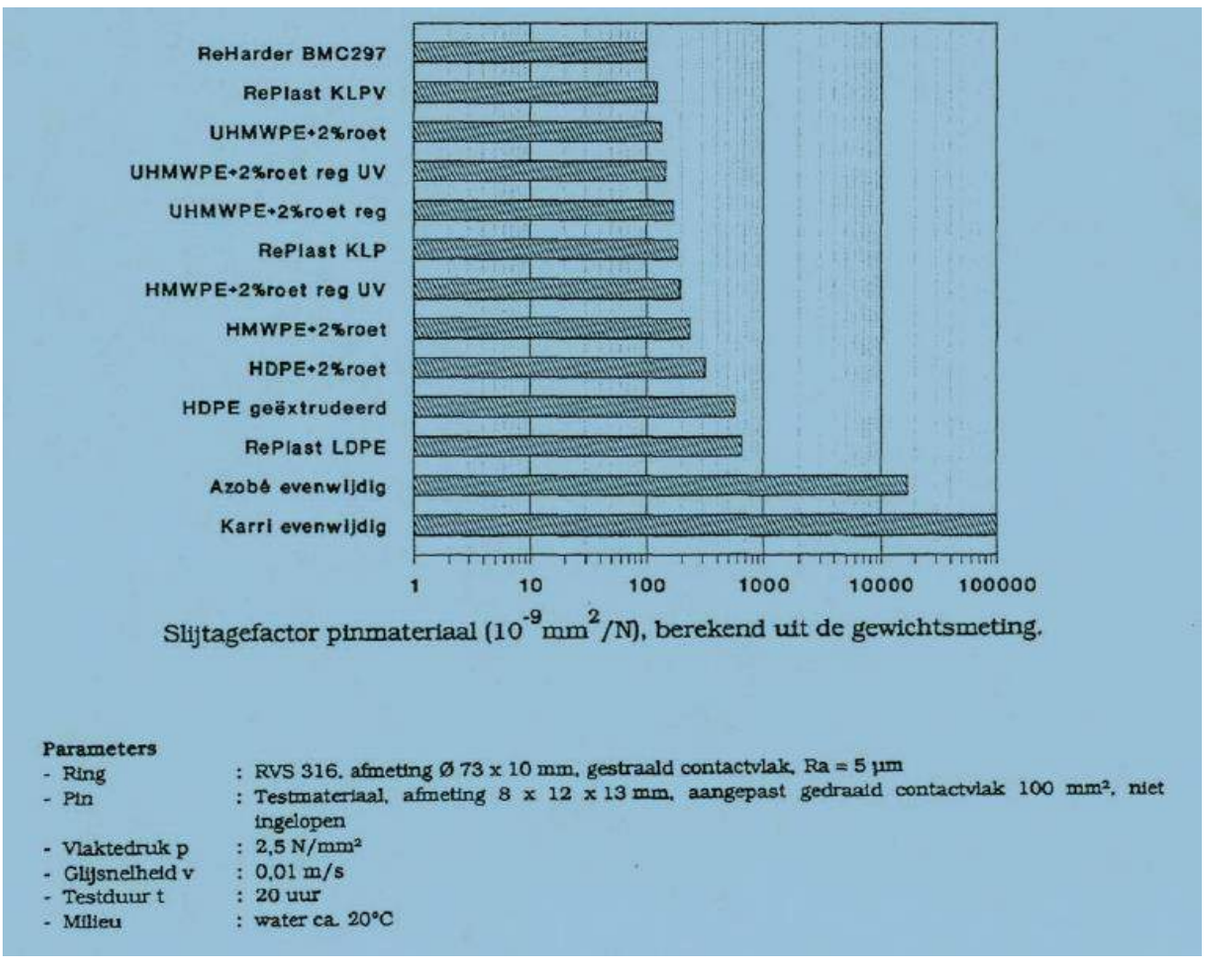
docu
pagin
uitgav

BIJLAGE 1 KEURINGSTABEL: Toepassingen, keuringen en te garander
(Niet alle te garanderen eigenschappen zijn hier genoemd).

(1)	(2)	(3)		(4)
SLIJTINTENSITEIT (1...5) en TOEPASSINGEN **1 = jaarlijks** **2 = wekelijks** **3 = dagelijks** **4 = ieder uur** **5 = ieder kwartier**	**KUNSTSTOF SOORT**	**STANDAARD-KEURINGEN[2]**		**AANVUL**
		Zand-slurry-waarde[4] (%)	**Relatieve rek[5] bij -15 °C (%)**	**Slijt-factor[6] 20-150 °C (k) mm²/N**
Produkten die tijdens montage of gebruik in zonlicht kunnen ko				
		<	>	< * 10^{-9}
1: Wrijfgording, wrijfstijl, aanslag, steigerplank, beschoeiing	Re-PE[9]	500	2	1000
2: Wrijfgording, wrijfstijl, aanslag, stootrand	Re-HDPE 250 uv	550	2	1200
3: Wrijfgording, aanslag, stootrand	Re-HMPE 500 uv	450	n.v.t.	800
4: Glijgeleiding, glijafdichting, kabelgeleiding	Re-UHMPE 1000 uv	140	n.v.t.	12
5: Hydrogeleiding, glijgeleiding, glijafdichting	UHMPE 1000 uv	115	n.v.t.	8

Figuur G-1 Slijt-eisen van kunststoffen door RVS met ruwheid Ra = 0,5 μm in ca. 20°C watermilieu.

Figuur G-2 met gemeten slijtagefactoren van kunststoffen en hout is overgenomen van TNO (Honselaar, 1993).



Figuur G-2 Slijten van kunststoffen door RVS met ruwheid Ra = 5 μm in ca. 20°C watermilieu.

Slijtfactor bij Ra =	0,5 µm	5 µm	10 µm	verhouding	Leverancier
- UHMPE uv	2 eis: <8	135	235	1,0·UHMPE uv	Röchling
- re-UHMPE uv	3 eis: <12	160	225	1,1·	Kreunen
- Re-PE/PP (KLP)	20 eis: <1.000	190	615	2,0·	Lankhorst
- Re-PE "LDPE"	30 eis: <1.000	650	1.900	10,0·	Lankhorst
- Azobé	80	17.000	58000	200·	De Groot
- Karri	120	130.000	260.000	1000·	De Groot

X 10 -9 mm^2/N

Bij continue belaste PE brugopleggingen wordt geadviseerd om minimaal 10 mm als slijtdikte aan te houden volgens NEN6786 Toelichting Art 10.10. Voor niet vaak belaste wrijfstroken is hiervoor 1,0 mm aangehouden. Daarmee volgt voor de diverse materialen na rato:

- UHMPE uv	0,10 mm	1,0·UHMPE uv
- re-UHMPE uv	0,11 mm	1,1·
- Re-PE/PP	0,20 mm	2,0·
- Re-PE	1,00 mm	10,0·
- Azobé	20,0 mm	200·
- Karri	100 mm	1000·

Bijlage H - Wrijvingsonderzoek kunststoffen en hout

Wrijvingscoëfficiënt scheepsbelasting uit literatuur

De aan te houden wrijvingscoëfficiënt bij aanvaringen bedraagt μ = 0,4 (NEN-EN1991-1-7/NB, 2011), Rijkswaterstaat verzwaart dit tot μ = 0,5 (ROK, 2017). Dit betreft de wrijvingsbelasting van een schip op de betonnen ondersteuningsconstructie, die al dan niet is voorzien van (houten) wrijfstroken. Het betreft de karakteristieke waarde van de maximale wrijvingsbelasting zonder belastingsfactor, die bij calamiteiten zoals een aanvaring 1,0 bedraagt. Van normen en richtlijnen kan worden afgeweken op basis van aanvullend onderzoek.

Wrijvingscoëfficiënt hout uit literatuur

De wrijvingscoëfficiënt tussen hout en beton bedraagt 0,4 in zowel natte als droge omstandigheden en zowel loodrecht op als evenwijdig aan de vezelrichting (EN1995-2, 2005). Dit betreft de karakteristieke waarde van de minimale wrijvingscapaciteit zonder materiaalfactor, die bij calamiteiten zoals een aanvaring 1,0 bedraagt.

Met hout op beton mag dus niet verondersteld worden dat de volledige belasting door scheepswrijving doorgegeven kan worden door wrijving naar het beton. Dan nemen verbindingsmiddelen een deel van de belasting voor hun rekening.

Wrijvingscoëfficiënten UHMPE uit literatuur

Wrijving tussen UHMPE in water is reeds onderzocht door Rijkswaterstaat voor belasting bij glijgeleidingen (RWS Ros D., 2003). De resultaten en de evaluatie zijn in Tabel H1 samengevat.

strookzijde	scheepszijde	omgeving	Ruwheid Ra (µm)	$f_{dyn,kar}$
UHMPE	Azobé	nat	0,8	0,17
UHMPE	staal ongeroest	nat	2,5	0,20
UHMPE	staal geroest	nat	6,3	0,22

strookzijde	wandzijde	omgeving	Ruwheid Ra (µm)	$f_{stat,kar}$
UHMPE	beton glad	nat	3,2	0,23
UHMPE	beton ruw	nat	10,0	0,27

Tabel H1 Wrijvingscoëfficiënt UHMPE (karakteristieke waarde maximum)

Wrijfstroken van re-UHMPE worden in de markt gemaakt uit schoon bedrijfsafval (Fa. Altena), waarvoor vergelijkbare wrijving mag worden verwacht als voor virgin UHMPE. Met (re-)UHMPE op ruw beton lijkt verondersteld te mogen worden dat de volledige belasting door scheepswrijving doorgegeven kan worden door wrijving naar het beton. Nader onderzoek met bovengrens en ondergrens voor re-UHMPE zoals verderop voor Re-PE/PP is gepresenteerd wordt aanbevolen.

Wrijvingscoëfficiënten Re-PE/PP uit experimenteel onderzoek

Met het wandmateriaal beton, de strookmaterialen EPDM & Re-PE/PP (SavePlastics), en de scheepshuid-materialen hout, staal & GVK zijn wrijvingsproeven verricht in zowel droge als natte omstandigheden. De resultaten en de evaluatie zijn hieronder samengevat in tabellen D2 t/m D6. Hieruit blijkt dat:

- vergeleken met Re-PE/PP blijkt dat UHMPE ruwweg de helft aan wrijving ondervind:
    - aan de belastende zijde geeft geroest staal de grootste dynamische/glijdende wrijving, deze is met 0,22 voor UHMPE (zie Tabel H1) ruwweg de helft ten opzichte van 0,46 voor Re-PE/PP (zie Tabel H2),
    - aan de dragende zijde geeft nat beton de laagste statische wrijving, deze is met 0,23 voor UHMPE (zie Tabel H1) eveneens ruwweg de helft ten opzichte van 0,46 voor Re-PE/PP (bovengrens 0,381 + 0,075 = 0,457, i.p.v. ondergrens 0,381 - 0,075 = 0,306 zoals vermeld in Tabel H5);
- rubber over de volledige interface tussen Re-PE/PP voorzijde en de betonwand (Variant 6) kan zorgdragen voor de afdracht van scheepswrijving naar het beton (zie Tabel D4);
- in de situatie met EPDM celrubber en gedeeltelijk aanliggen van Re-PE/PP (Variant 5) is op de laatste pagina van deze bijlage afgeleid dat de wrijving net worden opgenomen zonder verbindingsmiddelen: deels via ingedrukt celrubber met hoge wrijving en deels rechtstreeks tegen de betonwand met lage wrijving;
- met Re-PE/PP tegen de betonwand (Variant 4) zijn (evenals bij hout) verbindingsmiddelen nodig om een deel van de scheepswrijving naar het beton af te dragen (zie Tabel D6).

strookzijde	scheepszijde	omgeving	$f_{dyn,gem}$	$f_{dyn,kar}$	$f_{dyn,des}$
Re-PE/PP	kaal hout	droog	0,229	0,281	0,326
		nat	0,386	0,447	0,500
	gelakt hout	droog	0,296	0,348	0,394
		nat	0,320	0,376	0,424
	geroest staal	droog	0,380	0,422	0,459
		nat	0,402	0,464	0,518
	gecoat GVK (UP)	droog	0,227	0,286	0,337
		nat	0,255	0,297	0,334
Scheepszijde met hoogste wrijving:		maximum	0,402	0,464	0,518

Tabel H2 Resultaten gemeten wrijvingscoëfficiënt scheepszijde (belastend; bovengrens)

De karakteristieke waarde van de belastende wrijvingscoëfficiënt van 0,46 bij een aanvaring (calamiteit) is overeenkomstig de voorgeschreven waarde van 0,40 (NEN-EN1991-1-7/NB, 2011) en de verzwaring van RWS naar 0,50 (ROK, 2017).

strookzijde	wandzijde	omgeving	$f_{stat,gem}$	$f_{stat,kar}$	$f_{stat,des}$
Re-PE/PP	EPDM rubber	droog	0,790	0,746	0,708
		nat	0,905	0,851	0,803
EPDM rubber	ruw beton	droog	0,792	0,751	0,715
		nat	0,759	0,711	0,669
Wandzijde met laagste wrijving:		minimum	0,759	0,711	0,669

Tabel H3 Resultaten gemeten wrijvingscoëfficiënt wandzijde (dragend; ondergrens) - Re-PE/PP via EPDM rubber naar betonwand

f_{dyn}		f_{stat}		UC	op basis van		grenstoestand
0,402	/	0,759	=	53%	gemiddelde/mean waarde	(50%)	Bruikbaarheid
0,464	/	0,711	=	65%	karakteristieke waarde	(5%)	Calamiteit
0,518	/	0,669	=	77%	ontwerp/design waarde	(≈0,1%)	Uiterste

Tabel H4 Unity Check (UC) evaluatie opnemen scheepswrijving door wandwrijving - Re-PE/PP via EPDM rubber naar betonwand

strookzijde	wandzijde	omgeving	$f_{stat,gem}$	$f_{stat,kar}$	$f_{stat,des}$
Re-PE/PP	ruw beton	droog	0,446	0,337	0,242
		nat	0,381	0,306	0,240
Wandzijde met laagste wrijving:		**minimum**	0,381	0,306	0,240

Tabel H5 Resultaten gemeten wrijvingscoëfficiënt wandzijde (dragend; ondergrens) - Re-PE/PP rechtstreeks naar betonwand

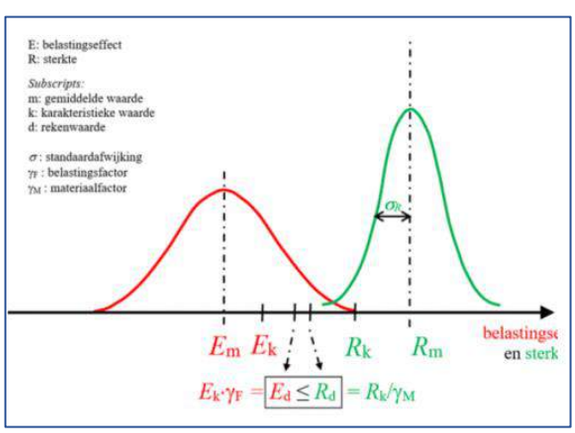
f_{dyn}		f_{stat}		UC	op basis van		grenstoestand
0,402	/	0,381	=	105%	gemiddelde/mean waarde	(50%)	Bruikbaarheid
0,464	/	0,306	=	151%	karakteristieke waarde	(5%)	Calamiteit
0,518	/	0,240	=	216%	ontwerp/design waarde	(≈0,1%)	Uiterste

Tabel H6 Unity Check (UC) evaluatie opnemen scheepswrijving door wandwrijving - Re-PE/PP rechtstreeks naar betonwand

De statistische waarden van de wrijvingscoëfficiënt in Tabellen H2, H3 en H5 zijn bepaald met n = 10 proeven en afgeleid met behulp van EN1990 tabellen D1 & D2.

De verhouding tussen ontwerpwaarde en karakteristieke waarde kan gezien worden als de:
- belastingfactor aan de belastende zijde, deze bedraagt 1,1;
- materiaalfactor aan de dragende zijde, deze bedraagt 1,1 via rubber en 1,3 rechtstreeks.

Voor deze factoren wordt bij calamiteiten zoals een aanvaring 1,0 aangehouden in de Eurocode.



Voor foto's van het experimentele onderzoek zie volgende twee pagina's.

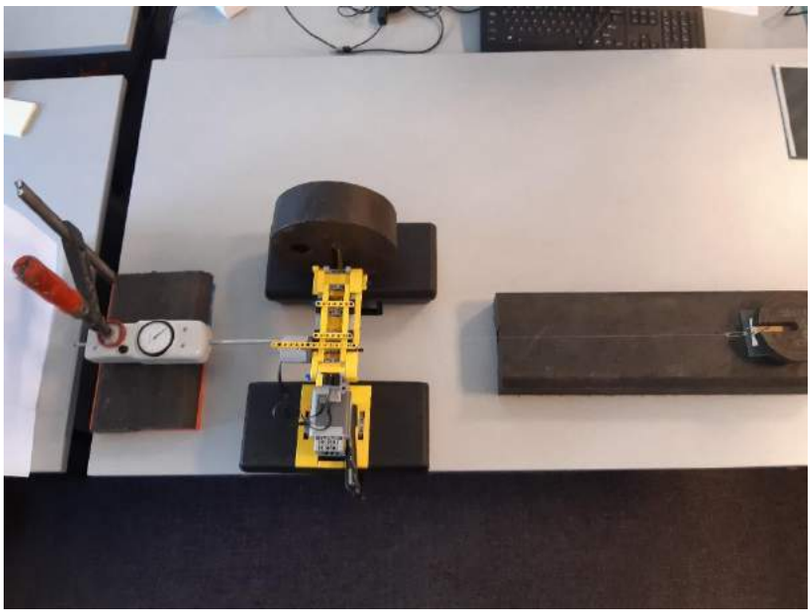


Foto H1 Overzicht van de meetopstelling
Links meetklokje, midden trekeenheid, rechts wrijfbaan.

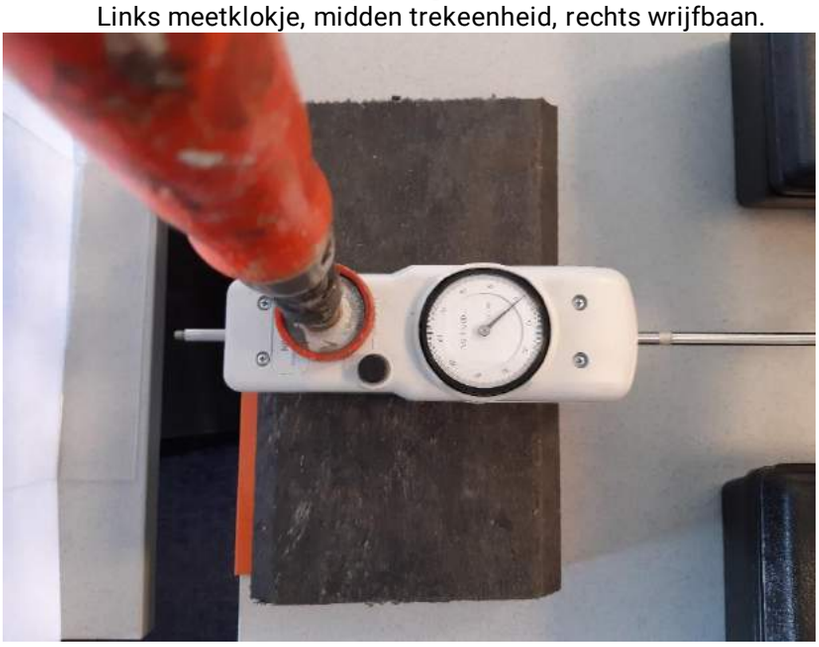


Foto H2 Krachtmeetklokje voor variabele kracht en voor maximum kracht
Maximum gebruikt bij bepalen statische wrijving.

Foto H3 Trekbrug met liertrommel en motor van technisch Lego.
Trekdraad gaat haaks door oog aan krachtmeetklokje.

Foto H4 GVK wrijfobject + 1 kg ballast op Re-PE/PP wrijfbaan.
Wrijfobject voorzien van aangelijmd hout met haakje.

Foto H5 Overzicht van de glijobjecten.
Van linksboven naar rechtsonder:
beton, ongelakt hout, gelakt hout, GVK, geroest staal,
celrubber, waaronder geprofileerd rubber waarnaast Re-PE/PP (SavePlastics)

Wrijving bij Variant 5

Bij Variant 5 verloopt de wrijving deels via EPDM celrubber en deels rechtstreek via aanliggen van Re-PE/PP. Daarvoor geldt onderstaande gemengde beschouwing:

F = 125 kN/wrijfstrook = 45kN via EPDM indrukking + 80kN via aanliggen Re-PE/PP over 0,5m.
Wrijving $\mu \cdot F$ per wrijfstrook (met afgeronde wrijvingscoëfficiënten):

- belastend: +0,45 x 125 kN = +56 kN
- dragend: -0,30 x 80 kN = -24 kN bij vasthouden door ankers
- dragend: -0,70 x 45 kN + -0,30 x 80 kN = -56 kN zonder ankers

Na bezwijken van de lokaal aanliggende bouten (op afschuiving of stuik) kan wrijving bij aanvaren alsnog worden overgedragen. Lokaal bezwijken is toelaatbaar bij een calamiteit.

Bijlage I - Rubber selectie

Bestandheid tegen UV, oxidatie en weer

Table 3.8: Comparative Vulcanizate Properties of NR and Other SR's*

Properties	Type of Rubber																
	NR	IR	SBR	BR	NBR	ACM	CR	ECO	CSM	FKM	(X)IIRs	EPDM	EAM	PVMQ	TM	SBS	AU
Tensile strength, gum	1	2	5	6	5	6	3	4	5	5	4	5	5	6	6	3	1
Tensile strength, with reinforcing fillers	1	2	2	4	2	3	2	3	3	3	3	3	3	4	4	1	1
Maximum elongation	1	1	2	3	2	4	2	3	3	3	2	3	3	4	4	1	2
Abrasion resistance with reinforcing fillers	4	4	3	1	2	4	3	3	3	4	4	3	2	5	5	5	1
Tear resistance	2	2	3	5	3	3	2	3	3	4	3	3	3	5	4	3	1
Rebound	2	2	3	1	3	4	3	3	4	5	6	3	3	3	5	4	3
Low temperature flexibility	2	2	3	2	3	5	3	3	5	5	2	2	4	1	4	2	4
Heat resistance	5	5	4	4	3	2	3	2	3	1	3	2	2	1	5	6	5
Oxidative resistance	4	4	3	2	3	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	5	1
UV resistance	4	4	3	3	3	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	5	1
Weather and ozone resistance	4	4	4	3	3	2	2	1	2	1	2	1	1	1	1	5	1
Oil resistance	6	6	5	6	1	1	2	1	2	1	6	4	4	1	1	6	1
Motor fuel resistance	6	6	6	6	2	3	3	1	2	1	6	5	5	6	1	6	1
Acid resistance	3	3	3	3	4	5	2	2	2	1	2	1	3	5	6	2	6
Alkali resistance	3	3	3	3	4	5	2	2	2	4	2	1	3	5	6	2	6
Flame resistance	6	6	6	6	6	6	2	2	3	3	6	6	6	6	6	6	6
Electrical resistivity	1	1	2	2	5	5	4	4	4	4	2	2	3	1	4	2	4
Gas permeation	5	5	4	4	2	3	3	1	3	3	1	4	2	6	1	4	1
Compression set − 40 °C	3	3	3	3	3	5	5	5	6	6	5	4	6	3	5	4	5
+ 20 °C	2	2	3	3	2	3	3	2	5	4	4	3	5	2	4	3	3
+100 °C	6	6	5	5	3	5	4	2	6	3	2	2	1	1	4	6	5

* 1 = excellent; 6 = insufficient.

1 excellent
2
3
4 medium
5
6 insufficient

164 3 Synthetic Rubber

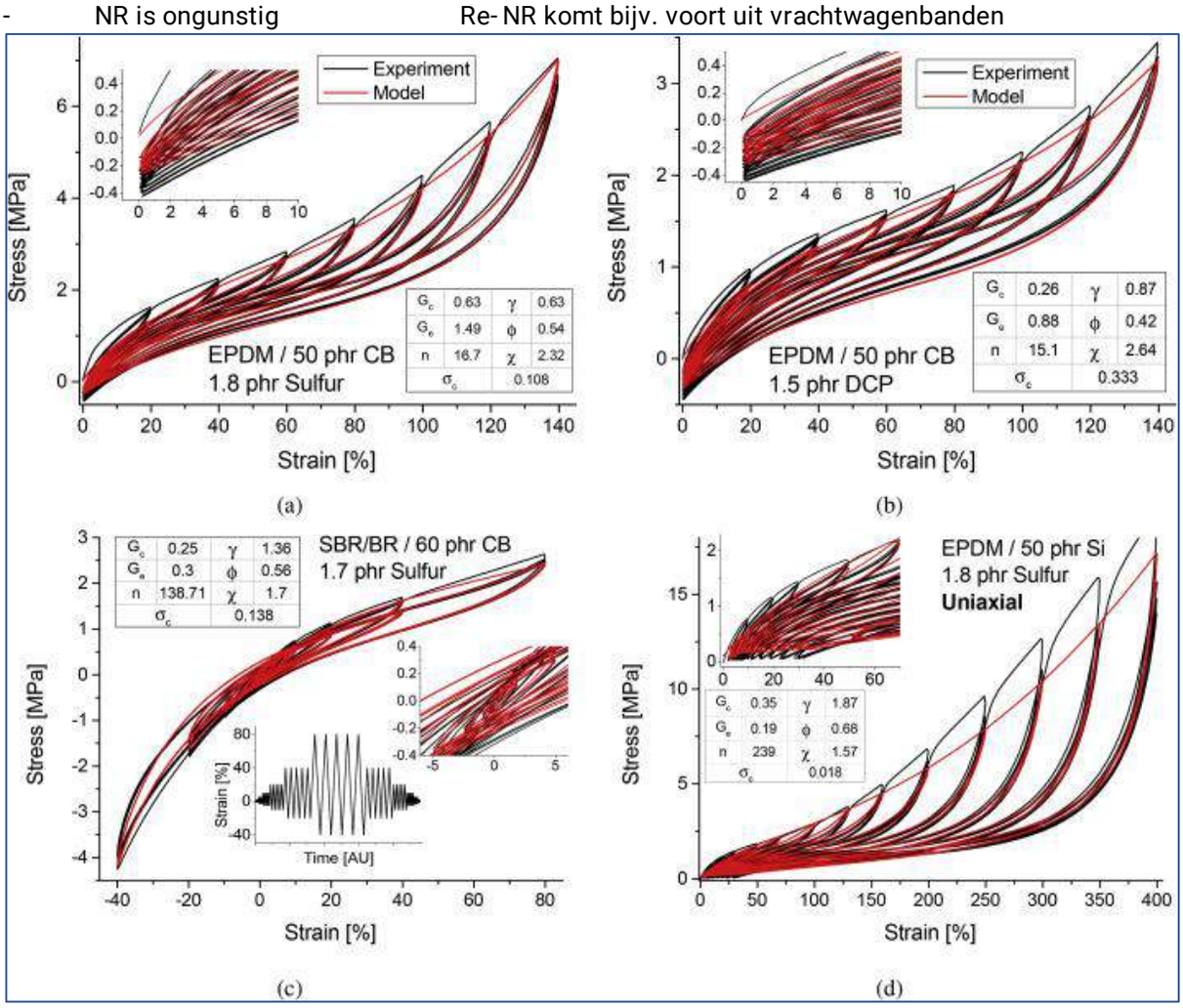
Figuur I-1, Degradatie vergelijking van diverse rubbersoorten.

Uit Figuur I-1 kan worden afgeleid dat EPDM zeer goed bestand en SBR matig bestand is tegen degradatie omstandigheden UV, oxidatie, ozon, weer, koude, warmte, zuur en alkali die bij een waterbouw omgeving kunnen spelen. Het is wel gevoelig voor vlammen en olie, dit zijn degradatie omstandigheden die niet of nauwelijks bij een waterbouwkundige toepassing (horen te) spelen.

Gedempte vering

Een gewenst kenmerk voor vering van het rubber is dat deze gedempt is. Immers als bij een niet-gedempte veer de indrukking plotseling wordt weggenomen, zal de veer meer dan volledig terug willen veren en zodoende de ankers in het beton met een impact op trek belasten. Hier zijn de verankeringen niet geschikt voor (Altena). Materiaaldemping komt in een spanning-rek diagram tot uiting in de verschillende lijnen tussen belasten en ontlasten, wat ook wel de hysterese-lus wordt genoemd, zie tevens Figuur I-2. Voor de keuze van rubbertype betekent dit:

- EPDM is gunstig — Re-EPDM komt bijv. voort uit dakbedekking
- SBR/BR is middelgunstig — Re-SBR/BR komt bijv. voort uit personenautobanden
- NR is ongunstig — Re-NR komt bijv. voort uit vrachtwagenbanden



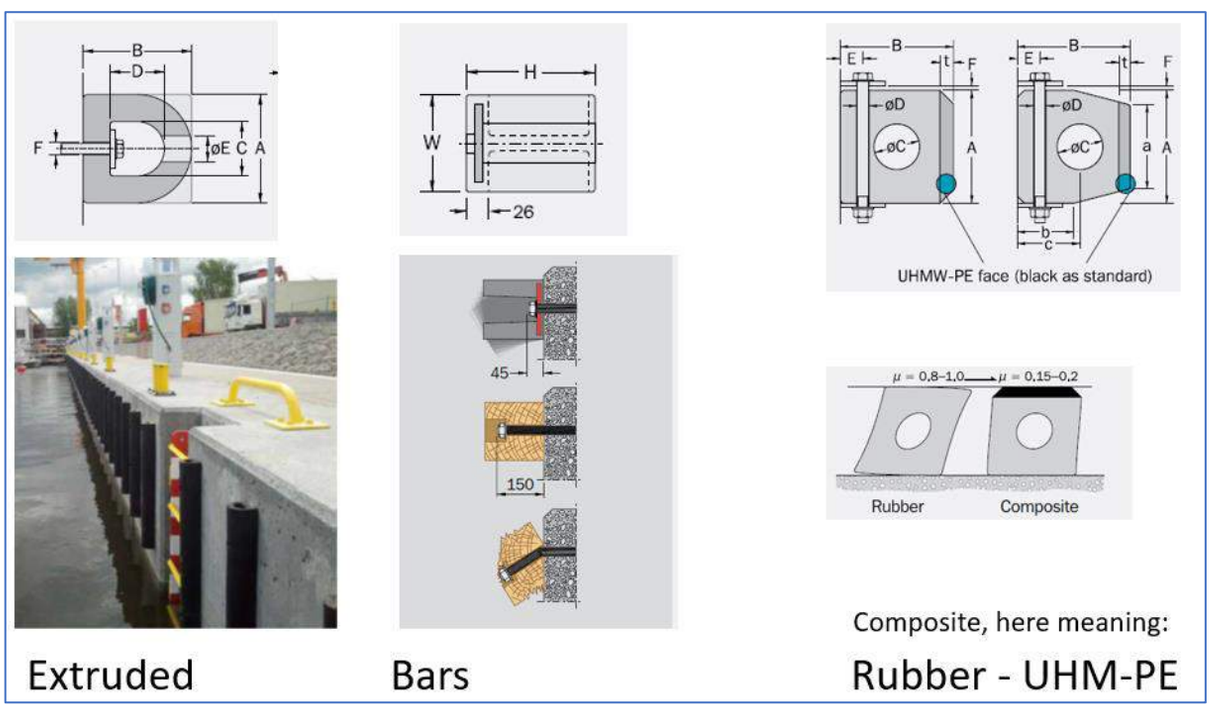
Figuur I-2, Spanning-rek diagram EPDM & SBR/BR rubber. (Plagge J, 2017).
Let op: alleen druk bij SBR/BR

Materiaaldemping treedt bij EPDM op trek, en maar zeer beperkt bij druk. Daarom is gekozen voor rubber dat niet op alleen op druk maar ook op buiging door uitwendige druk wordt belast, waarbij dus ook buigtrek optreed. Dit in de vorm van geprofileerd rubber of celrubber.
Ook ten aanzien van materiaaldemping geldt dat EPDM zeer geschikt en SBR matig geschikt is.

Bijlage J - Bestaande energie absorberende producten voor afmeren

In deze bijlage wordt een aantal bestaande flexibele fender producten getoond (zie Figuur L-1) voor afmeren van recreatievaart bij remmingwerken. Deze producten zijn op een rijtje gezet ter inspiratie voor de ontwikkelde flexibele wrijfstrook producten voor geleidewanden.
Wrijfstroken moeten overeenkomstige eigenschappen bezitten als fenders, echter wrijfstroken:

- moeten liefst compact zijn (kleine overspanning)
- moeten 250 kN / (2·0,5m') door kunnen geven
- hoeven beperkt energie op te nemen
- worden niet vaak belast
- worden minder op verticale wrijving belast maar meer op horizontale wrijving.



Figuur J-1, Fenderproducten recreatievaart. (Trelleborg)

Opvallend is dat de fenderproducten (zie ook Figuren J-2 t/m J-4):

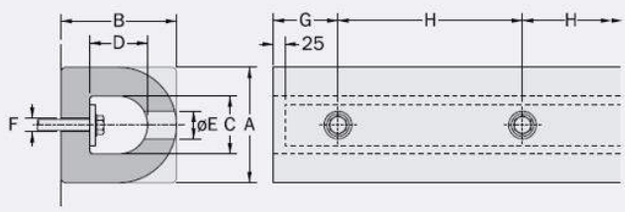
- allemaal van rubber zijn;
- profielen met sparing flexibeler zijn;
- veelal een veerweg van 50% hebben;
- allemaal vanaf een dikte van 150 mm de 250 kN/m' kunnen doorgeven;
- soms een aangelijmde / aan-gevulkaniseerde voorzijde van glad UHMPE kennen.

Opvallend is dat rubber een grote wrijving kent, en UHMPE een lage wrijving.

PERFORMANCE

FENDER SIZE	D		D	
	E	R	E	R
80	0.9	62	–	–
100	1.4	77	2.7	136
125	2.2	97	–	–
150	3.2	115	6.4	206
165	–	–	7.4	224
200	5.7	153	11.3	275
250	8.9	191	17.6	343
300	12.9	230	25.5	412
350	17.6	268	34.3	471
380	20.0	292	–	–
400	23.0	306	45.2	589
500	35.9	383	70.7	736

Values are per meter [Units: kNm, kN]

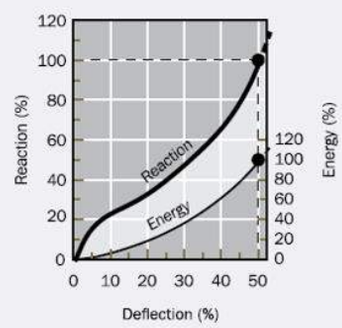


D SD-SERIES

A	B	øC	D	øE	øF	G	H	FLAT BAR	BOLT SIZE	WEIGHT
100	100	50	45	30	15	90-130	200-300	40 x 5	M12	9.9
150	150	70	65	40	20	110-150	250-300	50 x 8	M16	22.7
165	125	80	60	40	20	110-150	250-300	60 x 8	M16	20.3
200	150	90	65	50	25	130-180	300-400	70 x 10	M20	30.8

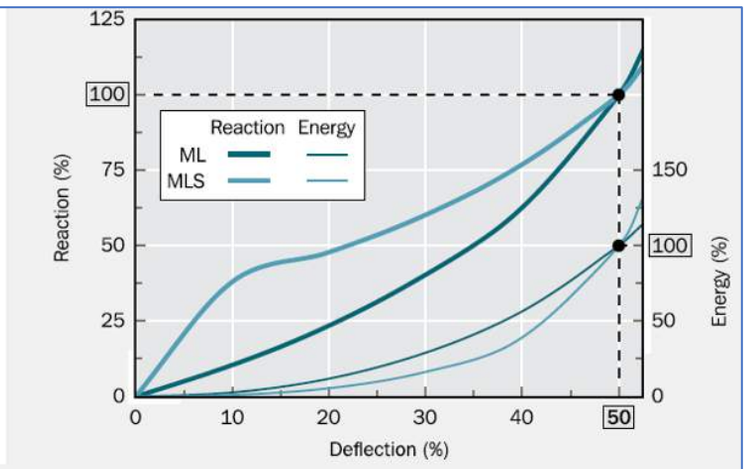
D DD-SERIES

A	B	øC	D	øE	øF	G	H	FLAT BAR	BOLT SIZE	WEIGHT
80	70	45	30	30	15	90-130	200-300	35 x 5	M12	4.8



Figuur J-2, Geëxtrudeerde fenderproducten (Trelleborg)

Geëxtrudeerde profielen kunnen vanaf een dikte van 150 mm 250 kN/m doorgeven.



Fender Bars

DIMENSIONS

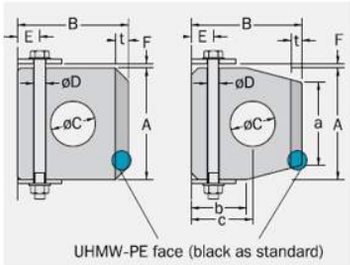
TYPE	W	H	L	A	B	ANCHORS	WEIGHT
ML	150	150	1000	250	500	2 x M24	38
MLS	200	300	1000	250	500	2 x M30	63

PERFORMANCE

E	R
16.7	638
23.0	355

Figuur J-3, Fender staven (Trelleborg)

Massieve staafprofielen kunnen vanaf een dikte van 150 mm 250 kN/m doorgeven, geschikt voor meer dan alleen recreactievaart.



PERFORMANCE

	CF-A[1]	
	E	R
100 x 100	4.0	222
150 x 150	10.5	312
165 x 125	10.9	373

	CF-C	
	E	R
80 x 80	1.6	76

CF-A SERIES **CF-B SERIES**

A	B	øC*	t	øD	E	F	G	H	FLAT BAR	BOLT SIZE	STD LENGTH	WEIGHT	
												CF-A	CF-B
100	100	30	20	15	25	10	90-130	200-300	50 x 6	M12	3000	10.3	11.1
150	150	65	20	20	30	12	110-150	250-350	60 x 8	M16	3000	21.5	27.0
165	125	65	20	20	35	15	110-150	250-350	60 x 8	M16	3000	19.2	24.8

CF-C SERIES **CF-D SERIES**

A	B	øC*	a	b	c	t	øD	E	F	G	H	FLAT BAR	BOLT SIZE	STD LENGTH	WEIGHT	
															CF-C	CF-D
80	80	42	60	40	44	10	15	25	6	90-130	200-300	45 x 6	M12	2000	5.4	7.0
100	100	45	74	50	56	10	15	25	8	90-130	200-300	45 x 6	M12	2000	8.4	11.0

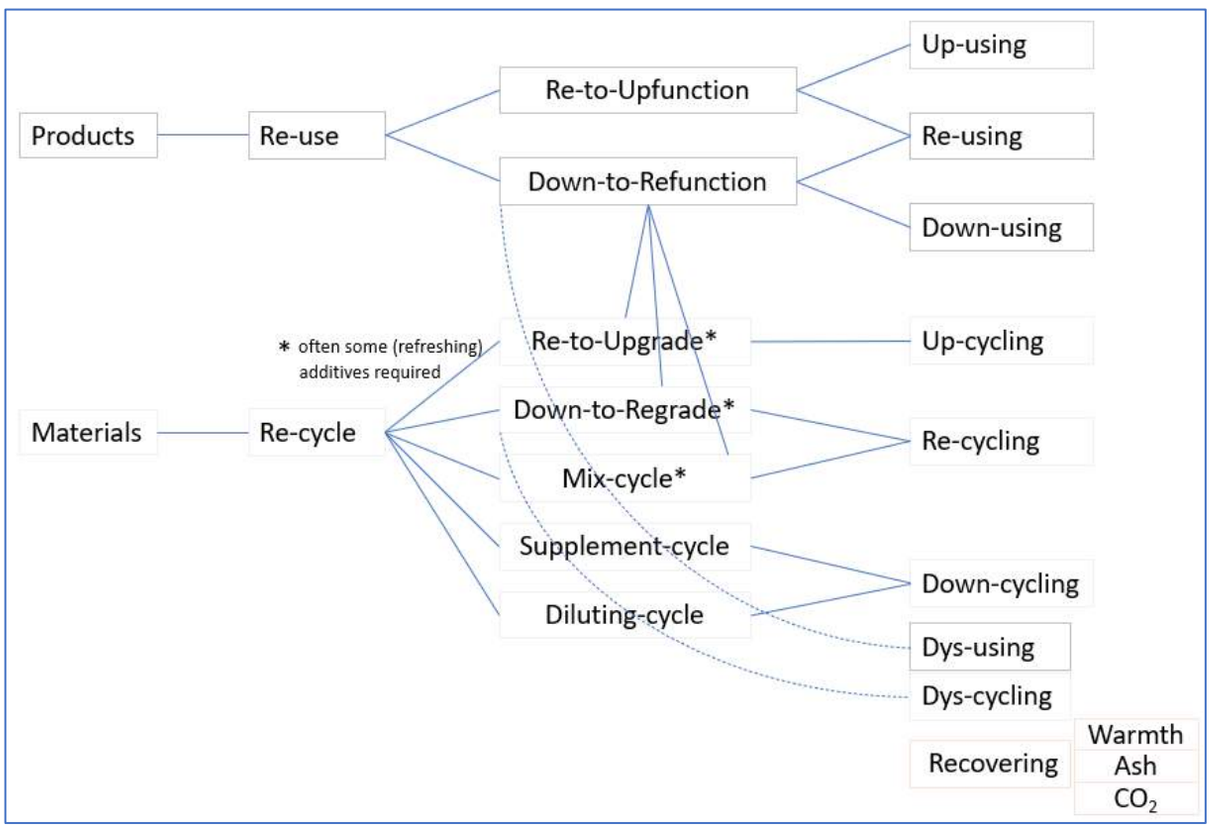
Figuur J-4, Fenders uit samengestelde materialen (Trelleborg)

Profielen met UHMPE voorzijde kunnen vanaf een dikte van 150 mm 250 kN/m doorgeven.

Bijlage K - Circulariteit van materialen en producten in de GWW

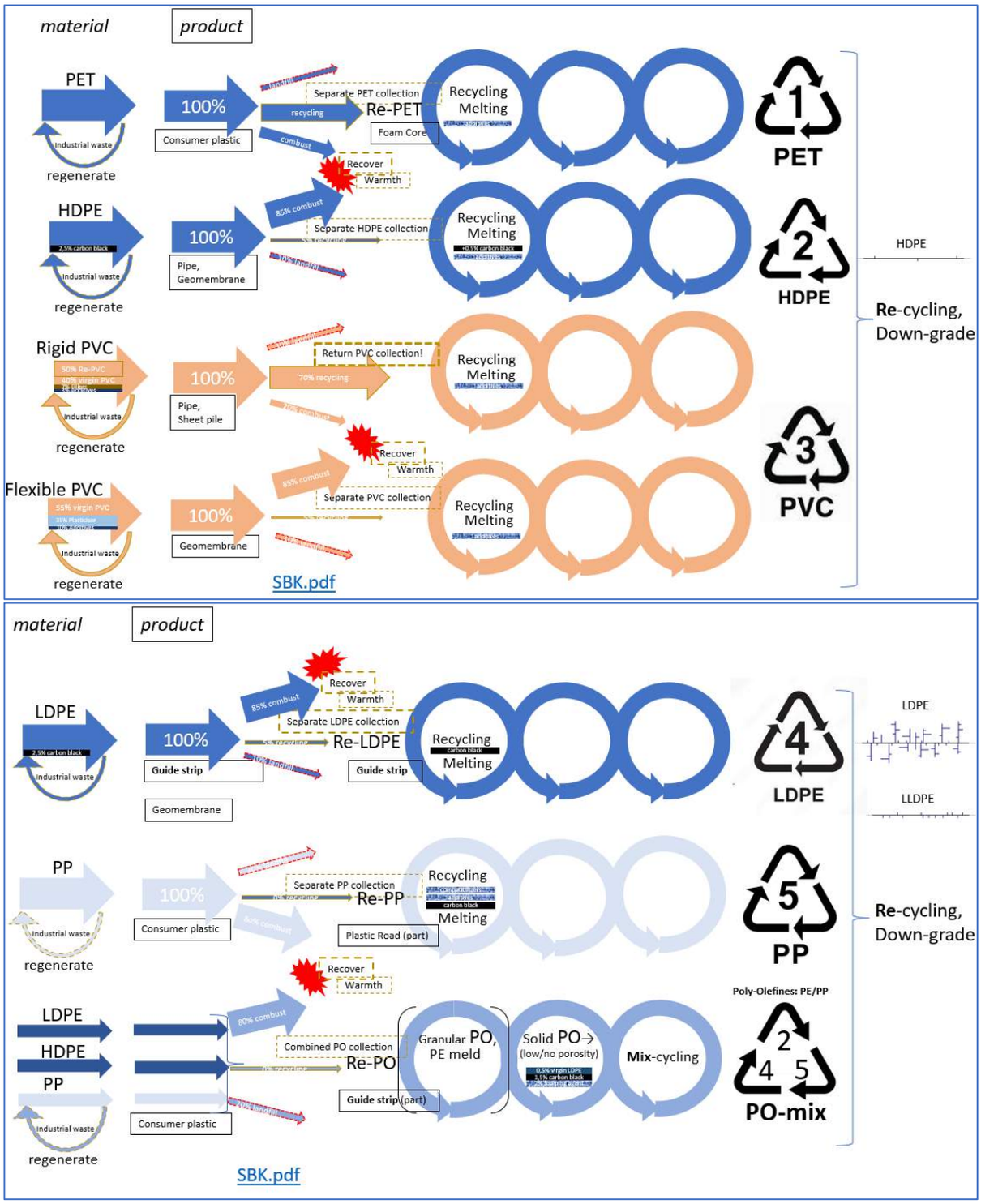
Op de volgende bladzijden zijn (met huidige afdankstromen volgens SBK) de circulariteitmogelijkheden van diverse thermoplast-, thermoharder- en elastomeermaterialen alsmede de tradionele constructiematerialen staal, beton en hardhout weergegeven, allen met als context toepassing in de Waterbouw. Uiteraard met inbegrip van de in dit rapport beschouwde materialen. Bij beton is naast de huidige situatie ook een circulair toekomstperspectief gevisualiseerd.

De mate van circulariteit van producten en materialen is weergegeven in Figuur K-1.

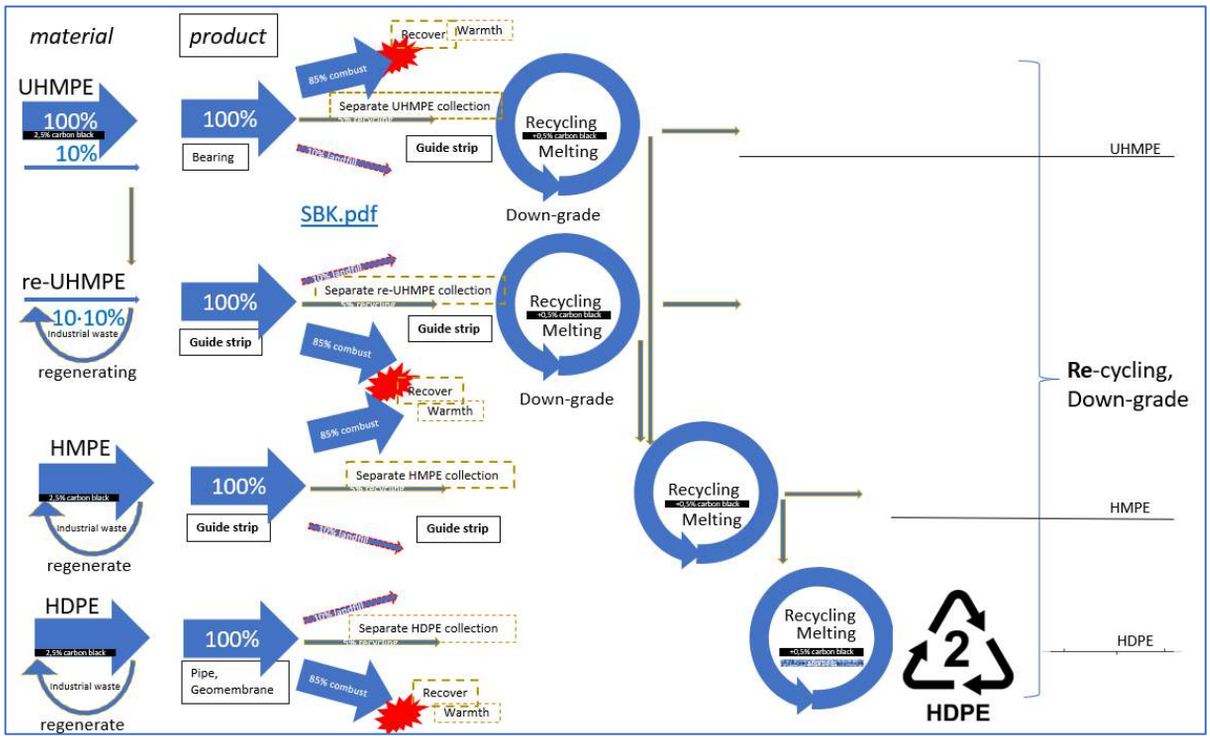


Figuur K-1 Mate van Circulariteit - rechter kolom: van boven naar onder = van gunstig naar ongunstig.

N.B. :	use/cycle	éénmaal circulair
	using/cycling	meerdere malen circulair
	Mix	vermenging materialen
	Supplement	aanvulling met gedeelte primair (virgin) materiaal
	Diluting	verdunning
	Dys-using	hergebruik in verstoorde functie
	Dys-cycling	hergebruik als verstoord materiaal



Figuur K-2a Circulariteitmogelijkheden van Thermoplasten.

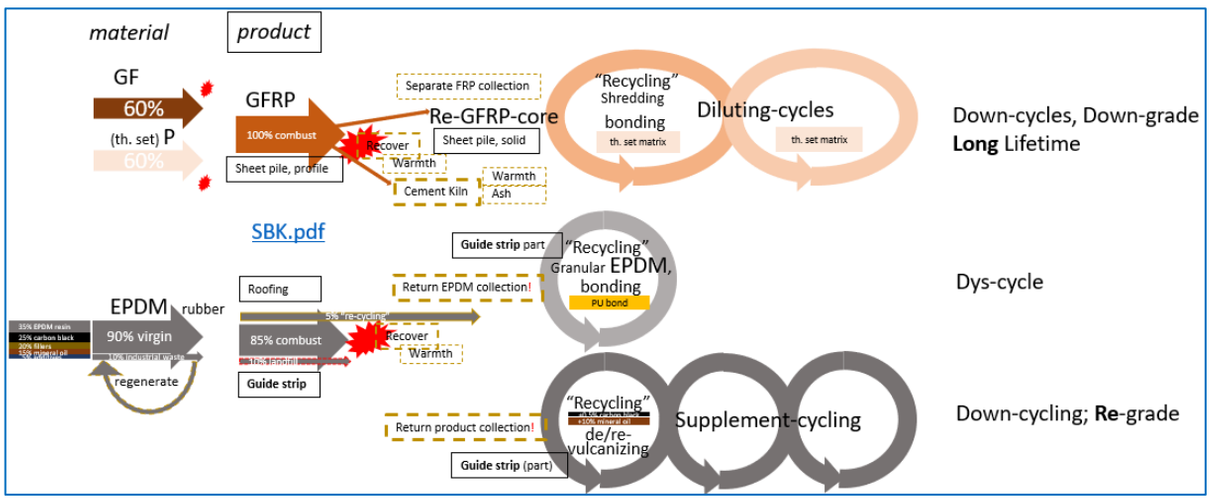


Figuur K-2b Circulariteitmogelijkheden van on- en weinig vertakte polyethyleen-thermoplasten.

Thermoplasten, advies: Verplicht statiegeld* (Return collection) én Multi-cycling

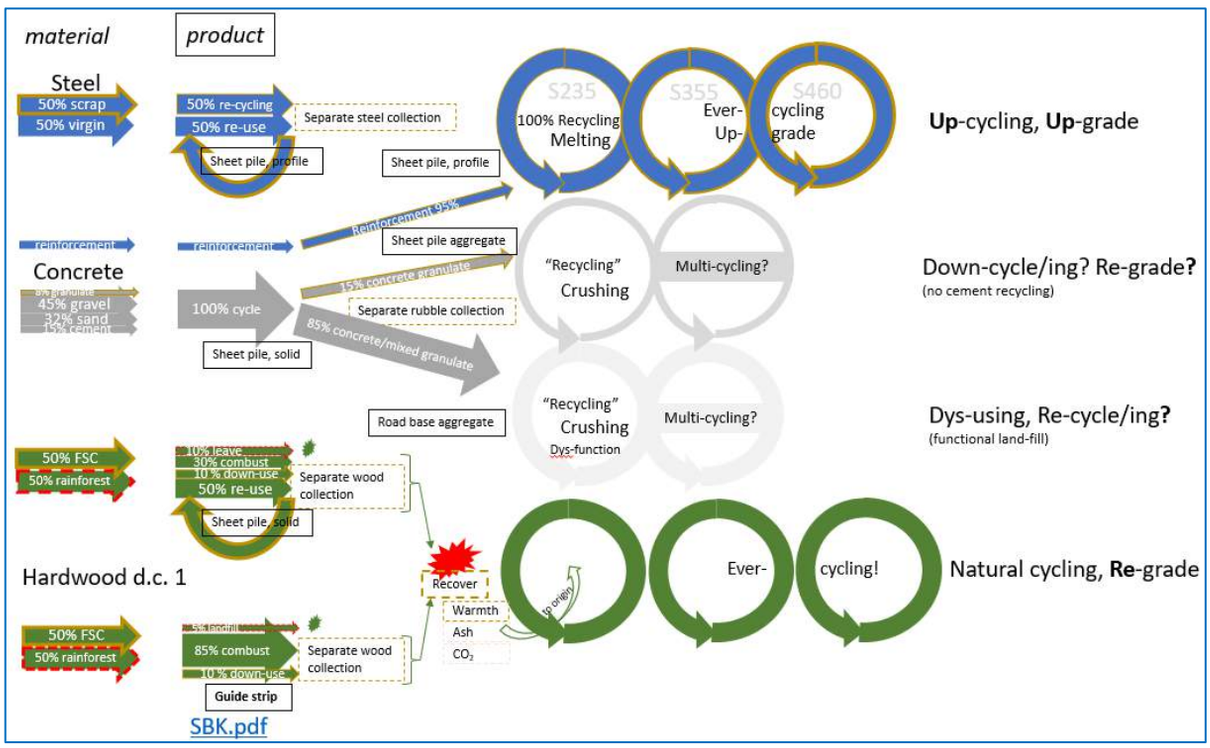
*uitvoering: brancheverenigingen o.i.d. ter voorkoming van alleen terugname eigen producten of invloed van eventuele faillissementen. Statiegeld bijvoorbeeld tweemaal de scheidings- en transportkosten voor het retourneren.

N.B. gratis inleveren gebeurt al bij PVC (Buizen Inzamel Systeem - Recycling)

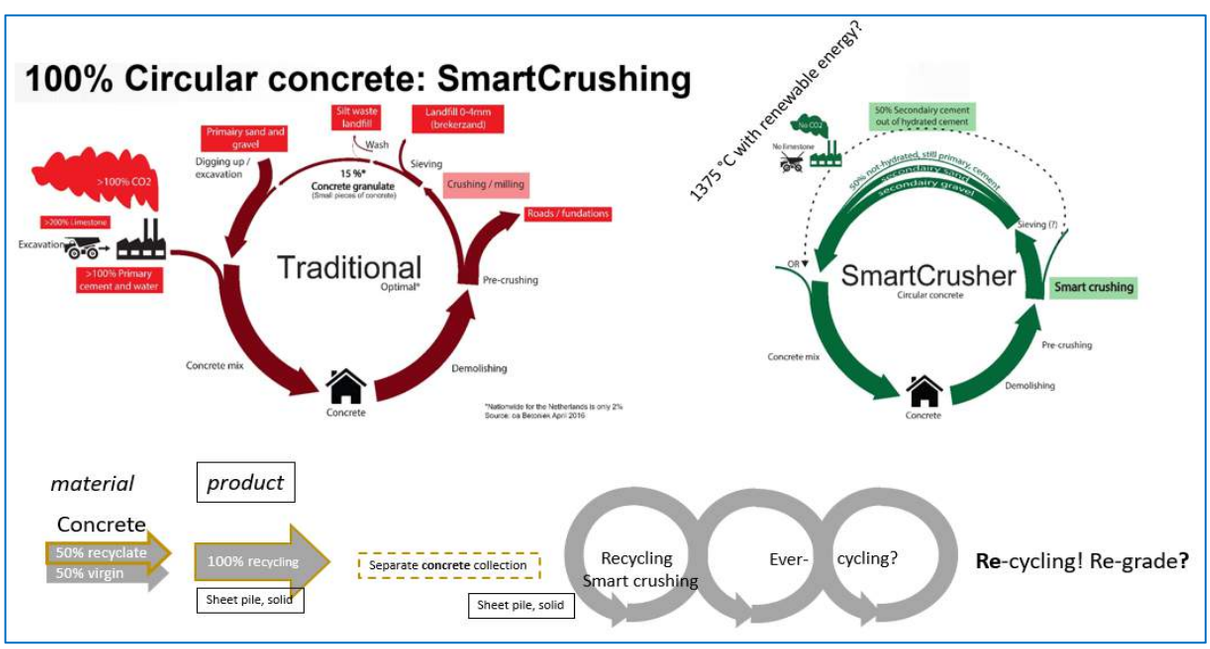


Figuur K-3 Circulariteitmogelijkheden van thermoharde GVK en elastomeer EPDM.

GVK, advies:	Verplicht Cement Kiln of Mechanische recycling (verdunning). N.B.: met mechanische recycling wordt tijd gekocht totdat toekomstige chemische recycling hopelijk technisch en economisch haalbaar wordt. Krafton kent reeds een terugname garantie voor eigen GVK-profielen en kan mechanisch recyclen als kern (Krafton en Van Beek GVK-recycling)
Rubber, advies:	Verplicht statiegeld* (Return collection) én Multi-cycling; *uitvoering: branchevereniging o.i.d. ter voorkoming van alleen terugname eigen producten of invloed van eventuele faillissementen. Statiegeld bijvoorbeeld tweemaal de scheidings- en transportkosten voor het retourneren.



Figuur K-4a Circulariteit van traditionele constructiematerialen (staal, beton en tropisch hardhout [I]).



Figuur K-4b Circulariteitmogelijkheid van beton (slimbreken.nl).

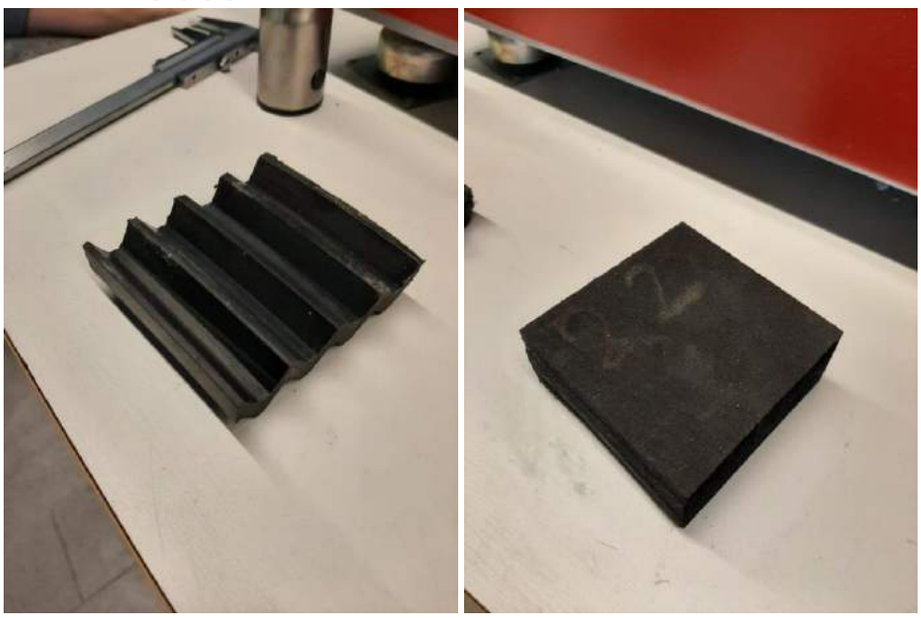
Traditionale constructiematerialen:

- staal — vanzelf Up-cycling en Ever-cyling
- beton, advies — verplicht multi-cycling (zeg vanaf 2030), het kan met Smart crushing
- hard hout, advies — maak een keuze uit het bij wet regelen van:
  - verbieden gebruik tropisch hard hout
  - verplichten FSC én opsporing ontduiking
  - veplichten TCO incl. MKI én actualiseer MKI (t.a.v. biodiversiteit).

[I] Bij hout moet voor het compleet sluiten van de cyclus de as teruggebracht worden naar het originele bos.

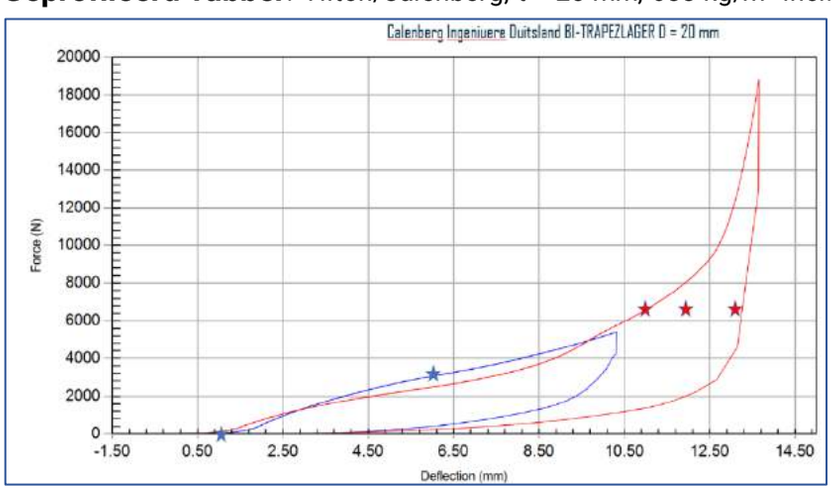
Bijlage L Drukproeven beddingmaterialen

EPDM rubber



Figuur L1 Foto's EPDM rubbers: 20 mm geprofileerd rubber (links), 35 mm celrubber (rechts)

Geprofileerd-rubber: Vilton/Calenberg, t = 20 mm, 683 kg/m^3 incl. sparingen; 76 x 81 x 20 mm.



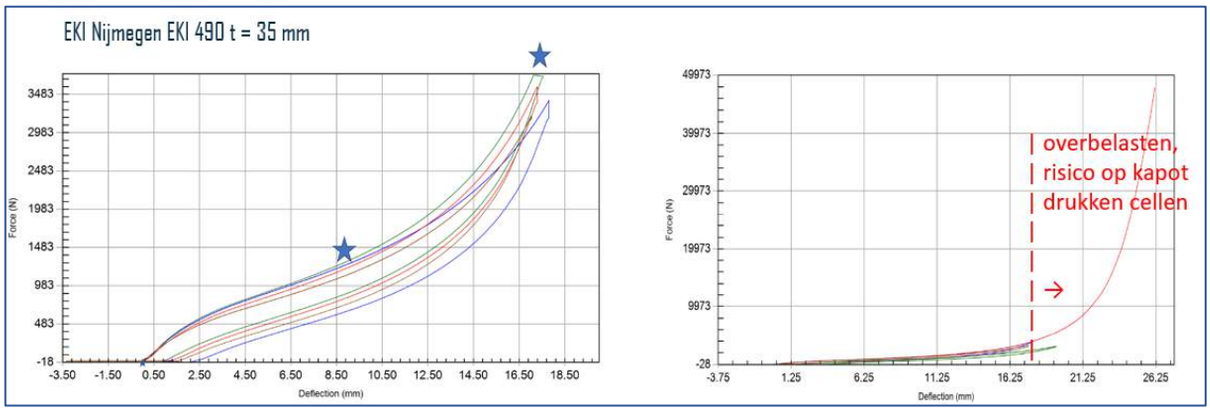
50% indrukken
overbelasten
* verwachte waarde
* toelaatbare waarde op basis van fabrikant gegevens

Figuur L2 Resultaten drukproef 20 mm geprofileerd rubber.

Waarnemingen bij Figuur L2:

- De stijfheid is overeenkomstig de verwachte waarde op basis van fabrikantgegevens.
- Te zien dat de in-vering en de terug-vering verlopen via verschillend paden: hysterese. Energie uit in-vering wordt daarbij omgezet in (langzame) terug-vering en warmte.
- Bij 50% indrukken dijde het kleine proefstuk breed uit, bij overbelasten nog meer. Na overbelasten was er nog geen schade aan het rubber te zien (bereikte drukspanning van 3,0 N/mm^2). De fabrikant brochure geeft aan dat de toelaatbare spanning vormafhankelijk is, met een bovengrens van 17,4 N/mm^2 (in casu 1,0 N/mm^2).

Cel-rubber: Eerste Kunststof Industrie, EKI 490, t = 35 mm, 475 kg/m^3 incl. cellen; 80 x 81 x 35 mm.



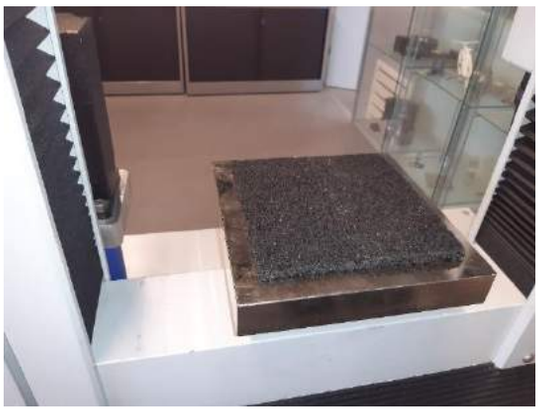
Figuur L3 Resultaten drukproef 35 mm celrubber.

Waarnemingen bij Figuur L3:

- De stijfheid is redelijk overeenkomstig de verwachte waarde op basis van fabrikantgegevens.
- Te zien is dat de in-vering en de terug-vering verlopen via verschillend paden: hysterese. Energie uit in-vering wordt daarbij omgezet in (langzame) terug-vering en warmte.
- De fabrikant geeft aan een maximum vervorming van 50% een veilige bovengrens is om het celrubber heel te houden (in casu 0,7 N/mm^2). Bij 59% indrukken dijde het kleine proefstuk in de breedte flink uit, bij overbelasten nog meer. Ook na overbelasten tot 7,5 N/mm^2 kwam het proefstuk langzaam terug in de oorspronkelijke vorm. Bij her-belasten na overbelasten week het kracht-verplaatsingsdiagram nauwelijks af van de oorspronkelijke vorm.

Gegranuleerd rubber

Er is in de markt gezocht naar gegranuleerd EPDM rubber. Dit was echter niet te vinden. Daarom is uitgegaan van in de markt beschikbaar gegranuleerd SBR rubber, er vanuit gaande dat de mechanische eigenschappen ruwweg hetzelfde kunnen zijn in gegranuleerd EPDM rubber.



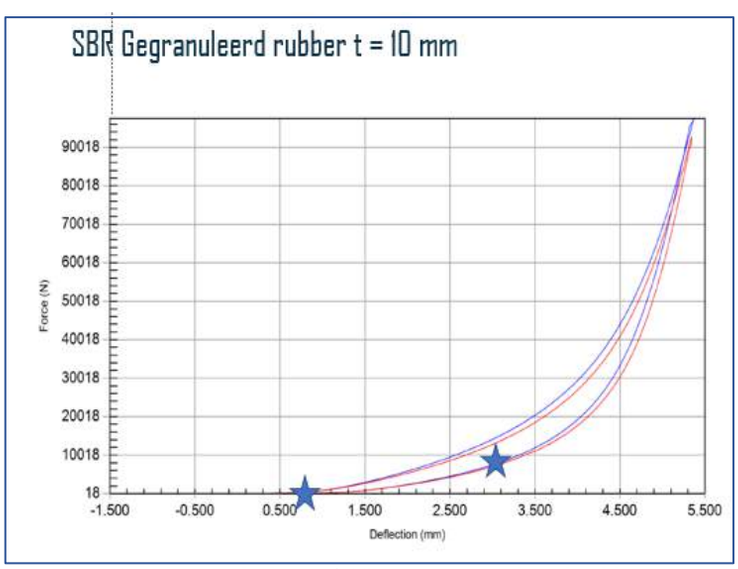
Figuur L4 Foto gegranuleerd rubber: 10 mm gegranuleerd SBR rubber

Gegranuleerd rubber: Hakron/Hofland Deltaflex, t = 10 mm, 710 kg/m^3 incl. poriën; 162x162x10 mm.

Er zijn proeven uitgevoerd met afmetingen met de dezelfde vormfactor als dat in de praktijk toegepast kan worden bij wrijfstroken. Met de vormfactor wordt de mate van opsluiting van rubberlagen weergegeven, in het geval van:

- wrijfstrook door de balk aan de voorzijde en betonvlak aan de achterzijde;
- proefstuk door stalen oplegvlakken aan onder- en bovenzijde van de drukbank.

Vormfactor in wrijfstrook S = (190 mm · 1000 mm) / (2·190+2·1000) mm · 20 mm) = 4,0
Vormfactor in proefstuk S = (162 mm · 162 mm) / (2·162+2· 162) mm · 10 mm) = 4,0



Figuur L5 Resultaten drukproef 10 mm gegranuleerd rubber.

Waarnemingen bij Figuur L5:

- De stijfheid is redelijk overeenkomstig de verwachte waarde (E = 1,3 N/mm2) op basis van fabrikantgegevens (48 Shore).
- De fabrikant geeft aan een maximum drukspanning van 1,2 N/mm^2. De proeven zijn doorgegaan tot circa 90 kN/(162mmx162mm) = 3,4 N/mm^2 zonder bezwijken te constateren.
- Te zien is dat de in-vering en de terug-vering redelijk dezelfde paden verlopen: hysterese is inderdaad beperkter met SBR.
- De rode lijn is met een belastingsnelheid van 10 mm/min en de blauw lijn met 100 mm/min verricht.

  Bij hogere snelheid is granulaatrubber slechts zeer beperkt stijver.

Bijlage M - Dilataties en beëindigingen verende wrijfstroken

Van kunststoffen is bekend dat deze een grote uitzettingscoëfficiënt hebben. Dilataties worden gebruikt om uitzettingen door fluctuerende temperatuur en vochtigheid op te nemen.
Bij dilataties tussen frontbalkdelen van verende wrijfstroken kan één balkdeel naast de dilatatie door een schampstoot worden ingedrukt, terwijl naastliggend deel nog niet wordt ingedrukt. Als het schip dan verder glijdt/wrijft langs het geleidewerk dan kan het - zonder maatregelen- de kopse zijde van het volgende balkdeel treffen.

De uitzettingscoëfficiënten van de beschouwde kunststof materialen zijn:

-	UHMPE	α = 150E-06m/m°C	(UTEC)
-	Re-PE/PP	α = 150E-06m/m°C	(Lankhorst) (SavePlastics)

Ter vergelijking:

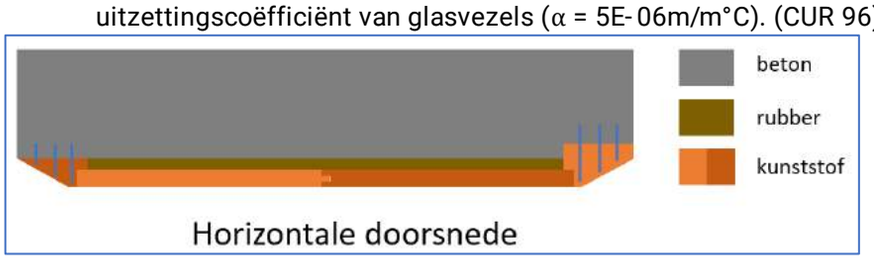
-	beton	α = 12E-06m/m°C	(EN-1992)
	C20/25	$\Delta\varepsilon_{vocht}$ = 0,05%	(EN-1992)
-	hout	$\alpha_{long} \leq$ 10E-06m/m°C	(Goli, 2019); ≤4,5E-06 [m]
		$\Delta\varepsilon_{vocht}$ = 0,2%	[n]

T_{min}= –25°C; T_{gem}= 10°C; T_{max}= 75°C (30° in schaduw + 45° in zon) bij zwarte kleur
T_{max}= 60°C (30° in schaduw + 30° in zon) bij grijze kleur (EN-1991-1-5)

Verlenging ΔT = +65°	PE & PE/PP	9,75mm/m'
Verkorting ΔT = –35°	PE & PE/PP	5,25mm/m'+
Beweging	PE & PE/PP	15mm/m'

Een standaard lengte voor starre Re-PE/PP wrijfgordingen is 4 m bij zowel Lankhorst als SavePlastics. Dit zijn geleidebalken van minimaal 80 mm dikte, met starre bevestiging die de uitzetting inperken.
Bij verende kunststof wrijfstroken zonder een starre bevestiging, moeten dilataties van bijvoorbeeld 15 mm bij -25°C om de 1 meter worden toegepast.

N.B.: - Ook Re-PE/PP kan gemengd met glasvezels zoals Lankhorst doet met KLP-V. Met 3,4% (vol) gehakte glasvezels in KLP-V wordt de uitzettingscoëfficiënt gehalveerd (α = 70E-06m/m°C). Dit verdubbeld echter ook de stijfheid. (Lankhorst)
Dilataties van bijvoorbeeld 15 mm bij -25°C om de 2 meter kunnen dan worden toegepast.
- Bij GVK (α < 40E-06m/m°C) strip zou de dilatatieafstand wel 4,0 m kunnen zijn vanwege de lage uitzettingscoëfficiënt van glasvezels (α = 5E-06m/m°C). (CUR 96)



Figuur M-1 Mogelijke dilatatie en beëindigingen flexibele wrijfstroken

Beide beëindigingen in Figuur M-1 zijn voorzien van een schuine zijde waarmee een geleidelijke overgang wordt gevormd voor langsvarende schepen. De beëindiging kan op het beton worden bevestigd (links) of in

[m] 3,1 à 4,5 E-06m/m°C volgens (USDA, 2010)
[n] Bij RV=60% is het vochtgehalte in hout circa 12%. Binnen toepassing RH = 60% gemiddeld.
Bij RV=80% is het vochtgehalte in hout circa 20% (geen rot). Buiten toepassing RH = 80% gemiddeld.
Bij RV=95% is het vochtgehalte in hout circa 30% (vezelverzadigingspunt) waarboven geen krimp.
Voor het krimpverschil in vezelrichting van volledig nat naar ovendroog is $\Delta\varepsilon$ = 0,3% een indicatie (Centrum Hout, 2011).
Voor een nat regende/spattende houten waterbouwtoepassing in de buitenlucht met een kleine dikte lijkt $\Delta\varepsilon$ = 0,2% een goede indicatie.

een inkassing in het beton (rechts). Bij een inkassing in het beton hoeven de bevestigingsmiddelen niet op afschuiving belast te worden, behalve als daar ook de beëindiging van de betonwand zit. De dilatatie met messing en groef in Figuur M-1 zorgt dat beide frontdelen bij een dilatatie evenveel ingedrukt worden. De messing wordt hierna gecontroleerd op dwarskracht en buiging.

Dimensionering messing

Belasting verdeling: 250 kN/2 = 125 kN/wrijfstrook = 12,5 kN links + 100 kN/0,5m + 12,5 kN rechts, conform Bijlage F in geval van doorlopende balk.

Belasting verdeling: 250 kN/2 = 125 kN/wrijfstrook = 5 kN links + 107,5 kN/0,5m + 12,5 kN rechts, in geval van scharnierende dilatatie aan linker zijde.

Met messing dikte 30 mm / 3 = 10 mm, breedte 170 mm en uitkraging van 15 mm dilatatie volgt:

τ = 5 kN / (170 mm ·10 mm) = 3 N/mm^2 < 27 N/mm^2 (zie Bijlage N)

σ = 5 kN · 0,015 m / ⅙(170 mm ·10^2 mm) = 26 N/mm^2 < 27 N/mm^2 (zie Bijlage N)

Bijlage N - Mechanische eigenschappen kunststoffen balken

re-UHMPE

Het document Eisen "Kunststoffen Rijkswaterstaat" geeft aan dat "re-UHMPE 1000 uv-stabiel" voor glijgeleidingen van regeneraat is gemaakt van vermalen fabrieksafval, en dat "UHMPE 1000 uv-stabiel" voor glijopleggingen en glijlagers bedoeld is. (NBD0979 2001).

Polyethyleen ultrahoogmoleculair (PE-UHMW)

Algemene eigenschappen			
Materiaal nummer		1401	
Soortelijk gewicht	ISO 1183	0,930	g/cm³
Doorzichtheid		op	
Condities van het test materiaal			
Mechanische eigenschappen			
Vloeispanning	ISO 527	17	MPa
Treksterkte	ISO 527	–	MPa
Rek bij breuk	ISO 527	>50	%
Trek-E-modulus	ISO 527	720	MPa
Trek-kruipmodulus (0,5% 1000h)	ISO 899-1	230	MPa

Figuur N1 Mechanische Eigenschappen UHMPE

Uit: Datenblatt | NAEFF zie tevens UHMPE kenmerken - U-Hubs

N.B.: 17 / 720 = 2,4%: 2,4% elastisch + >47,6% plastisch = >50,0% rek bij breuk

Regeneraat (re-UHMPE) is soms iets zwaarder en iets minder slijt- en slagvast dan virgin zwart UHMPE, maar het heeft gelijkwaardige mechanische eigenschappen in sterkte, stijfheid, breukrek en wrijving. (Trelleborg Fender Systems)

			Algemene Eigenschappen				Mechanische Eigenschappen							
			Dichtheid DIN 53749	Vochtopname bij normaal klimaat	Brandgedrag DIN 4102 of UL-94	Specifieke Warmtecapaciteit	Treksterkte DIN 53455	Rek tot breuk DIN 53455	E-Modulus DIN 53457 (23°C)	Buigsterkte DIN 53452	Slagsterkte DIN 53453 (23°C)	Drukvastheid ISO 604	Shore Hardheid OF Kogseindrukhardheid in MPa	Wrijvingscoëfficiënt
5	Hoge Dichtheid Polyethyleen	HD-PE	0,95	< 0,05	B2	2,5	22	> 800	800	25	geen breuk	22 tot 32	60 Shore D	0,25
6	Lage Dichtheid Polyethyleen	LD-PE	0,92	< 0,05	B2	2,5	8 tot 10	> 700	200 tot 400		geen breuk	10 tot 16	70 Shore A	0,58
7	Hoog Molecuïlair Polyethyleen Type 500	HM-PE	0,95	< 0,05	HB		28	> 600	1200	40	geen breuk		64 Shore D	0,25
8	Ultra Hoog Molecuïlair Polyethyleen Type 1000	UHM-PE	0,93	< 0,05	HB		> 20	> 350	600	27	geen breuk		62 Shore D	0,25

Figuur N2 Mechanische Eigenschappen PE

Uit: PE | Vink Kunststoffen

Er staat weinig informatie over de schuifsterkte ter beschikking. Eén bron geeft 33 N/mm^2 voor HDPE (matweb.com HDPE) De schuifsterkte is in dezelfde orde van grootte als de buigsterkte voor HDPE. Als schuifsterkte voor UHMPE wordt daarom de buigsterkte aangehouden.

SavePlastics Re-PE/PP met aanvullende buigproeven

Fabrikant SavePlastics heeft diverse mechanische eigenschappen van haar Re-PE/PP (gerecycled plastic consument afval) bepaald bij verschillende temperaturen. Voor een overzicht zie Figuur P3.

save plastics

Technical Data in an overview			save plastics Quality 3			save plastics ® Quality 1			save plastics ® Ultra		
Testing:	Standard DIN EN ISO	Unit	Result			Result			Result		
3 Point Bend	178	MPa	Flexural Stress	-5°C	27.4	Flexural Stress	-5°C	21.2	Flexural Stress	-5°C	35.1
			Bending E-Modulus		1.739	Bending E-Modulus		1.289	Bending E-Modulus		2.261
			Flexural Stress	23°C	15.2	Flexural Stress	23°C	11.6	Flexural Stress	23°C	24.0
			Bending E-Modulus		890	Bending E-Modulus		581	Bending E-Modulus		1.424
			Flexural Stress	65°C	6.3	Flexural Stress	65°C	4.6	Flexural Stress	65°C	16.5
			Bending E-Modulus		262	Bending E-Modulus		162	Bending E-Modulus		856
Tensile	527-2	MPa	Strength		9.36	Strength		9.65	Strength		15.6
			Tensile E-Modulus		957	Tensile E-Modulus		659	Tensile E-Modulus		1.490
		%	Elongation		3.7	Elongation		13.8	Elongation		1.7
Timed Tensile	899-1	MPa	Tensile E-Modulus	1 hours	455	Tensile E-Modulus	1 hours	316	Tensile E-Modulus	1 hours	1.043
			Tensile E-Modulus	100 hours	279	Tensile E-Modulus	100 hours	202	Tensile E-Modulus	24 hours	975
									Tensile E-Modulus	100 hours	852
Timed 3 Point Bend	899-2	MPa	Bending E-Modulus	1 hours	595	Bending E-Modulus	1 hours	380	Bending E-Modulus	1 hours	1.159
			Bending E-Modulus	24 hours	439	Bending E-Modulus	24 hours	271	Bending E-Modulus	24 hours	943
			Bending E-Modulus	100 hours	367	Bending E-Modulus	100 hours	235	Bending E-Modulus	100 hours	816
Pressure Characteristics	604	MPa	Compression Strength	1% Stretch	1.5	Compression Strength	1% Stretch	1.8	Compression Strength	1% Stretch	2.5
				2% Stretch	3.0		2% Stretch	3.3		2% Stretch	5.3
				10% Stretch	13.4		10% Stretch	13.3		10% Stretch	27.9
				20% Stretch	18.6		20% Stretch	18.2		20% Stretch	29.0
			Pressure E-Modulus		262	Pressure E-Modulus		271	Pressure E-Modulus		815

Technical Data in an overview			save plastics Quality 3		save plastics ® Quality 1		save plastics ® Ultra	
Testing:	Standard DIN EN ISO	Unit	Result		Result		Result	
Charpy Test	179	kJ/m²	Impact Resistance	28	Impact Resistance	12	Impact Resistance	12
Impact Shore Hardness	868		Shore Hardness	54	Shore Hardness	53	Shore Hardness	62
Density Test	1183-1	g/cm³	Density	0.9896	Density	1.0062	Density	1.0529
Water Absorbtion	62	%	23°C,50%r.L.	<1	23°C,50%r.L.	<1	23°C,50%r.L.	<1
			23°C in water	<1	23°C in water	<1	23°C in water	<1
			100°C in water	<1	100°C in water	<1	100°C in water	<1
Resistance	60093 4	Ω	Surface	3.0×10^{13}	Surface	3.2×10^{13}	Surface	1.5×10^{14}
			Specific Surface	3.0×10^{13}	Specific Surface	3.2×10^{14}	Specific Surface	1.5×10^{14}
			Flow/Contact	7.0×10^{13}	Flow/Contact	9.0×10^{13}	Flow/Contact	$>2.0 \times 10^{14}$
			Specific Flow/Contact	3.5×10^{14}	Specific Flow/Contact	4.5×10^{14}	Specific Flow/Contact	$>8.4 \times 10^{14}$
Ball Striking Test	2039-1	N/mm²	Striking Hardness	20.71	Striking Hardness	18.44	Striking Hardness	39.52
Thermal Expansion		1/°C	Coefficient of Thermal expansion	0.00012432	Coefficient of Thermal expansion	0.00018993	Coefficient of Thermal expansion	0.0001510648
Screw Pull out force		N	Drilled Material	3.400	Drilled Material	7.500	Drilled Material	8.230
		N	Non Pre-Drilled	4.700	Non Pre-Drilled	7.500	Non Pre-Drilled	8.140

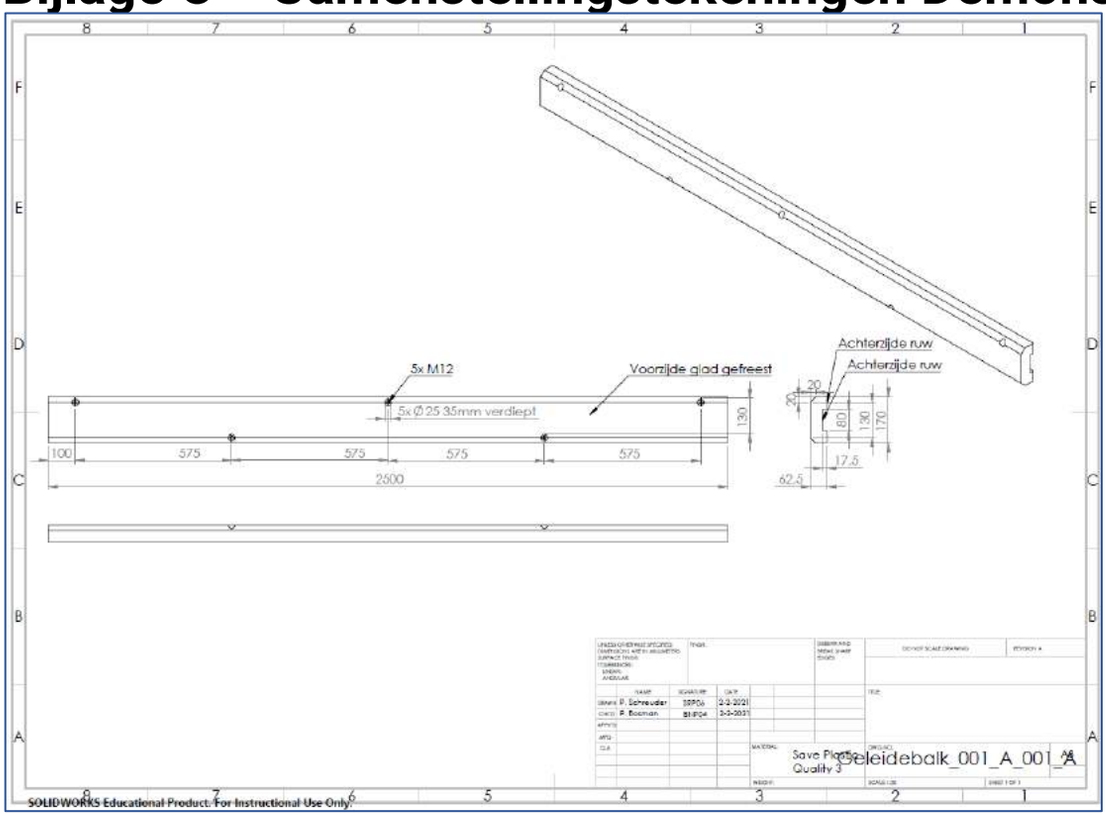
save plastics
Westervoortsedijk 73, Arnhem
Postbus 882
6800 AW Arnhem

026 30 333 07
info@saveplastics.nl
www.saveplastics.nl

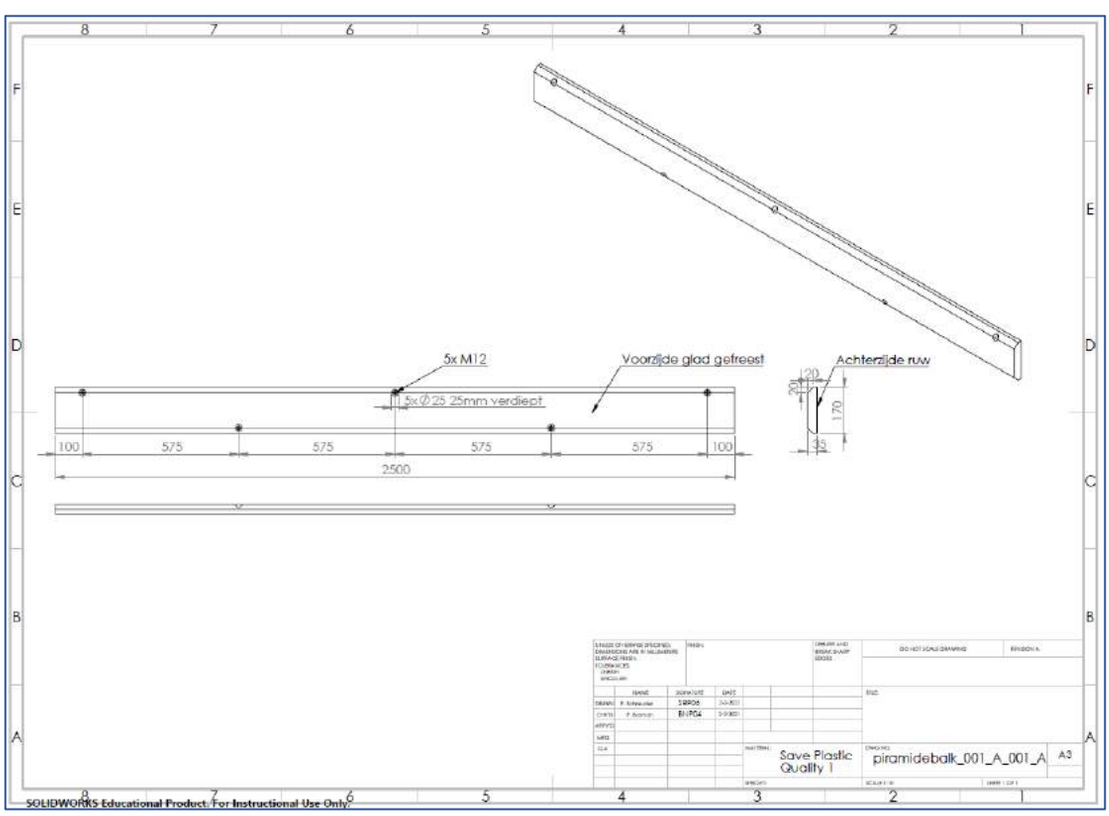
urban products

Figuur N3 Mechanische Eigenschappen Re-PE/PP SavePlastics

Bijlage O - Samenstellingstekeningen Demonstrators



Figuur O1 Samenstellingstekening variant 5. Celrubber Re-PE/PP U-balk



Figuur O2 Samenstellingstekening Variant 6 Geprofileerd rubber Re-PE/PP strip

Bijlage P Drukproeven Demonstrators

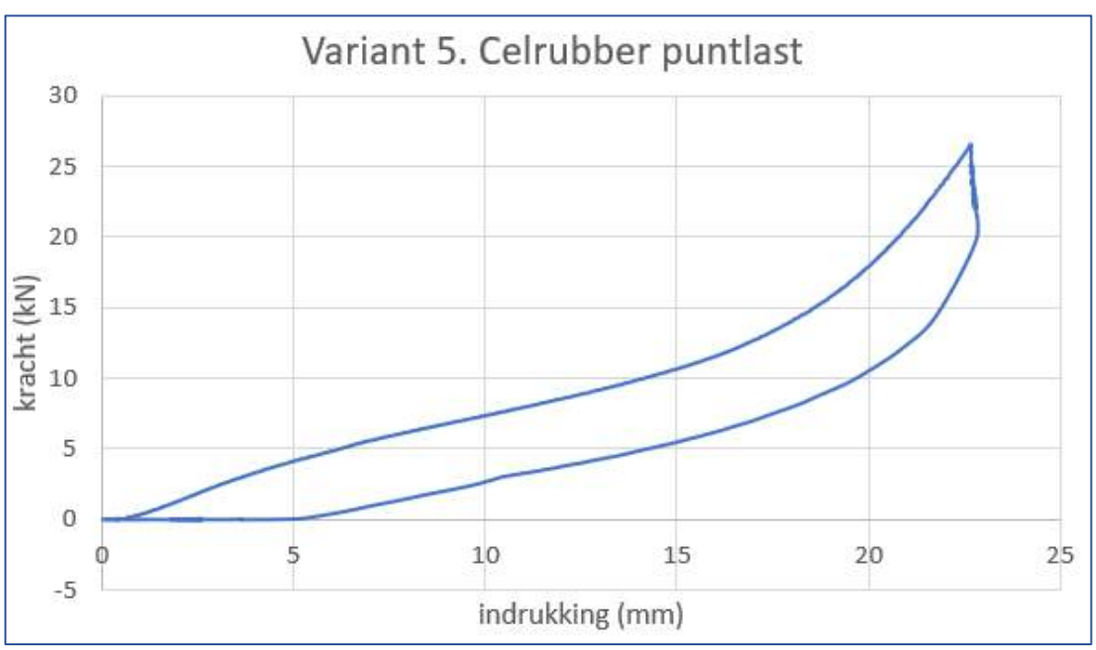
De Demonstrators van Varianten 5 en 6 zijn beproefd op:

- een puntlast tot het profiel ging aanliggen;
- een lijnlast van 125 kN uitgesmeerd over 0,5 m.

De proefopstelling heeft een drukoplegging over een lengte van circa 2,5 m. Dit simuleert de betonwand.
Bij de lijnlast van 125 kN is de wrijfstrook aan de rechter zijde verhinderd met lijmklemmen om los te komen van de drukoplegging. Dit simuleert de ankerverbinding aan de betonwand.
De foto's en waarnemingen van de vier proeven zijn op de volgende bladzijden weergegeven.

Foto P1 Drukproef Variant 5: 45 mm lijf Re-PE/PP U-balk op 35 mm celrubber puntlast

Boven: over volle breedte belast, strook vrij, komt aan weerszijden omhoog;
Onder: één zijkant belast, belaste zijde ligt aan (links) en niet-belaste zijde niet (rechts)



Waarneming:
Ca. 15 kN puntlast komt overeen met 17,5 mm indrukking: conform verwachting.
Daarboven wijst knik in de grafiek ook op aanliggen.

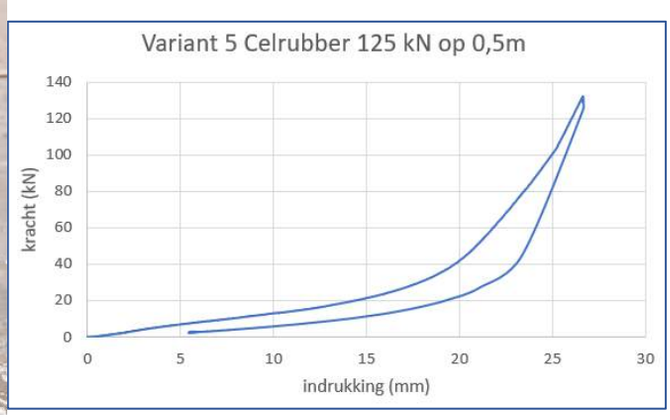
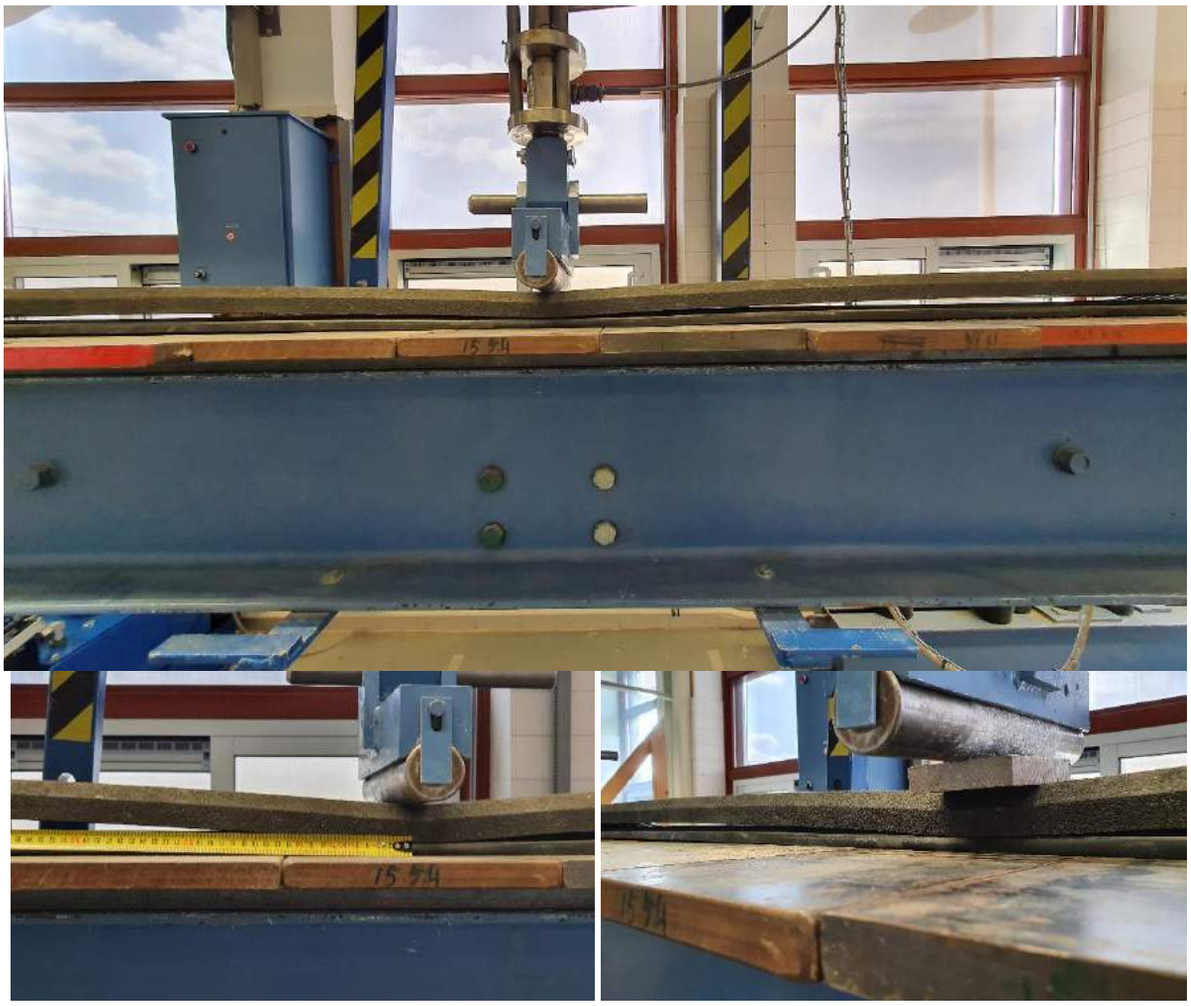


Foto P2 Drukproef Variant 5: 45 mm lijf Re-PE/PP U-balk op 35 mm celrubber 0,5 m last 125 kN.

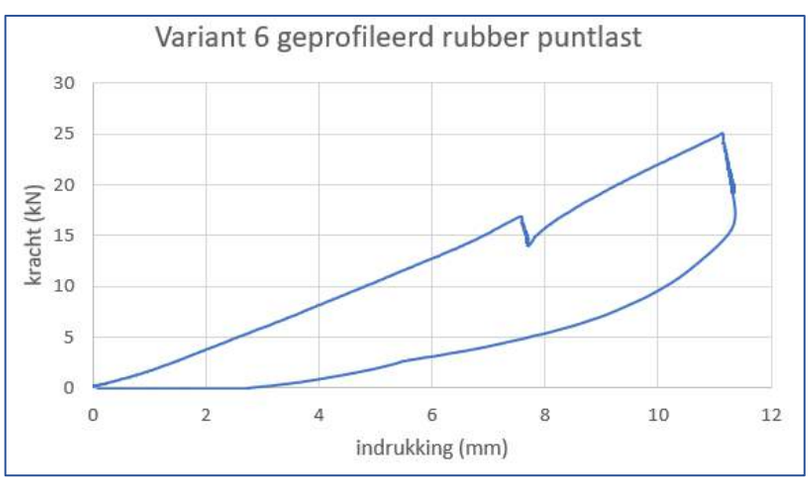
Strip vrij: komt omhoog linkerzijde; strip verhinderd: met lijmklem rechterzijde. Boutgaten gepositioneerd direct naast 0,5 m lastvlak (detail).

Waarneming:
Wrijfstrook onbeschadigd, ook met boutgaten.



Foto's P3 Drukproef Variant 6: 30 mm Re-PE/PP strip op 20 mm geprofileerd rubber; puntlast

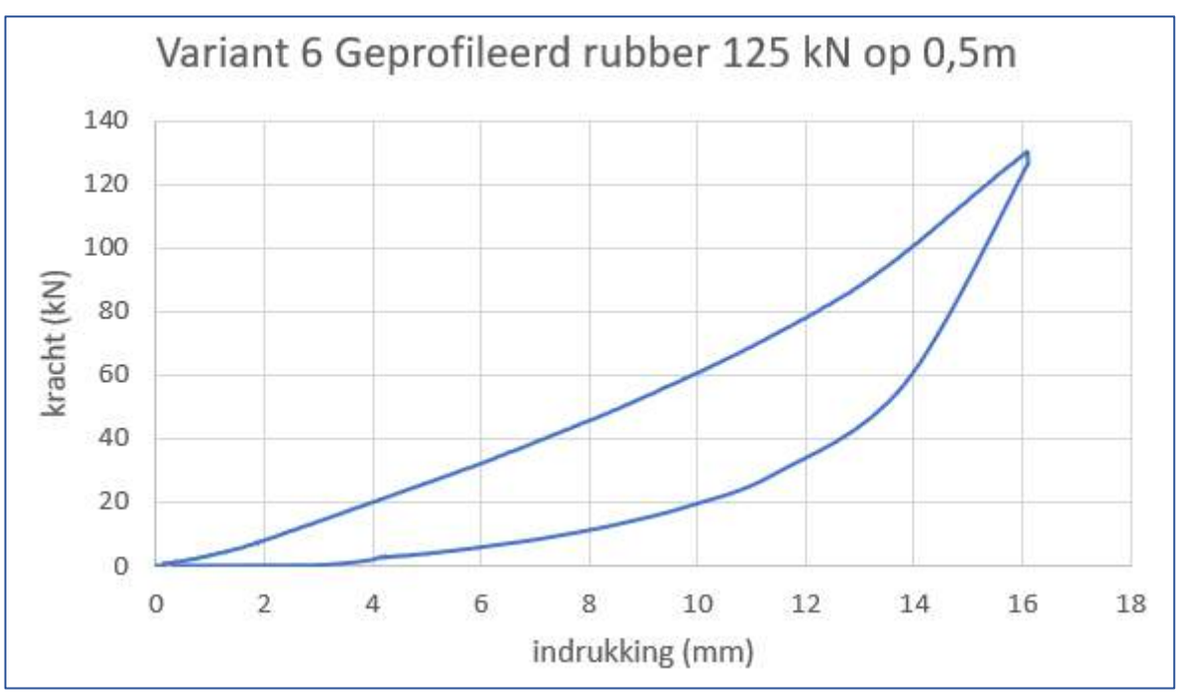
Boven: over volle breedte belast, strook vrij, komt aan weerszijden omhoog;
Onder, links: detail van zone die wordt ingedrukt
Onder, rechts: één zijkant belast (rechts)



Waarneming:
Bij bijna 8 mm per ongelijk gerelaxeerd. Anders:
ca. 25 kN puntlast komt overeen met 10 mm indrukking: conform verwachting.

Foto P4 Drukproef Variant 6: 30 mm Re -PE/PP strip op 20 mm geprofileerd rubber; 0,5m last 125kN

Strip vrij: komt omhoog (linkerzijde); strip verhinderd met lijmklem (rechterzijde)



Waarneming:
Wrijfstrook onbeschadigd, ook met boutgaten.

Doel van de aanvullende buigproeven bij 20° is om vast te stellen:

- of de aangeboden gegevens valide zijn
- of de belastingsnelheid invloed heeft op de sterkte en de stijfheid
- of schroeven invloed hebben op de buigsterkte, en met name
- wat de breukrek is.

Foto P4 Buigproef Re-PE/PP strip.

Foto P5 Buigbreuk en breukvlak Re-PE/PP strip.

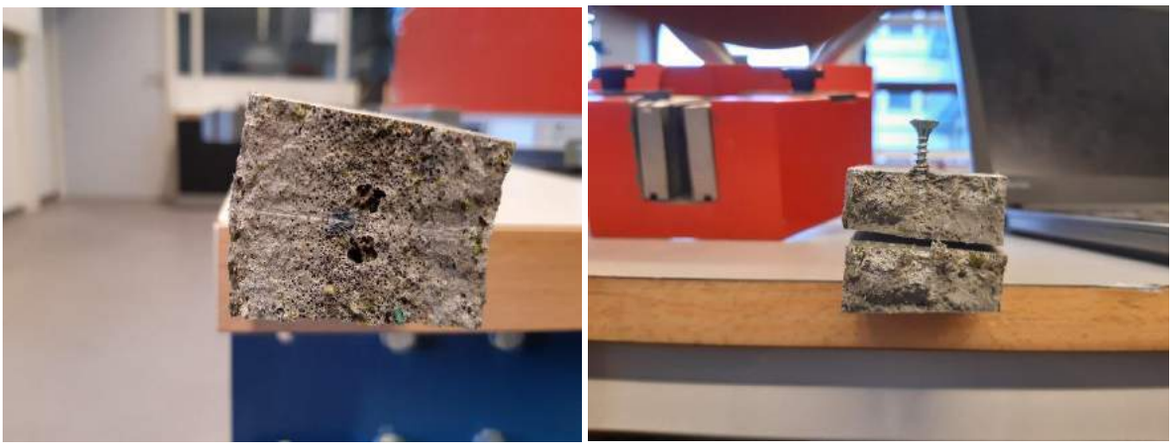
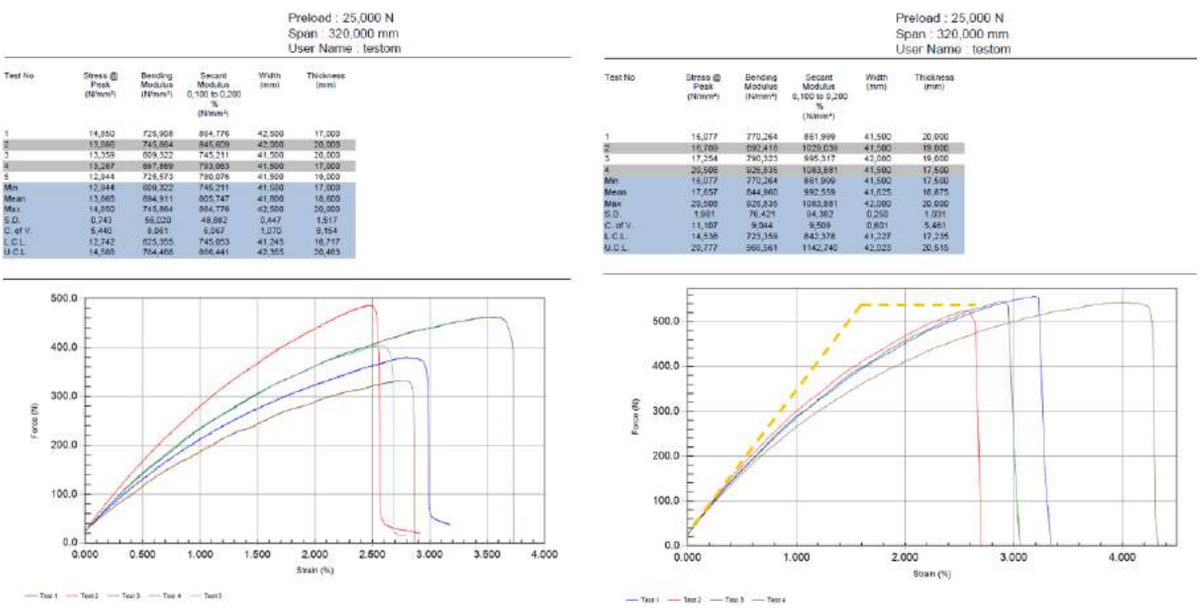


Foto P6 Breukvlak Re-PE/PP strip.



V = 20 mm/min

V = 500 mm/min

Figuur P7 Resultaten bij v=20 mm/min (links) en v=500mm/min (rechts)
Overspanning 320 mm, proefstukken b ≈ 40 x h ≈ 20 mm

Waarnemingen bij Figuur P7:
De gemeten buigsterkte ondergrens van 12,7 N/mm^2 bij normale belastingsnelheid is wat lager dan die van Q3 wordt aangegeven zijnde 15,2 N/mm^2.

De gemeten gemiddelde E-modulus van 805 N/mm^2 bij normale belastingsnelheid is ook wat hoger dan die van Q3 wordt aangegeven zijnde 890 N/mm^2.

De aangegeven mechanische eigenschappen kunnen als valide worden beschouwd voor de ruw gezaagde proefstukken.

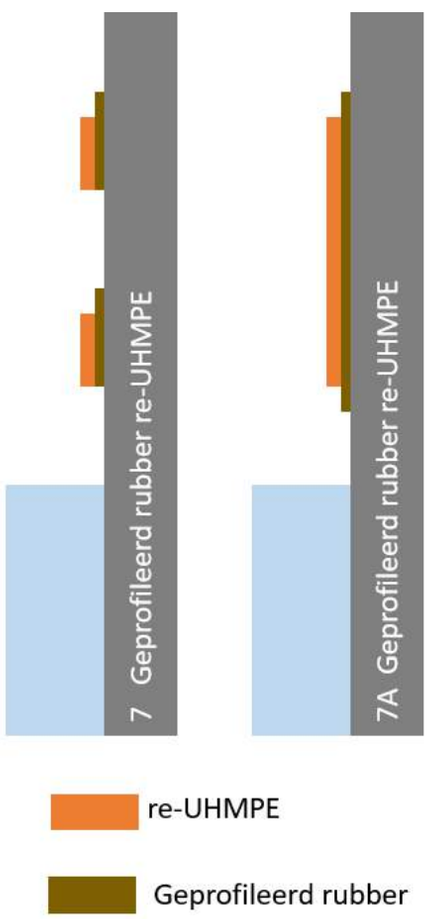
De breukspanning is circa 30% groter bij de snellere belasting. Aanvaarbelasting is nog sneller.
Uit proeven met en zonder een schroef blijkt geen verschil in buigsterkte.

De rek bij breuk bestaat uit elastische rek + plastische rek, deze is gestileerd met een stippellijn in Figuur H7 (rechts). De plastische rek bedraagt minimaal 70% extra ten opzichte van de elastische rek.

Bijlage Q - Schortvariant

Voordelen van stroken-variant 7:
- minder materiaal, minder kosten
- bestand tegen aanvaren recreatievaart

Voordelen van schort-variant 7A:
- beton tussen stroken niet meer te raken bij schampen
- beton tussen stroken ook niet meer te raken bij aanvaren
- drukcapaciteit rubber profiel maximaal vanwege vormfactor
  S = h/(2·t)
- rubber ook bestand tegen forse aanvaring beroepsvaart
- profiel rubber verticaal te plaatsen: vuil- & waterdoorlatend



Figuur Q-1 Stroken- en schortvariant: 7 & 7A

F = 0,50 m · 2·0,15 m · 8,4 N/mm^2 =	1.263 kN capaciteit
CEMT II onder een hoek van 10°	1.256 kN aanvaarbelasting

Schort

F = 0,50 m · 0,55 m · 17,4 N/mm^2 =	4.785 kN capaciteit
CEMT I onder een hoek van 30°	4.360 kN aanvaarbelasting
CEMT II onder een hoek van 25°	4.363 kN
CEMT IV onder een hoek van 20°	4.703 kN
CEMT VIb onder een hoek van 15°	4.722 kN
CEMT VII onder een hoek van 10°	4.022 kN

In samenwerking met

provincie Overijssel

Witteveen + Bos

save plastics

altena INFRA-MATERIALEN

Lectoraat Kunststoftechnologie

Doorvaren naar een Circulaire Economie Verende Wrijfstrook

Over het lectoraat Kunststoftechnologie

Het lectoraat Kunststoftechnologie stimuleert innovatie op het gebied van kunststofverwerking en -producten in het midden- en kleinbedrijf. Vanuit de onderzoeksprojecten, uitgevoerd door docenten van de technische opleidingen bij de Hogeschool Windesheim in samenwerking met bedrijven, vloeien nieuwe kennis en inzichten naar het Hoger Onderwijs én het bedrijfsleven.

Samenvatting

Wrijfstroken tegen betonwanden worden traditioneel in hout uitgevoerd: wrijfhout. Met tropisch hardhout kan een lange levensduur worden verkregen ten koste van de biodiversiteit in het regenwoud. Alternatief voor tropisch hardhout vormt PE: virgin en recyclaat. In dit onderzoek zijn kosten en milieu-impact van wrijfstroken in deze materialen vergeleken. Dit zowel voor massieve, starre wrijfstroken, als voor verende wrijfstroken met rubberlaag. Alle varianten zijn circulair ontworpen. Van de verende zijn demonstrators gemaakt, getest, geplaatst en onderworpen aan schampstoot van schepen.

hogeschool Windesheim