



Miljø- og
Ligestillingsministeriet
Miljøstyrelsen

Miljørigtig genanvendelse af CFC-holdige fjernvarmerør MUDP-projekt

MUDP Rapport

Juni 2025

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jan Kjær	Eldan Recycling A/S
Jakob Kristensen	Stena Recycling A/S
Vibeke Jacobsen	Stena Recycling A/S
Carsten Hovgaard	Dan Jord A/S
Jacob Stensbjerg Callesen	GasDetect A/S

Bjørn Malmgren-Hansen	Teknologisk Institut
Casper Laur Byg	Teknologisk Institut
Martin Bundgaard Johansen	Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7564-007-2

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	6
2.	Summary and Conclusion	7
3.	Sammenfatning og konklusion	11
4.	Introduktion	15
5.	Sammensætning af fjernvarmerør	17
5.1	Materialer i og konstruktioner af fjernvarmerør	17
5.2	Sorteringsforsøg ved Dan Jord	20
6.	Udvikling af forbehandlingskoncept	23
6.1	Forsøg med neddeling af forbehandlede rør	23
6.1.1	Resultat af forsøg med rør Type 1 (med CFC) og Type 2 (uden CFC) - lige uden mellemlag/bitumen	23
6.1.2	Resultat af forsøg med rør Type 3 (med CFC) og Type 4 (uden CFC) - med mellemlag	24
6.1.3	Forsøg med neddeling og vindsigtning	25
6.2	Forsøg med neddeling af rør med næbsaks	26
6.3	Forbehandlingskoncept	27
7.	Modning af CFC-sensor	28
7.1	Motivation og sorteringsbehov	28
7.2	Taskeudgave af CFC-sensor	28
7.3	Krav til og fremstilling af videreudviklet CFC-sensor	30
7.4	Erfaringer og videre modning	34
7.5	Moniteringsbehov ved opgravninger og sorteringspladser	36
7.6	Moniteringsbehov på neddelingsanlæg	37
8.	Fremstilling af forbehandlede rør	38
9.	Behandling af forbehandlede fjernvarmerør	44
9.1	Udvikling af anlæg til behandling af modificerede fjernvarmerør	44
9.1.1	Layout for behandling af forsorterede fjernvarmerør	44
9.2	Udviklingstest med forbehandlede rør med og uden CFC	46
9.2.1	Forsøg del 1: Neddeling og jernseparation	46
9.2.2	Resultater af forsøg	47
9.2.3	Forsøg del 2: Vindsigtning af plast og skum	48
9.2.4	Materiale uden CFC	50
9.2.5	Materiale med CFC	52
9.2.6	Samlede mængder og estimerede renheder og udbytter	54
9.2.7	Samlet delkonklusion	55
9.2.8	Pillepresning af PUR	55
10.	Oparbejdning og afsætning af HDPE	58

10.1	Oparbejdning af HDPE fra rør uden CFC	58
10.2	Oparbejdning af HDPE fra rør med CFC	60
10.3	Ekstrudering af HDPE	61
10.4	Analyser af materialekvalitet af ekstruderet HDPE	64
10.4.1	FTIR	64
10.5	Fremstilling af ekstruderede strenge og sprøjtetøbte trækstænger	65
10.6	DSC-analyser	66
10.7	MFI og styrkeegenskaber	70
10.8	Anvendelsesmuligheder	71
10.8.1	Rørmateriale	71
10.8.2	Mellemlag	71
10.8.3	Kraftige emner	71
10.8.4	Græsarmering	71
10.8.5	Muligheder for forbedring af kvaliteten	72
11.	Oparbejdning og afsætning af PUR	73
11.1	Analyser af piller	73
11.2	Vurdering af anvendelsesmuligheder	73
11.2.1	Mekanisk genanvendelse	74
11.2.2	Kemisk genanvendelse	74
12.	Diskussion af muligheder for sortering, forbehandling og oparbejdning af alle typer fjernvarmerør	78
13.	Miljøeffekter	81
13.1	Vurdering af mængder af fjernvarmerør samt produkter fra anlæg og efter oparbejdning	81
13.1.1	Antagne mængder behandlet af anlæg	81
13.1.2	Tilgængelige mængder	81
13.2	Vurdering af miljøeffekter	81
14.	Businesscase	86
14.1	Forbehandling	86
14.2	Oparbejdning	87
14.3	Samlede behandlingsomkostninger	89
15.	Konklusion	92
Bilag 1.	Dimensioner af rør	93
Bilag 1.1	Dimensioner af medierør og kapperør	93
Bilag 2.	Indhold af materialer i rør	94
Bilag 2.1	Mellemlag eller yderlag af andre materialer	94
Bilag 2.2	Ribber og indblæsningshuller	100
Bilag 2.3	Kraftigt gods	102
Bilag 2.4	Problematiske fraktioner i rør type3, type 4.	104

1. Forord

Projektet 'Miljørigtig genanvendelse af CFC-holdige fjernvarmerør' er gennemført i perioden fra 1. januar 2020 til 30. maj 2023 med støtte fra Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet.

Affald af udtjente fjernvarmerør opstår løbende ved renoveringer af fjernvarmestrækninger i fx byer. Ved den nuværende oparbejdningsmetode behandles rørene med en teknologi, hvor stålet i det varmetransporterende medierør genanvendes, mens indholdet af isolerende PUR skum og kappeplast af HDPE ikke genanvendes.

Det overordnede formål med projektet har været at udvikle et koncept til en behandlingsløsning for udtjente CFC-holdige fjernvarmerør med høj genanvendelsesgrad af alle materialer og samtidig opsamling af CFC. Der er i projektet også arbejdet med udvikling af behandlingsløsninger til nyere udtjente rør, som er opskummet med cyklopentan, og som udgør en betragtelig andel af rørene.

Rapporten beskriver udviklingsaktiviteterne.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem Eldan Recycling, Stena Recycling A/S, Dan Jord A/S, GasDetect A/S og Teknologisk Institut.

Projektets styregruppe har bestået af:

- Jan Kjær, Eldan Recycling A/S
- Jakob Kristensen, Stena Recycling A/S
- Rasmus Birch Sørensen, Dan Jord A/S
- Jacob Stensbjerg Callesen, GasDetect A/S
- Bjørn Malmgren-Hansen, Teknologisk Institut
- Miljøstyrelsen.

2. Summary and Conclusion

In this project, a concept was developed for a treatment solution for end-of-life district heating pipes containing Polyurethane foam with CFC or cyclopentane, comprising the recycling of HDPE plastic in the outer tube casing as well as the recycling of foam.

Environmental impact

The environmental benefits of recycling plastics are significant if the developed treatment solution is used, as it gives estimated savings of app. 0.75 tons CO₂/ton district heating pipes or 3 tons CO₂/ton plastics, if HDPE material as well as PUR foam are recycled.

If savings in CO₂ equivalents obtained by avoiding CFC emissions are included, the overall picture is even more significant. It is estimated that the current method of separating pipes at Stena has an emission of CO₂ equivalents of 28.9 tons of CO₂ per ton of treated pipe, whereas the new concept has an emission of 0.69 tons of CO₂ per ton of treated district heating pipes or savings of 28.2 tons of CO₂ per ton of treated pipes. It should be noted that the estimate is associated with some uncertainties.

Business case

Calculations have been made of different scenarios with the developed concept of pre-treating and reprocessing plants. The calculations show a higher treatment cost compared to the current treatment in a shredder plant. That is, i.e., due to increased costs related to manual checking of pipes for content of bitumen layer or CFC. The costs for pre-treatment increases quite drastically when the pipe dimension decreases.

The table below shows the estimated treatment cost for Stena's current treatment in shredder plants compared to the new concept with 3 shifts and recycling of PUR for two pipe dimensions.

Scenario	Shredder	New concept, 3 shifts, recycling of PUR
62 mm	-1.170	583
114 mm	-1.170	-330

It appears that the new concept is 840 DKK more expensive per ton.

However, the picture changes when the environmental economic value of eliminating avoided CFC emissions is examined. When performing an estimate of saved CO₂ equivalents in tons converted to DKK by assuming a price of 606 DKK/ton (corresponding to the CO₂ quota price, it is estimated that the cost for treatment with the current shredder system treatment corresponds to an environmental cost of 16 283 DKK/ton, which is reduced to 1151 DKK/ton for the new concept when treating 114 mm pipes, 3 shifts, and recycling of PUR.

The calculated economic benefits of the new process are considerable when the environmental value of saved CO₂ emissions is included. It is assessed that the uncertainties in the estimate will not have a significant impact on the large effect that arises by avoiding emission of CFC gases.

However, in order to establish the process it is necessary to ensure an economic basis for the increased price of the treatment in the form of improved regulatory framework conditions for the treatment of district heating pipes. For instance, identical requirements for treatment of all

CFC-containing district heating pipes where it is required that a substantial part of the CFC content is collected during treatment. In this context, one can have an eye to the existing rules for the treatment of refrigerators. Specific demands exist on the safe destruction of the CFC content from the compressor as well as the foam. Furthermore, it should be considered if demands should be placed on the removal of CFC-containing pipes found with the sensor-based method used in this project as well as pipes foamed with cyclopentane. In that way, the quantities that are treated and from which plastic resources can be extracted could be increased.

Composition of district heating pipes

District heating pipes consist of 3 main components:

1. One media tube (steel for all large pipes).
2. Foamed insulation of polyurethane plastic.
3. Outer casing made of hard plastic.

The outer casing of most pipes is made of HDPE, but a small number of pipes have a plastic casing made of PVC.

The project mapped the composition of the pipes from Dan Jord's renovations in Aarhus.

The mapping showed that older, especially CFC-containing pipes, have several extra layers of, e.g., plastic film, oil canvas or textile, and bitumen. The layers can be found both on the outside of the media tube and on the inside of the casing tube. In addition, there may be pipe joints with a content of canvas and bitumen.

Especially the sticky bitumen was considered a problem for the subsequent reprocessing.

Newer tubes foamed with cyclopentane have an aluminum layer on the inside of the casing pipe.

At a certain distance on the pipes, various strong metal structures such as valves and flanges had been mounted. Furthermore, pipe joints often had joints with older pipes made of PVC and smaller pipes where the media pipe was made of PEX.

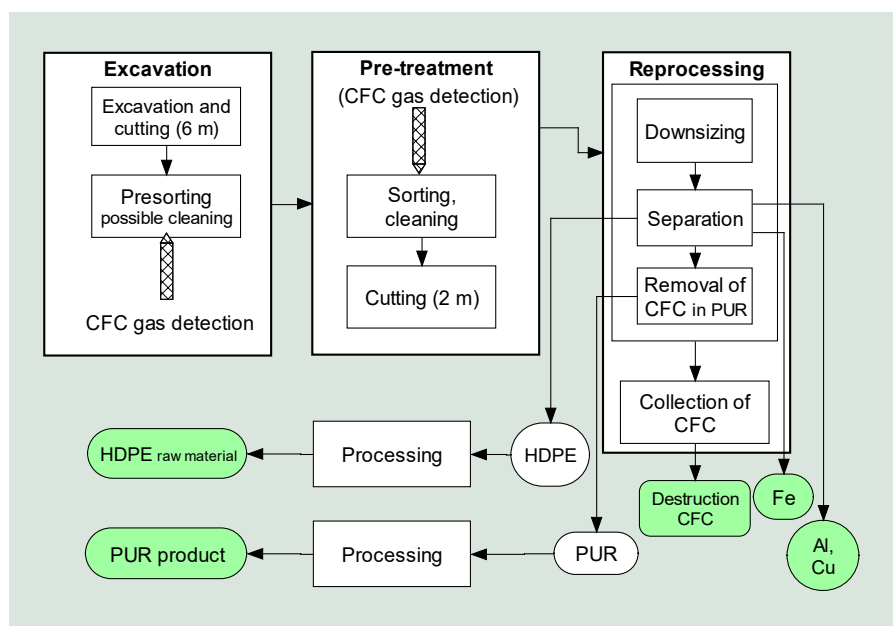
Finally, hard plastic arch ribs had been inserted mainly in older pipe constructions, and various supply holes for foam had been installed, and they have rubber seals. Overall, many of the district heating pipes have been made with a much more complex construction than merely a media pipe, casing pipe, and insulation foam.

Several experiments have been carried out with shredding and material characterisation of pipes removed by Dan Jord – that is, pipes with interlayers, without interlayers, and with and without CFC, respectively. A detector system developed by GasDetect/Danish Technological Institute measured whether or not the pipes contained CFCs.

The results showed that 52.8% of the pipes contained CFCs. The proportion of CFC-containing pipes is expected to decrease over time as the old pipe sections are replaced.

Concept for treatment solution

An overall concept for treatment solution is shown in the figure below. The figure shows the sorting/testing stages connected with excavation and subsequent pre-treatment before reprocessing in the material separation facility developed in the project.



Pre-sorting and pre-treatment of pipes during excavation and pre-treatment

Based on the results of the mapping, a method was developed for pre-sorting and pre-treating of pipes.

The method consists of:

1. Coarse sorting where pipes with a wall thickness exceeding 4 mm as well as PEX and PVC pipes are rejected.
2. Classification of pipes with and without CFC based on detector measurement.
3. Rejection of pipes with a bituminous interlayer from fraction of CFC pipes (bitumen is hardly found in pipes foamed with cyclopentane).
4. Cutting away or cutting off, of heavy goods, bitumen joints, and cutting away/cutting into pieces < 2 m length.

Modification of CFC detector

The project has developed a more robust and user-friendly version of the CFC detector. Everything is built into a robust waterproof box with indication of measured CFC and control alarms, and a simpler probe has also been developed. After field testing, further possibilities have been identified to reduce maintenance in user situations with rain and mud.

Reprocessing plants

In the project, a concept was developed for processing the pretreated pipes. The concept was tested by testing the individual sub-stages such as shredding, separation of HDPE and foam, and pressing of foam into pellets.

By separating foam and plastic, the following yields and purities were obtained with two-stage purification using a wind separator:

	Purity %	Purity %	Yield %	Yield %
Test	Heavy HDPE	Light weight foam	Heavy HDPE	Light weight foam
Pipes without CFC in foam	95.1	95.9	97.5	99.5
Pipes with CFC in foam	90.3	85.5	85.7	99.6

Reprocessing of HDPE

The project has developed a method for purification of HDPE that includes density separation and friction washing, followed by extrusion with melt filter.

The method showed that it is possible to obtain HDPE qualities that can be sold for recycling. However, purification requires that there are no significant amounts of bitumen in the HDPE material, which is why many CFC-containing pipes cannot be treated with the method so HDPE is extracted.

This report discusses an alternative method.

Reprocessing of PUR foam

In the project, pellets were pressed on a laboratory press, and they were made of CFC-containing foam, a mixture of CFC-containing and non-CFC-containing foam, respectively. The results showed how much the content of CFC gas is reduced. Based on the results, it is estimated that pellets can be made on a full-scale press with sufficient reduction in the CFC content.

This report reviews several reprocessing options with focus on chemical methods.

3. Sammenfatning og konklusion

I projektet er udviklet et koncept til en behandlingsløsning for udtjente CFC-holdige fjernvarmerør og for rør opskummet med cyclopentan med genanvendelse af HDPE-plasten i kappen og med mulighed for at opnå genanvendelse af skummet.

Miljøeffekt

De miljømæssige fordele ved at genanvende plast med det udviklede koncept er markante med en estimeret besparelse på ca. 0,75 ton CO₂/ton fjernvarmerør eller 3 ton CO₂/ton plast, hvis den udviklede metode benyttes, og der både genanvendes HDPE-kappemateriale og PUR-skum.

Hvis man inddrager besparelserne i CO₂-ækvivalenter ved at undgå CFC-emissioner, er billedet endnu mere markant. Således estimeres det, at den nuværende metode med shreddning af rør ved Stena har en emission af CO₂-ækvivalenter på 28,9 ton CO₂ per ton behandlede rør, mens det nye koncept har en emission på 0,69 ton CO₂ per ton behandlede fjernvarmerør eller en besparelse på 28,2 ton CO₂ per ton behandlede rør. Det skal bemærkes, at estimatet er forbundet med en del usikkerheder.

Businesscase

Der er foretaget beregninger af forskellige scenarier med det udviklede koncept med forbehandling og oparbejdningsanlæg. Beregningerne viser en højere behandlingsomkostning i forhold til den nuværende behandling i et shredder anlæg, som bl.a. skyldes en øget udgift til manuel kontrol af rør for indhold af bitumenlag og CFC. Udgiften til forbehandling stiger ret drastisk, når rørdimensionen falder.

I nedenstående tabel er vist den estimerede behandlingsudgift for Stenas nuværende behandling i shredder anlæg sammenlignet med det nye koncept ved 3 skift og genanvendelse af PUR for to rørdimensioner.

Scenarie	Shredder anlæg	Nyt koncept, 3 skift genanvendelse af PUR
62 mm	-1.170	583
114 mm	-1.170	-330

Det ses, at det nye koncept er 840 kr. dyrere pr. ton.

Hvis man ser på den miljøøkonomiske værdi af at undgå CFC-emissioner, ændrer billedet sig imidlertid. Hvis man således foretager et estimat af sparede CO₂-ækvivalenter i ton omregnet til kr. ved at antage en pris på 606 kr./ton (svarende til CO₂-kvoteprisen), er det estimeret, at udgiften til den nuværende behandling med shredder anlæg svarer til en miljømæssig omkostning på 16.283 kr./ton, som reduceres til 1.151 kr./ton for det nye koncept ved behandling af 114 mm rør, 3 skift og genanvendelse af PUR.

Den beregnede økonomiske fordel med den nye proces er således meget stor, når den miljømæssige værdi af besparet CO₂-emission medtages, og det vurderes, at usikkerhederne i estimatet ikke vil have væsentlig indflydelse på den store effekt ved at undgå udledning af CFC-gasser.

Hvis processen skal etableres, er det imidlertid nødvendigt, at der sikres et økonomisk grundlag for den fordyrede behandling i form af forbedrede lovgivningsmæssige rammevilkår for behandling af fjernvarmerør. Fx ens krav til behandling for alle CFC-holdige fjernvarmerør, hvor det kræves, at en væsentlig del af CFC-indholdet opsamles ved behandling. Man kan i denne regi seke til reglerne for behandling af kølemøbler, hvor der jo er specifikke krav til destruktion af CFC-indholdet fra såvel kompressorer som skum. Endvidere bør det overvejes, om man burde stille krav om fjernelse af CFC-holdige rør, som findes med den i projektet benyttede sensorbaserede metode, samt rør opskummet med cyklopentan for herved at øge de mængder, som behandles, og hvorfra der således ville kunne udvindes plastressourcer.

Sammensætning af fjernvarmerør

Fjernvarmerør består af 3 hovedkomponenter:

- Et medierør (stål for alle større rør)
- Opskummet isolering af polyurethanplast
- En yderkappe i hård plast.

Yderkappen på de fleste rør er HDPE, men der er dog en mindre mængde rør, hvor plastkappen er i PVC.

Sammensætningen af rør fra Dan Jords renoveringer i Aarhus blev kortlagt i projektet.

Kortlægningen viste, at der i ældre, især CFC-holdige, rør forekommer flere ekstra lag i form af fx plastfolier, olielærred eller tekstil og bitumen. Lagene kan findes både på ydersiden af medierøret og på indersiden af kapperøret. Herudover kan der være rørsamlinger med indhold af lærred og bitumen.

Især det klistrede bitumen blev anset for et problem for den efterfølgende oparbejdning.

For nyere rør opskummet med cyklopentan indgår et alulag på indersiden af kapperøret.

På rørene er der med en vis afstand monteret diverse kraftige metalkonstruktioner som ventiler og flancher. Endvidere er der ved rørsamlinger tit samlinger med ældre rør med PVC samt mindre rør, hvor medierøret er af PEX.

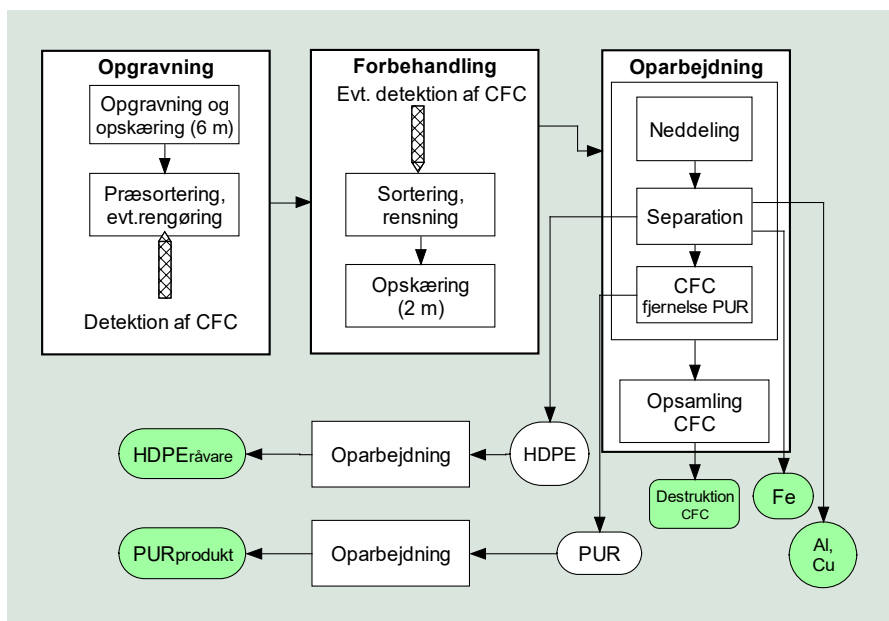
Endelig er der i primært ældre rørkonstruktioner indsat tværripper i hård plast, ligesom der er monteret diverse indblæsningshuller til skum, som er forsynet med gummitætninger. Samlet er mange af fjernvarmerørene således udført i en langt mere kompleks konstruktion end blot medierør, kapperør og isoleringsskum.

Der er udført en række forsøg med neddeling og materialekarakterisering af optagne rør fra Dan Jord henholdsvis af rør med mellemlag og uden mellemlag og med og uden CFC. Bestemmelse af, om rørene indeholdt CFC, blev målt med et detektorsystem, som er udviklet af GasDetect/Teknologisk Institut.

Resultaterne viste, at 52,8 % af rørene var med CFC. Andelen af CFC-holdige rør formodes at falde over tid, efterhånden som gamle rørstrækninger er blevet udskiftet.

Koncept til behandlingsløsning

Et overordnet koncept til behandlingsløsning er vist på nedenstående figur. Figuren viser trin med sortering/test i forbindelse med opgravning og efterfølgende forbehandling inden oparbejdning i det i projektet udviklede anlæg til materialeseparation.



Præsortering og forbehandling af rørene ved opgravning og forbehandling

Baseret på resultaterne af kortlægningen blev der udviklet en metode til præsortering og forbehandling af rørene.

Metoden består af:

- Grovsortering, hvor der frasorteres rør med godstykkelse over 4 mm, samt PEX og PVC-rør
- Opdeling i rør med og uden CFC ud fra måling med detektor
- Frasortering af rør med bitumenholdigt mellemlag fra fraktion med CFC-rør (bitumen findes sjældent i rør, som er opskummet med cyklopentan)
- Fraskæring eller bortklipping af kraftigt gods, samlinger med bitumen samt skæring/klipping i stykker <2 m længde.

Modificering af CFC-detektor

Der er i projektet udviklet en mere robust og brugervenlig version af CFC-detektoren. Således er alt indbygget i en robust vandtæt kasse med indikation af målt CFC og kontrolalarmer, ligesom der er udviklet en simplere probe. Efter test i felten er der identificeret yderligere muligheder for at mindske vedligehold i brugssituationer med regn og mudder.

Oparbejdningsanlæg

I projektet er udviklet et koncept til behandling af de forbehandlede rør. Konceptet er testet via test af de enkelte deltrin såsom neddeling, separation af HDPE og skum samt presning af skum til piller.

Ved separation af skum og plast blev der med en tottrinsoprensning med brug af vindsigtning opnået følgende udbytter og renheder:

	Renhed %	Renhed %	Udbytte %	Udbytte %
Forsøg	Tung HDPE	Let skum	Tung HDPE	Let skum
Rør uden CFC i skum	95,1	95,9	97,5	99,5
Rør med CFC i skum	90,3	85,5	85,7	99,6

Oparbejdning af HDPE

I projektet er der udviklet en metode til oprensning af HDPE, i hvilken der indgår densitetsseparation og friktionsvask fulgt af ekstrudering med smeltefilter.

Metoden viste, at der kan opnå HDPE-kvaliteter, som vil kunne afsættes til genanvendelse. Oprensning kræver dog, at der ikke er væsentlige mængder bitumen i HDPE-materialet, hvorfor mange CFC-holdige rør ikke kan behandles med metoden, så der udvindes HDPE. Der er i rapporten diskuteret en alternativ metode.

Oparbejdning af PUR-skum

I projektet blev der presset piller på en laboratoriepresse af henholdsvis CFC-holdigt skum og en blanding af CFC-holdigt og ikke-CFC-holdigt skum. Resultaterne viste, hvor meget indholdet af CFC-gasser er reduceret. Ud fra resultaterne er det vurderet, at der kan fremstilles piller på en fuldskalapresse med tilstrækkelig reduktion i CFC-indholdet.

Der er i rapporten gennemgået en række oparbejdningmuligheder med fokus på kemiske metoder.

4. Introduktion

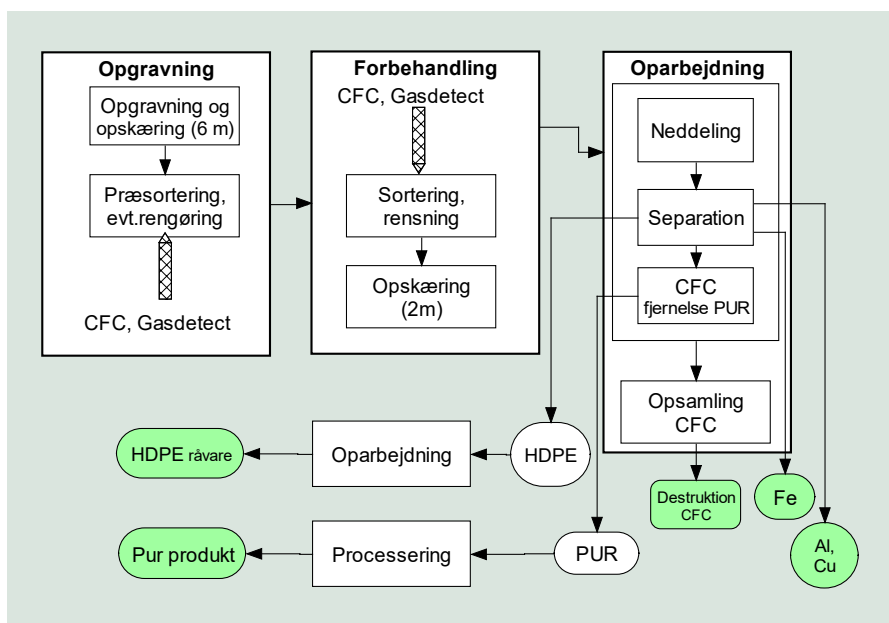
Ved den nuværende oparbejdning af udtjente fjernvarmerør behandles rørene med en teknologi, hvor stålet i det varmetransporterende medierør genanvendes, hvorimod indholdet af isolerende PUR-skum og kappeplast af HDPE ikke genanvendes.

Det overordnede formål med projektet har været at udvikle et koncept til en behandlingsløsning for udtjente CFC-holdige fjernvarmerør (rør fra før 1995), hvor

- 1) der opnås høj genanvendelsesgrad af såvel stål som plastmaterialer
- 2) CFC, som delvist udledes under den nuværende behandling, opsamles, så det kan sendes til destruktion (i ældre rør benyttes CFC-11 til opskumning af polyurethan. CFC-11 er, udover at være en ozonlagsnedbrydende gas, også en kraftig drivhusgas).

Der arbejdes i projektet også med udvikling af behandlingsløsninger til nyere udtjente rør, som er opskummet med cyklopentan, og som udgør en betragtelig andel af rørene.

Projektets idé til oparbejdningskoncept er skitseret på FIGUR 1.



FIGUR 1. Oparbejdningskoncept.

Projektets aktører er:

- 1: Entreprenøren Dan Jord, der udfører renovering af fjernvarmestrækninger. Dan Jord opgraver og opskærer normalt fjernvarmerør til længder <6 m. I projektet undersøges det, om man med fordel kan udføre en præsortering/forbehandling ved Dan Jord for at opnå materialer, som i højere grad kan genanvendes med udnyttelse af indholdet af HDPE og skum.
- 2: Stena Recycling (herefter benævnt Stena), som udfører oparbejdning af fjernvarmerør ved brug af shredderteknologi, hvor rør neddeles, og hvor jern og ikke jern-metaller frasepareres til genanvendelse, mens skum og PE ender som materialer til energiudnyttelse eller deponi.

- 3: Eldan Recycling (herefter benævnt Eldan), som udvikler og producerer genanvendelsesanlæg, herunder til en beslægtet produktgruppe i form af kølemøbler. I projektet arbejdes med udvikling af teknologi målrettet fjernvarmerør.
- 4: GasDetect. I et tidligere projekt er udviklet en detektorenhed, som kan skelne mellem fjernvarmerør, der indeholder CFC-gasser, og rør, som ikke gør. I nærværende projekt arbejdes med modning af teknologien og brug til detektion af CFC-holdige rør.

5. Sammensætning af fjernvarmerør

5.1 Materialer i og konstruktioner af fjernvarmerør

Som udgangspunkt består et fjernvarmerør af tre hovedelementer (se FIGUR 2):

- Et medierør (stål for alle større rør)
- Opskummet isolering af hærdeplast i polyurethan
- En yderkappe i hård plast (typisk HDPE).

PUR-isoleringen var før 1995 opskummet freon (CFC). Efter 1995 blev rør en overgang opskummet med CO₂ og dernæst med cyklopentan som angivet i Miljøprojekt Kortlægning af gamle CFC-holdige fjernvarmerør¹.

Fordeling af rør efter størrelser er undersøgt nærmere i rapporten, hvor det er opgjort, at strækninger med rør fra før 1. januar 1995 udgør 26.000 km, svarende til en freonmængde (CFC) på 4.000 tons. Rapporten påpeger, at det typisk ikke er problemer med varmeisoleringen af rør med freon, der bevirker, at de må udskiftes, men snarere dårlige samlinger ved muffer, for lille ledningsdimension m.m. Typisk fjernes kun 50 % af ledningerne ved renoveringerne, da det er dyrere at fjerne dem end at lade dem ligge i tracéerne, hvis der er plads.

I nærværende projekt undersøges de forskellige former for konstruktioner nærmere for at kunne udvikle en optimal oparbejdningsmetode.

Grundkonstruktionen medierør, skum og kapperør kan indeholde fx flere mellemlag og samlinger med andre rørtyper. For at undersøge, hvad der findes af materialer, stoffer og rørkonstruktioner, som kan have betydning for mulighederne for oparbejdning, er der foretaget en række sorteringsforsøg af de rør, som opgraves af Dan Jord.

Der er foretaget undersøgelser af typer af opbygninger af fjernvarmerørene ved gennemgang af en stor mængde rør opgravet af Dan Jord.

Udgangspunktet for oparbejdning er, at rørenes medierør skal være af stål, og at kapperøret skal være fremstillet af HDPE-plast. Udviklingen af teknologier er begrænset til rør med godstykkelse ≤ 4 mm af rørvæggen, da dette vurderes som grænsen for, hvad Eldans neddelingsudstyr kan behandle.

¹ N. Winther et al., Kortlægning af gamle CFC-holdige fjernvarmerør, Miljøprojekt nr. 1826, 2016, Miljøstyrelsen



FIGUR 2. Fjernvarmerør med stålmedierør, PUR-isolering og HDPE-kappe.

Rørene findes i mange dimensioner, afhængigt af om de er til brug på hovedstræk mellem større byer, lokale bystrækninger eller som tilslutning til bygninger. En væsentlig del af de danske fjernvarmerør fremstilles af LOGSTOR. Af LOGSTORs produktkatalog fremgår det, at dimensioner af medierør i stål findes fra 26,9 mm ydre diameter til 1.219 mm. Godstykkelsen af rør varierer fra 2,6 mm for rør med ydre diameter 26,9 mm til 12,5 mm for rør med 1.219 mm ydre diameter. Rørtyper med ydre diameter op til 168 mm har en godstykkelse af rørvæggen af medierøret på ≤ 4 mm (data for dimensioner fra LOGSTOR findes i produktkatalog fra LOGSTOR², som er gengivet i udvalgt i Bilag 1.1).

I de mindre dimensioner findes også fjernvarmerør med medierør af PEX (krydsbundet PE, som ikke kan smelte, se FIGUR 3) og kobberør. Kapperørene er af hovedsageligt HDPE, men der har også været anvendt rør med PVC-kappe. Disse er grå og er derfor let genkendelige (se FIGUR 4).

² LOGSTOR Produktkatalog District Energy Version 2020.12



FIGUR 3. Fjernvarmerør med PEX-medierør.



FIGUR 4. Fjernvarmerør med samling af rør med PVC-kappe (grå) og HDPE-kappe (sort).

I Bilag 2 gennemgås en række fundne konstruktioner, som kan have betydning for oparbejdning af rørene.

Konstruktionerne omfatter:

- Mellemlag af fx plastfolier, olielærred eller tekstil, bitumen og aluminium (henholdsvis ved medierør eller kappe), se Bilag 2.1 L1-L7
- Krympeflexsamlinger på yderside af rør med bitumen/klister, se Bilag 2.1 L8-L9
- Tværribber i skum af plast og indblæsningshuller til skum, se Bilag 2.2 M1-M5
- Rør med påmonterede metalemnner i kraftigt gods, som fx ventiler og flancher (> 4 mm ståltykkelse), se Bilag 2.3 M6-M8.

Herudover findes der:

- Samlinger med PVC-rør eller PEX-rør
- Twinrør
- Nyere rør med kobberfølere.

I TABEL 1 er oplysninger om fundne materialer opsummeret. Desuden er det angivet, om materialet muligvis kan udgøre et problem for oparbejdning.

TABEL 1. Særlige materialer og konstruktioner af fjernvarmerør, som kan have betydning for udvikling af genanvendelsesmetode.

Emne	Type	Position	Beskrivelse	Påvirkning oparbejdning
Mellemlag	L1	Medierør	Tekstillærred af PP	Formentlig lille betydning
Mellemlag	L2	Medierør	Bitumen/klister+tekstillærred PP	Bitumen formentlig problematisk
Mellemlag	L3	Medierør	Folielag sort PE	
Mellemlag	L4	Medierør	Bitumen/klister+tekstillærred PP	Bitumen formentlig problematisk
Mellemlag	L5	Kapperør	Bitumen/klister	Bitumen formentlig problematisk
Mellemlag	L6	Kapperør	Alu/bitumen/klister	Bitumen formentlig problematisk
Mellemlag	L7	Kapperør	PE-folie	Formentlig lille betydning
Samling	L8	Yderside	Klister/bitumen+lærred (PP)	Bitumen formentlig problematisk
Samling	L9	Yderside	Klister/bitumen i krympeflex	Bitumen formentlig problematisk
Tværribber	M1	Skum	PP	Formentlig lille betydning
Tværribber	M2	Skum	PP	Formentlig lille betydning
Tværribber	M3	Skum	PE	Formentlig lille betydning
Indblæsningshul	M4	Yderkappe	Klar plast+gummi	Klar plast formentlig lille betydning, Gummi måske problematisk
Indblæsningshul	M5	Yderkappe	Sort plast	Formentlig lille betydning
Kraftigt gods	M6	Yderkappe	Metalflanche	Skal bortskæres
Kraftigt gods	M7	Yderkappe	Ventiler	Skal bortskæres
Kraftigt gods	M8	Yderkappe	T-stykke, fordelerflanche	Skal bortskæres

5.2 Sorteringsforsøg ved Dan Jord

Efter den indledende karakterisering af materialer i fjernvarmerør blev der udført et sorteringsforsøg på indsamlede fjernvarmerør fra Dan Jords renoveringer af fjernvarmestrækninger i Aarhus. Her blev materialer opdelt i fem kategorier:

Type 0: Rør: Rør med PEX, rør med PVC-kappe og rør med vægtykkelse af stålmedierør >4 mm blev frasorteret begrundet med 1) at PEX-rør og PVC vil forurene HDPE, 2) at kobberrør typisk er med små diametre og derfor vurderes at passe bedre til en separat oparbejdning og endelig 3) at neddelere vurderes maksimalt at kunne håndtere 4 mm vægtykkelse af stålmedierør.

Herefter blev resten af rørene opdelt i følgende fire kategorier:

Type 1: Lige enkeltrør uden inderlag/krympeflex eller samlinger med bitumen (simpel konstruktion) med CFC

Type 2: Lige enkeltrør uden inderlag/krympeflex eller samlinger med bitumen (simpel konstruktion) uden CFC

Type 3: Komplekse rør med materialer, konstruktioner fra TABEL 1, med CFC

Type 4: Komplekse rør med materialer, konstruktioner fra TABEL 1, uden CFC.

Bestemmelse af, om rørene indeholdt CFC, blev udført med et analyseapparat udviklet af Teknologisk Institut og GasDetect – Se nærmere beskrivelse i kapitel 7.

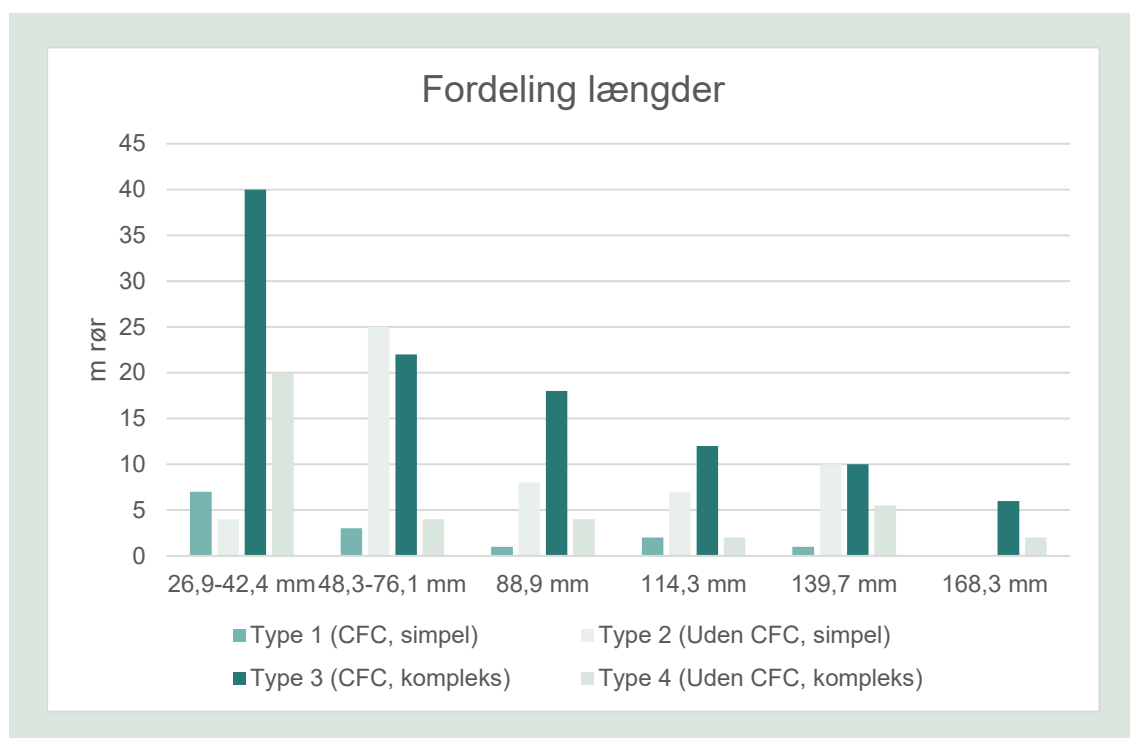
Årsagen til, at rørene deles op i rør med eller uden CFC, er, at rør med CFC udgør en særlig miljøfare, hvis stofferne slipper ud. Evt. kommende lovgivning i lighed med lovgivningen indenfor kølemøbler kan derfor tænkes at ville stille særlige krav til håndtering af rør med CFC.

Ud fra forsøget blev der beregnet en fordeling af rørlængder (FIGUR 5) og en fordeling omregnet til kg stål ud fra typisk godstykkelse (FIGUR 6).

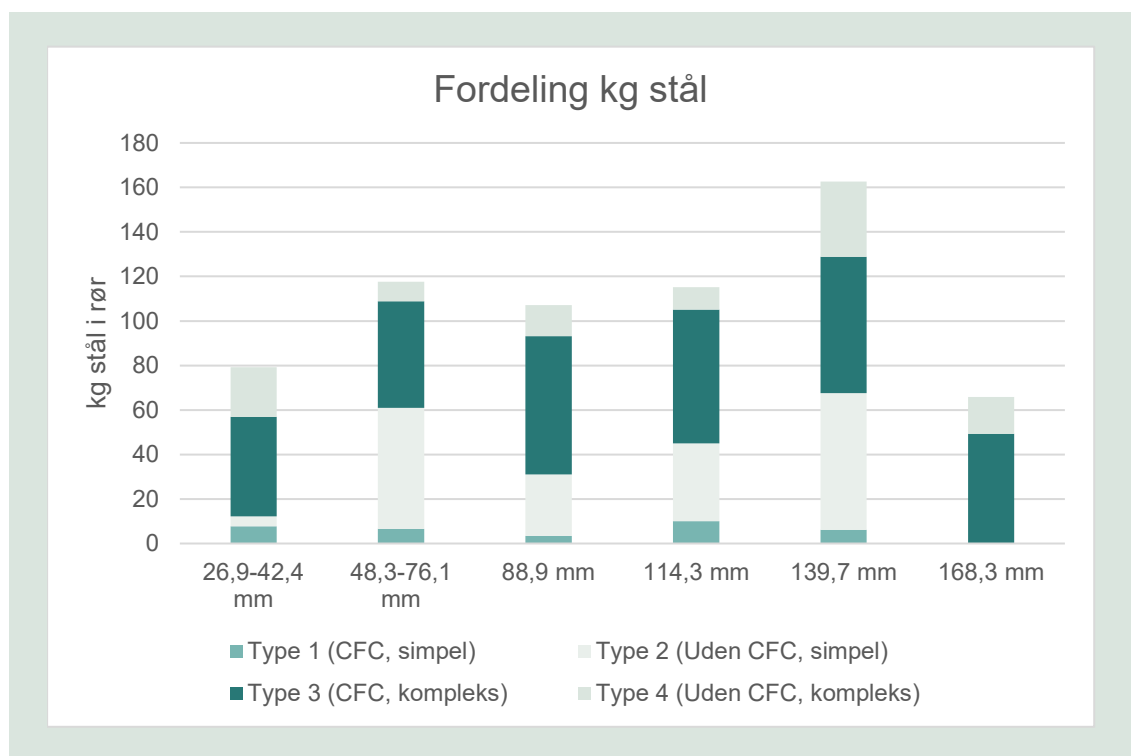
I alt er der sorteret rør, svarende til ca. 681 kg stål.

Det er beregnet, at:

- rør med CFC udgør 52,8 % (baseret på mængden af stål)
- komplekse rør udgør ca. 63 % (baseret på mængden af stål)
- fordeling af rør samlet udgør 47,8 % af Type 3 (CFC, kompleks), 5 % af Type 1 (CFC, simpel), 15,4 % af Type 2 (uden CFC, kompleks) og 26,9 % af rør uden CFC, simpel (fordeling er baseret på mængden af stål).



FIGUR 5. Fordeling af fjernvarmerør efter længde.



FIGUR 6. Fordeling af fjernvarmerør regnet som estimeret stålmængde.

6. Udvikling af forbehandlingskoncept

6.1 Forsøg med neddeling af forbehandlede rør

Baseret på analyserne i kapitel 5 er der arbejdet videre med et forbehandlingskoncept. Det første trin omfatter en grovsortering, hvor de mest oplagte emner, som ikke kan behandles, frasorteres.

Grovsortering:

- Frasortering af rør med over 4 mm godstykkelse (Ø 168 mediestålrør), idet disse ikke kan behandles med metoden
- Frasortering af rør med PEX-medierør, idet PEX vil ødelægge genanvendelsesmuligheden for kapperør af HDPE
- Frasortering af rør med PVC-kappe, da disse kan vanskeliggøre genanvendelsen af kapperør af HDPE (PVC kan principielt frasepareres med synke/flydeteknik, men vil medføre en stor affaldsfraktion).

Det stod herudover hurtigt klart, at kraftige metalemner såsom ventiler og kraftige flancher (godstykkelse >4 mm) skal bortskæres, inden rørene kan behandles i et oparbejdningsanlæg. Derimod vides det ikke, hvordan mellemlag og bitumen vil påvirke oparbejdningen og separationen af rør på et oparbejdningsanlæg. Det er derfor valgt at udføre oparbejdningsforsøg ved Eldan i Fåborg, hvor mindre mængder rør neddeles, og simulering af separation testes. Samtidig udføres en analyse af sammensætningen af de neddelte materialer.

Der er udført forsøg med to typer rør, som er oplagret af Dan Jord fra virksomhedens løbende renoveringer:

Type A: Rør uden mellemlag og uden bitumen i samlinger samt befriet for kraftige metalemner (Type 1+ Type 2).

Type B: Rør med mellemlag og med bitumen i samlinger, men befriet for kraftige metalemner (Type 3 + Type 4).

Rørene blev forbehandlet af Dan Jord ved at skære rør i længder <2 m med bajonetsav og bortskære kraftige metalemner som ventiler og flanger. Efterfølgende blev de to typer rør transporteret til Eldan og neddelt i 2 trin. Sammensætningen af materialer, der ikke indeholder medierør af jern, er herefter bestemt.

6.1.1 Resultat af forsøg med rør Type 1 (med CFC) og Type 2 (uden CFC) - lige uden mellemlag/bitumen

I TABEL 2 er vist resultater af en test med rør.

TABEL 2. Sammensætning af materialer med rør Type 1, Type 2, sold 30 mm. Sten og træ er frasorteret.

Fraktion	Middel %	Bemærkning
HDPE	45,49	Egnet til genanvendelse
Skum	33,35	Egnet til genanvendelse
HDPE+skum	0,77	Kan formentlig oparbejdes sammen med HDPE

Fraktion	Middel %	Bemærkning
Hård plast	11,92	Kan formentlig oparbejdes med densitetsseparation, hvorefter let fraktion kan oparbejdes sammen med HDPE
Gummi+skum	7,59	Muligvis problematisk rest, men kan formentlig delvis fjernes med densitetsseparation
Tekstil	0,22	Muligvis problematisk rest
Kobber	0,57	Bør kunne fjernes med eddy-current separation
Pap	0,10	Muligvis problematisk rest

Summen af ren HDPE og skum udgør 78,8 %. Der indgår desuden 12 % blandet hård plast. En densitetsseparation af hård plast viste, at hård plast bestod af ca. 70 % tung plast, mens densitetsseparation af gummi+skum viste, at fraktionen bestod af ca. 91 % tung fraktion.

Det vurderes indledende, at hård plast kan oparbejdes til genanvendelse ved at benytte en densitetsseparation i vand fulgt af en renseproces.

Hvis de 30 % let fraktion oparbejdes sammen med HDPE, kan udbyttet af HDPE og skum estimeres til ca. 82 %.

6.1.2 Resultat af forsøg med rør Type 3 (med CFC) og Type 4 (uden CFC) - med mellemlag

TABEL 3. Sammensætning af materialer i forsøg med rør Type 3, Type 4, sold 30 mm.

Fraktion	Sort 1 %	Sort 2 %	Middel %	Bemærkning
HDPE	42,2	39,6	40,9	Egnet til genanvendelse
HDPE+bitumen	7,9	4,9	6,4	Problematisk
HDPE+skum	10,0	10,6	10,3	Kan formentlig oparbejdes sammen med HDPE
Bitumen	7,9	10,2	9,1	Problematisk
Pap/sølvpapir/bitumen/skum	2,5	2,5	2,5	Problematisk
Bitumen+PE-folie	2,7	1,9	2,3	Problematisk
Bitumen+skum	3,4	1,4	2,4	Problematisk
Bitumen+skum+PE-folie	0,8	2,7	1,8	Problematisk
Gummiagtigt mellemlag er PE	0,4	1,7	1,0	Forventes delvist kompatibel med HDPE
Skumafstiver	1,0	1,6	1,3	Forventes delvist kompatibel med HDPE
Uidentificeret materiale	0,2	0,5	0,3	
Skum	19,2	19,1	19,2	Egnet til genanvendelse
Skum+PE-folie	1,5	2,7	2,1	
PE-folie	0,4	0,7	0,5	

Summen af rene fraktioner af skum og HDPE = 60,1 %.

Da den samlede fraktion er med mellemlag, indgår en stor andel af materialer med bitumen (22 %), som vurderes at kunne medføre problemer med oparbejdning.

Billeder af fraktioner med indhold af bitumen er vist i Bilag 2.4.

6.1.3 Forsøg med neddeling og vindsigtning

For at undersøge, om der kan opnås en bedre separation med mindre sold, er der udført forsøg med neddeling af rør af Type 1 + Type 2 og rør af Type 3 + Type 4 med 20 mm sold. Behandlingen blev udført ved at pre-shredde rør, frasortere jern og dernæst neddele rest i granulator med brug af 20 mm sold.

Fraktionerne er efterfølgende vindsigtet i en laborievindsigte ved Eldan. Forsøgene viste, at det var muligt at opnå en god separation af skum fra rør uden mellemlag, mens renheden var lavere fra rør med bitumen (se FIGUR 7).



FIGUR 7. Vindsigtningsforsøg i laboratorieopstilling (øverst tv: separeret tung fraktion fra rør uden mellemlag, øverst th: separeret let fraktion (skum) fra rør uden mellemlag, nederst tv: separeret tung fraktion fra rør med mellemlag, nederst th: separeret let fraktion (skumholdig) fra rør med mellemlag).

Det blev derfor betegnet som realistisk at separere HDPE og skum fra rør uden mellemlag i fuldskala, mens det vurderes vanskeligt fra rør med bitumenmellemlag.

Baseret på forsøgene blev det planlagt at opbygge en pilotopstilling for at teste oparbejdning og separation i en realistisk skala. Opbygning og udvikling af anlæg i pilotopstilling er beskrevet i kapitel 9. Fremstilling af de forbehandlede rør til pilotforsøgene er beskrevet i kapitel 8. Neddeling af rør med bajonetsav ved Dan Jord var forholdsvis tidskrævende og ikke en effektiv metode til store mængder rør. Der er derfor arbejdet med neddeling af rør ved Stena med en næbsaks, der har høj kapacitet. Forsøgene er beskrevet i næste afsnit.

6.2 Forsøg med neddeling af rør med næbsaks

Der er udført forsøg med neddeling med næbsaks af 6 m lange fjernvarmerør ved Stena Recycling Grenå til rørstumper <2 m, hvilket kræver 3-4 klip pr. rør. Forsøgene er opdelt i forsøg 1, hvor der klippes et rør ad gangen, og forsøg 2, hvor der klippes 3-4 rør ad gangen.



FIGUR 8. Fjernvarmerør til neddelingsforsøg.



FIGUR 9. Neddeling af fjernvarmerør med næbsaks.

Observationer vedrørende forsøget er vist i TABEL 4.

TABEL 4. Resultater af forsøg.

Forsøg	Rør	Rør/ klip	Klip i alt	Tid pr. klip (sek)	Tid/rørstump (sek)	Kommentar
1	3	1	9	13,89	10,4	Ingen problemer med klip, PUR knækker af 5-10 cm fra klip
2	10	3/3/4	11	25,45	6,2	Nogle klip måtte gentages, PUR knækker af 5-10 cm fra klip

Af forsøgene fremgår det, at der kan fremstilles rør med en tid på mellem 6-10 sekunder pr. produceret rørstump a 2 m. Der opstår lidt flere fejl, når der klippes 3-4 rør ad gangen, men tidsforbruget pr. produceret rør a 2 m er lavere, end hvis der klippes et rør ad gangen. Der vil knække en del PUR-stumper af ved kontakt med næbsaksen. Det forventes, at der undslipper lidt gasser (CFC eller cyklopentan) fra området, hvor næbbene klemmer skummet sammen og bryder nogle af PUR-cellerne.

6.3 Forbehandlingskoncept

Baseret på forsøgene blev følgende forbehandlingskoncept opstillet:

Grovsortering

- Frasorter rør med over 4 mm godstykkelse (Ø 168 mediestålrør) - kan ikke behandles med metoden
- Frasorter rør med PEX-medierør - kan ikke behandles med metoden
- Frasorter rør med PVC-kappe - kan ikke behandles med metoden.

Finsortering

- Frasorter rør med bitumenmellemlag
- Resterende rør forbehandles.

Fraskæring/klipning

- Bortskær/fraklip T-stykker og bøjninger, så der er maks. 50 cm til hovedrør af hensyn til indføding i anlæg)
- Bortskær/fraklip ventiler, flacher og andet kraftigt jerngods - send til metalgenanvendelse
- Bortskær/fraklip PVC-stumper (grå), som er splejset på HDPE-rør (om dette er nødvendigt afhænger af mængde og oparbejdning af HDPE-kappen. Hvis HDPE oparbejdes med synke-flydeteknik, kan mindre mængder PVC formentlig tolereres mod en forhøjet udgift til bortskaffelse af synkerest
- Bortskær/fraklip samlinger, hvor der indgår bitumen/klistre.

Længdeafkort

- Afkort alle rør til <2 m længde.

Eksempler på emner, der skal fraskæres/bortklippes, er vist i Bilag 2.3.

Forbehandlingskonceptet kan suppleres med analyse for indhold af CFC, hvilket behandles nærmere i afsnit 7.5.

7. Modning af CFC-sensor

7.1 Motivation og sorteringsbehov

En hurtig og brugervenlig metode til on-site detektion af CFC-gas i præisoleringen omkring fjernvarmerør er et vigtigt element til at opnå effektiv identifikation og præsortering af fjernvarmerør, som skal graves op eller lige er gravet op.

Som tidligere nævnt er der allerede udviklet en CFC-sensor til detektion af CFC-gas i Miljøprojektet 'On-site detektion af CFC-gas i præisolerede fjernvarmerør'³. Sensoren anvendes på stedet til brug for sortering af opgravede fjernvarmerør med hhv. uden CFC-gasser. Udstyret måler rørisoleringens gasindhold ved at udtage en mindre gasprøve fra rørenderne på de blottede fjernvarmerør og analysere indholdet af CFC-gasser. Denne måling foretages på under 60 sekunder og giver en indikation af, om rørets isolering indeholder CFC-gasser eller ej.

I nærværende projekt vil dette måleudstyr blive videreudviklet, så det er mere brugervenligt og robust. Målet er, at GasDetect gennem projektet får videreudviklet sensoren til on-site detektion af CFC-gasser i fjernvarmerør med henblik på efterfølgende markedsføring og salg af det udviklede instrument til anlægssentreprenører og til genvindingsbranchen.

Til arbejdet i arbejdsplanke 1 og 2 skal der anskaffes et større antal opgravede cyclopentan- og CFC-holdige fjernvarmerør. For at kategorisere de anskaffede rør med henblik på præsortering er det nødvendigt at benytte den allerede udviklede CFC-sensor hos Dan Jord. Igennem dette arbejde vil ny viden om de praktiske udfordringer, som måtte opstå ved brug af udstyret blive genereret.

På baggrund heraf vil der blive arbejdet på at modne sensoren og tilbehøret, så det kan bruges direkte til dokumentation af indholdet af CFC-gas, fx i forbindelse med evt. fremtidig lovgivningsbestemt behandling. Arbejdet omfatter bl.a., at udstyret opgraderes, så måleresultatet afgives klart og tydeligt, og at udstyret kan holde til de miljømæssige belastninger i og omkring opgravning af fjernvarmerørene.

7.2 Taskeudgave af CFC-sensor

Der foreligger i dag en CFC-sensor, som med sikkerhed kan identificere CFC-gas, ligesom det er undersøgt og sikret, at sensorteknologien ikke er følsom overfor andre interfererende gasser (fugt, cyclopentan eller CO₂). Sensorens detektionsprincip bygger på absorption af IR-lys ved tilstedeværelsen af kulstof-fluor-bindinger, og sensoren vil derfor også kunne detektere de relevante CFC- og HCFC-gasser.

Målemetoden er blevet demonstreret ad flere omgange på oparbejdningspladsen hos Stena Recycling i Grenaa samt ved opgravning af ældre fjernvarmerør flere steder i Aarhus Kommune. Sensorløsningen har virket pålideligt, og målingerne kan foretages af lægmand efter en kort introduktion til sensorløsningen – enten ved personlig oplæring eller ved at følge en manual. Mere om dette kan læses i projektrapporten³.

CFC-sensorens komponenter kan ses på FIGUR 10. Her ses den med den såkaldte 'slag-lod'-udgave af proben. CFC-sensoren i feltet ses på FIGUR 11 med forlænget slange og hammer-

³ N. Winther, M. Frederiksen, C. Laur Byg, On-site detektion af CFC-gas i præisolerede fjernvarmerør, Miljøstyrelsen, 2022

udgave af proben. Eksempel på brug af CFC-sensoren hos Dan Jord, januar 2021 ses i FIGUR 12.



FIGUR 10. CFC-sensorens komponenter er vist (fra venstre): Probe til indføring af rawplug i en blotlagt ende af et fjernvarmerør, IR-måleinstrument, kulfilter til nul-luft, batteri og bæretaske.



FIGUR 11. Komponenterne af CFC-sensoren hos Dan Jord, januar 2021. Der er påsat længere slange og skiftet til en hammerudgave af proben.



FIGUR 12. Test af CFC-sensoren hos Dan Jord januar 2021.

7.3 Krav til og fremstilling af videreudviklet CFC-sensor

Med nærværende projekt er det ambitionen at opnå tilfredsstillende robusthed af selve udstyret, samtidig med at udstyret kan håndtere alle fjernvarmerør med henblik på en præsortering af fjernvarmerør på stedet.

Baseret på længerevarende brug af sensoren hos Dan Jord og tidligere observationer, er kravene til en videreudviklet CFC-sensor:

- *Lettere at bruge*
 1. Gøres simpel, så resultatet ikke kan misforstås
 2. Selve CFC-gaskoncentrationen er ikke vigtig (men kan virke forvirrende)
 3. Længere slange, da der ikke altid er plads til kassen i selve opgravningen
 4. Høj lyd, da der kan være meget støj fra maskiner og trafik
 5. Alle komponenter (inkl. probe, batteri og lader) i samme enhed
 6. Opladning af batteriet skal være simpelt.
- *Robusthed*
 1. Installeres i vandtæt kasse, så CFC-sensoren fungerer med lukket kasse
 2. Vandtæt(te) lydgiver(e), lysgivere og eventuelle knapper skal installeres på ydersiden af kassen
 3. Skal kunne holde til målinger en hel dag i regnvejrs/luft

4. Filtre for vand og støv skal let kunne udskiftes
 - a. Vandfilter tømmes for vand
 - b. Støvfilter kræver udskiftning hver ca. 3 måneder.

På baggrund af ovennævnte krav er der i projektet udviklet en robust sensor, som er vist i FIGUR 13 til FIGUR 17.

Vandtæt kasse med simple funktioner installeret ved lys- og lydgivere yderst på kassen kan ses i FIGUR 13. Ind-/udgange til/fra kassen til prøveluft (sample), nul-luft og udluft (exhaust) kan ses i FIGUR 14.

For at kunne trække signaler fra CFC-sensoren ud på eksterne signalgivere er der bygget et mindre print, som muliggør dette. Dette print er afbilledet i FIGUR 15. Printet måler de elektriske signaler, som styrer lysgiverne på selve sensoren, og disse behandles, så de kan bruges som styresignal til eksterne signalgivere: Fejl, Tændt, CFC fundet, Lydgiver, Trykknop (OK).

For at reducere omkostningerne og den tid, det kræver at ombygge udstyret fra producenten, er det valgt at bruge en simplere probe, som kommer med udstyret. Denne probe kan ses i FIGUR 16. Indholdet af kassen er vist i FIGUR 17. Holdere til de forskellige komponenter er udsåret i skumindlægget.

Funktionerne af signalgiverne på ydersiden af kassen er:

- **Tændt:** Grøn lysgiver lyser konstant, når udstyret er klar. Blinker grønt under opvarmning i ca. 10 minutter
- **Gastrykalarm:** Alarmen blinker ved tilstopning af filtre. Undersøg slanger for tilstopning og skift filtre
- **CFC målt:** Rød lysgiver blinker ved måling af CFC-gasser i prøven. Der er tale om en vedholdende (Latch) alarm, der skal afbrydes med 'Afbryd CFC'-knappen
- **Afbryd CFC:** Afbryder 'CFC målt'-signalgiveren i tilfælde af registreret CFC
- **Lydgiveren (buzzer):** Afgiver 'normal' lyd (ca. 1 sekund mellem lydafgivelse) ved 'CFC målt' og 'aggressiv' lyd (ca. 0,3 sekund mellem lydafgivelse) ved trykalarm.

Udstyret startes ved at:

5. Åbne kassen
6. Tilslutte batteri og tænde på trykknappen på den blå sensorenhed
7. Tilslutte proben
8. Lukke kassen igen
9. Afvente opvarmningen i ca. 10 min til 'Tændt' lyser konstant.

En måling udføres således:

10. Montér en rawlplug på spidsen af måleproben
11. Placer den frie ende af rawlpluggen på skummet i fjernvarmerøret
12. Hamr rawlpluggen helt ind i skummet
13. Lad måleproben sidde med rawlpluggen i skummet og afvent instrumentets reaktion i ca. 10 sekunder
14. Hvis 'CFC målt'-dioden blinker, og der afgives en 'normal lyd', så indeholder skummet CFC-gas og skal sorteret efter gældende instruks. Der trykkes efter markering af røret med markeringskridt på knappen 'Afbryd CFC'
15. Hvis 'CFC målt' ikke blinker, indeholder skummet *ikke* CFC-gas
16. Ved tilstopning af probe, filter eller sensor vil 'Trykalarm' blinke, og lydgiveren vil afgive 'aggressiv' lyd. Inspicer derefter filtre.



FIGUR 13. Vandtæt kasse med simple funktioner installeret ved lys- og lydgivere yderst på kassen.



FIGUR 14. Ind og udgange fra kassen til prøveluft (sample), nul-luft og udluft (exhaust).



FIGUR 15. Print til styring af signalgivere. De fem ledningspar styrer: Tryk-knap (OK), Fejl, Tændt, CFC fundet, buzzer.



FIGUR 16. En simplere probe, som kommer med udstyret.



FIGUR 17. Holdere til de forskellige komponenter er udskåret i skumindlægget.

7.4 Erfaringer og videre modning

Den videreudviklede CFC-sensor har efter fremstillingen været testet i laboratoriet og i igangværende opgravninger. Generelt fungerer opgraderingerne fornuftigt. I FIGUR 18, FIGUR 19 og FIGUR 20 ses en testlokation i samarbejde med Dan Jord ved en opgravning ifm. en reparation af fjernvarmerør. Der var i dette tilfælde fundet CFC-indhold i rørisoleringen. Efter et mindre antal målinger med CFC-sensor gik udstyret i gask-alarm. Det viste sig, at filteret blev stoppet til med vand grundet meget højt vandindhold i isoleringen på fjernvarmerørerne.

Dette leder til en evaluering af videreudviklingen. Som nævnt fungerer udstyret tilfredsstillende, om end nedenstående dog, afhængigt af brugssituationen, kunne overvejes:

- Selvvalgt slangelængde
- Ved brug af udstyret, samtidig med at tunge maskiner er i brug, ville det give mening at have en lyd giver med kraftig lydstyrke
- Hvis udstyret skal kunne måle i længere tid i regn eller slud, skal der integreres en decideret vandfælde, som kan tømmes løbende
- Der er risiko for jord og mudder i slangetilslutningerne, som evt. kan afhjælpes af en mere robust konstruktion- problemet vil dog ikke kunne afhjælpes fuldstændig.



FIGUR 18. Test af den videreudviklede CFC-sensor i samarbejde med Dan Jord ved en opgravning ifm. en reparation af fjernvarmerør.



FIGUR 19. Test af den videreudviklede CFC-sensor i samarbejde med Dan Jord ved en opgravning ifm. en reparation af fjernvarmerør.



FIGUR 20. Efter et mindre antal målinger med den videreudviklede CFC-sensor gik udstyret i gastryk-alarm. Det viste sig, at filteret blev stoppet til med vand grundet meget højt vandindhold i isoleringen på fjernvarmerørene.

7.5 Monitoringsbehov ved opgravninger og sorteringspladser

Følgende procedure er beregnet på frasortering og behandling af CFC-holdige rør, hvis dette bliver et krav i lighed med krav til kølemøbler.

Planlægning

Informationer om rørene i den pågældende strækning drejer sig om:

17. Alder af rør
18. Total længde
19. Kendskab til reparationer i strækningen (og årstid for disse)
20. Kendskab til metode til isolering af rørender efter svejsearbejder (fx anvendelse af bitumen til tætning).

Hvis rørene stammer fra før ca. 1995, eller alder ikke kendes, planlægges en udvidet screening. Hvis rørene er fra efter 1996, udføres der begrænset screening. Hvis rørene er *twinrør*, indeholder de ikke CFC og skal derfor ikke analyseres.

Fritlægning af rør og måling af cellegastype (kun monorør ikke twinrør)

21. *Udvidet screening:* Et målepunkt for minimum hver 50 m og altid i start og slut af etappen
22. *Begrænset screening:* Målepunkter som minimum i start, midt og slut af etappen
23. Der foretages altid målinger ved overgange fra én isoleringstykke til en anden
24. Ved et målepunkt fritlægges ender i et rent endesnit i isoleringen
25. Minimum én måling med rawlplugprobe udføres pr. målepunkt
26. Rørenden markeres tydeligt med kridt eller maling i én farve, som markerer CFC-holdigt rør, eller en anden farve, som markerer ikke-CFC-holdigt rør.

Forbehandling af rør til brug for oparbejdningsmetoden udviklet i nærværende projekt er beskrevet i afsnit 6.3.

En samlet metodebeskrivelse for forsortering og oparbejdning med brug af måleudstyret til CFC-gasser er beskrevet i kapitel 12.

7.6 Monitoringsbehov på neddelingsanlæg

Der er foretaget en vurdering af udslip ved klipning. Det formodes, at der vil undslippe lidt CFC fra knuste celler, som brydes af næbsaksen. Udslippet vurderes dog at være begrænset. Hvis man fx antager, at al cellegas slap ud af en brudflade på 5 cm (bredden af klippefladen) for hver 2 meter, vil tabet af CFC-gasser være mindre end 2,5 %. Dette betragtes som et konservativt estimat, da ikke alle celler brydes. Det er derfor valgt ikke at udvikle løsninger til at monitorere udslip af CFC-gasser ved forbehandling af rør, hvor rørene neddeles til 2 m længde.

I selve anlægget til efterfølgende behandling vil alt afgivet gas blive opfanget og kølet til under dugpunktet for CFC/HCFC og cyclopentan og derved opsamlet til efterfølgende destruktion. Overvågning af faciliteterne for lækager af LEL og CFC-sensorer kunne desuden være relevant.

Behandlingsanlæg til kølemøbler anvender desuden tilføring af nitrogen til procesluften for at minimere eksplosionsfaren i systemerne. Eksplosionsfaren ved behandling af CFC/HCFC-rør vil være minimal, men dog størst ved HCFC R142 og R141 eller evt. helt nye gastyper såsom hydrofluoroolefins (HFO).

8. Fremstilling af forbehandlede rør

Der er fremstillet forsorterede og behandlede rør ved Dan Jord baseret på metoden i afsnit 6.3.

Rørene er sorteret i fraktionerne:

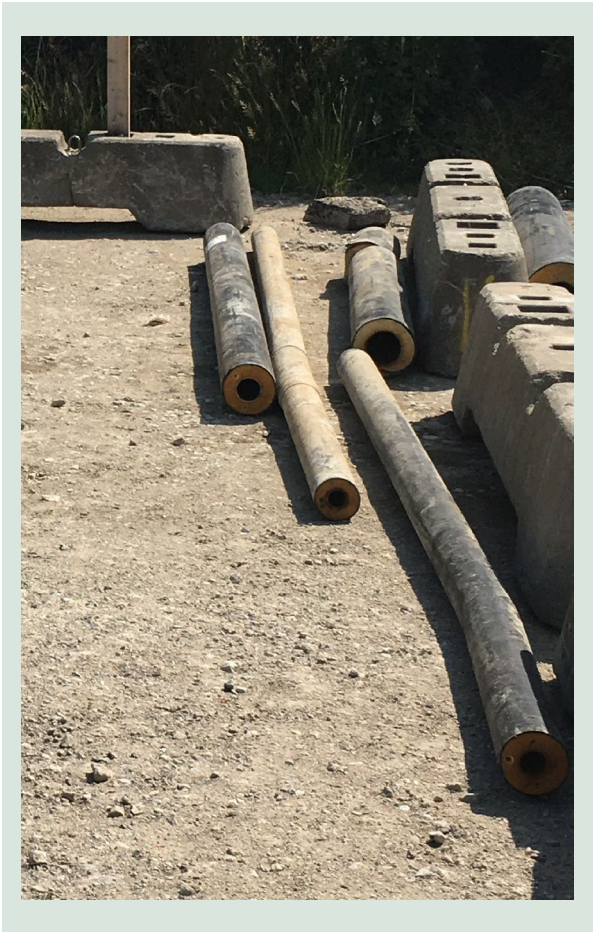
Type 1: Rør uden bitumenmellemlag/andet problematisk, med CFC

Type 2: Rør uden bitumenmellemlag/andet problematisk, uden CFC

Type 3: Rør med bitumenmellemlag/andet problematisk, med CFC

Type 4: Rør med bitumenmellemlag/andet problematisk, uden CFC

Nedenfor er vist eksempler på rør i de 4 kategorier, inden rørene blev behandlet med fraskæring af ventiler/kraftigt gods og neddeling til stykker <2 m.



FIGUR 21. Type 1: Rør uden bitumenmellemlag/andet problematisk, med CFC.



FIGUR 22. Type 2: Rør uden bitumenmellemlag/andet problematisk, uden CFC.



FIGUR 23. Type 3: Rør med bitumenmellemlag/andet problematisk, med CFC.



FIGUR 24. Type 4: Rør med bitumenmellemlag/andet problematisk, uden CFC.

Nedenfor er vist neddeling med Bajonetsav.



FIGUR 25. Neddeling med bajonetsav.

Nedenfor er vist neddelte, forbehandlede rør.



FIGUR 26. Type 1: Forbehandlede rør, uden mellemlag med CFC.



FIGUR 27. Type 2: Forbehandlede rør, uden mellemlag uden CFC.



FIGUR 28. Type 3: Frasorterede rør uden CFC.



FIGUR 29. Type 4: Frasorterede rør med CFC.

Rørene fra Type 1 og Type 2 er benyttet til udviklingsforsøg for behandlingsmetoden til fjernvarmerør i kapitel 9.

9. Behandling af forbehandlede fjernvarmerør

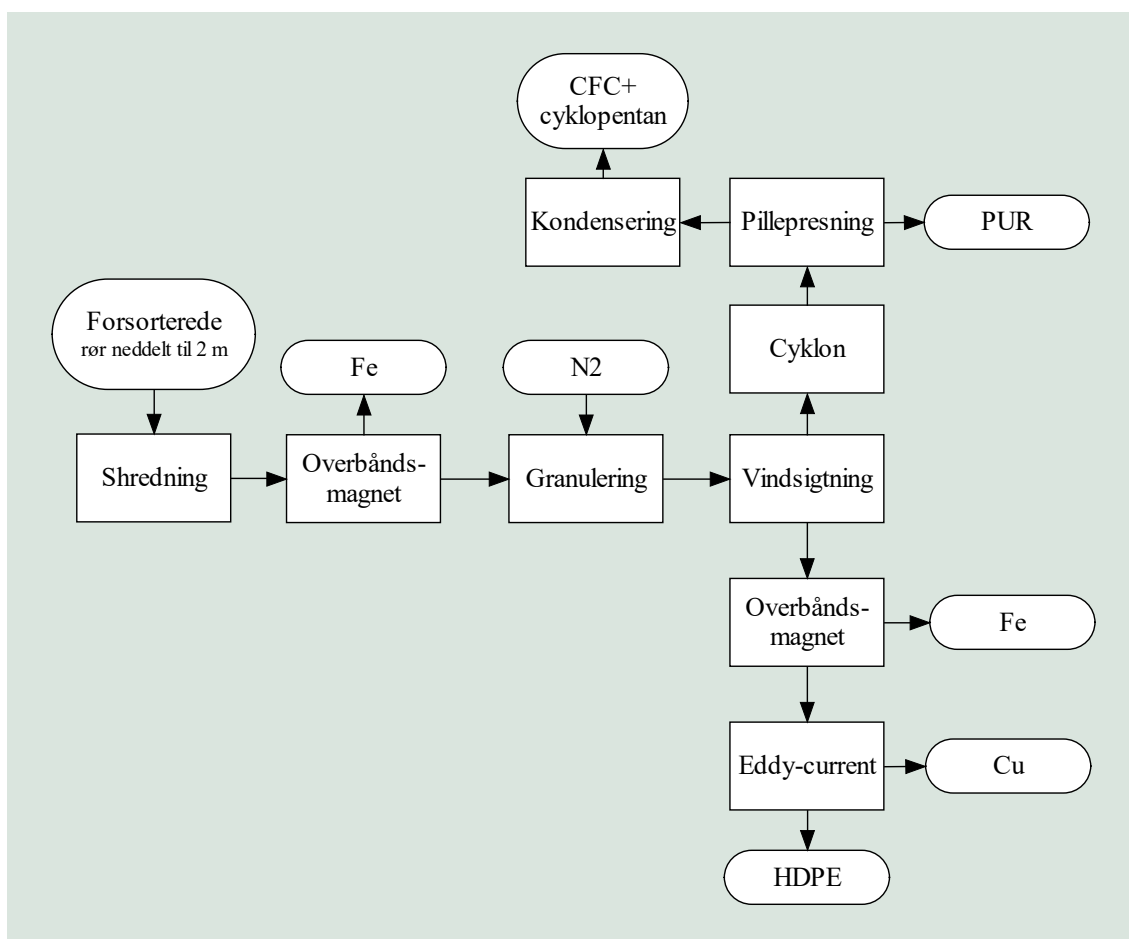
9.1 Udvikling af anlæg til behandling af modificerede fjernvarmerør

Ud fra erfaringer med de indledende forsøg med neddeling og separation i afsnit 6.1 blev det vurderet, at Eldans koncept til behandling af kølemøbler kræver modificering for at kunne anvendes til behandling af fjernvarmerør. Det skyldes blandt andet den observation, at stål var rimeligt befriet for skum efter det første trin i neddelingen. Der er derfor udarbejdet et nyt layout for behandling af fjernvarmerør som vist på FIGUR 30.

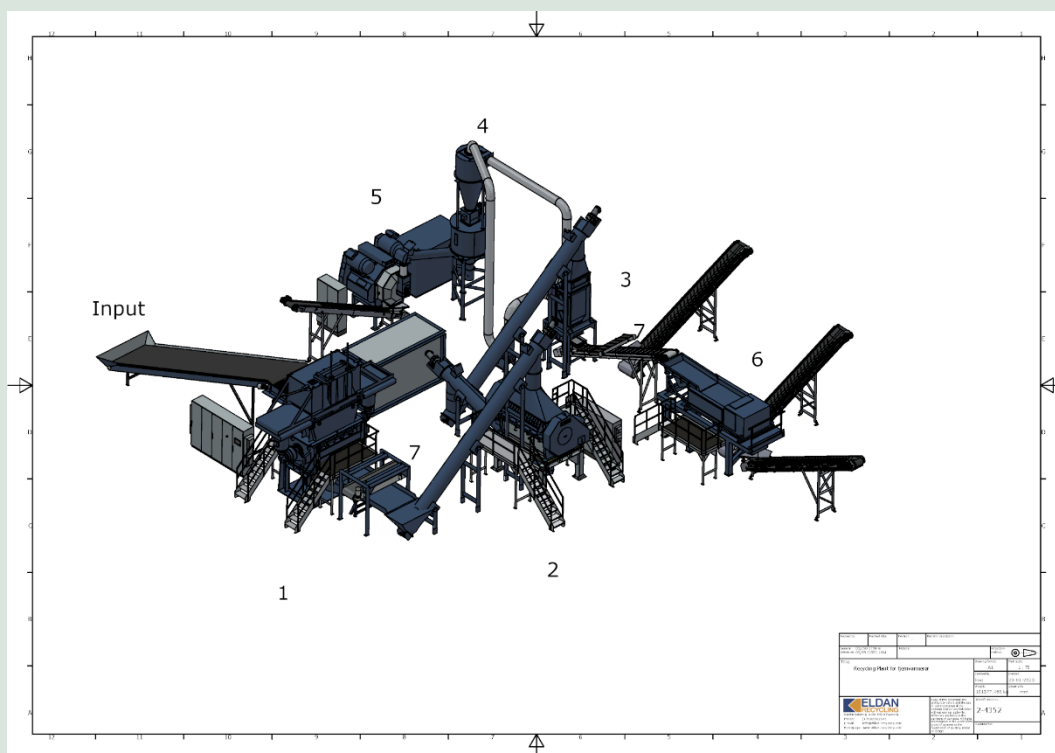
9.1.1 Layout for behandling af forsorterede fjernvarmerør

Ved metoden modtages rør neddelt til <2 m og med frasorterede bitumenlag og kraftigt gods. Rørene behandles herefter i et anlæg med følgende trin:

27. Forneddeling
28. Fraseparation af jern
29. Finneddeling
30. Vindsigtning med fraseparation af skum fra HDPE/kobber
31. Fraseparation af kobber/jern fra HDPE
32. Fjernelse af gasser fra skum.



FIGUR 30. Anlægslayout. Enheder og in-/outputs.



FIGUR 31. 3D-tegning af anlægslayout. 1: Shredder. 2: Granulator. 3: Vindsigte. 4: Cyklon. 5: Pillepresser. 6: Eddy-current. 7: Overbåndsmagnet.

9.2 Udviklingstest med forbehandlede rør med og uden CFC

I metoden beskrevet i afsnit 9.1 er de enkelte trin testet på rør af Type 1 (med CFC) og Type 2 (uden CFC) fra Dan Jord.

I det følgende er vist resultater af behandling med de udviklede trin.

9.2.1 Forsøg del 1: Neddeling og jernseparation

- 1: Shredning ca. 100 mm
- 2: Fe-separation med overbåndsmagnet/manuelt
- 3: Granulering 15-30 mm sold
- 4: Fraseparation af småt jern med rullemagnet.

Ved behandlingen var det endelige separationsudstyr til fraseparering af jern ikke etableret, hvorfor fraseparering foregik delvis manuelt.



FIGUR 32. Neddeling og separation af jern.

9.2.2 Resultater af forsøg

Rør Type A, uden CFC

Sammensætning af 739 kg rør: 37 % HDPE+skum m.m. og 63 % jern - i alt behandlet ca. 1.580 kg, hvor der opnås 589 kg skum+HDPE+kobbertråde m.m.

Rør Type A, med CFC

Sammensætning af 1.781 kg rør: 29 % HDPE+skum m.m. og 71 % jern - af de 1.781 kg opnås 525 kg skum+HDPE+andet.



FIGUR 33. Frasepareret jern.

10 repræsentative stykker af det fraseparerede jern blev analyseret og viste et gennemsnitligt indhold på ca. 0,75 % skum, hvilket er den acceptable grænse⁴. I det endelige system kan der etableres en yderligere bearbejdning for at opnå et endnu lavere indhold af skum.

9.2.3 Forsøg del 2: Vindsigtning af plast og skum

Der er ved Eldan opbygget en vindsigte til fraseparering af skum fra HDPE.

Vindsigten er vist på FIGUR 34.

⁴ Ifølge Jakob Kristensen, Stena er der ved international handel med jernskrot en grænse på 0,75 % for urenheder



FIGUR 34. Vindsigte.

Der blev udført forsøg med enkelt- og dobbelttoprensning af HDPE fra rør med CFC og uden CFC.

9.2.4 Materiale uden CFC



FIGUR 35. HDPE fra materiale uden CFC.



FIGUR 36. Skum fra materiale uden CFC (1 gang vindsigtning).



FIGUR 37. Skum fra materiale uden CFC (2 gange vindsigtning).

Sammensætningen af HDPE- og skumfraktioner fra vindsigteforsøgene blev analyseret som vist i TABEL 5.

TABEL 5. Sammensætning fraktioner fra vindsigtning af materiale uden CFC.

	Metal Fe	Cu tråd	Fortinnet/ cu tråd	Skum	HDPE sort	Klar hård plast	Folie klar m alu	Folie sort	Bitumen
1 let (1x)	0,0	0,0	0,0	65,0	33,9	0,0	1,2	0,0	0,0
1 tung (1x)	0,0	2,8	2,7	0,0	94,5	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabellen viser:

- en høj renhed af den tunge fraktion (HDPE) på 94,5-98 %. Urenheder udgøres af fortinnet tråd og kobbertråd, som kan frasepareres med eddy-current separation
- at 1 gang vindsigtning giver en lav renhed af skum på ca. 65 %, mens dobbelttoprensning øger renheden til 95,9 %.



FIGUR 38. Øverst (HDPE-fraktionen 1 x vindsigtning): HDPE, fortinnet tråd, kobber. Nederst: (skum-fraktionen 1 x vindsigtning): PUR-skum, HDPE, folie.



FIGUR 39. Eksempler afskallet plast fra HDPE.

9.2.5 Materiale med CFC

Sammensætningen af HDPE og skum fra rør med CFC er vist i TABEL 6.

TABEL 6. Sammensætning af fraktioner fra vindsigtning af materiale med CFC.

	Metal Fe	Cu tråd	Fortinnet/ al cu tråd	Skum	HDPE sort	Klar hård plast	Folie klar m alu	Folie sort	Bitumen
2 let (1X)	0,0	0,0	0,0	67,9	29,0	0,0	0,0	1,0	2,1
2 tung (1X)	0,2	0,9	0,0	0,2	89,5	4,1	0,0	0,0	5,1

	Metal Fe	Cu tråd	Fortinnet/ al cu tråd	Skum	HDPE sort	Klar hård plast	Folie klar m alu	Folie sort	Bitumen
2b let (2X)	0,0	0,0	0,0	84,0	14,2	0,0	0,0	0,5	1,3
2b tung (2X)	0,0	0,0	0,0	0,7	94,5	0,8	0,0	0,0	3,9

Tabellen viser:

- en lav renhed af HDPE på 89,5 % ved 1 gang vindsigtning. Herudover haves et indhold på 5,1 % bitumen
- Renheden af HDPE øges til 94,5 % ved 2 gange vindsigtning, men indholdet af bitumen er stadig højt med 3,9 %
- Renheden af skum er lav ved en gang vindsigtning (67,9 %), men øges til 84 % ved 2 gange vindsigtning. Der er imidlertid et indhold på 1,3-2,1 % bitumen i skumfraktionerne.

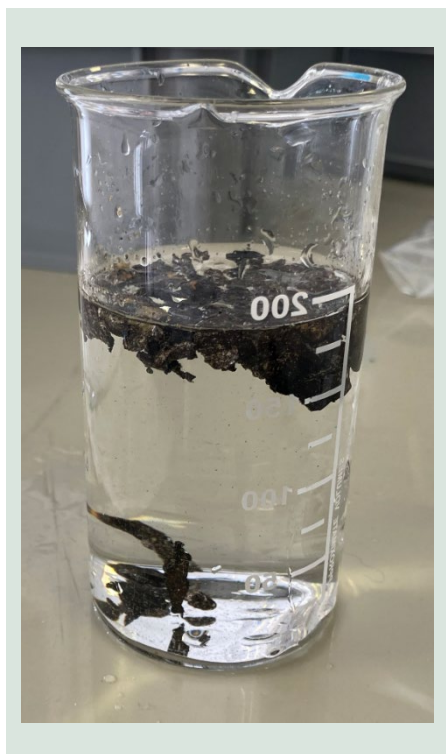


FIGUR 40. Sortering af HDPE-fraktion fra rør med CFC, 1 gang vindsigtning: Tv.: HDPE. Midt øverst: Klar, hård plast. Midt nederst: Skum. Th. øverst: Kobbertråde. Th. nederst: Bitumen.



FIGUR 41. Skum fra rør med CFC, 1 gang vindsigtning inden sortering.

Der blev udført forsøg med densitetsseparation af HDPE og bitumen. Både HDPE og bitumen flyder i vand og kan derfor ikke separeres med denne metode.



FIGUR 42. Forsøg med densitetseparation af bitumen.

En mulig separationsmetode af HDPE og bitumen er særligt MIR-baseret udstyr⁵, der kan fraseparere PP eller non-PP fra sorte flakes (FIGUR 42), men metoden er dyr, og noget bitumen hænger fast på HDPE'en, hvorfor en god forsortering vurderes at være et bedre valg, hvis plast i de gamle CFC-holdige rør skal udnyttes.

9.2.6 Samlede mængder og estimerede renheder og udbytter

Samlet blev produceret HDPE og skummængder, som angivet i TABEL 7.

TABEL 7. Producerede mængder.

	HDPE kg	PUR-skum kg
Uden CFC	344	317
Med CFC	218	243

De beregnede renheder og udbytter er vist i TABEL 8.

TABEL 8. Renhed og udbytter.

	Renhed %	Renhed %	Udbytte %	Udbytte %
Forsøg	Tung HDPE	Let skum	HDPE tung	Skum let
1 uden CFC 1x	94,5	65,0	71,6	100,0
1a uden CFC 2x	98,0	95,9		
1+1a uden CFC begge trin (HDPE samles)	95,1	95,9	97,5	99,5
2 med CFC 1x	89,5	67,9	68,7	99,8

⁵ MIR Mid-infrared. Der findes flakesortere baseret på dette princip til polymersortering af sort plast. Det vides ikke, hvor godt et sorteringsresultat der kan opnås med brug af denne type udstyr.

	Renhed %	Renhed %	Udbytte %	Udbytte %
2a med CFC 2x	94,5	85,5		
2+2a med CFC begge trin (HDPE samles)	90,3	85,5	85,7	99,6

Det ses, at der opnås en langt højere renhed af skum og et højere udbytte af HDPE ved at benytte en 2-trins vindsigtning.

9.2.7 Samlet delkonklusion

Materiale uden CFC

- HDPE: Kvalitet af HDPE vurderes egnet til at gennemføre rensnings- og ekstruderingsforsøg
- PUR: Skummet har lav renhed og lavt udbytte ved en enkelt passage af vindsigten, men kan formentlig presses til piller. Der bør benyttes dobbelttoprenset skum (højere renhed/mindre tab af HDPE).

Materiale med CFC

- HDPE: Det vurderes, at vask og omsmeltning af HDPE-blandingen i kommerciel skala ikke er mulig med et indhold på 4-5 % bitumen, som vil sætte sig i oparbejdningsanlægget. Et alternativ kan være mindre forsøg med manuel sortering/vask inden ekstrudering
- PUR: Det vurderes muligt at forsøge med pillepresning af dobbelttoprenset skum.

9.2.8 Pillepresning af PUR

For at teste pillepresning blev der benyttet en pillepresser ved Teknologisk Institut, Sdr. Stenderup.

Pillepresseren er en laboratorieversion, som ikke vil være lige så kraftig som en kommerciel presse, men den viste sig brugbart anvendelig til presning af skummet.



FIGUR 43. Pillepresser.

Input til forsøgene var skum, som var vindsigtet 2 gange fra rør med hhv. uden CFC.

Efter justering blev der fremstillet piller fra skum med CFC. Temperaturen i de aftappede piller var ca. 83 °C.

Det viste sig vanskeligt at presse sammenhængende piller af skummet uden CFC med laboratoriemaskinen, hvorfor der blev benyttet en blanding med 1 del skum fra rør med CFC og 1 del skum fra rør uden CFC. Her var det muligt at fremstille piller, der hang godt sammen.

Eksempler på de fremstillede piller er vist på FIGUR 44.



FIGUR 44. Pressede piller af PUR. Tv.: Med CFC. Th.: Uden CFC.

Pillernes sammensætning er estimeret ud fra sammensætningen af de tilførte skummaterialer.

TABEL 9. Sammensætning tilført skum.

	Skum fra rør med CFC	Skum fra rør uden CFC	1:1-blanding
Purskum	77,3	86,1	81,7
Plastfilm	2,0	4,8	3,4
Sort (HDPE eller bitumen)	20,7	9,1	14,9

Det ses, at renheden af skummet med CFC er 77 % og af 1:1-blandingen ca. 82 %.

10. Oparbejdning og afsætning af HDPE

10.1 Oparbejdning af HDPE fra rør uden CFC

Baseret på konklusionen i afsnit 9.2.7 blev det vurderet, at HDPE uden CFC ville kunne oparbejdes yderligere. Det blev valgt at teste oparbejdning ved Aage Vestergaard Larsen, som råder over udstyr, der kan anvendes til friktionsvask.

HDPE-materialet indeholdt en del metallsensortråde, som blev frasorteret ved indledende at udføre en manuel densitetsseparation i vand.

Input er vist på FIGUR 45 og densitetsseparation på FIGUR 46.



FIGUR 45. Input (der ses indhold af kobbertråde og skum. Der ses desuden lag af aluminium på HDPE fra kapperørene).



FIGUR 46. Manuel separation af HDPE i flydekar (rester af skum flyder ligeledes).

Efter densitetsseparation blev materialet vasket i friktionsvaskeren. Output ses på FIGUR 47.



FIGUR 47. Output efter friktionsvask og tørring.

Output er befriet for skum (som slås i stykker og vaskes væk) og en del af alulaget er fjernet.

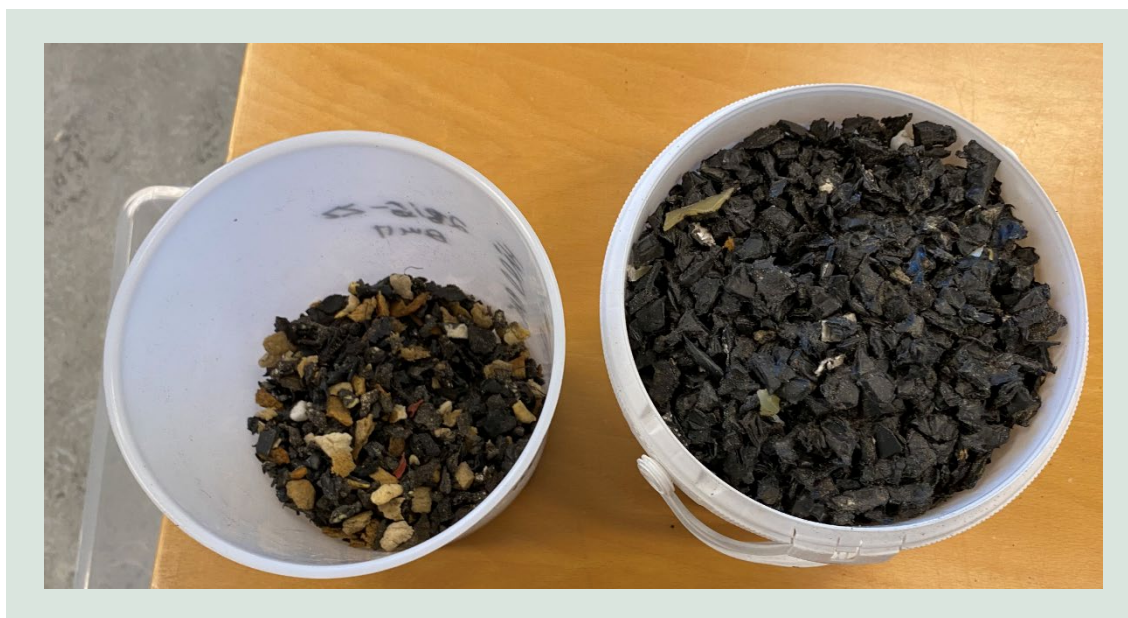
Ud fra en massebalance er der estimeret et udbytte på ca. 90 %, hvoraf ca. 5 % er tab i vask, og ca. 5 % er fra densitetsseparation, hvor en væsentlig del af massen stammer fra kobbersensortråde fra rørene.

10.2 Oparbejdning af HDPE fra rør med CFC

Baseret på konklusionen i afsnit 9.2.7 blev det vurderet, at HDPE med CFC ville kræve, at det forholdsvis høje bitumenindhold skulle frasorteres fra det vindsigtede materiale. Da bitumenpartiklerne ikke kunne frasorteres maskinelt med fx densitetsseparation i vand, blev det valgt at oparbejde en mindre portion manuelt, så der blev opnået tilstrækkeligt HDPE til at kunne udføre ekstruderingsforsøg i mindre skala.

Trinene i oparbejdningen var manuel frasortering af bitumen, vask i opvarmet vand, densitetsseparation og tørring i varmeskab ved 105 °C.

Der blev produceret ca. 16 kg tørret materiale til ekstrudering. På FIGUR 48 er vist frasorteret skum og bitumen, og på FIGUR 49 er vist den færdige oparbejdede HDPE til ekstrudering.



FIGUR 48. Eksempel på sortering (Tv. frasorteret skum, bitumen mv. Th. frasorteret plast).



FIGUR 49. Sorteret, vasket densitetssorteret og tørret HDPE fra rør med CFC.

10.3 Ekstrudering af HDPE

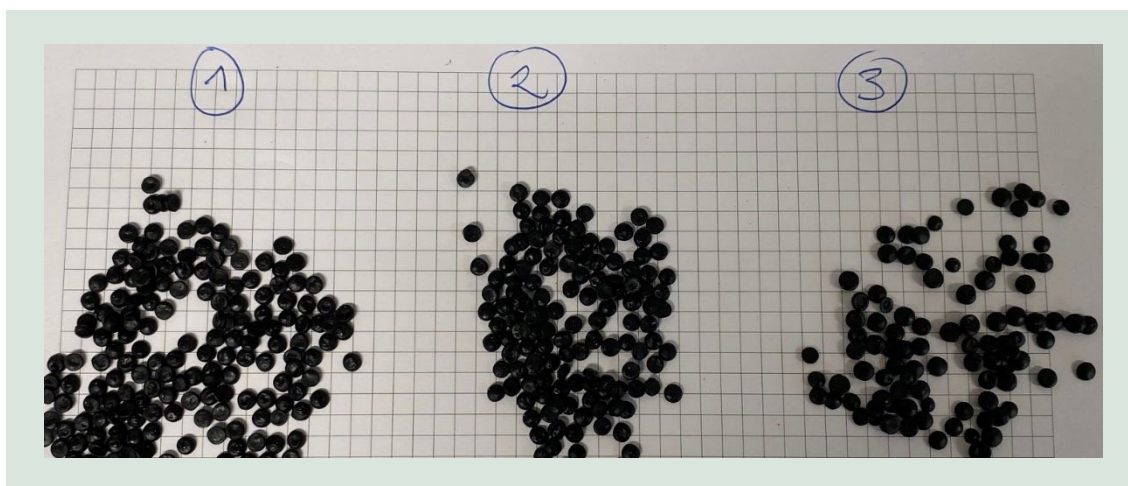
De 2 typer HDPE fra rør med og uden CFC blev ekstruderet ved AVL på en mindre ekstruder med smeltefilter.

Der blev udført 4 forsøg med ekstrudering:

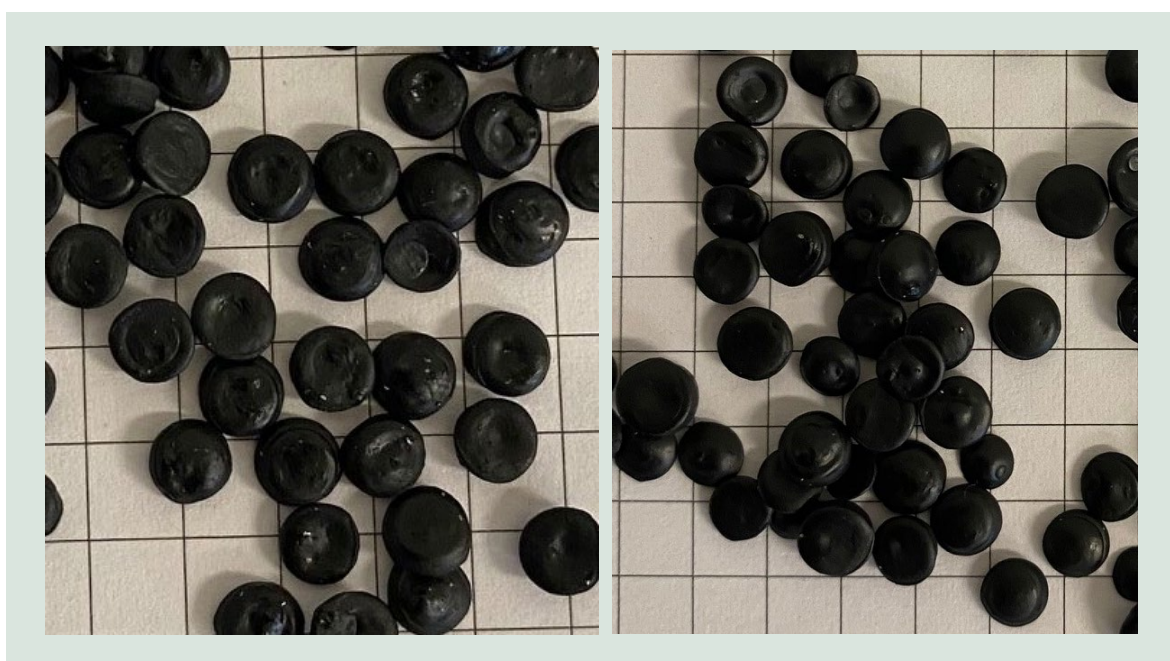
- 33. HDPE fra rør uden CFC ved 270 °C
- 34. HDPE fra rør uden CFC ved 300 °C
- 35. HDPE fra rør med CFC ved 270 °C
- 36. Reference af HDPE i rørkvalitet fra produktionsspild af kasserede rør fra produktion af fjernvarmerør.

Det var muligt at processere alt materiale.

Fremstillede piller er vist på FIGUR 50 og FIGUR 51.



FIGUR 50. Fremstillede piller forsøg 1-3.



FIGUR 51. Detaljebillede af piller. Forsøg 1 tv.; forsøg 3 th. Der ses små alustykker, som har passeret smeltefiltret (mesh 40 ca. 350 µm) mest i materiale fra rør uden CFC, hvor der er flere kapperør med aluminiumslag.

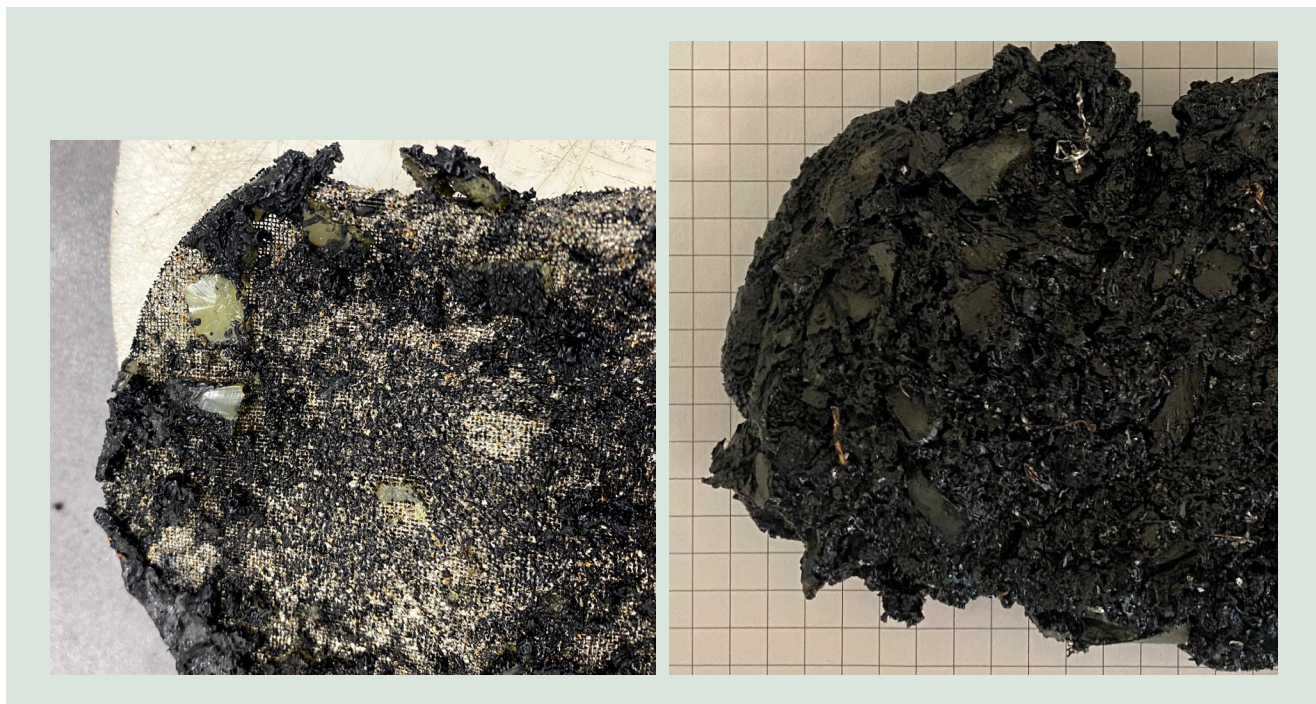
Gennemskårne piller viser små huller i piller fra forsøg 1-3 (se FIGUR 52). Huller stammer typisk fra indhold af gas enten fra for højt indhold af fugt eller gas dannet fra indhold af organisk materiale, som dekomponerer ved ekstruderings temperaturen.



FIGUR 52. Gennemskårne piller.

På smeltefiltrene blev fundet plast med højere smeltepunkt end processeringstemperaturen.

Eksempler på FIGUR 53.



FIGUR 53. Tv.: Smeltefilter fra forsøg 2 med klar plast, der ikke smelter ved 300 °C. Th.: Filterkage fra forsøg 3. Indhold af mange plaststykker, der ikke smelter (udgør ca. 0,5 % af tilført masse).

Efterfølgende sås klare plaststykker, som blev analyseret med FTIR og bestemt til at være polyethylen. En ekstra smeltetest på en varmeplade viste, at plasten ikke smeltede, hvorfor det blev konkluderet, at der er tale om krydsbundet polyethylen (PEX). Plasten kan stamme fra spacere eller lignende, som indgår i nogle konstruktioner. Så længe mængden ikke er for stor til smeltefiltrets kapacitet, udgør plasten dog ikke et problem.

Generelt blev det konkluderet om forsøg og opnåede piller:

TABEL 10. Observationer for forsøg.

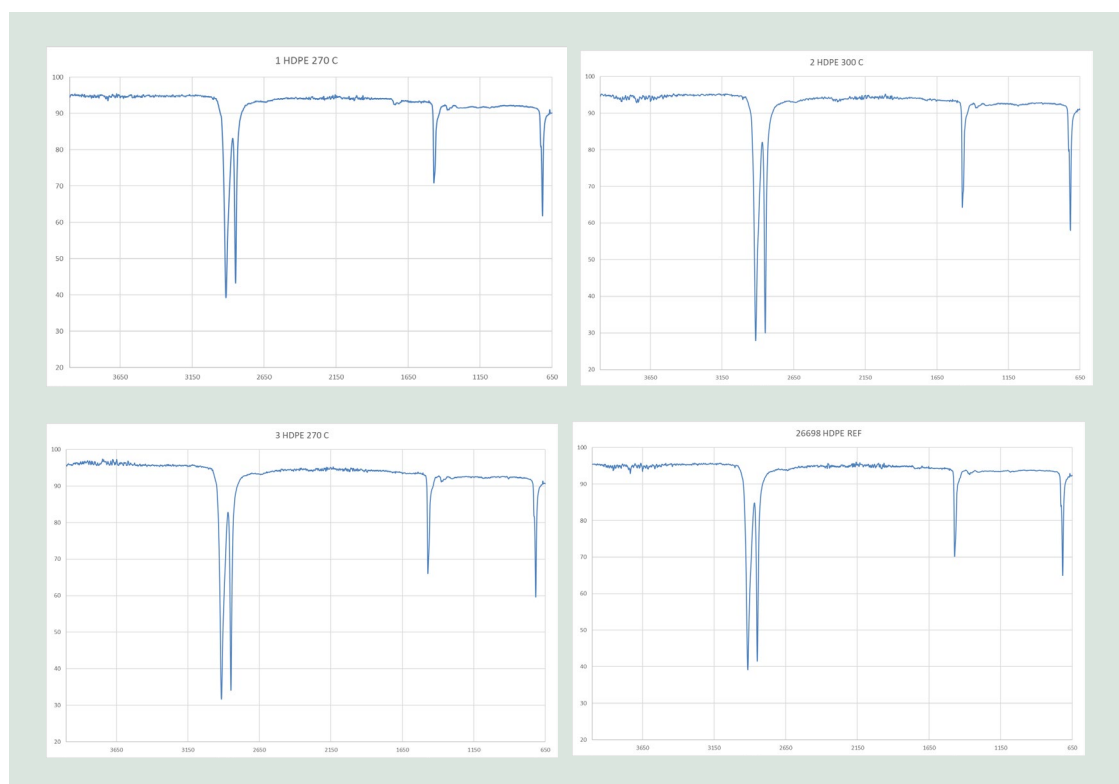
Nr	Forsøg	Observationer
1	HDPE fra rør uden CFC, 270 °C	Meget materiale på smeltefilter, men ekstruder kunne holdes kørende. Piller ser fine ud. Nogle aluminiumspartikler kan ses samt lidt sugninger fra indhold af gas
2	HDPE fra rør uden CFC, 300 °C	Meget materiale på smeltefilter, men ekstruder kunne holdes kørende. Piller ser fine ud. Nogle aluminiumspartikler kan ses samt lidt sugninger fra indhold af gas
3	HDPE fra rør med CFC, 270 °C	Meget materiale på smeltefilter, men ekstruder kunne holdes kørende. Piller ser fine ud. Få aluminiumspartikler kan ses samt lidt sugninger fra indhold af gas

10.4 Analyser af materialekvalitet af ekstruderet HDPE

Der er foretaget en række analyser for at karakterisere kvaliteten af pillerne.

10.4.1 FTIR

Der er foretaget FTIR-analyser af piller fra HDPE fra de tre forsøg samt referencen.



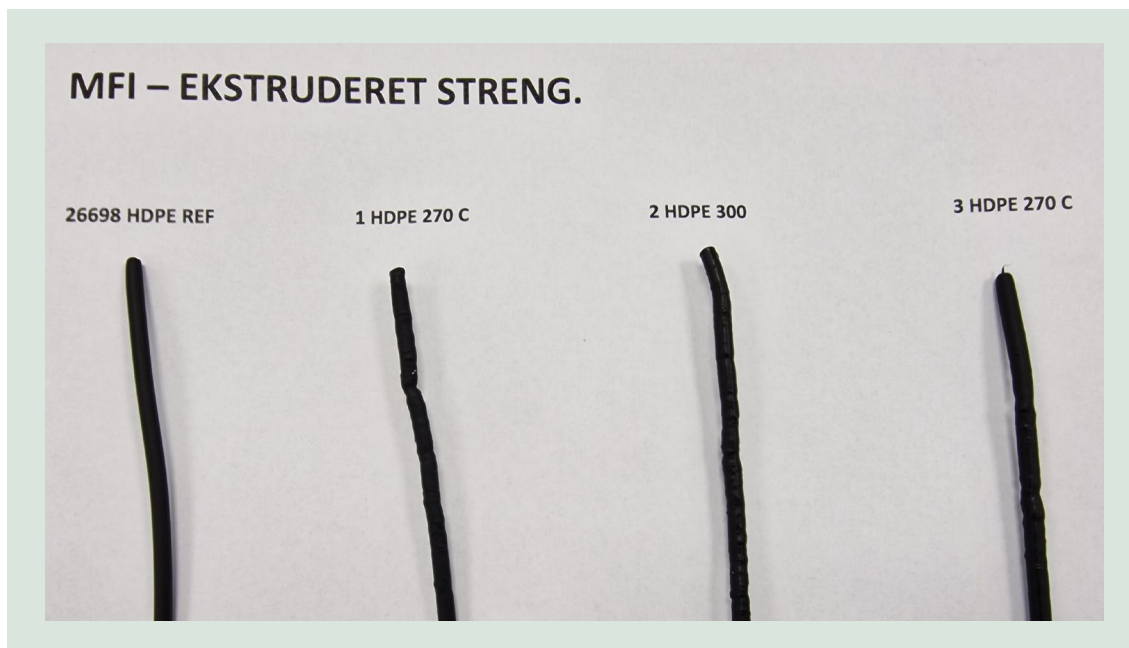
FIGUR 54. FTIR-analyser (x-aksen er bølgetal cm⁻¹).

Det ses, at næsten alle IR-spektre er ens, hvilket indikerer en høj renhed (lille indhold af andre polymerer).

10.5 Fremstilling af ekstruderede strenge og sprøjtestøbte trækstænger

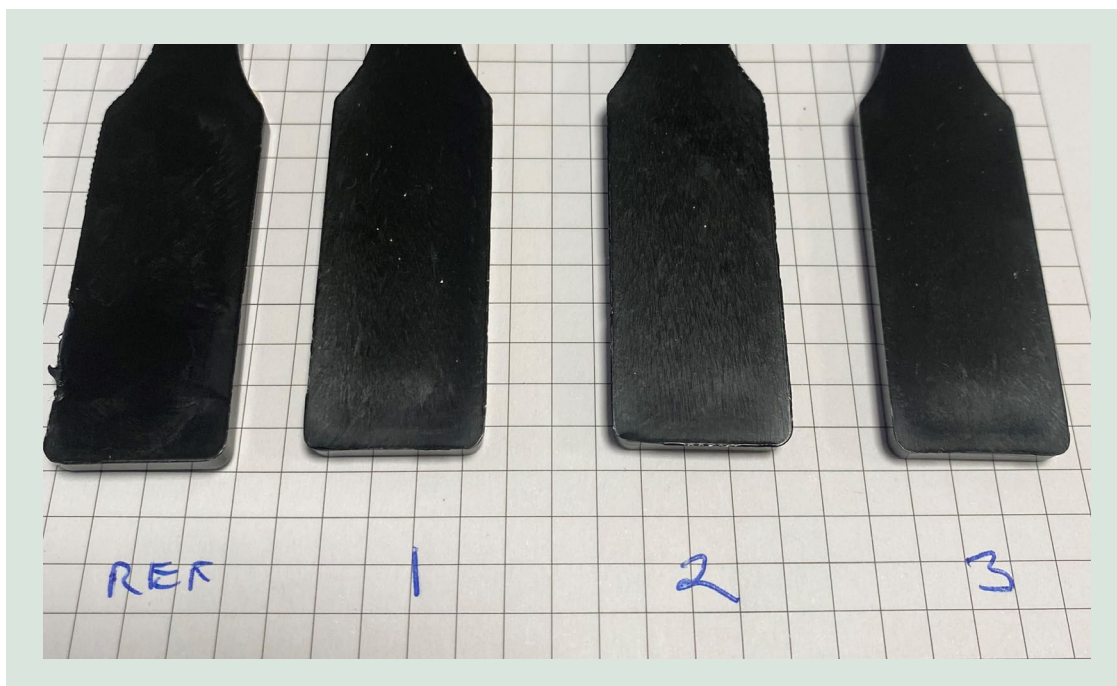
Bedømmelse af ekstruderede strenge (FIGUR 55) viste:

- Referencen er helt glat
- 1-3 er lidt ru/inhomogene.



FIGUR 55. Ekstruderede strenge.

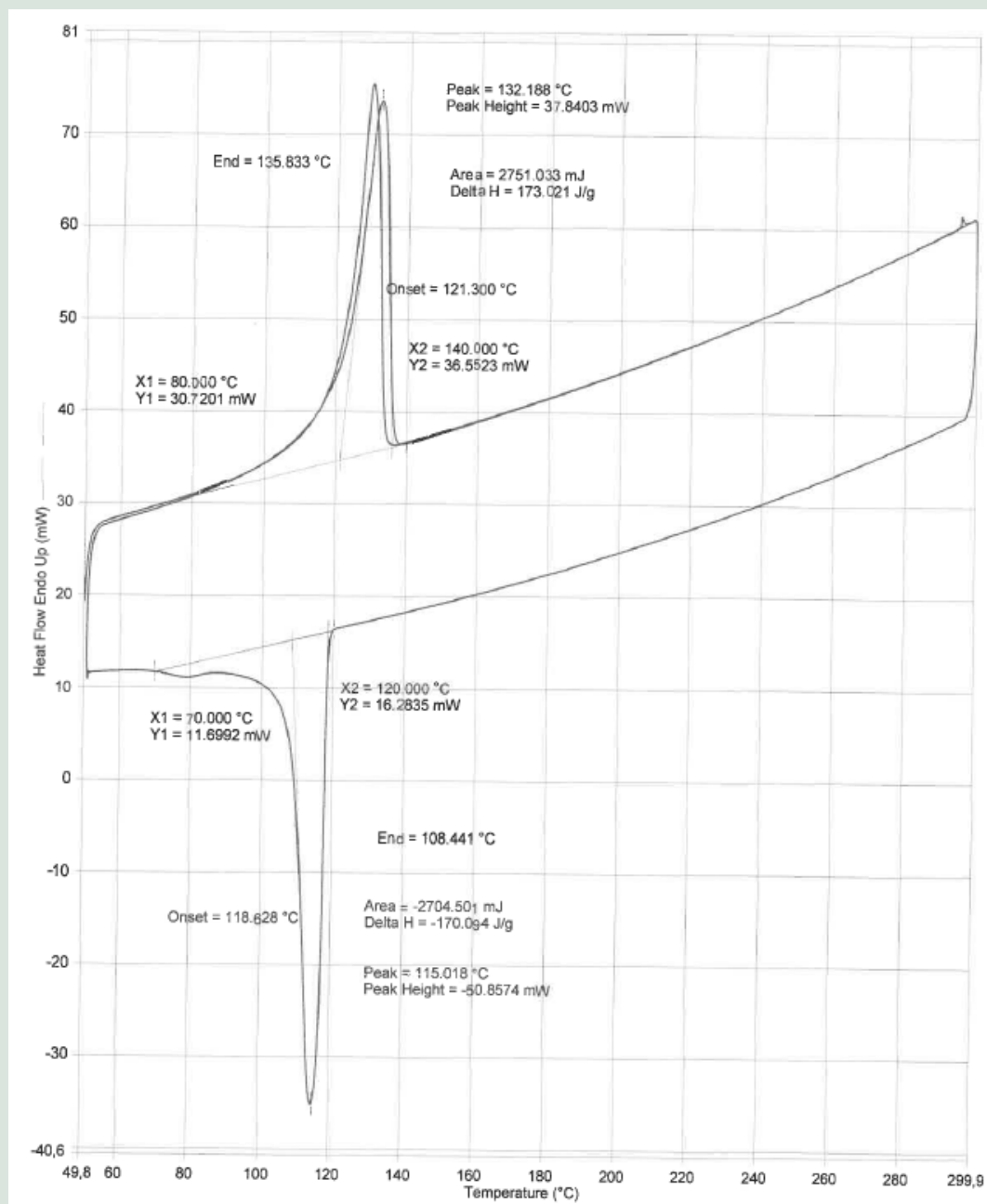
De sprøjtestøbte trækstænger var alle fine og glatte, dog med indhold af små aluminiumspartikler.



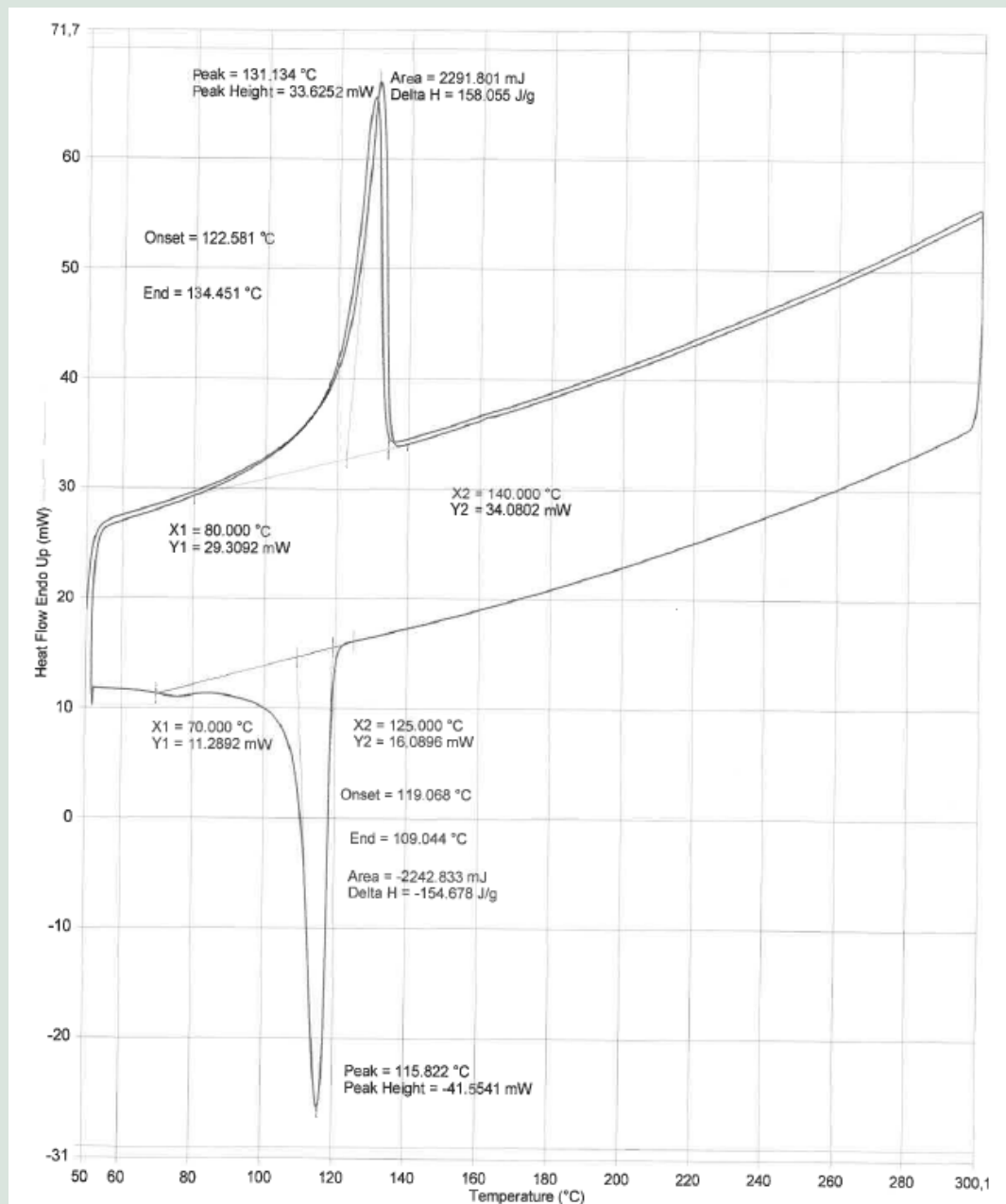
FIGUR 56. Sprøjttestøbte trækstænger.

10.6 DSC-analyser

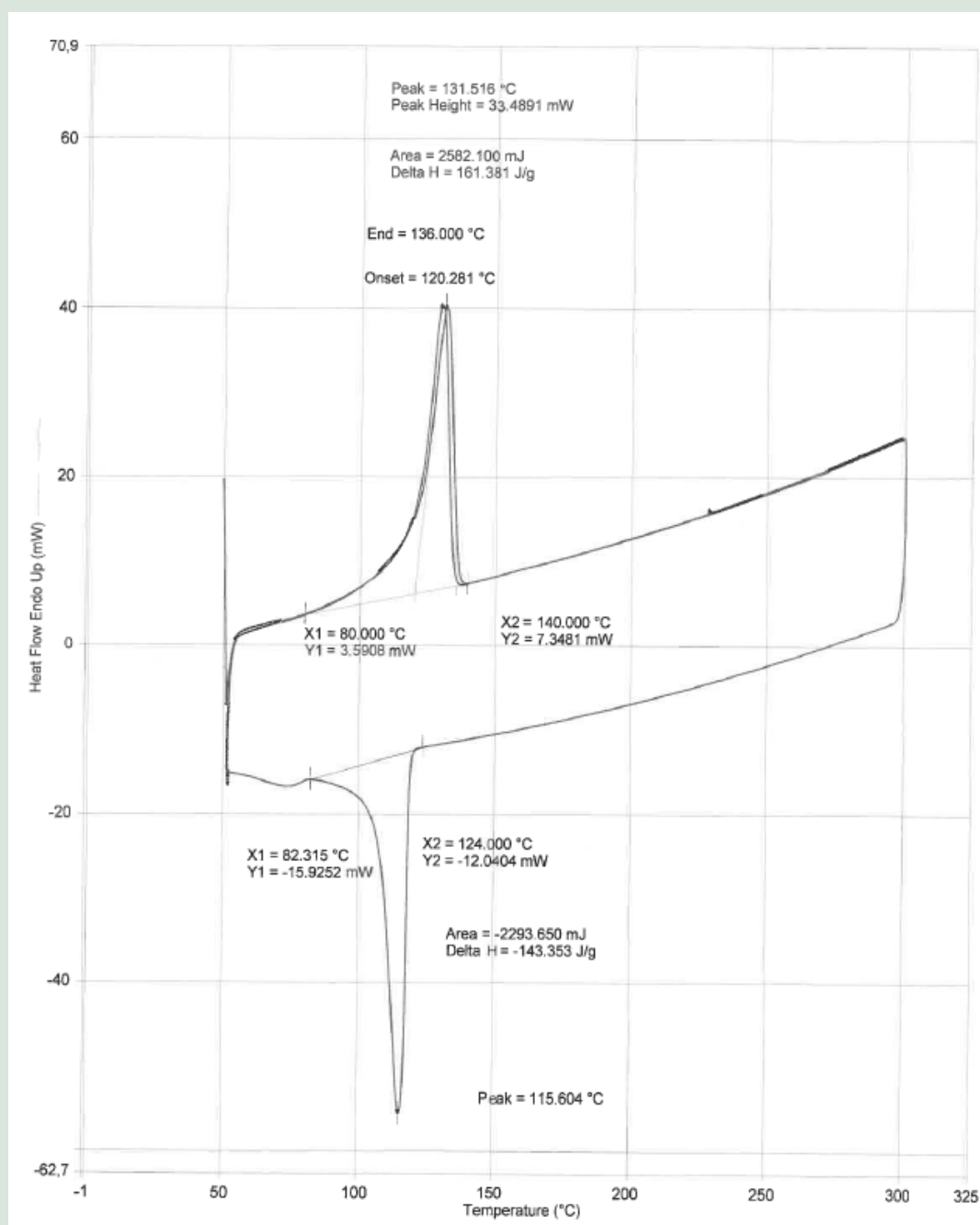
DSC-analyser (Differential Scanning Calorimetri) er vist på FIGUR 57.



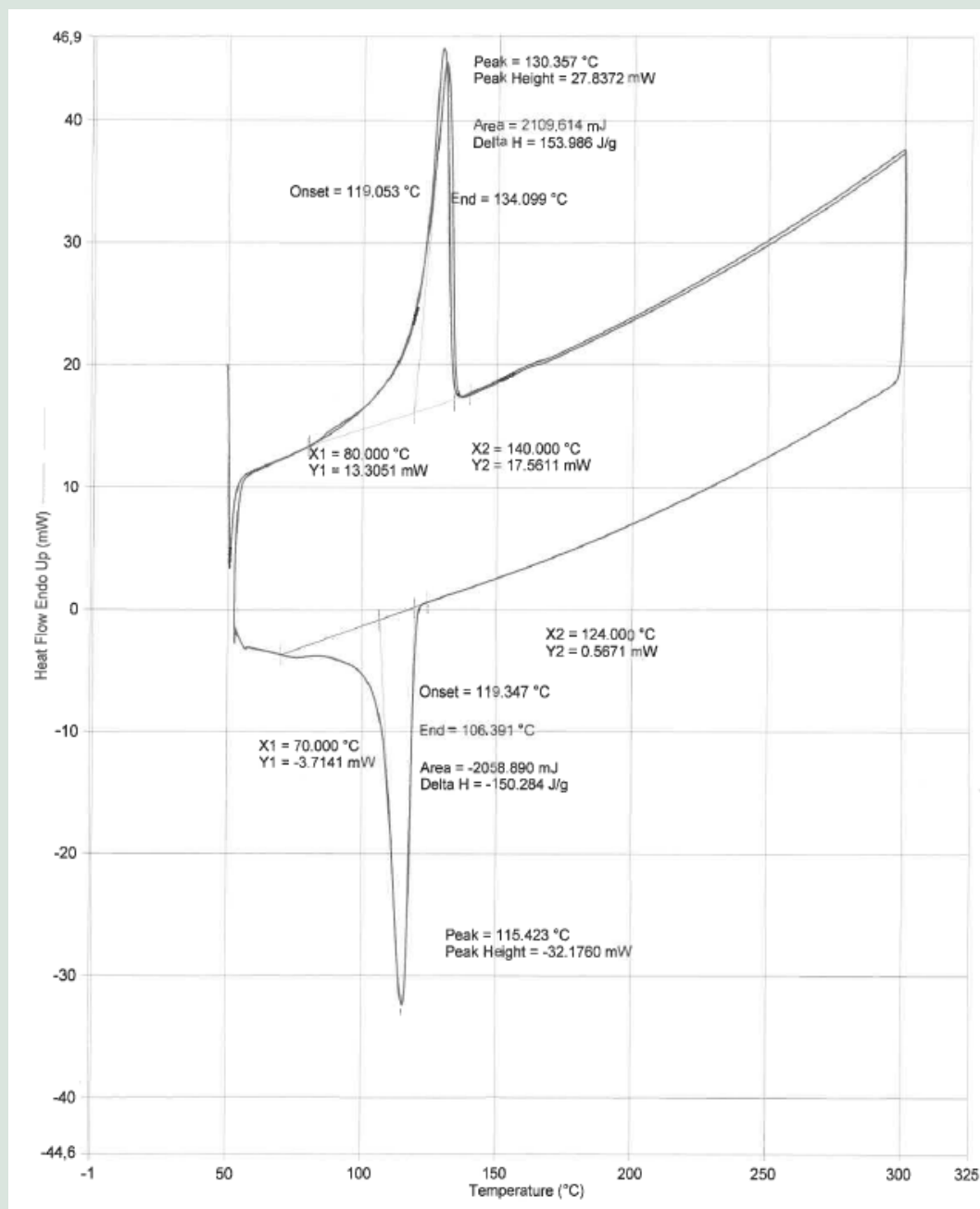
FIGUR 57. DSC-reference.



FIGUR 58. DSC-forsøg 1.



FIGUR 59. DSC-forsøg 2.



FIGUR 60. DSC-forsøg 3.

DSC-analyserne viser ingen markante forskelle, og bestemte smeltepunkter er således næsten ens (1: 131,1 °C. 2: 131,5 °C. 3: 130,3 °C. Ref. 132,2 °C). Der er herudover ingen markante ekstra toppe fra fx PP (dog en lille flad top for forsøg 3 ved 160-170 °C). Polymerrenheden vurderes derfor meget høj.

10.7 MFI og styrkeegenskaber

Der er målt smelteindex på piller samt styrkeegenskaber på træprøvestængerne. Desuden er ekstruderede strenge bedømt ud fra AVL's vurderingssystem.

Resultaterne er resumeret i TABEL 11.

TABEL 11. MFI, trækstyrke og strengbedømmelse.

Analyse	Enhed	26698 HDPE REF	1 HDPE 270	2 HDPE 300	3 HDPE 270	Metode
MFI (190 °C: 5 kg)	g/10 min	0,2	0,3	0,5	0,4	ISO 1133
Trækstyrke ved flydepunkt	Mpa	25	22	21	22	ISO 527-2
Trækstyrke ved brud	Mpa	20	16	19	20	ISO 527-2
Forlængelse ved brud	%	29	40	44	41	ISO 527-2
E-modul	Mpa	646	556	601	538	ISO 527-2
Streng*		1	2	2	2	

Streng*: Strengbedømmelse ud fra AVL's vurderingssystem

1: Glat overflade og massivt tværsnit på streng

2: Ru overflade og massivt tværsnit på streng

3: Ru overflade og opkogt tværsnit på streng

Ud fra resultaterne vurderes:

- MFI: MFI stiger lidt fra forsøg 1 til 2. Alle MFI er dog forholdsvis tæt på referencen
- Trækstyrke ved flydepunkt og brud samt E-modul er ens inden for usikkerheden
- Forlængelse ved brud %: er lidt højere for 1, 2 og 3 end for referencen (de er lidt mere elastiske)
- Strengbedømmelse: Materialerne er brugbare til nogle formål (2), men ikke så gode som referencen (1).

10.8 Anvendelsesmuligheder

Der er blevet diskuteret en række mulige anvendelsesområder med AVL.

Da HDPE-kvaliteten er fra rør, er MFI lavt, og anvendelser er derfor primært til lav MFI-anvendelser, hvor der anvendes ekstrudering som fremstillingsproces.

10.8.1 Rørmateriale

Det ville være interessant, hvis der kunne opnås en genanvendelse af rørmaterialet til fremstilling af nye rør, men da de ekstruderede strenge er i kvalitet 2, vurderes det indledende, at kvaliteten ikke er tilstrækkelig til direkte anvendelse, omend muligvis som co-ekstruderet inder- eller mellemlag.

10.8.2 Mellemlag

Materialet kan formentlig anvendes som co-ekstruderet mellemlag i diverse materialer, fx kabelbeskyttelse.

10.8.3 Kraftige emner

Der findes kraftige emner på markedet, hvortil materialet formentlig kan anvendes som tilsats; fx i:

- Køreplader
- Plastplanker.

10.8.4 Græsarmering

Tilsats til græsarmering kan være en mulighed.

Materialet er ikke umiddelbart egnet til sprøjtestøbning, men kan formentlig anvendes som til-sats til høj MFI-materiale.

10.8.5 Muligheder for forbedring af kvaliteten

Der er en lille mængde aluminiumspartikler $<350\text{ }\mu\text{m}$ i materialet. For de fleste emner med en vis dimension vil den lille mængde aluminiumspartikler ikke påvirke styrken væsentligt, men vil kunne ses på overflader.

Specielt i HDPE fra rør af ældre dato indgår lidt bitumenrester, som bliver blandet ind i HDPE ved ekstruderingen. Dog er ekstrudering ikke så effektiv en opblanding som compounding. Det vurderes derfor, at en compounding vil kunne producere et mere homogent materiale med mere fejlfrie strege og forbedrede egenskaber. En compounding er imidlertid et fordyrende trin.

Filtrering med finere filter kan formentlig også forbedre egenskaberne. Dette vil dog fordyre behandlingen og øge tabet af HDPE med filterkage.

11. Oparbejdning og afsætning af PUR

11.1 Analyser af piller

For de fremstillede piller i afsnit 9.2.8 blev indholdet af CFC analyseret for pillerne fremstillet fra rør med CFC.

Resultatet viste et indhold på 0,83 % CFC11 samt et indhold af cyklopentan på 0,82 %. Noget af skummet til pillerne må derfor stamme fra fejlsorterede rør med cyklopentan.

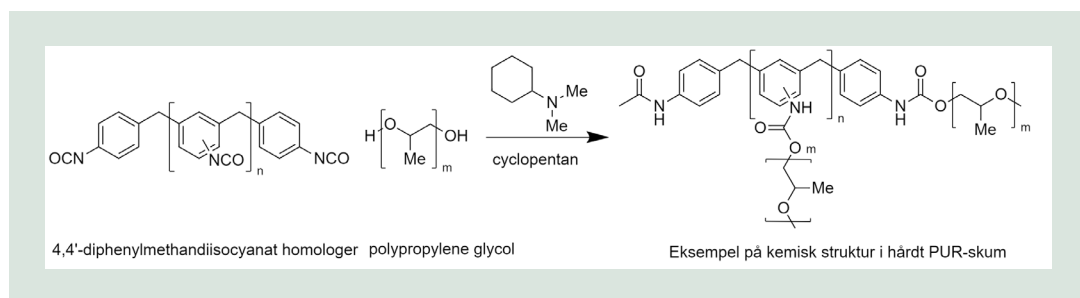
Af Miljøprojekt nr. 1826 2016¹ fremgår et målt indhold af CFC 11 i rør fra 70'erne på mellem 3,4 og 27 vægt% (middel 11,7). Der er således sket en rimelig reduktion på formodentlig over 90 %.

Det forventes, at en kommerciel fuldskalapresse, som er væsentligt mere effektiv end laboratorieversionen, vil kunne reducere CFC til under 0,2 %.

11.2 Vurdering af anvendelsesmuligheder

PUR fra fjernvarmerør er oftest fremstillet i stift skum. Ifølge LOGSTOR benyttes PUR i nye konstruktioner, der kan holde til 120 °C. Skum af polyisocyanurat (PIR) anvendes i fritliggende højtemperatur-isoleringsystemer fra 120 °C til 170 °C, mens jordforlagte højtemperatur-isoleringsystemer fra 120 °C til 250 °C er baseret på PUR med et inderlag af mineraluld for at undgå termisk beskadigelse af PUR-skummet.⁶

Ifølge nuværende sikkerhedsdatablade fra LOGSTOR består PUR-skummet af 4,4'-diphenylmethandiisocyanat samt dens isomerer og homologer (komponent A).⁷ Endvidere består komponent B af en polyol: propoxileret propan-1,2-diol (polypropylene glycol); en katalysator: cyclohexyldimethylamin samt opskumningsmidlet cyclopentan⁸. Ved blanding af de to komponenter i det ønskede forhold dannes et stift PUR-skum (FIGUR 61). Der har formentlig været anvendt en række varianter af PUR gennem tiden, men information om de specifikke formuleringer med hensyn til typen og ratioen af isocyanat og polyol er ikke kendt.



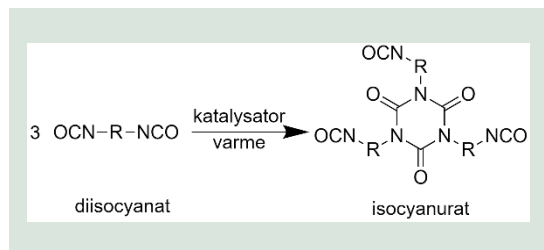
FIGUR 61. Kemisk skitse af reaktion mellem isocyanat og polyol.

⁶ <https://www.logstor.com/media/7550/kingspan-logstor-industry-brochure-dk.pdf>

⁷ https://www.logstor.com/media/7431/isocyanat-komponent-a-foam-pack_21122021_da.pdf

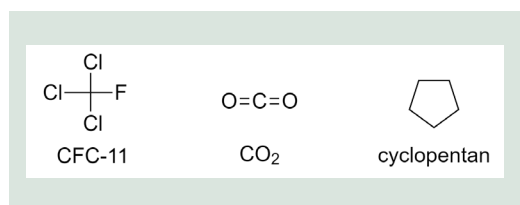
⁸ https://www.logstor.com/media/7362/polyol-komponent-b-foam-pack_21122021_da.pdf

PIR er produceret de samme typer af reagenser som PUR, men med øget ratio af isocyanat til polyol samt øget reaktionstemperatur med tilsat katalysator.⁹ Det betyder, at PIR primært udgøres af isocyanurat (trimer af isocyanat), som har bedre varmeresistente egenskaber end PUR.



FIGUR 62. Kemisk skitse af PIR-dannelse fra diisocyanater.

Tidligere (før 1995)¹⁰ blev PUR opskummet med CFC- og HCFC-gasser, hvis anvendelse som inerte gasser udgør en signifikant negativ indvirkning på ozonlaget og som drivhusgas. Før anvendelse af cyclopentan blev dominerende som opskumningsmiddel, blev CO₂ i en kort periode brugt som opskumningsgas, men blev udfaset pga. høj diffusion og dermed forringet isoleringsevne over tid.¹¹



FIGUR 63. Kemisk skitse af forskellige opskumningsmidler.

11.2.1 Mekanisk genanvendelse

PUR har tidligere været presset til plader eller anvendt i isoleringsprodukter sammen med cement. Neddelt PUR fra afskær og lignende kan også anvendes som fyldstof for at nedbringe produktionsspild. Dan-iso har for nylig offentliggjort deres resultater indenfor genanvendelse af PUR som fyldstof i nye produkter, hvor der opnås 45 % genanvendelse af genindstøbt regenerat.¹²

11.2.2 Kemisk genanvendelse¹³

PUR kan spaltes i isocyanatdelen og polyoldelen, hvilket blev benyttet i en genanvendelsesproces ved LOGSTOR for en række år siden, dog kun med udnyttelse af polyoldelen vha. glykolyse. De fleste processer til kemisk spaltning af PUR er begrænset til at genvinde polyolde-

⁹ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pat.3891>

¹⁰ CFC-11 blev udfaset i 1992 ifølge Miljøprojekt nr. 1076, 2006

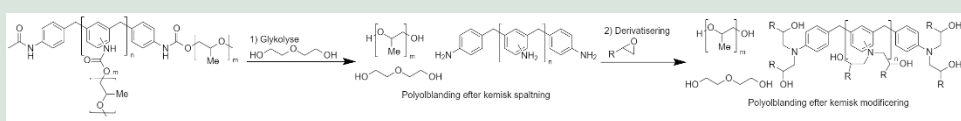
¹¹ <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2022/08/978-87-7038-433-9.pdf>, <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2016/02/978-87-93435-30-8.pdf>, <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2016/02/978-87-93435-28-5.pdf>

¹² <https://dan-iso.dk/forside/genvinding/>

¹³ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18301831>

len, da adskillelsen af polyol og isocyanatderivater (dianiliner) er teknologisk udfordrende. Iso-cyanatdelen bliver derfor ofte anset som affald og forlader værdikæden som kemisk affald eller bliver kemisk modificeret til en polyol.

Den mest anvendte teknologi er glykolyse, som benytter lav-molekylvægt-dioler (fx diethylenglykol) som spaltningssagens (FIGUR 64). Produktblandingen efter glykolyse indeholder original polyol, den anvendte diol og dianilin samt dens urethan-derivater. Denne blanding kan anvendes direkte som hærder i nogle epoxyprodukter. Blandingen kan også tilsættes i meget små mængder til virgint polyol, som kan anvendes til formulering af ny PUR-skum. Begrænsningen i brugen af denne blanding er tilstedeværelsen af giftige og reaktive dianiliner. Blandingen kan yderligere modificeres med epoxider eller cykliske karbonater, som omdanner amino-grupperne i dianilinerne til hydroxy-grupper og derfor nu udgør en dianilin-modificeret polyol. Samlet set indeholder produktblandingen til slut kun alkoholer, hvor diolen og den dianilin-modificerede polyol er strukturelt forskellige fra den originale polyol. Glykolyseproduktet kan tilsættes i mængder omkring 10-20 % i virgint polyol til brug i nye PUR-skumprodukter.



FIGUR 64. Kemisk skitse af glykolyseproces af stift PUR-skum.

Alternative metoder til glykolyse for stift PUR-skum er begrænset til forskning- og udviklings-metoder som fx aminolyse¹⁴, solvolyse¹⁵ og overgangsmetalkatalyseret hydrogenering¹⁶ (TABEL 12). Aminolyse benytter sig af en alifatisk amin, som nedbryder PUR til polyol samt amin-derivater af dianilin. Metoden kan køres under milde betingelser, men der har været begrænset udvikling af denne teknologi. Solvolyse er en bred betegnelse for en proces, hvor opløsningsmidlet også agerer som reagens. Disse anses som simple processer, da reaktionsblandingen kun indeholder spaltede PUR-komponenter samt opløsningsmidlet. Hydrogenering af PUR er en proces, der kun forbruger hydrogen, men metoden er begrænset af skala samt tilgængelighed og pris af de avancerede overgangsmetalkatalysatorer.

Udbytte af de individuelle produkter afhænger af både komposition af PUR-skummet og de valgte spaltningssprocesser.

For blødt PUR-skum findes der en større mængde kemiske metoder til spaltning. Det beror især på egenskaberne af den høje molekylvægt af polyolen, som ofte er omkring eller over 3.000 g/mol, og som udgør 60-70 wt% af PUR-skummet. Det betyder mildere reaktionsbetingelser som fx 2-fase-glykolyse og acidolyse, som også giver mulighed for separation af polyol og dianilin.¹⁷

¹⁴ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18301831>

¹⁵ <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acssuschemeng.2c02797>

¹⁶ <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cssc.202101705>,
<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/jacsau.1c00050>, <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/fttr/10.1002/cssc.202101606>

¹⁷ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18301831>

TABEL 12. Kemiske metoder til nedbrydning af stift PUR-skum.

Teknologi	Skala	Spaltningsreagens	Produktblanding
Glykolyse	Kommercielt	Diol	Original polyol, dianilin- modificeret polyol og diol
Aminolyse	Forskning	Alifatiske aminer	Original polyol, dianilin-derivater og aminer
Solvolyse	Forskning	Alifatiske alkoholer	Original polyol og dianilin
Hydrogenering	Forskning	Hydrogen	Original polyol og dianilin

Ovennævnte metoder har flere generelle begrænsninger. En vigtig parameter at kende er den eksakte PUR-komposition for at tilsætte de rette typer og mængder af reagenser og katalysatorer. Dette kan blive en udfordring, hvis indsamlet end-of-life PUR stammer fra forskellige kilder, har forskellige produktionsår, været underlagt forskellige miljømæssige påvirkninger eller lignende. Sidstnævnte kan give anledning til uønskede urenheder, som mekanisk kan slide på reaktorudstyr eller inhibere kemisk spaltning. For at ensarte den fysiske tilstand af PUR-skummet kræves det ofte, at skummet neddelles og pelleteres for at opnå høj overfladeareal-volumenratio til reaktionen samt at komprimere materialet, for at transporten fra punktkilde til spaltningslokation bliver økonomisk forsvarlig.

Ved varians i end-of-life PUR-kompositionen vil spaltningsprocessen give forskellige produkt-kompositioner, hvilket besværliggør at finde afsætningsmuligheder og udfordrer en mulig lukket skum-til-skum-cirkularitet af polyol og isocyanat.

En række aktører i Europa forsker i, udvikler eller idriftsætter netop nu kemisk genanvendelse af PUR, herunder:

- Covestro¹⁸
- BASF¹⁹
- Recticel²⁰
- Repsol²¹
- Evonik.²²

Af ovenstående er det kun Covestro, der fokuseret udvikler metoder til at genvinde stift PUR-skum, mens de øvrige aktørers indsatser som udgangspunkt har fokus på blødt skum.

Teknologisk Institut og Aarhus Universitet har også arbejdet med en proces til kemisk genanvendelse af både isocyanatindholdet og polyoldelen (solvolyse og overgangsmetalkatalyseret hydrogenering).

Det vides ikke, hvordan processerne vil reagere på delvist forurenede PUR fra udtjente fjernvarmerør idet der i disse fraktioner både kan være rester af jord/sand andre plasttyper og noget af det bitumen/kliester, som har været anvendt til reparationer. Det vil kræve et særskilt studie at undersøge, hvor rene produkter fra isocyanat og polyol der kan opnås ved kemisk oparbejdning af PUR fra fjernvarmerørene, men Teknologisk Institut vurderer umiddelbart, at der vil

¹⁸ <https://www.covestro.com/press/covestro-develops-innovative-recycling-technologies/>

¹⁹ https://chemicals.basf.com/global/en/Monomers/isocyanates-and-polyols/PU_recycling.html

²⁰ <https://www.recticel.com/polyurethane-valuable-material-circular-economy.html>

²¹ <https://www.repsol.com/en/sustainability/circular-economy/our-projects/chemical-recycling-of-polyurethane-foam/index.cshhtml>

²² <https://www.pu-additives.com/en/evonik-partners-with-the-vita-group-for-pioneering-efficient-polyurethane-mattress-recycling-process-165382.html>

være en rimelig sandsynlighed for, at PUR-fraktioner fra fjernvarmerør kan oparbejdes, især fra nyere rør uden bitumen.

12. Diskussion af muligheder for sortering, forbehandling og oparbejdning af alle typer fjernvarmerør

Det overordnede mål for projektet er som beskrevet i indledningen at udvikle en metode til at behandle CFC-holdige fjernvarmerør med udvinding af plastmaterialer til genanvendelse og sikre, at skum befries for CFC ved at blive opsamlet til destruktion.

Projektet har vist, at oparbejdning af mange CFC-holdige rør vanskeliggøres af et højt indhold af bitumen, som ikke kan adskilles fra HDPE-kappen, mens nyere rørkonstruktioner uden CFC ikke indeholder større mængder bitumen.

I det følgende er opstillet en sorterings- og oparbejdningsmetode, som forventes at kunne sikre, at alle rør med godstykkelse af stål under 4 mm kan behandles, så CFC destrueres, og så HDPE uden bitumen udvindes.

Metoden er beskrevet nedenfor (se også FIGUR 65):

Grovsortering

- Frasorter rør med over 4 mm godstykkelse (Ø 168 mediestålrør) - kan ikke behandles med metoden
- Frasorter rør med PEX-medierør – rør kan ikke behandles med metoden
- Frasorter rør med PVC-kappe (grå kappeplast) – rør kan ikke behandles med metoden.

Finsortering

- Der sorteres i rør med og uden bitumenmellemlag.

Metode

- Alle twinrør er uden bitumenlag og uden CFC og sorteres fra til (fraktion 1) uden bitumen
- Resterende monorør gennemmåles for, om der er CFC:
 - Hvis der ikke er CFC, er der typisk heller ikke mellemlag, og rørene kan sorteres til rør uden bitumen (fraktion 1)
 - For rør med CFC undersøges rørender grundigt ved at fjerne lidt skum, fx med stemmejern, og se, om der er bitumenmellemlag
 - Rør med bitumenlag sorteres til (fraktion 2) med bitumen
 - Rør uden bitumenlag sorteres til (fraktion 1) uden bitumen
- Rør fra fraktion 1, dvs. uden bitumen, sendes til fraskæring/klipning og efterfølgende oparbejdning med oparbejdningsmetode 1
- Rør fra fraktion 2, dvs. med bitumen, må enten behandles på traditionel vis ved Stena eller til fraskæring/klipning og til oparbejdning med oparbejdningsmetode 2.

Fraskæring/klipning

Denne fase kan ske med udstyr ved Stena (næbsaks) eller Dan Jord (sav).

- Bortskær/fraklip T-stykker og bøjninger, så der er maks. 50 cm til hovedrør

- Bortskær/fraklip ventiler, flancher og andet kraftigt jerngods – send til metalgenanvendelse
- Bortskær/fraklip PVC-stumper (grå), som er splejset på HDPE-rør
 - Nødvendigheden heraf afhænger af mængde og oparbejdning af HDPE-kappen. Hvis HDPE oparbejdes med synke-flydeteknik, kan mindre mængder PVC formentlig tolereres mod en forhøjet udgift til bortskaffelse af synkerest
- Bortskær/fraklip samlinger, hvor der indgår bitumen/klister.

Længdeafkort

- Afkort alle rør til <2 m længde

Oparbejdning, metode 1 (rør uden bitumen)

Forsorterede og nedklippede rør fra fraktion 1 behandles med metoden beskrevet i afsnit 9.1.1. Herved opnås HDPE til videre oparbejdning med omsmeltnings (se kapitel 10) og presede skumpiller uden gasser til videre oparbejdning (se kapitel 11).

Oparbejdning, metode 2 (rør med bitumen)

Forsorterede og nedklippede rør behandles med en variant af metoden beskrevet i afsnit 9.1.1.

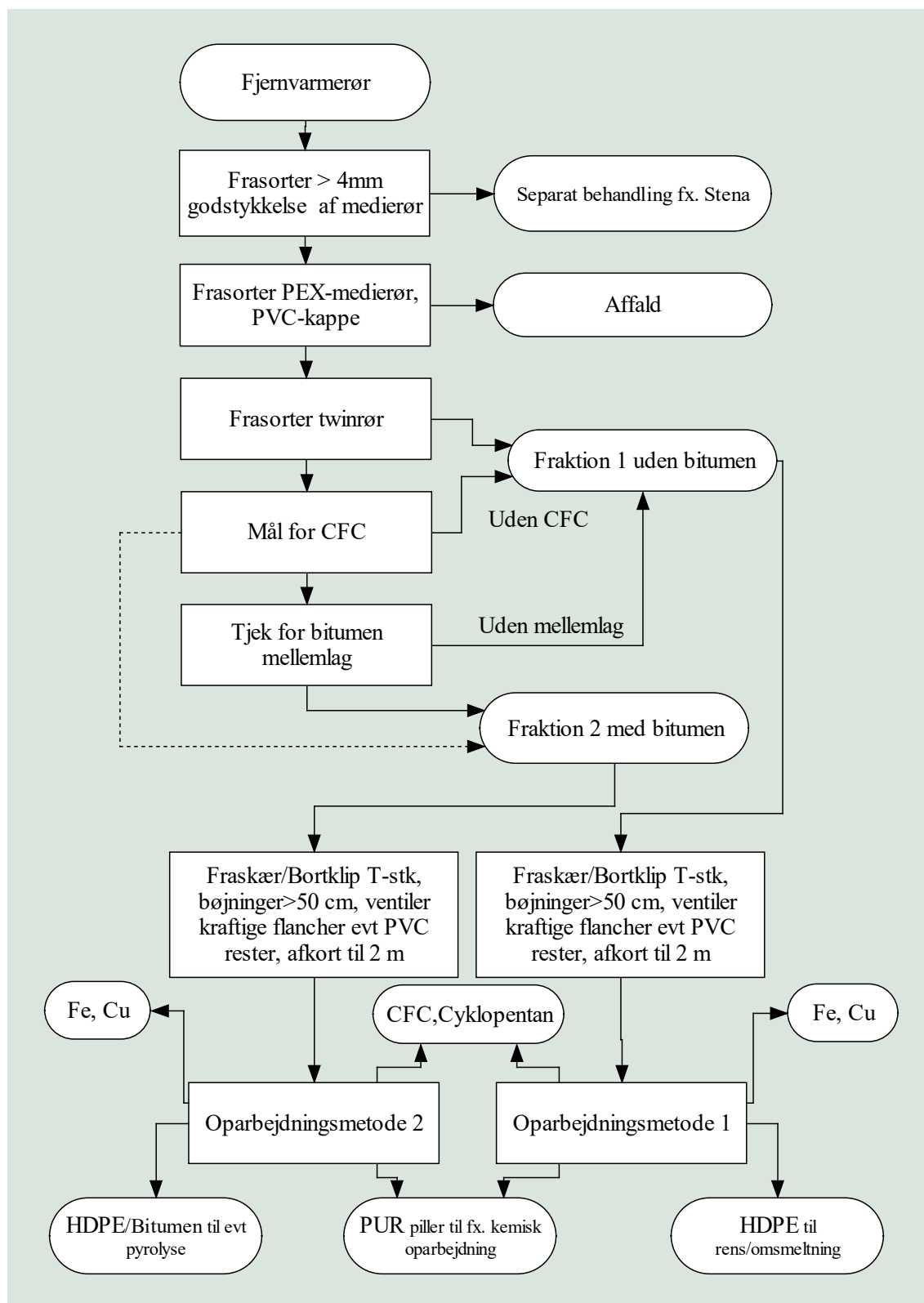
Når HDPE, bitumen og skum er separeret, presses piller af skummet. Det forventes, at det meste af den tunge bitumen bliver i HDPE-fraktionen, hvorfor det herved kan sikres, at skummet befries for CFC (se afsnit 9.2.8).

Skumpillerne kan efterfølgende forsøges oparbejdet med metoder som beskrevet i kapitel 11. HDPE-fraktionen vil indeholde bitumen og vurderes ikke umiddelbart egnet til oparbejdning med rensning og omsmeltnings. Kun den HDPE, der er frasorteret bitumen er egnet til dette (se beskrivelse i kapitel 10).

Dog kan HDPE-fraktionen sandsynligvis genanvendes via kemisk oparbejdning, fx ved brug af pyrolyse.

Implementering af oparbejdningss metode 2 kræver dog yderligere udvikling og test.

Metoden er illustreret på FIGUR 65.



FIGUR 65. Metode til sortering, for behandling og oparbejdning af fjernvarmerør.

13. Miljøeffekter

13.1 Vurdering af mængder af fjernvarmerør samt produkter fra anlæg og efter oparbejdning

13.1.1 Antagne mængder behandlet af anlæg

Udgangspunktet for behandling er, at der minimum kan skaffes mængder til behandling af rør i ét skift på et Eldanbehandlingsanlæg.

Med en kapacitet på 4 ton/time og 1.850 driftstimer pr. år svarer det til en behandlet mængde på 7.400 ton rør pr. år, mens det ved tre skift svarer til en tilført mængde på 22.500 ton pr. år.

Ud fra data for sammensætning antages der produceret 3 ton jern pr. time, 0,5 ton HDPE pr. time, 0,45 ton pressede PUR-piller og 0,05 ton restfraktion til forbrænding.

13.1.2 Tilgængelige mængder

I det følgende er foretaget estimer af, hvordan de to scenarier med behandlet mængde rør svarer til den mængde rør, der er nedgravet.

Mængden af nedgravede CFC-holdige rør er i Miljøprojekt nr. 1826 fra 2016²³ estimeret til 26.000 km. Der er i rapporten omregnet til et typisk standardrør med en gennemsnitsdiameter på 200 mm af kapperør og 114 mm af medierør (ud fra LOGSTORs tabeller over rørdimensioner, isoleringsserie 1).

Et estimat af materialeindhold giver 5 kg stål/m, 0,95 kg HDPE/m og 0,91 kg PUR/m for et 200 mm kapperør eller samlet 6,86 kg/m.

Hvis alle 26.000 km CFC-holdige rør kunne behandles med et anlæg med ét skift, svarer dette til 24 års drift²⁴ eller 8 år ved 3-holdsskift.

Det foreslåede anlæg kan imidlertid ikke behandle rør med dimensioner over 168 mm af medierøret, svarende til 4 mm godstykkelse. Til gengæld kan anlægget behandle rør opskummet med cyklopentan, som der løbende vil komme flere af i forhold til rør med CFC-indhold.

Hvor store mængder der reelt er tilgængelige for behandling, vil være afhængigt af, hvilke krav der stilles til entreprenører ved opgravning og renovering. Således angives det i Miljøprojekt nr. 1826 fra 2016²³, at man typisk lader 50 % af rørene ligge ved renoveringer. Hvis alle rør blev opgravet, ville renoveringsprisen stige som angivet i ²³, men til gengæld ville man kunne få fjernet CFC-holdige og evt. ikke-CFC-holdige rør og udnytte ressourcerne i disse.

13.2 Vurdering af miljøeffekter

I det følgende er foretaget et estimat af CO₂-besparelsen ved at benytte den i projektet udviklede behandlingsmetode i forhold til den nuværende metode ved Stena, hvor HDPE og skum forbrændes. I TABEL 13 er vist generelle data for sammensætning af rør og besparelse i CO₂ ved genanvendelse samt netto-CO₂-emission ved forbrænding med korrektion for substituerede fossile kilder.

²³ N. Winther et al., Kortlægning af gamle CFC-holdige fjernvarmerør, Miljøprojekt nr. 1826, 2016, Miljøstyrelsen

²⁴ For en kapacitet på 7.400 t/år fås en behandlingstid på 26.000 km * 6,86 ton/km / 7.400 t/år = 24 år

TABEL 13. Generelle data.

Parameter	Værdi
Input Fe %	75
Input HDPE %	12,5
Input PUR %	12,5
CO ₂ t/ton input forbrænding blandet plast	1,9 ²⁵
CO ₂ -besparelse HDPE tCO ₂ /t i forhold til virgin	1,8 ²⁶
CO ₂ -besparelse PUR tCO ₂ /t i forhold til virgin	3,2 ²⁷

I TABEL 14 er vist data for antaget udbytte ved materialesorteringstrin og efterfølgende oparbejdning af udsorterede plastmaterialer.

TABEL 14. Udbytte plast.

Input 1 ton		
Case	Nuværende shredder anlæg Stena	Ny oparbejdningsproces
Udbytte materialesortering genanvendelse HDPE %	0	80 ²⁸
Udbytte materialesortering genanvendelse PUR %	0	90 ²⁹
Udbytte omsmeltning HDPE %	0	95 ³⁰
Udbytte PUR genanvendelsestrin %	0	50 ³¹

I TABEL 15 er vist beregninger af miljøeffekt for de to processer per ton fjernvarmerør. Beregningen medtager ikke emission af CFC. Dette emne behandles senere.

TABEL 15. Beregninger miljøeffekt ekskl. CO₂-ækvivalenter fra CFC-emission.

Input 1 ton			
Case	Nuværende shredder anlæg Stena	Ny oparbejdningsproces	Forskel
Fe output t	0,75	0,75	
HDPE, output t	0	0,1	
PUR, output t	0	0,1125	
Rest til forbrænding HDPE t	0,25	0,025	
Rest til forbrænding PUR t		0,0125	

²⁵ Der er antaget en netto CO₂-emission på 1,9 ton CO₂/ton forbrændt plast baseret på data fra BASF-rapport Evaluation of pyrolysis with LCA - 3 case studies, 2020. Forholdene svarer til tyske forhold, hvor der anvendes mere fossilt brændsel end i Danmark, hvorfor emissionen formentlig er højere for danske forhold.

²⁶ Plastics Europe Ecoprofiles and Environmental Declarations for European Plastic Manufacturers HDPE, LDPE, LLDPE April 2014

²⁷ Eco-profile Flexible polyurethane (PU) Foam EUROPUR august 2015

²⁸ Baseret på forsøg i kapitel 9 og kapitel 10

²⁹ Baseret på forsøg i kapitel 9 og kapitel 10

³⁰ Baseret på forsøg kapitel 10

³¹ Det antages, at der benyttes en mekanisk eller kemisk proces med et udbytte på 50 %, se afsnit 11.2

Input 1 ton			
Case	Nuværende shredder-anlæg Stena	Ny oparbejdnings-proces	Forskel
Fe output t	0,75	0,75	
HDPE, output t	0	0,1	
Energiforbrug til behandlingsanlæg kWh/ton	24 ³²	87,5 ³³	
Kg CO ₂ /kWh produceret		0,00013 ³⁴	
Ton CO ₂ udledt forneddeling	0,0091	0,0091 ³⁵	
Ton CO ₂ udledt materialesortering	0,0031	0,0114	
Ton CO ₂ HDPE		-0,17	
Ton CO ₂ PUR		-0,18	
Ton CO ₂ forbrænding	0,475	0,071	
Ton CO ₂ samlet emission per ton	0,49	-0,26	-0,75
Ton CO ₂ ved 7.400 ton	3.606	-1.926	-5.532
Ton CO ₂ ved 22.500 ton	10.964	-5.857	-16.821

I beregningen er negligeret CO₂-emission fra materialefase og produktion af det indgående processeringsudstyr. Dog er der udført et estimat for Eldananlægget, som viser, at bidraget over 10 år udgør mindre end ca. 10 % af energiforbruget³⁶. Udstyret forventes typisk at have meget lang levetid med passende vedligehold (>15 år), hvorfor CO₂ fra materiale og produktionsfase kun forventes at bidrage med en mindre del i forhold til energiforbruget i brugsperioden.

Transport af fjernvarmerør er antaget at være ens, hvorfor det ikke vil påvirke differencen mellem processerne. Transport er dog medtaget med en transportdistance af rør på 200 km for at illustrere, hvor meget transporten bidrager med. Bidrag for transport af plastprodukter er negligeret.

Resultatet af estimatet viser en stor CO₂-besparelse ved at genanvende plastmaterialerne (0,75 ton CO₂/ton fjernvarmerør eller 3 ton CO₂/ton plast i rørene). Dette skyldes ikke kun besparelsen ved brug af genanvendte ressourcer i forhold til virgine materialer, men også et væsentligt bidrag fra undgået forbrænding af virgint materiale.

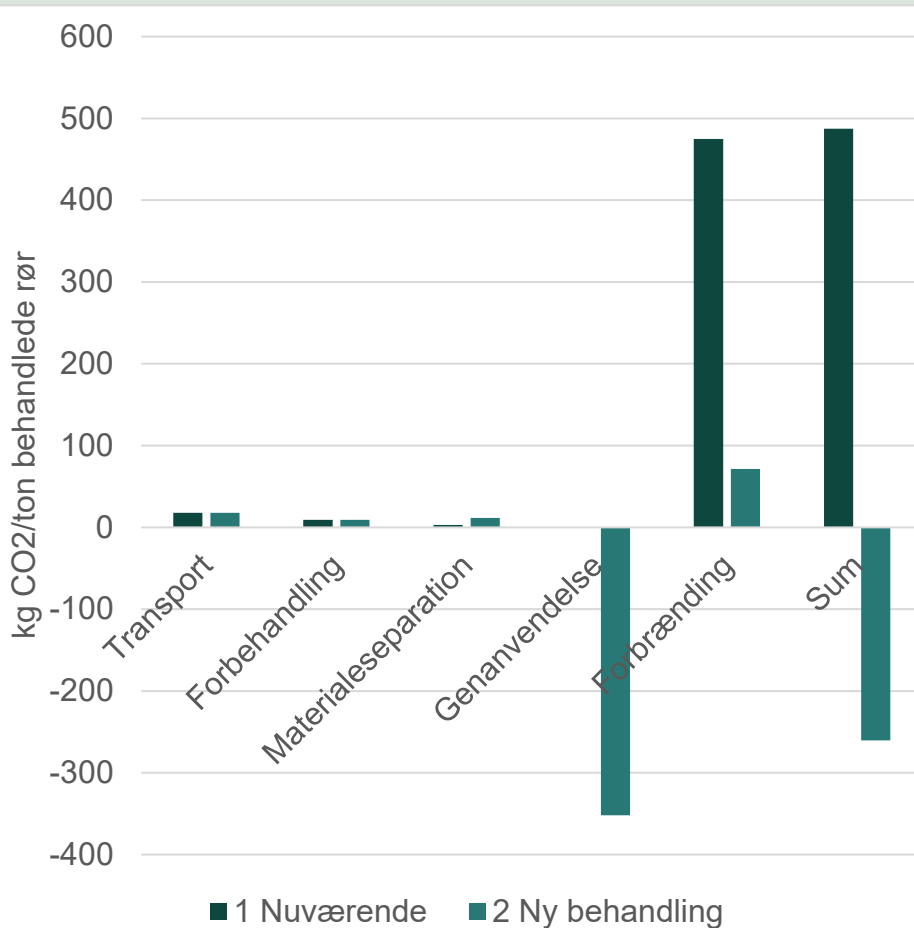
³² Energiforbrug er opgivet af Stena

³³ Energiforbrug er opgivet af Eldan

³⁴ EEA Greenhouse gas emission intensity of electricity production, Danmark 2021 https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-12/#tab-chart_2 (130 gCO₂/kWh)

³⁵ Beregnet ud fra data fra Stena for brændstofforbrug (18 liter diesel/time) samt test af kapacitet af udstyr til neddeling (5,3 ton/time af rør med dimension af medierør på 114 mm)

³⁶ Der er udført en beregning for Eldans anlæg ud fra indhold af stål og kobber i elmotorer. Med en antaget levetid på 10 år og 50 % besparelse ved genanvendelse opnås et forbrug til materialer, som svarer til ca. 10 % af det årlige energiforbrug.



FIGUR 66. Beregnet miljøeffekt kg CO₂/ton behandlet fjernvarmerør.

Estimat af CO₂-emission, hvor emission af CFC inkluderes

I beregningen ovenfor var ikke medtaget emission af CFC-11, der udover at være en ozonlagsnedbrydende gas også er en kraftig drivhusgas. Det fremgår af Miljøprojekt nr. 1827 fra 2016³⁷, at det forventes, at 40 % af CFC-gas frigives momentant ved shreddning, og at resten hurtigt frigives ved henstand i deponi. Ved den nuværende shreddningsproces forventes således frigivet en væsentlig del CFC til miljøet, som undgås ved den ny oparbejdningsproces, da shreddning her foregår i lukket proces, hvor CFC-gasserne opfanges.

I det følgende er givet et overslag over de reelle CO₂ (ækvivalent) udslip fra den nuværende shredderproces og fra den nye proces.

Det antages, at der mistes 75 % af CFC-indholdet i skummet fra fjernvarmerørene ved den nuværende shreddningsproces inden forbrænding/deponi, mens der med behandling med den nye proces mistes 25 % CFC fra de 10 % skum, som forventes tabt som materiale til forbrænding eller skum vedhæftet stål. Årsagen til det antagne lavere tab med den nye proces er, at frigivet CFC-gas ved oparbejdning vil blive opsamlet.

Ifølge Miljøprojekt nr. 1826, 2016²³ indeholder CFC-holdigt skum i gennemsnit 13 vægt% CFC-11.

³⁷ M. Kemner, M. Rasch, Livscyklusvurdering af behandling af gamle CFC-holdige fjernvarmerør Miljøprojekt nr. 1827, 2016, Miljøstyrelsen

GWP-faktoren (100-års basis) for CFC-11 er ifølge IPPC 5. revision 4.660 (det vil sige, at hvert molekyle CFC-11 svarer til 4.660 ækvivalente CO₂-molekyler).

Det antages, at ca. 50 % af fjernvarmerørene er med CFC, som det blev observeret ved sorteringsforsøg i afsnit 5.2.

Beregningsvisen viser herefter, at der ved shreddning skal adderes 28.400 kg CO₂-ækvivalenter pr. ton fjernvarmerør for den eksisterende shredderproces og 950 kg CO₂-ækvivalenter pr. ton for den nye proces. CO₂-emission for et skift (7.400 ton/år) og 3 skift (22.500 ton/år) er vist i TABEL 16.

TABEL 16. Beregninger miljøeffekt inkl. CFC-ækvivalenter.

Input 1 ton			
Case	Nuværende shredderanlæg Stena	Ny oparbejdningsproces	Forskel
Ton CO ₂ -ækvivalenter samlet emission per ton fjernvarmerør inkl. CFC	28,88 ³⁸	0,69 ³⁹	-28,20
Ton CO ₂ inkl. CFC ved 7.400 ton	213.743	5.078	-208.665
Ton CO ₂ inkl. CFC ved 22.500 ton	649.894	15.440	-634.453

Ved etablering af den nye proces beregnes en reduktion i emissioner på over 97 % for de rør, som behandles med processen.

For rør med CFC, fx med dimension >168 mm, som ikke kan behandles med processen, vil der stadig være et tab i den nuværende proces på de anslåede 29 ton CO₂-ækvivalenter pr. ton fjernvarmerør.

Hvis der behandles 7.400 ton rør pr. år, svarer besparelsen i CO₂-emission til 0,5 % af Danmarks drivhusgasudledning (44 mio. ton 2021), og for 22.500 ton pr. år svarer besparelsen til 1,5 % af Danmarks udledning af drivhusgasser.

³⁸ Ton CO₂-ækvivalenter afgivet pr. ton behandlede rør beregnes på følgende vis: Tab af CO₂-ækvivalenter fra CFC = 0,125 ton PUR/ton * 13 % CFC/100 * 50 % rør med CFC/100 * 75 % tab/100 * 4.660 CO₂ ækv/ton = 28,4 ækv/ton rør. Hertil lægges 0,49 t CO₂/ton fra ikke-udnyttet plast - i alt 28,88 ton CO₂-ækvivalenter/ton fjernvarmerør med det nuværende shredderanlæg ved Stena.

³⁹ Ton CO₂-ækvivalenter afgivet pr. ton behandlede rør beregnes på følgende vis: Tab af CO₂-ækvivalenter fra CFC = 0,125 ton PUR/ton * 10 % tab/100 * 13 % CFC/100 * 50 % rør med CFC/100 * 25 % tab/100 * 4.660 CO₂ ækv/ton = 0,947 ækv/ton rør. Hertil fratrækkes 0,26 t CO₂/ton fra genanvendt hård plast og skum - i alt 0,69 ton CO₂-ækvivalenter/ton behandlet fjernvarmerør med den nye oparbejdningsproces.

14. Businesscase

Der er foretaget estimater af behandlingsomkostninger for forskellige scenarier. Der benyttes samme baggrundsdata som i kapitel 13.

14.1 Forbehandling

Der er foretaget et estimat af ekstra omkostninger til behandling af rør med den udviklede metode ved Dan Jord og Stena.

Forbehandlingen omfatter følgende trin ved Dan Jord:

- Sortering af rør efter dimension og eventuelt indhold af PVC, PEX
- Sortering af rør efter indhold CFC /ikke-CFC ved brug af GasDetects udviklede CFC-måler
- Frasortering af rør med bitumenlag, primært i CFC-holdige rør
- Fraskæring af ventiler/tungt gods.

Ved Stena foretages neddeling til 2 meters længder, hvorefter rørene kan behandles i oparbejdningsanlægget (Eldankoncept), se 14.1.2.

I TABEL 17 er vist et estimat for udgift pr. måling med GasDetects udviklede CFC-måler.

TABEL 17. Estimat af omkostninger til brug af GasDetect-udstyr.

Emne	Enhed	Talværdi
Investering	Kr./apparat	48.000
Driftsomkostninger til serviceeftersyn	Kr./år	4.300
Udskiftning af dele	Kr./år	4.800
Levetid	År	10
Kontrol pr. længde	Meter	10
Målinger pr. dag		10
Arbejdsdage	Dage pr. år	200
Målinger pr. år		2.000
Simpel afskrivning over 10 år + drift	Kr./år	13.900
Estimeret udgift/måling	Kr./måling	6,95

I TABEL 18 er estimeret det ekstra tidsforbrug til forbehandling af 100 meter rør, dels hvis ventiler og tungt gods fraskæres af Dan Jord, dels hvis disse emner fraklippes ved Stena.

TABEL 18. Estimat af omkostninger til forbehandling ved Dan Jord med to scenarier.

Emne	Parameter (enhed)	Fraskæring ved Dan Jord	Klipning ved Stena
Sortering efter dimension/PEX/PVC	Typisk kontrollængde (meter)	5,5	5,5
Sortering efter dimension/PEX/PVC	Ekstra tid bortskæring/sortering (minutter)	1	1
Sortering af rør efter CFC	Typisk kontrollængde (meter)	10	10
Sortering af rør efter CFC	Tidsforbrug (minutter/rør)	2	2
Sortering af rør efter CFC	Udgift til CFC måler (kr./rør af 10 m)	6,95	6,95
Sortering efter bitumenlag CFC-rør	Typisk kontrollængde (meter)	5,5	5,5

Emne	Parameter (enhed)	Fraskæring ved Dan Jord	Klipning ved Stena
Sortering efter bitumenlag CFC-rør	Tid (minutter/rør)	1	1
Fraskæring af ventiler/tungt gods	Typisk kontrollængde (meter)	5,5	5,5
Fraskæring af ventiler/tungt gods	Tid (minutter/rør)	5	0
Udgift til arbejds løn	(Kr./time)	300	300
Normal processering	(Meter/dag)	100	100
Ekstra minutters tidsforbrug	(Minutter)	147,3	56,4

Endelig er der foretaget en række estimater af udgiften til samlet forbehandling ved Dan Jord og Stena som funktion af rørdiameter, og alt efter om fraskær af tunge emner sker ved Dan Jord eller klippes ved Stena.

TABEL 19. Estimat af omkostninger til forbehandling ved Dan Jord med to scenarier.

Estimat nr.		1	2	3	4	5	6
Fraskær/klip af tungt gods		Stena	Stena	Stena	Dan Jord	Stena	Stena
Rørtype		Mono	Mono	Twin	Mono	Mono	Mono
Dan Jord	Enhed						
Antaget middel-diameter stål	(mm)	36	62	62	114	114	168
Vægt	(Kg/meter)	1,85	3,3	6,1	6,86	6,86	10,7
Ekstra behandlings-omkostning	(Kr./meter)	3,51	3,51	3,51	8,06	3,51	3,51
Ekstra behandlings-omkostning	(Kr./ton)	1.899	1.065	576	1.175	512	328
Stena							
Klipning 2 m	Rørlængde (m)	6	6	6	6	6	6
Klipning 2 m	Klip pr. rør	2	2	2	2	2	2
Klipning tungt gods	Rørlængde (m)	12	12	12	12	12 (enhed)	12
Klipning tungt gods	Klip	2	2	2	2	2	2
Tid/klip	(Sekunder)	14	14	14	14	14	14
Driftsudgift	(Kr./time)	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
Gennemsnitlig vægt rør	(Kg/meter)	1,85	3,3	6,1	6,86	6,86	10,7
Kapacitet klipning	(Kg/time)	1.427	2.546	4.706	5.292	5.292	8.254
Udgift	(Kr./ton)	1.121	629	340	302	302	194

Beregningerne illustrerer, at sorterings- og neddelingsudgiften er nogenlunde konstant pr. meter, hvorfor det er langt dyrere at sortere og neddele de små rør pr. vægtenhed end de store. Herudover er viser tabellen, at fraskæring af tunge emner ved Dan Jord er dyrere (estimat 4) end med fraklipning ved Stena (Estimat 5).

14.2 Oparbejdning

I det følgende er det forudsat, at der fremskaffes materiale, svarende til kapaciteten af et oparbejdningsanlæg, som er 4 t/time.

Beregninger af behandlingsomkostninger er baseret på anlægsdesignet i afsnit 9.1.

Kapitalomkostninger er beregnet ud fra følgende data:

- 7 % rente p.a.
- 10 års tilbagebetaling
- Investering anlæg 40 mio. kr.
- Investering simpel bygning/hal 3 mio. kr.

Driftsomkostninger er beregnet ud fra følgende data:

- Lønudgifter 350.000 kr. pr. medarbejder
- Strømpris 1 kr./kWh
- Kvælstof 0,5 kr./m³

Bemanding: 3 pr. skift

Strømforbrug: 350 kWh/time

Kvælstof: 500 m³/time

Diverse materialeomkostninger: 115.000 kr./år

Indtægter/udgifter til producerede outputstrømme er beregnet ud fra følgende data:

Produceret stålmængde: 3 ton/time

Produceret HDPE: 0,5 ton /time

Produceret skum (piller): 0,45 ton/time

Udskilt rest af støv til forbrænding: 0,05 ton/time

Indtægt for salg af stål 2.300 kr./ton

Indtægt for salg af HDPE: 1.000 kr./ton

Antaget indtægt ved afsætning af PUR til genanvendelse: 500 kr./ton

Udgift til forbrænding: 620 kr./ton

Der er desuden foretaget et estimat for normal behandling via shredder og raffineringsanlæg ved Stena, hvor plast og skum forbrændes.

Kapitalomkostninger og driftsomkostninger for Stenas anlæg er sat til 400 kr./ton.

Der er foretaget beregning for følgende scenarier:

- 1: Eldananlæg, 1 skift, forbrænding af skum
- 2: Eldananlæg, 3 skift, forbrænding af skum
- 3: Eldananlæg, 3 skift, genanvendelse af skum
- 4: Nuværende behandling ved Stena.

TABEL 20. Estimat af behandlingsomkostninger i Eldanoparbejdningsanlæg sammenlignet med behandling i shredderanlæg.

Scenarie	1	2	3	4
Forklaring	Eldananlæg, 1 skift, forbrænding PUR	Eldananlæg, 3 skift, forbrænding PUR	Eldananlæg, 3 skift, genanvendelse PUR	Behandling via shredderanlæg
Driftstimer (timer/år)	1.850	5.550	5.550	5.550
Tilført mængde (ton/år)	7.400	22.200	22.200	22.200
Kapitalomkostninger (kr./ton)	827,3	275,8	275,8	
Driftsomkostninger (kr./ton)	307,4	307,4	307,4	

Scenarie	1	2	3	4
Forklaring	Eldananlæg, 1 skift, forbrænding PUR	Eldananlæg, 3 skift, forbrænding PUR	Eldananlæg, 3 skift, genanvendelse PUR	Behandling via shredder anlæg
Driftstimer (timer/år)	1.850	5.550	5.550	5.550
Tilført mængde (ton/år)	7.400	22.200	22.200	22.200
Kapitalomkostninger (kr./ton)	827,3	275,8	275,8	
Totale udgifter (kr./ton)	1.134,8	583,2	583,2	400,0
Nettoindtægt (kr./ton)	1.772,5	1.772,5	1.898,5	1.570,0
Behandlingsomkostning (kr./ton)	-637,7	-1.189,3	-1.315,3	-1.170,0

Der er beregnet for monorør med middeldiameter af medierør på 62 mm og på 114 mm. Det er antaget, at 75 % af rør ved Dan Jord udsorteres til genanvendelse

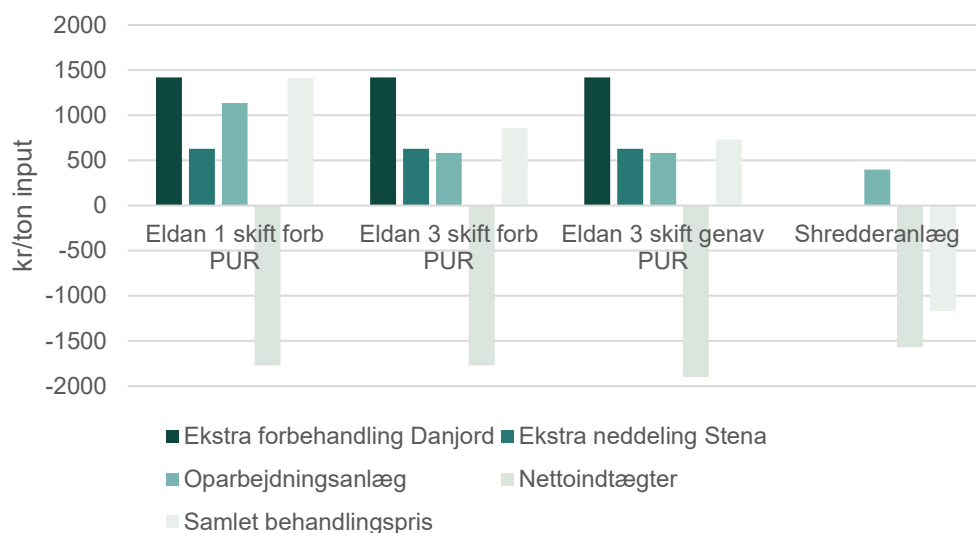
14.3 Samlede behandlingsomkostninger

I TABEL 21 er beregnet de samlede behandlingsomkostninger fra forbehandling og oparbejdning. I beregningerne er det forudsat, at 75 % af rørene udsorteres til genanvendelse ved Dan Jord.

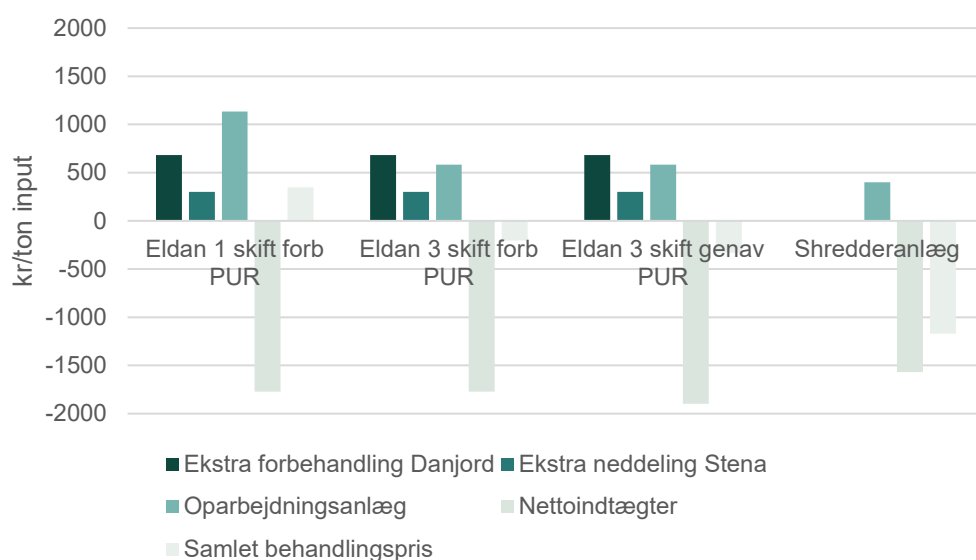
TABEL 21. Estimerede behandlingsomkostninger kr./ton (negativ pris er overskud ved behandling).

Scenarie	Shredder anlæg	Nyt koncept, 1 skift, forbrænding af PUR	Nyt koncept, 3 skift, forbrænding af PUR	Nyt koncept, genanvendelse af PUR
62 mm	-1.170	1.410	858	583
114 mm	-1.170	347	-204	-330

På FIGUR 67 og FIGUR 68 er vist omkostninger og indtægter for behandling af 62 mm rør og 114 mm rør.



FIGUR 67. Sammenligning af scenarier for monorør 62 mm middeldiameter medierør.



FIGUR 68. Sammenligning af scenarier for monorør 114 mm middeldiameter medierør.

Samlet ses det, at det ved oparbejdning af små rør (62 mm diameter medierør) er væsentligt dyrere at behandle med sortering, neddeling med næbsaks eller lignede og behandling i et Eldan anlæg end med den nuværende shredderteknologi. Det skyldes, at alle rør skal sorteres uanset diameter og klippes med næbsaks. For rør med større diameter estimeres et overskud ved behandling, når der benyttes 3 skift.

Hvis man kan mindske omfanget af kontrol ved fx kun at kontrollere få rør på en forventet ens strækning, vil omkostningen kunne reduceres kraftigt. Ligeledes vil der formentlig kunne klippes flere end 3 rør ad gangen, når der er tale om mindre rør, hvilket vil reducere udgifterne til klipning ved Stena.

Estimat af den økonomiske effekt af sparet CO₂ (ækvivalent) udledning med den nye proces, hvor undgået CFC-udledning medtages

I det følgende er der foretaget en økonomisk beregning af behandlingsomkostningerne, hvor værdien af CO₂-udledningen inkl. CO₂-ækvivalenter fra CFC medregnes.

Der er benyttet estimerede udledninger af CO₂-ækvivalenter fra afsnit 13.2 og en CO₂-kvotepris på 606 kr./ton, svarende til prisen for 2021 (Energistyrelsen).

Der er foretaget en beregning for rør med lille dimension (62 mm), hvor der haves en høj behandlingsudgift med den nye proces – se TABEL 22.

TABEL 22. Estimerede behandlingsomkostninger kr./ton for rør med 62 mm diameter af medierør inkl. CO₂-ækvivalentemission (negativ pris er overskud ved behandling).

Scenarie	Shredder anlæg	Nyt koncept 1 skift, forbrænding af PUR	Nyt koncept 3 skift, forbrænding af PUR	Nyt koncept, genanvendelse af PUR
CO ₂ -ækvivalenter inkl. CFC/ton	28,8	0,69	0,69	0,69
Kr./ton CO ₂ (Energistyrelsen 2021)	606	606	606	606
CO ₂ - miljømæssig effekt kr./ton	17.453	418	418	418
Behandlingspris kr./ton	-1.170	1.410	859	733
Samlet omkostning når CO ₂ -udledning svarende til kvotepris medtages kr./ton	16.283	1.828	1.277	1.151

Af tabellen ses, at behandlingsprisen inkl. CO₂-emission for det nye koncept kun udgør ca. 10 % af behandlingsomkostningerne for den nuværende proces, når man medtager effekten af besparelse i CO₂-emission.

Den beregnede økonomiske fordel med den nye proces er således meget stor, når den miljømæssige værdi af besparet CO₂-emission medtages, og det vurderes, at usikkerhederne i estimatet ikke vil have væsentlig indflydelse på den store effekt ved at undgå udledning af CFC-gasser.

Hvis processen skal etableres, er det imidlertid nødvendigt, at der sikres et økonomisk grundlag for den fordyrede behandling i form af forbedrede lovgivningsmæssige rammevilkår for behandling af fjernvarmerør. Fx ens krav til behandling for alle CFC-holdige fjernvarmerør. Man kan i denne regi seke til reglerne for behandling af kølemøbler, hvor der jo er specifikke krav til sikker destruktion af CFC-indholdet fra såvel kompressorer som skum.

15. Konklusion

I projektet er udviklet et koncept til en behandlingsløsning for udtjente CFC-holdige fjernvarmerør og for rør opskummet med cyclopentan med genanvendelse af HDPE-plasten i kappen og med mulighed for at opnå genanvendelse af skummet.

Hvis man kun regner på behandlingsudgiften, er det nye koncept dyrere end behandling i et shredder anlæg. Det nye koncept er imidlertid langt billigere end behandling med et shredder anlæg hvis man medtager den miljøøkonomiske effekt af den besparede CO₂-udledning fra undgået udledning af CFC.

Således estimeres det, at den nuværende metode med shredning af rør ved Stena har en emission af CO₂-ækvivalenter på 28,9 ton CO₂ per ton behandlede rør, mens det nye koncept har en emission på 0,69 ton CO₂ per ton behandlede fjernvarmerør eller en besparelse på 28,2 ton CO₂ per ton behandlede rør. Dette leder til, at udgiften til den nuværende behandling med shredder anlæg svarer til en miljømæssig omkostning på 16.283 kr./ton, som reduceres til 1.151 kr./ton for det nye koncept. Men som nævnt tidligere er det, for at processen skal etableres, nødvendigt, at der sikres et økonomisk grundlag for den fordyrede behandling i form af forbedrede lovgivningsmæssige rammevilkår for behandling af fjernvarmerør.

Bilag 1. Dimensioner af rør

Nedenfor er vist dimensioner af medierør og kapperør for rør fra LOGSTORs produktionskatalog

Bilag 1.1 Dimensioner af medierør og kapperør

I tabellen er vist udvalgte data af rørdimensioner fra LOGSTORs produktkatalog for mono og twin rør i isoleringsserie 1.

TABEL 23. Dimensioner af fjernvarmerør fra LOGSTOR.

Stålrør (medierør) udvendig diameter mm	Enkelt: 1 Twin: 2	Medierør godstykkelse mm	PE-kapperør udvendig diameter mm
26,9	1	2,6	90
26,9	2	2,6	125
33,7	1	2,6	90
33,7	2	2,6	140
42,4	1	2,6	110
42,4	2	2,6	160
48,3	1	2,6	110
48,3	2	2,6	160
60,3	1	2,9	125
60,3	2	2,9	200
76,1	1	2,9	140
76,1	2	2,9	225
88,9	1	3,2	160
88,9	2	3,2	250
114,3	1	3,6	200
114,3	2	3,6	315
139,7	1	3,6	225
139,7	2	3,6	400
168,3	1	4	250
168,3	2	4	450

Bilag 2. Indhold af materialer i rør

Bilag 2.1 Mellemlag eller yderlag af andre materialer

Ved gennemgang af en lang række rør blev der fundet en del konstruktioner, hvor der indgik mellemlag op ad medierør eller kapperør eller på ydersiden af rør i samlinger. En række eksempler er vist på FIGUR 69 til FIGUR 77. Polymertype i plastlag er identificeret med FTIR.



FIGUR 69. Tekstillærred (PP) op ad medierør (L1).



FIGUR 70. Tekstillærred (PP) med underlag af indtørret bitumen/klister (L2).



FIGUR 71. Folielag (PE) op ad medierør (L3).



FIGUR 72. Bitumen/klisterlag op ad medierør (L4).



FIGUR 73. Bitumen/klister op ad skum ved kapperør (L5).



FIGUR 74. Bitumen/klister plus aluminiumslag op ad kapperør (L6).



FIGUR 75. PE-lag op ad kapperør (L7).



FIGUR 76. Samling af rør med lærred (PP) og bitumen/klister (L8).



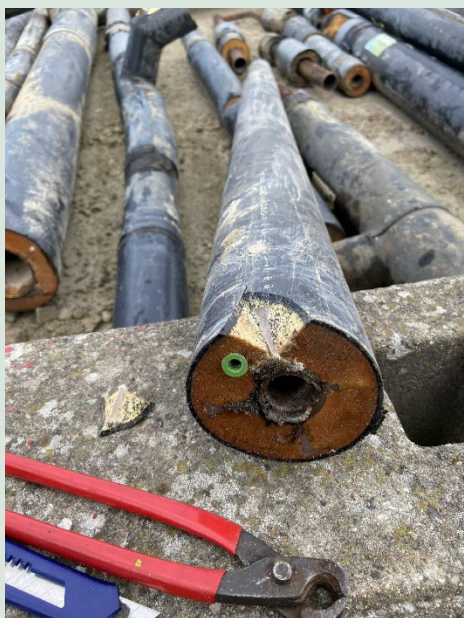
FIGUR 77. Rørsamling med klister/bitumen og krympeflex (L9).

Bilag 2.2 Ribber og indblæsningshuller

I nogle rør indgår tværstivere/ribber i plastmateriale i skummet. Der er fundet ribber i PE og PP.



FIGUR 78. Tværribber i PP (M1).



FIGUR 79. Tværribber i PP (M2).



FIGUR 80. Tværribber i PE (M3).



FIGUR 81. Indblæsningshuller i plast med lukning med gummilap (M4).



FIGUR 82. Indblæsningshul med sort plastprop (M5).

Bilag 2.3 Kraftigt gods

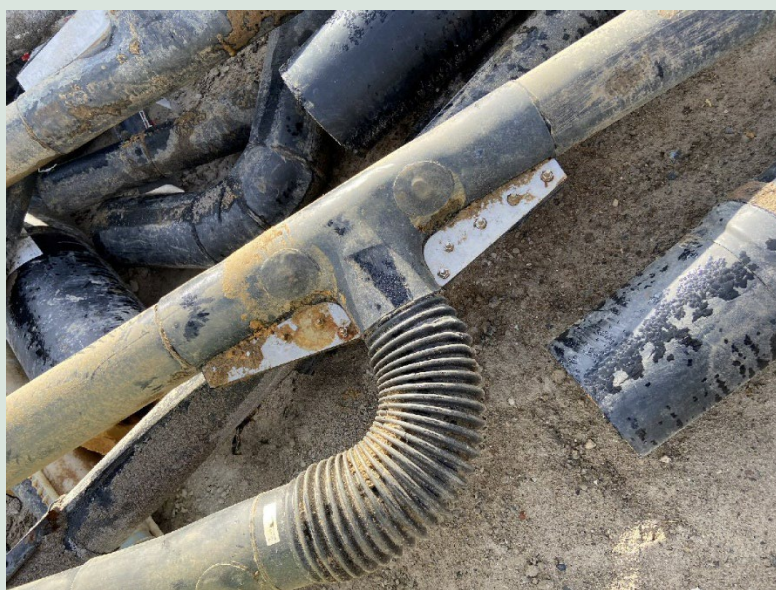
I fjernvarmerør indgår kraftigt metalgods af dimension over 4 mm som fx ventiler og beslag, som ikke vil kunne neddeles. Eksempler er vist på FIGUR 83 til FIGUR 85.



FIGUR 83. Kraftig flanche med metalprop (M6).



FIGUR 84. Fjernvarmerør med ventiler (M7).



FIGUR 85. Fjernvarmerør med T-stykke-fordelerflanche (M8).

Bilag 2.4 Problematiske fraktioner i rør type3, type 4.



FIGUR 86. Bitumen.



FIGUR 87. Bitumen+PE-folie.



FIGUR 88. Bitumen+skum+PE-folie.



FIGUR 89. Bitumen+skum.



FIGUR 90. HDPE+bitumen.



FIGUR 91. Pap, metalfolie, bitumen og skum.

Miljørigtig genanvendelse af CFC-holdige fjernvarmerør

Affald af udtjente fjernvarmerør opstår løbende ved renoveringer af fjernvarmestrækninger i fx byer. Ved den nuværende oparbejdningsmetode behandles rørene med en teknologi, hvor stålet i det varmetransporterende medierør genanvendes, mens det isolerende polyuretan-skum (PUR-skum) og kappeplast af HDPE-plast ikke genanvendes.

I MUDP-projektet 'Miljørigtig genanvendelse af CFC-holdige fjernvarmerør' er udviklet et koncept til en behandlingsløsning for udtjente CFC-holdige fjernvarmerør og for rør opskummet med cyklopentan med genanvendelse af HDPE-plasten i kappen og med mulighed for at opnå genanvendelse af skummet.

En kortlægning af typiske sammensætninger af fjernvarmerør viste, at der i fjernvarmerør gennem tiden har været anvendt en del yderligere materialer end stål, PUR og HDPE - eksempelvis bitumen som gør genanvendelse af HDPE vanskelig. Dette har ledt til udvikling af en præsorterings- og forbehandlingsmetode, der frasorterer rør, som ikke er egnede til genanvendelse, og som forbehandler rør, så de er egnede til behandling i det i projektet udviklede oparbejdningsanlæg. Oparbejdningsanlægget separerer rørmaterialerne i fraktionerne stål, HDPE og PUR-skum. HDPE er efterfølgende oparbejdet med en udviklet metode, hvor der opnås HDPE-kvaliteter egnet til genanvendelse fx via ekstrudering. PUR-skummet presses til piller befriet for opskumningsgasser, hvorefter det kan oparbejdes via kemiske metoder.

Etablering af genanvendelseskonceptet vil resultere i en væsentlig CO2-besparelse, da udslip af CFC-gasser reduceres.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk