

# RE: SOURCE

Slutrapport för projekt

---

## **RECYTAL- Tillämpning av återvunna glasfiberförstärkta kompositisolatorer och kasserade glasfibrer i byggindustri**

---

Projektperiod: Juni 2017 till december 2017  
Projektnummer: 44267-1

Titel på projektet – svenska <b>RECYTAL - Tillämpning av återvunna glasfiberförstärkta kompositisolatorer och kasserade glasfibrer i byggindustri</b>
Titel på projektet – engelska <b>RECYTAL – Recycling glass fibre reinforced composite insulators and production scrap in construction applications</b>
Universitet/högskola/företag <b>Swerea SICOMP AB</b>
Adress <b>Argongatan 30, 431 22 Mölndal</b>
Namn på projektledare <b>Jocke Pettersson Swerea SICOMP</b>
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Sotirios Grammatikos, Tang Luping, Chalmers Magdalena Juntikka, Peter Hellström, Swerea SICOMP Ingemar Lövgren, Thomas Concrete Group Magnus Svanberg, Sigbritt Ek, Peter Lindberg, ABB Composites</b>
Nyckelord: 5-7 st <b>Återvinning, Recykling, Recycling, Composites, Concrete, Reinforced Mortar</b>

## Förord

Projektet är ett förprojekt inom programmet Re:Source och har finansierats av Energimyndigheten .

## Innehållsförteckning

Sammanfattning .....	3
Summary .....	3
Inledning och bakgrund .....	4
Genomförande .....	4
Resultat och diskussion.....	5
Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg .....	8
Publikationslista.....	9
Projektkommunikation.....	9
Referenser .....	10
Bilagor .....	11-28

## Sammanfattning

Projektet har syftat till att undersöka potentialen för återvinning/återanvändning av defekta och uttjänta glasfiberförstärkta (GFRP) kompositisolatorer som förstärkning i cement och nya kompositprodukter. Projektet har framställt återvunnet material av uttjänta kompositisolatorer genom att mala ned dem till önskade fibrösa fraktioner. Recepturer har provats ut för inblandning av återvunnet material både i nytt kompositmaterial och i cement. Materialprover har tagits fram och testats mekaniskt. Projektet har även som tillägg betraktat möjligheten att upparbeta uttjänta kompositisolatorer för återanvändning som strukturella komponenter i byggingindustrin.

Resultaten i projektet omfattar exempel på hur både kompositmaterial och cement kan framställas med tillsatser av återvunna fraktioner från uttjänta kompositisolatorer. Här ingår recepturer, process och uppmätta mekaniska data. Exempel på hur en återvinningskedja för kompositisolatorer skulle kunna se ut samt aktörer som bör ingå diskuteras.

Slutsatsen av förprojektet är att det finns goda tekniska förutsättningar för att gå vidare och utvärdera koncepten i ett industriellt förankrat innovationsprojekt.



Figur 1. Malning av uttjänta kompositrör för återvinning. (Eng: Discarded composite tubes are grinded for material recycling).

## Summary

The project aims at investigating the potential for recycling / reuse of end-of-life glass fiber reinforced (GFRP) composite insulators as reinforcement in cementitious mortars and new composite products. The project has produced recycled materials of scrapped composite insulators by grinding them to desired fibrous fractions.

Formulations have been tested for adding recycled materials both in new composite materials and in cementitious mortars. Material samples have been developed and tested mechanically. The project has also considered the possibility of utilizing end-of-life composite insulators for reuse as structural components in the construction industry.

The results of the project include examples of how both composite materials and cementitious mortars can be made with additives of recycled fractions from composite insulators. Formulations, processes and measured mechanical data are presented. Example of how a recycle chain for composite insulators can be set up and industrial partners that should be included is discussed.

The conclusion of the preliminary project is that there are good technical conditions for continuing and evaluating the concepts in an industry-based innovation project.

## Inledning och bakgrund

Den största andelen uttjänta fiberförstärkta kompositer (GFRP) hamnar idag i deponier eller används för energiproduktion huvudsakligen via förbränning (enligt direktivet om förbränning av avfall, 2000/76 / EG) [1]. Det produceras årligen mer än 60 000 ton sammansatt avfall i Europa som hamnar i deponier runt om i Europa eller i andra länder utanför EU (EG: s avfallshanteringsförordningar (259/93)) [2]. Även om förbränning och deponering ger negativ miljöpåverkan är drivkraften ännu låg för att skapa återvinningskedjor för GFRP. En orsak anses vara brist på industriella återvinningsmetoder samt den relativt låga nyanskaffningskostnaden för materialen. Nyligen har användningen av kommersiellt tillverkade fiberförstärkta kompositer i cementbaserade material studerats av ett antal forskare som förstärkning i betong [3-6]. Specifikt har dessa studier betraktat mald GFRP eller armeringsstänger (rebar) skurna i bitar som fyllmedel / armering för betong. Resultaten har varit lovande både vad gäller processbarhet och mekaniska egenskaper. I syfte att skapa en mer hållbar återvinningslösning för fiberförstärkta kompositer, särskilt de som används inom energiindustrin, skall denna förundersökning bedöma potentialen för återvinning / återanvändning av (GFRP) i form av kasserade kompositisolatorer och dess produktionsspill. Ett konsortium bestående av Swerea SICOMP AB, Chalmers tekniska högskola, ABB Composites AB och Thomas Concrete AB har skapats. Syftet i denna förundersökning är att använda kasserade epoxibaserade glasfiberförstärkta isolatorer som fyllmedel/armering i nytt kompositmaterial samt i cementbaserade produkter som ersättning av befintliga tillsatser i form av grus / krossade stenar. Arbetet utförs i form av labbskala försök där representativa materialprover tas fram med efterföljande mekanisk provning.

## Genomförande

### Hållbarhetsanalys

Projektets namn	Recytral			
Projektets effekt	Återvinning / återanvändning av kompositisolatorer inom byggsektorn			
Jämförelseobjekt	Här jämförs återvinning/återanvändning av uttjänta kompositisolatorer med alternativet deponi alt energåtervinning vid förbränning			
	Råmaterial	Tillverkning	Användning	Återvinning och resthantering
Sammanfattning för miljömässig hållbarhet	Minskad användning av råmaterial både vid återvinning och återanvändning	Återanvändning av kompositisolatorören ersätter nytillverkade komponenter. Återvinning av material enligt föreslagna metoder kan dock innebära fler processteg i tillverkningen jämför med att endast nya råvaror används	Vid återanvändning av isolatorrör som byggelement i tex brokonstruktioner minskar transport- och hanteringsvikterna avsevärt eftersom det ersätter betong och stål	Nyttillverkade kompositprodukter med tillsats av återvunnet material enligt presenterat koncept kan materialåtervinnas på nytt. Dock endast som tillsats vid nytillverkning, så en viss del nytt material krävs
	Hållbarhetsaspekt	Beskrivning av hur projektet ska hantera hållbarhetsaspekten		
Positiva hållbarhetsaspekter	Råmaterial	Projektet eftersträvar att tillsätta så hög andel återvunnet material som möjligt i nya produkter i syfte att minska användning av ny råvara.		
	Tillverkning	Återanvändning av så stor del som möjligt av uttjänt produkt som alternativ till återvinning av material från densamma bedöms som gynnsammare ur ett hållbarhetsperspektiv.		
	Användning	Vid återanvändning av kompositisolatorrör som ersättning för stål och betong inom byggsektorn kan medföra väsentliga viktminskningar. Dett bör belysas i projektet.		
Risker	Råmaterial	Föreslagna materialåtervinningskoncept kräver fortfarande en relativt stor andel nytt material eftersom det endast tillsätts i nivåer 20-40%. Att nytillverka produkter av 100% återvunnet material fungerar ej med föreslagna koncept. Projektet eftersträvar att tillsätta så hög halt som möjligt av återvunnet material.		

Figur 2. Sammanfattning av hållbarhetsanalys utförd enligt metod rekommenderad för projekt inom Re:Source.

## AP 1-2. Krav, mål och provtillverkning

I samråd med ABB valdes och samlades representativa GFRP produkter för återvinning. Kontakter för malning till lämpliga fraktioner togs med Rapid granulator i Bredaryd som bistod med utrustning för malning. Metoder för att tillsätta granulerat återvunnet material i både komposit och cement togs fram. Även att undersöka möjligheten att återanvända skrotade kompositrör i nya applikationer utan att mala ned dem togs med som alternativ för inledande utvärdering även om det inte ingick i ursprunglig plan. Med hänsyn till energiåtgång och kostnader bedömdes återanvändning av skrotade kompositrör i nya applikationer som det mest gynnsamma alternativet.

Två applikationsområden valdes för provtillverkning:

1. Cement armerad med återvunnen mald GFRP. I samarbete med Thomas Concrete AB togs recepturer fram och provkroppar tillverkades för mekanisk test på Chalmers.
2. Kompositlaminat med tillsats av återvunnen mald GFRP. På Sicomp togs fram metod och receptur för att blanda in upp till 25% återvunnet material i nya laminat. Testlaminat och provkroppar framställdes i två versioner för mekanisk provning på Sicomp.

Det framkom en ide inom projektgruppen att skrotade GFRP rör också möjligen skulle kunna återanvändas utan att malas ned i nya applikationer efter upparbetning och karakterisering av prestanda. Detta ingick ej i ursprunglig planering och budget men beslutades att behandlas i begränsad omfattning som ide i denna förstudie för att utgöra komplement till övriga prov och slutsatser. Iden består av att skrotade kompositrör som tjänat ut som isolator fortfarande bör ha mycket goda mekaniska egenskaper och bör, efter verifiering av mekaniska prestanda, kunna användas som lastbärande komponent i nya applikationer. Här bestämdes att utföra begränsade tester av mekaniska prestanda på skrotat rör samt utvärdera effekten av att fylla dem med betong för att på detta sätt skapa en produkt som kan användas som lastbärande komponent i byggindustrin. En tänkbar applikation är pelare för kompositbroar. De valda skrotade rören kapades av ABB Composites i enhetslängder för test och skickades till Chalmers för provtillverkning där rören fylldes med betong för att jämföras mekaniskt med ofyllda rör i begränsad omfattning för att ge en indikation om detta har potential att gå vidare med.

## AP 3-4. Provning, utvärdering och rapportering

För de tre applikationsområdena utfördes provning och utvärdering enligt:

1. GFRP-armerad cement. Kompressionstester utfördes på tillverkade kutsar på Chalmers. Jämförande provning gjordes på kutsar utan tillsats av återvunnet material (GFRP).
2. Två typer av kompositlaminat med kärna av 25% återvunnet material testades på Sicomp i böjprovning samt slagprovning både dynamiskt och kvasi-isostatiskt.

Inledande karakterisering av återanvända GFRP rör fyllda med betong påbörjades att testas i kompressionsprov och böjprov av Chalmers. Här ingår också referensrör utan betongfyllnad som referens. Fortsatt karakterisering av dessa liksom val av applikationer bör kunna utgöra grund för fortsatta projekt. En ide är att det inom byggindustrin bör finnas lämpliga applikationer. Här ingår även att identifiera vilka aktörer som krävs för att skapa en återanvändningskedja. Exempel på hur en industriellt förankrad återvinningskedja för kompositisolatorer skulle kunna se ut samt aktörer som bör ingå har diskuterats externt via kontakter i angränsande projekt.

## Resultat och diskussion

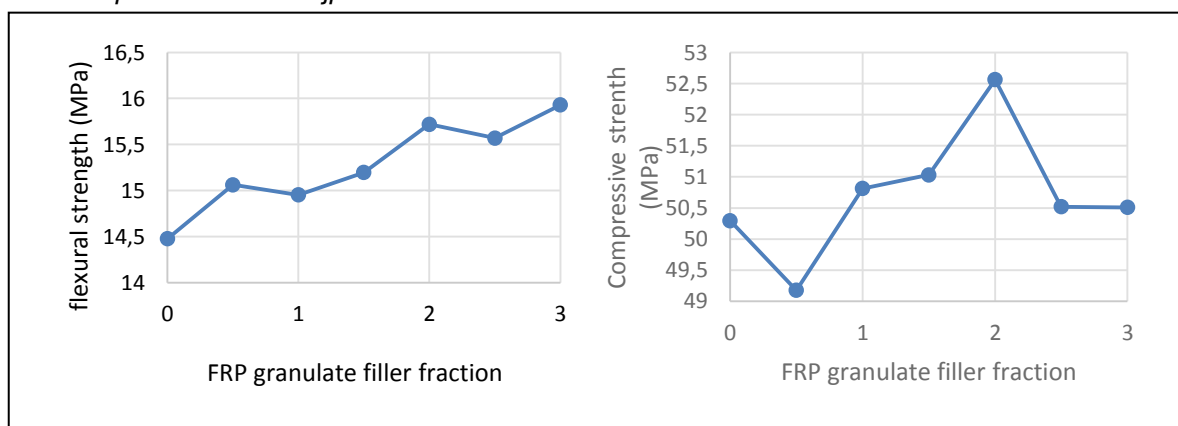
### Malning av GFRP

Det återvunna materialet som togs fram för samtliga tester bestod av utskrotade isolatorrör från ABB Composites. Rören är tillverkade genom fiberlindning och består av glasfiber och epoxi och har en glasfiberhalt på ca 70%. Efter kapning till hanterbara storlekar maldes de i knivkvarn av märket Rapid. Galler med håldiameter 6 mm användes. Ingen efterföljande siktning eller separering gjordes. Resultatet blev en fraktion som kunde användas som tillsats både i cementen och i kompositlaminat. I bilaga (1) visas exempel på materialet före och efter malning.

### GFRP-armerad cement

Kutsar med och utan tillsats av återvunnen GFRP jämfördes i kompressionstester. Recepturer, process och metod beskrivs i bilaga (1).

#### Kompression och böjprov resultat



Figur 3. Resultat av böjprov och kompressionstest. Bilderna visar brottlast som funktion av mängd (%) tillsatt återvunnen GFRP.

### Kompositlaminat med tillsats av återvunnen mald GFRP

Kompositlaminat bestående av en blandning av mald GFRP och ny råvara togs fram. Laminaten består av vinylester och glasfiber med tillsats av 25% återvunnen GFRP samt övriga tillsatser som provats ut för att ge god processbarhet och prestanda. Laminaten gjöts i atmosfärstryck i rumstemperatur. Recepturen för laminaten visas i

bilaga (2). Två typer av laminat gjordes, TYP S hade 800 gr/m<sup>2</sup> armering på respektive sida och TYP D hade 1200 gr/m<sup>2</sup> på respektive sida.

#### Böjprovning resultat

Böjprovning utfördes i enlighet med standard ASTM D7264 med stöдавstånd 150 mm. Provtavarnas dimension var (L x B) 180 x 25 mm. Metoden för böjprovning visas i bilaga (3)

Laminattyp	Böjhållfasthet Medelvärde [MPa]	Antal prov	Tjocklek Medelvärde [mm]
TYP S	183	4	7,9
TYP D	198	4	8,8

#### Slagprovning resultat

Dynamisk och kvasi-isostatisk slagprovning utfördes i enlighet med standard ASTM D136. Provtavarnas dimension var (L x B) 150 x 100 mm. Metoden för slagprovning visas i bilaga (4)

Laminattyp	Dynamiskt, Initial skada Medelvärde [J]	Kvasi-isostatiskt Initial skada Medelvärde [J]	Kvasi-isostatiskt Penetration Medelvärde [J]	Antal prov
TYP S, t=7,9mm	7,5	-	-	7
TYP D, t=8,8mm	9,2	-	-	7
TYP S, t=8,2mm	-	14	-	1
TYP D, t=9,1mm	-	18	120	1

#### Återanvända GFRP-rör med/utan betongfyllning

Skrotade GFRP-rör kapades till enhetslängder och fylldes med betong i syfte att ge indikationer på prestanda. Rör utan betongfyllning utgör referens. Begränsade inledande mekaniska tester indikerar mycket goda mekaniska egenskaper som ligger i nivå med rörens ursprungliga prestanda när de var nytillverkade. Fullständig test av dessa kan dock ej utföras inom ramen för detta förprojekt på grund av att det ej funnits med i ursprunglig planering och budget. Effekten av betongfyllnad är att rören blir väsentligt styvare och starkare i kompression vilket kan vara till stor nytta i lastbärande applikationer där kompressionslasten är betydande, till exempel bropelare eller andra liknande applikationer i byggindustrin.



## Tolkning av resultat

### *Malning av GFRP*

Proven visar att standardutrustade knivkvarnar kan användas för att effektivt mala GFRP till fraktioner som kan användas som återvunnen tillsats i både cement och nya kompositapplikationer. Den malda fraktionen kan användas i sin helhet utan att avlägsna oönskade fraktioner via siktning. I denna förstudie användes små kvarnar som krävde att rören kapades ned till < 500 mm stora bitar för att kunna hanteras av kvarnen. För återvinning i större skala krävs kvarnar med större kapacitet. Enligt uppgift från kvarntillverkaren, Rapid Granulator AB, finns det en mängd olika kvarnar med tillräcklig kapacitet att tillgå som bygger på samma malningsteknik vid en eventuell industrialisering av malning av GFRP.

### *GFRP- armerad betong*

Testen visar att det fungerar att blanda malda återvunnen fraktion av GFRP som fibrös armerande tillsats i cement. Tillsats av upp till 3 viktsprocent fungerar fint. Det som begränsar mängden tillsatt återvunnen GFRP är i första hand processbarheten för cementen.

### *Kompositlaminat med tillsats av återvunnen malda GFRP*

- Resultaten demonstrerar enkel processteknik för laminat med tillsats av 25% återvunnet material som kan appliceras på en mängd applikationer. Mekaniska prestanda är något lägre än för de flesta laminattyper som används kommersiellt idag men troligen tillräckligt bra för vissa applikationer. Att laminaten visar på relativt god stryktålighet via slagprovet kan möjliggöra applikationer där robusthet och kostnad premieras. Detta koncept, eller liknande koncept för återvinning av fiberförstärkta kompositer föreslås kunna tillämpas även inom andra branscher (t.ex. inom förnybar energi, marin, bil, elektronik, flyg och rymdindustrin).

### *Återanvända GFRP rör med/utan betongfyllning*

Testerna indikerar att skrotade kompositislatorrör har mycket goda mekaniska prestanda som bör kunna ligga till grund för återanvändning i nya applikationer. Vid fyllning av rören med betong visas att prestanda som lastbärande komponent för kompressionslast ökas avsevärt. Eftersom denna aktivitet ej ingick i ursprunglig plan och budget har endast mycket begränsade tester kunnat utföras som indikation. De lovande resultaten utgör en god grund för att karakterisera egenskaperna mer utförligt i nya projekt

## Slutsatser, nyttiggörande och nästa steg

Förprojektet har demonstrerat att kompositisolatorer (GFRP) kan malas ned och utgöra tillsatsmaterial både i nya kompositprodukter och som fibrös tillsats i cement. Kommersiell drivkraft för att i närtid införa denna typ av materialåtervinning bedöms dock som relativt låg för närvarande eftersom de materialfraktioner som ersätts med det återvunna materialet är relativt billiga, och därmed minskar den ekonomiska drivkraften för införande. Det beskrivna konceptet med återanvändning av uttjänta

kompositisolatorer som lastbärande komponenter i byggindustrin i till exempel broar, bedöms som lovande på grund av att det bör finnas ett ekonomiskt incitament då de återanvända rören indikerat goda mekaniska prestanda och troligen kan användas i relativt krävande lastbärande applikationer. Ett konkret förslag är att utvärdera om de går att använda som byggkomponenter i gång- och cykelbroar. En industriellt fokuserad plan som stegvis beskriver återvinning och återanvändning av uttjänta kompositisolatorer ges som exempel nedan (steg 1-5). I detta exempel används återanvända rör från kompositisolatorer som lastbärande komponenter i gång- och cykelbroar. Som fyllnad i cementen i punkt 2 kan även återvunnet material enligt beskriven teknik tillsättas.

1. Uttjänta eller av andra orsaker skrotade kompositisolatorer samlas av producenten (aktörer ex: ABB Composites)
2. Uppgradering till rörformade konstruktionselement, eventuellt fyllning av betongkärnor med tillsats av återvunnet material. Här ingår att ta fram specifikationer /prestanda dokumentation för de återvunna rören. Lagerhållning av ett sortiment som kan erbjudas marknaden (aktörer ex: ABB, partners från återvinningsbranschen, ex STENA mfl.)
3. Brodesigners/brobyggare kan allokera konstruktionselement ur erbjudet sortiment vid konstruktionsfasen. (aktörer: brodesigners/brobyggare)
4. Brobyggare köper allokerade byggelement från (2) ovan.
5. De återanvända kompositrören ingår som konstruktionselement i nya broar.

Exemplet ovan bedöms som ett fullt realistiskt konceptexempel på återanvändning och återvinning av uttjänta eller skrotade kompositisolatorer och kan ligga till grund för fortsatta projekt. Troligen bör första steget vara att utvärdera prestanda i full skala där stora isolatorer i längder upp till cirka 10 meter karakteriseras med avseende på lastbärande egenskaper. De viktigaste tekniska utmaningarna för återvinning av kompositmaterialet med föreslagna metoder som tillsats i kompositlaminat eller i betong har identifierats vara att ordna insamling och malning på ett kostnadseffektivt sätt eftersom den nya råvaran som det återvunna materialet kan ersätta fortfarande är relativt billigt.

## Publikationslista

Resultat från projektet planeras att presenteras vid nästa ECCM18-konferens i Aten, juni 2018. Utöver detta avses en publikation publiceras i "Composite Structures, Elsevier" eller "Construction- and building materials, Elsevier", arbete med artikel för publikation pågår (Chalmers).

## Projektkommunikation

Projektarbetet har presenterats vid tekniska möten vid Chalmers. Preliminära resultat har delgivits och diskuterats med intressenter som är möjliga industripartners i fortsatt arbete med att realisera en industriellt baserad återvinningskedja för kompositisolatorer som lastbärande komponenter i brobyggnad enligt beskrivet exempel under ”Slutsatser, nyttiggörande och slutsatser” ovan. Bedömningen är att det finns goda förutsättningar för att gå vidare inom detta område tillsammans med intressenter från industrin.

## Referenser

- [1] European Commission, Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council on the incineration of waste, 2008.
- [2] European Commission, Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of regulation (EC) no 1013/2006 on shipments of waste, 2015.
- [3] N. Reynolds, M. Pharaoh, An introduction to composites recycling, in: V. Goodship (Ed.), Management Recycling and Reuse of Waste Composites, Woodhead Publishing, 2010, pp. 3–19.
- [4] M. Shahria Alam, E. Slater, Billah.A. Muntasir, Green concrete made with RCA and FRP scrap aggregate: fresh and hardened properties, J. Mater. Civ. Eng. 25 (12) (2013) 1783–1794.
- [5] M.C.S. Ribeiro, A.C. Meira-Castro, F.G. Silva, J. Santos, J.P. Meixedo, A. Fiúza, Reuse assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: a case study regarding GFRP pultrusion wastes, Resour. Conserv. Recycl. (2015).
- [6] A. Yazdanbakhsh LC. Bank, C. Chen, Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete, Construction and Building Materials 121 (2016) 278–284.

## Bilagor

## Bilaga1

**Recytal appendix 1 - Methods and results for adding recycled GFRP in cement****Methods**

After considerable literature review of the fundamental literature, the experimental research work within this pre-study initiated with the collection of FRP insulation pipes provided by ABB Composites AB shown in Figure 1. The FRP pipes were filament wound manufactured, with glass fibre reinforcement and epoxy resin serving the polymer matrix. The pipes were cut into <0.5m in order to fit within the granulator's container.



**Figure 1. Discarded FRP insulation pipes from ABB Composites AB that were ground and used as filler in cementitious and polymer matrix composites.**

## Bilaga 1

FRP pipes were grinded using a special granulator provided by RAPID Granulator, Sweden, at the premises of the company, to produce FRP granulates shown in **Figur** .

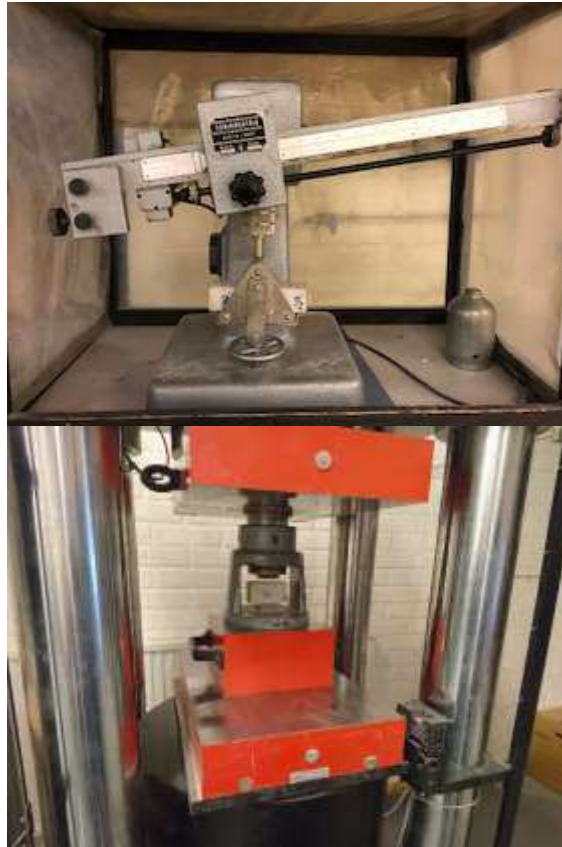


**Figure 2. Granulation procedure to produce FRP fillers for cementitious and polymer matrix composites.**

After granulation, a considerable amount of FRP granulates was produced to be used as filler in cementitious and polymer matrix composites. With respect to cement, standard cementitious mortars (1350g sand, 450g cement, 225g water) were fabricated to study the effect of FRP fillers in mortars. In order to reach the goal of the study, FRP fillers were added to a certain degree or until workability of the cementitious mix was affected. To that respect, a maximum amount of 3% by volume of FRP ground fillers was added within the standard mortar mix. A gradual increase of the FRP fillers content was adopted to effectively test filler influence of the cementitious mix. To that end, prismatic mortar samples (40x40x160mm) containing 0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% and 3% of FRP filler were fabricated.

**Bilaga 1****Results**

For all sample fractions, 3 specimens were fabricated and the mean value of all test results was calculated. Specimens were subjected to 3-point bending and compression testing to study the effect of FRP granulate filler addition (Figure 3).



**Figure 3. Three point bending testing machine (left), compression testing machine (right).**

Bilaga1

Figure 4 depicts the mean values of flexural strength and compression stress for the different FRP granulate fractions. As can be seen, flexural strength increases steadily with an increase in FRP fraction. Interestingly enough, compression stress values reach a maximum at 2%v/v FRP fraction. This implies the fact that 2% v/v is the maximum FRP granulates that have to be used in order to increase the mechanical properties of cementitious mortars. Compression testing reflects that a further filler fraction increase up to 3%, does not affect compression capacity, however, this is the point where workability of mortars is significantly influenced.

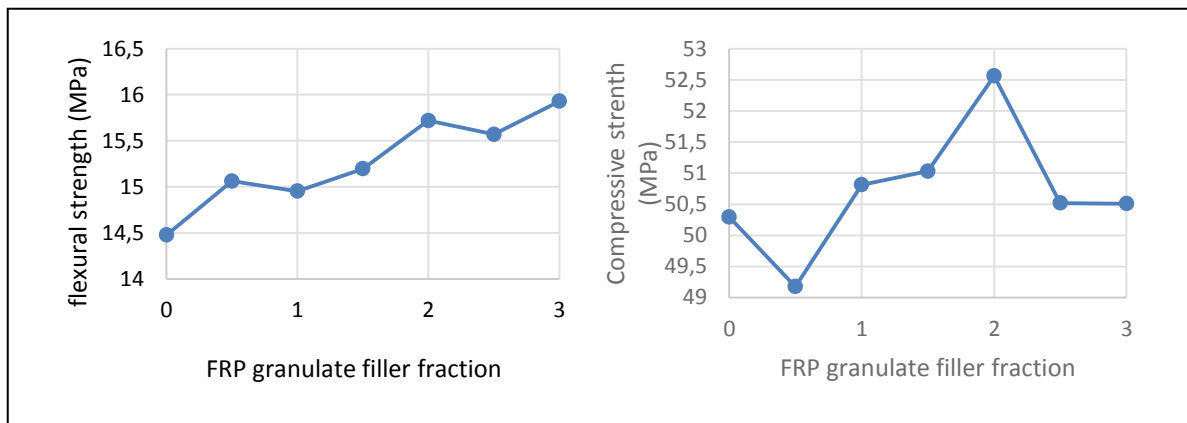


Figure 4. Flexural strength (left) and compression stress (right) for the different FRP granulate fractions.

## Bilaga1

The fabricated and tested cementitious mortars, can be seen in Figure 5.



Figure 5. Cementitious mortars containing FRP granulated fillers at different fractions.

### Conclusions

It can be concluded that, from a structural point of view, FRP granulates can be employed as efficient reinforcing fillers in cementitious mortars up to 3%v/v without compromising the pristine mechanical behaviour.

The effect of filler sizing is expected to be very important for the final mechanical properties of mortars as well as the workability.

It becomes obvious that this feasibility study proven the potential of recycling/repurposing of retarded FRP insulation pipes contributing to the waste reduction, minimization of CO<sub>2</sub> emissions, efficient use of resources, etc. This paves the way for the next step of the project idea that is a 'Demonstrator project'.



## Bilaga 2

### Recytral appendix 2 – Resin mixture formulation for adding recycled fractions in composite materials

Formulation laminate Recytral , 300 x 600mm, x10mm			
Receipt			
Komponent	ppw	gram	Weight %
Dion 9102	100	2600	61
Acc. 9802 (cobalt 1%)	3	78	2
Inhibitor 9853	0,2	5,2	0,1
Color paste	2	52	1
talc	16	416	10
Recyklat (70% glas/epoxi)	43	1118	26
Sum		4269,2	100
Catalyst: 2% Norpol Peroxide 11			
Mixture density:	1,361	kg/dm3	
Geltime roomtemp	47 min		
Post cure	30 C, 12h		
Laminate size (lam1+Lam2)	0,525 X 0,785= 0,412 m2		
Reinforcements top/bottom	lam 1 (Gram)	lam2 (Gram)	
E-glass weave 365gr/m2	75,19	75,19	

**Bilaga 2**

E-glass CSF 450 gr/m <sup>2</sup>	92,7	185,4	
Sum	167,89	260,59	
Total in laminate	335,78	521,18	gram
Resinmix	2134,6	2134,6	gram
tot laminate weight	2470,38	2655,78	gram



Figure 1. Resin mixture is prepared including recycled fraction. Two layers of glass fibre mats are added on top and bottom. The laminate is then cured in room temperature in atmospheric pressure. The laminate is sealed with a bag to prohibit styrene evaporation during curing.

## Bilaga 3

### Recytal appendix 3 – Three point bending method.

Three point bending tests were carried out using the ASTM D7264/D7264M-15 standard. A three point bending fixture was used in a Shimadzu universal testing machine, see Figure 6.



Figure 6 3-point bending test setup

The specimens were quite non-uniform in their size, therefore the thickness was measured in 6 different locations and the width was measured in three different locations. The span between the two lower supporting rollers was 150 mm for all specimens.

The maximum flexural stress was calculated for each specimen using equation 2 from the ASTM standard

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2}$$

where

$\sigma$  = stress at the outer surface in the load span region, MPa

P = applied force, N

L = support span, mm

b = width of beam, mm

h = thickness of beam, mm

The maximum recorded force given by the load cell in the testing machine was used for the calculations.

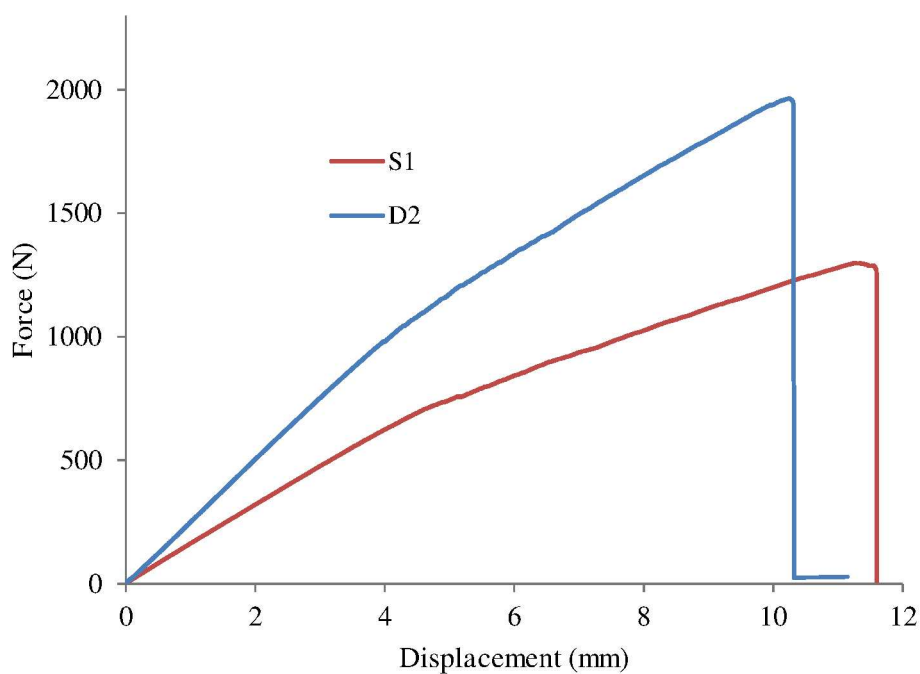
All specimens failed in a similar manner, see Figure 7.

**Bilaga 3**



**Figure 7 Specimen S3 and specimen D2 after failure**

The load deflection curves for one S specimen and one D specimen is presented below in Figure 8.



**Figure 8 Load/Deflection curve from specimen S1 and D2**

## Bilaga 4

### Recytal appendix 4 – Impact testing.

Two types of impact testing was performed in Recytal; quasistatic impact testing and dynamic impact testing. Quasistatic impact testing was performed with the same boundary conditions as the dynamic impact tests but were performed at low (quasistatic) speeds in a Shimadzu universal testing machine. The dynamic tests were performed following the ASTM D7136 standard, see Figure 9.

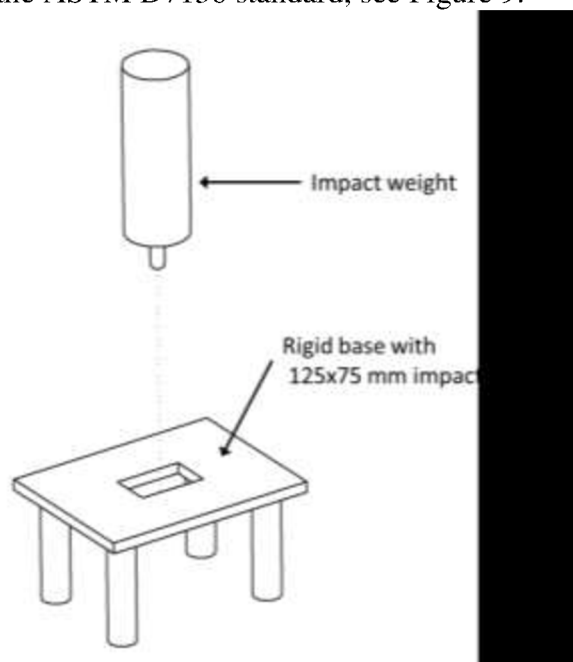


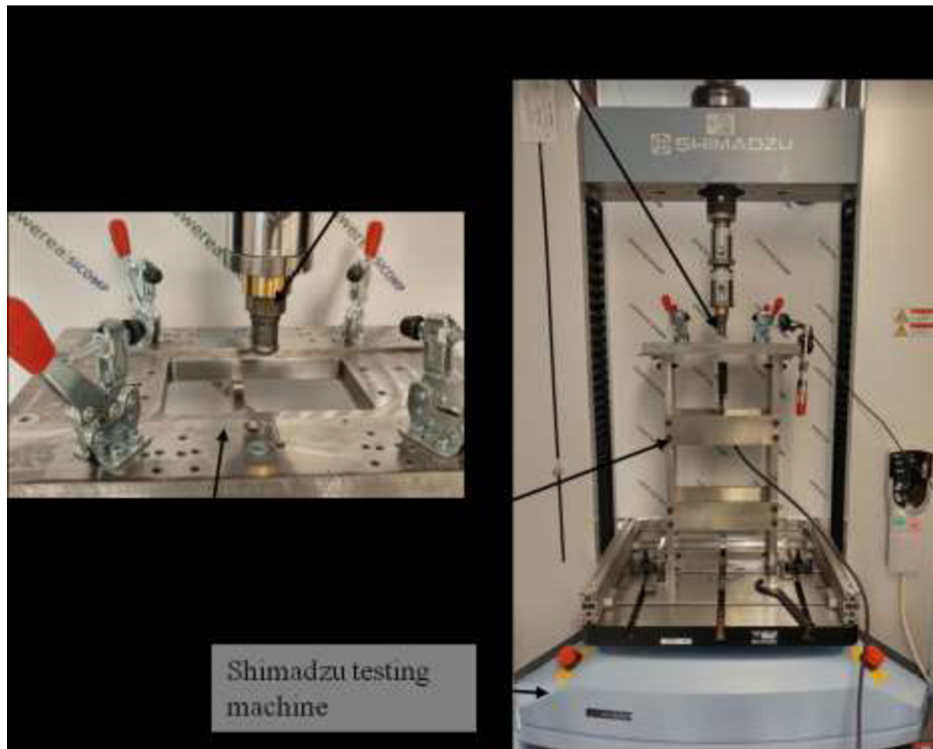
Figure 9 ASTM D7136 impact test setup in principle

A specimen is placed over the 125x75 mm impact window and a impact weight with a known weight is dropped on the center of the specimen with a known speed, producing a known impact energy. The impact weight has a impact tup with a specie shape, the impact tup is the part of the impact weight which directly makes contact with the specimen. The damage inflicted on the specimen can then be observed. If the test is instrumented and a deflection and force is recorded during the test the resulting load/deflection curves can also be used to identify at which energy the damage is likely to have started.

#### Quasistatic impact testing

Quasistatic impact testing was done initially before impact testing on two specimens, this was done to identify which impact energy could be used in the quasistatic tests without testing specimens at irrelevant impact energies. The same rigid base as in the dynamic tests were used for the quasistatic tests, but the quasistatic tests were performed using a Shimadzu universal testing machine a low speeds. The same impact tup that is used in the dynamic tests is also used in the quasistatic tests, see

## Bilaga 4



**Figure 10** Quasistatic impact test setup.

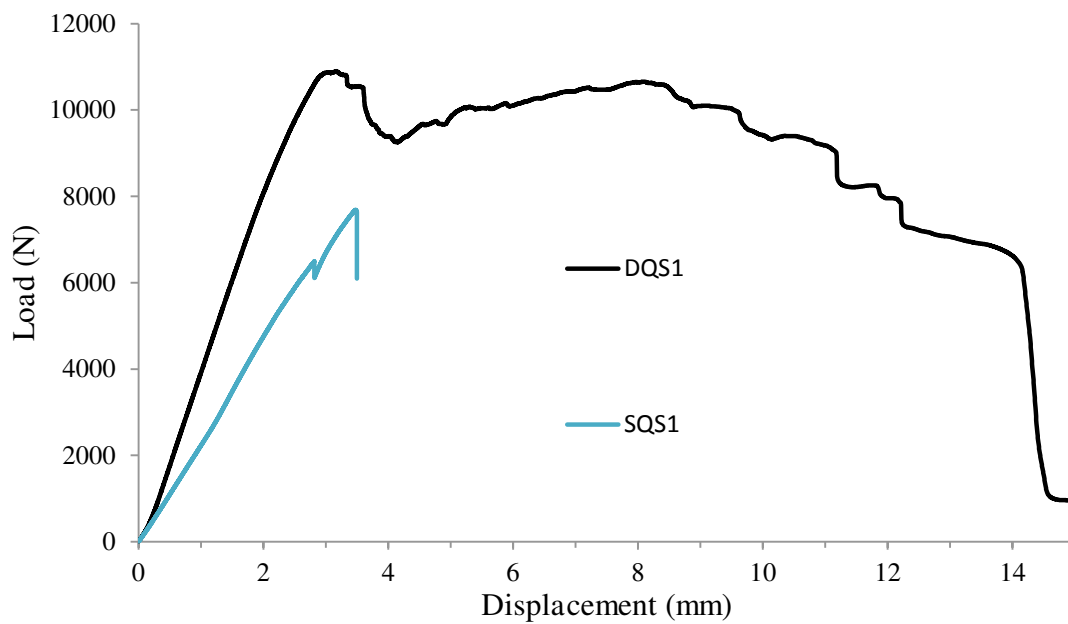
The specimen is placed over the impact window and clamped with four clamps in the corners of the impact window, see Figure 11.



**Figure 11** Specimen at start of test

Two specimens were tested, SQS1 and DQS1. DQS1 had the double amount of reinforcing glassfiber at the top and bottom of the laminate. Specimen DQS1 was tested until the impact tup had completely penetrated the specimen, specimen SQS1 was tested only until a large drop in load (indicating damage) was recorded by the testing machine. The load/displacement curves for both specimens are presented below in Figure 12.

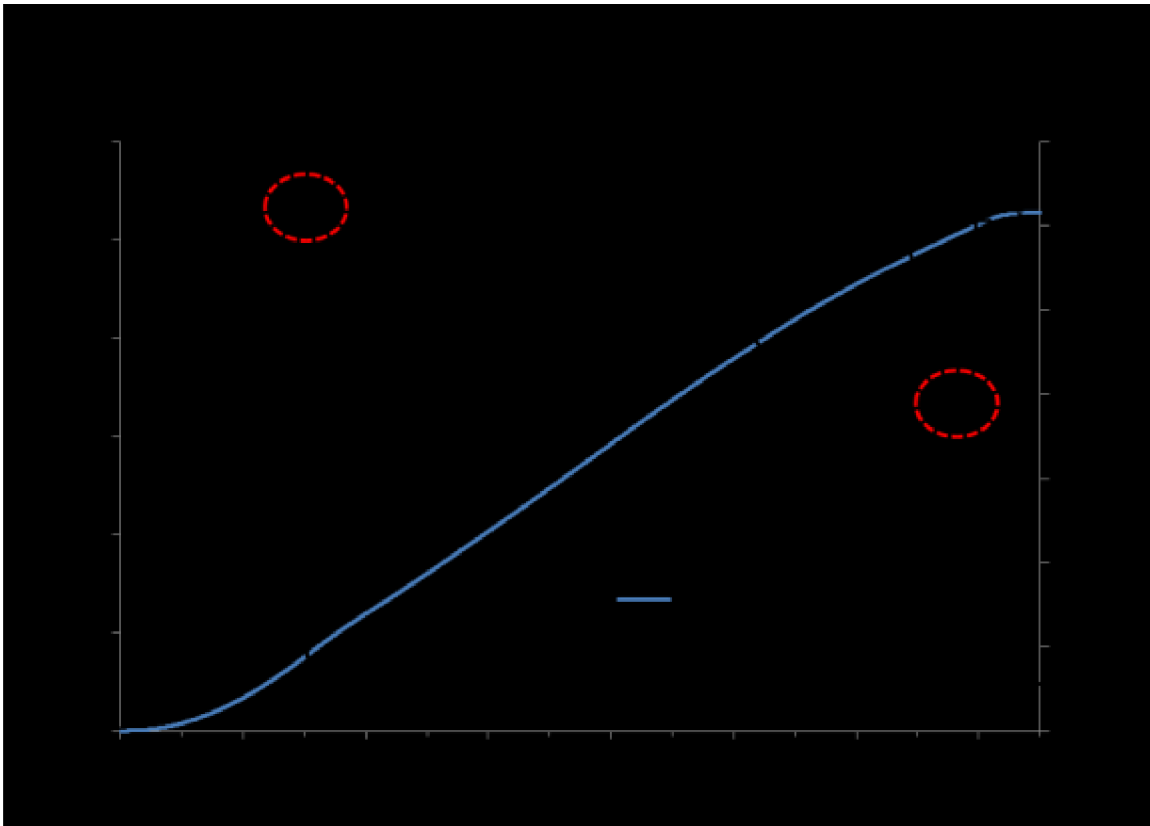
**Bilaga 4**



**Figure 12** Load/Displacement curves of specimen DQS1 and SQS1

To convert the load/displacement curves into impact energies the load/displacement curves is integrated to give an energy (work)/displacement curve. It is then possible to identify at which impact energy certain damage is likely to occur, see Figure 13,

## Bilaga 4



**Figure 13 The energy required for initial damage and penetration is determined for specimen DQS1**

For specimen DQS1 initial damage occurs at around 18 J (Joule), while penetration requires 120 J. The same was done for specimen SQS1, where initial damage occurred at around 14 J.

Since the tests was filmed using a synchronized video camera, the visual damage propagation can be investigated. This is presented for specimen DQS1 below in Figure 14.



## Bilaga 4

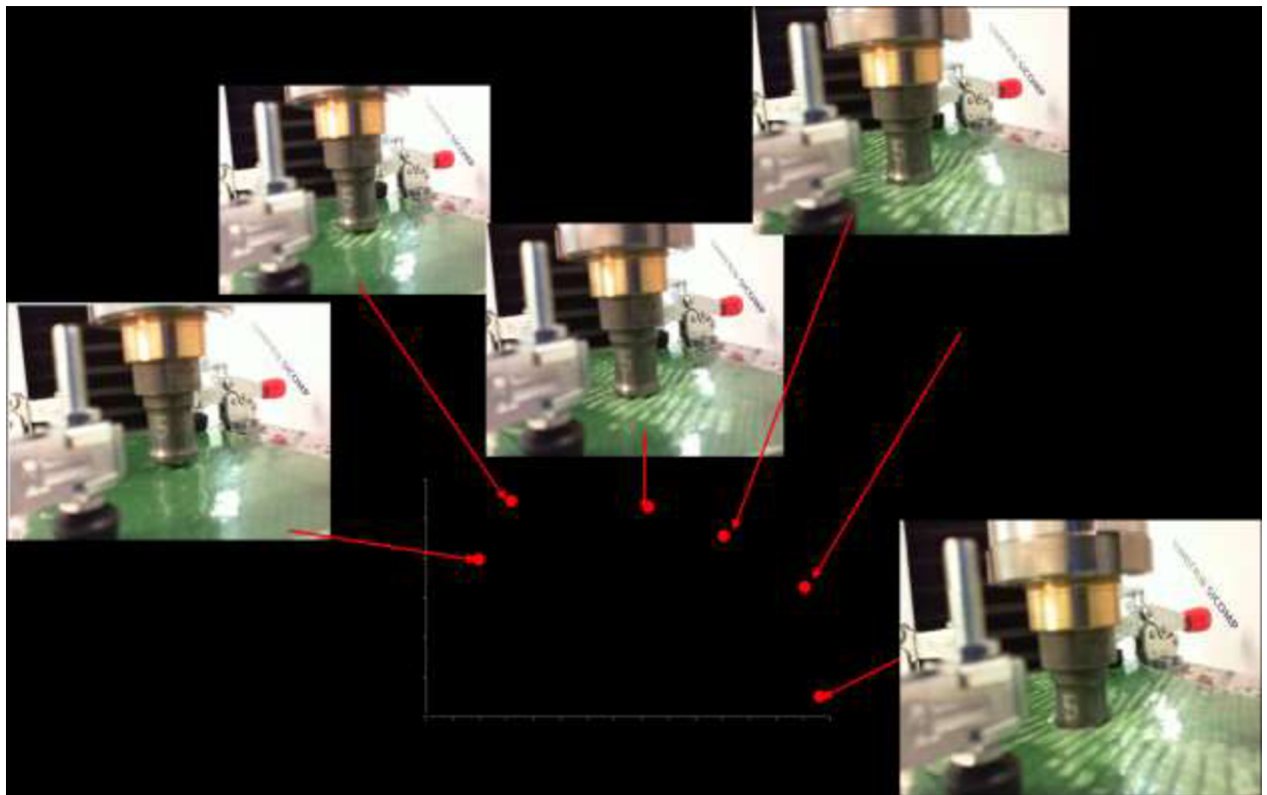
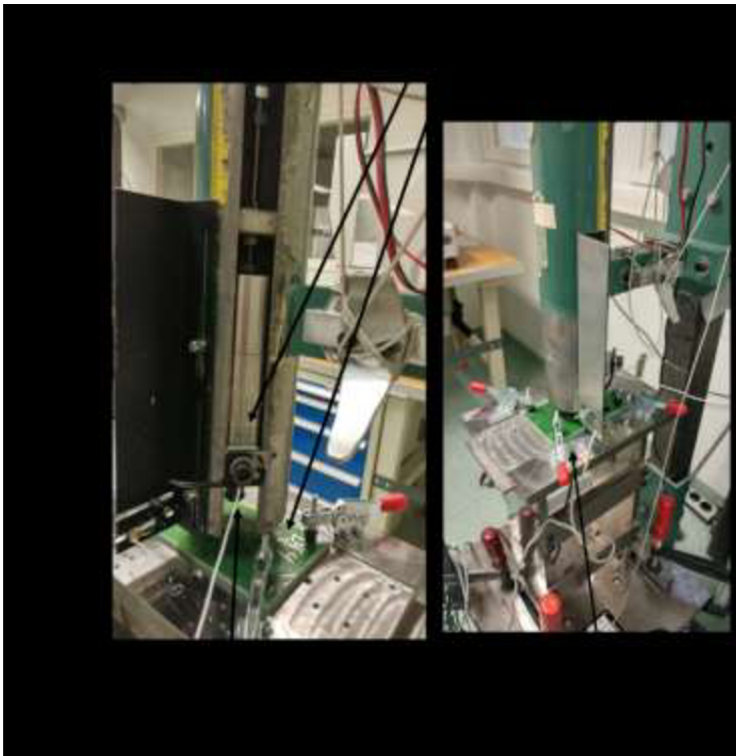


Figure 14 Specimen DQS1 damage propagation

### Dynamic impact testing

After determining at which impact energy damage would be expected to occur in the quasistatic impact tests, dynamic impact tests were performed. They were performed with the same rigid impact base as the quasistatic tests, but were impacted with an instrumented drop weight guided by an impact tube. Additionally, the deflection of the underside of the specimen was recorded using a high-speed laser distance sensor. The impact speed of the drop weight was recorded using an optical sensor. See Figure 15 for photos of the test setup.

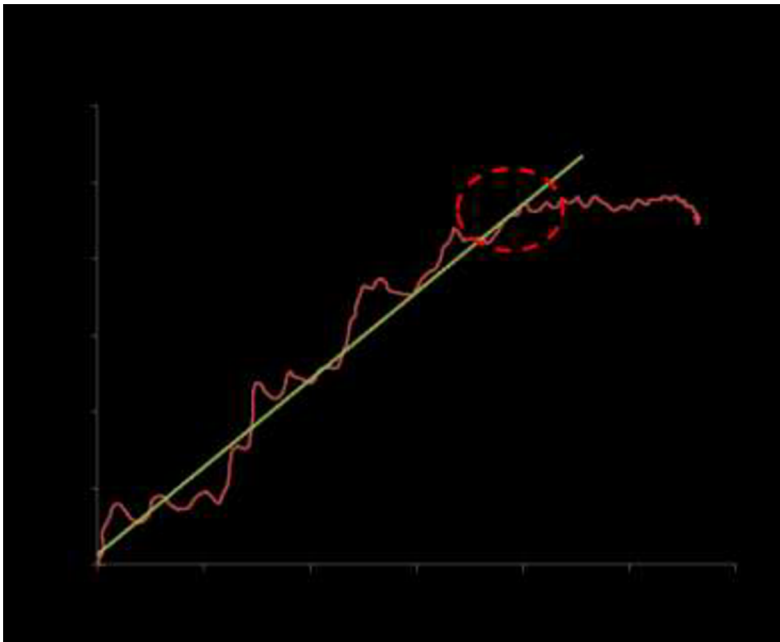
## Bilaga 4



**Figure 15 Impact test setup**

7 S specimen and 7 D specimen were impacted. Four specimens of each type were impacted at around 20 J and 3 specimens of each type were impacted at around 40 J. Regardless of what energy the specimens were impacted the load/deflection curves for each specimen was studied to determine at which point they diverged from being linear, see Figure 16

## Bilaga 4

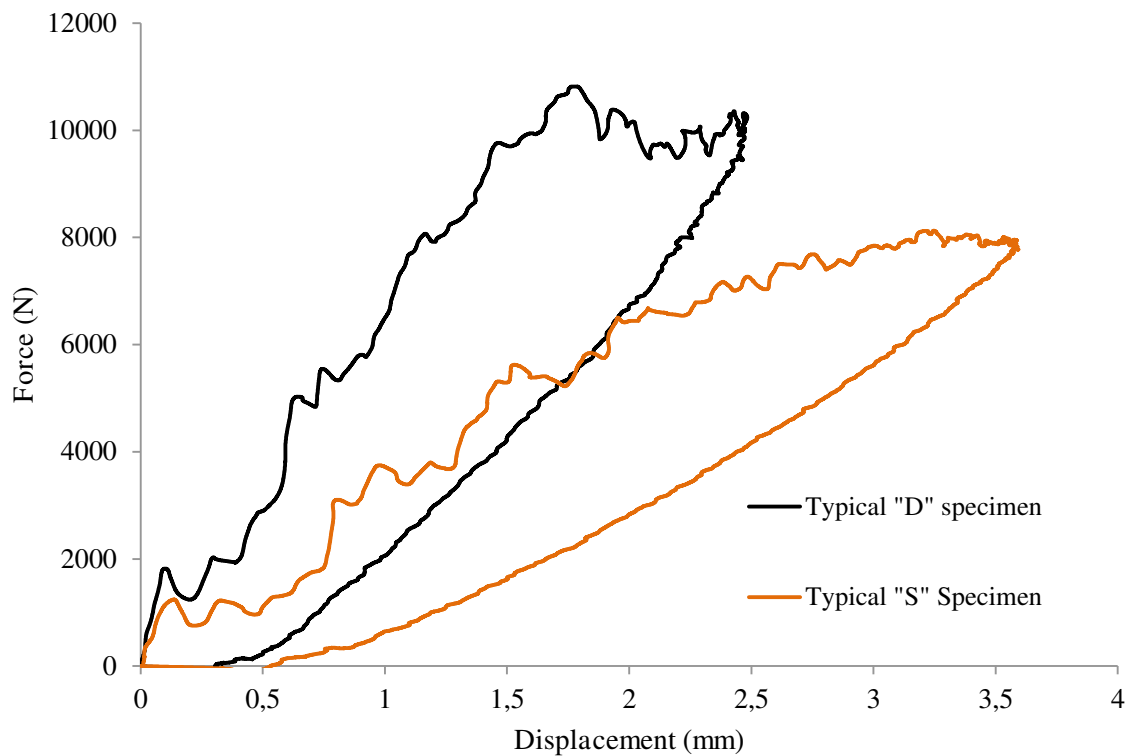


**Figure 16 Load/Deflection data from specimen SI3**

Just like in the quasistatic tests, the load/deflection curves were integrated and the energy at the point where initial damage occurred (indicated by the divergence in the linearity in the load/deflection curve) could be found.

Below, in Figure 17, load/deflection curves of one typical “D” specimen and one typical “S” specimen is shown, both impacted at close to 20 J. It is clear that the “D” specimen has a stiffer structural response, most likely due to the larger amount of glass fibre in the top and bottom

## Bilaga 4



**Figure 17 Typical force/displacement response of two different types of specimens both impacted at close to 20 J**

An example of the visible damage sustained on the specimen is shown below in Figure 18.

## Bilaga 4



Figure 18 Visible damage on specimen DI1