

Udvikling af linere til damvarmelagre



Foto: Etablering af plastliner i et 60.000 m³ damvarmelager (SUNSTORE 3, Dronninglund)

Januar 2015

NORDJYLLAND

Jyllandsgade 1
DK-9520 Skørping
Tel. +45 9682 0400
Fax +45 9839 2498

MIDTJYLLAND

Vestergade 48 H, 2. sal
DK-8000 Århus C
Tel. +45 9682 0400
Fax +45 8613 6306

SJÆLLAND

Postadresse:
A.C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Besøgsadresse:
Frederikskaj 10 A 1. sal
2450 København SV
Tel.: +45 9682 0400

www.planenergi.dk
planenergi@planenergi.dk
CVR: 7403 8212

Indholdsfortegnelse

1	Indledning og resumé.....	3
1.1	Baggrund for projektet.....	3
2	Udvikling af testmetode for linere og erfaringer med PP-liner.....	5
3	Opbygning af eksisterende damvarmelager	5
4	Levetid for eksisterende HDPE-linere	7
5	Opstilling af løsningsmuligheder	8
5.1	Forbedret plastliner	8
5.2	Aluminiumsliner	8
5.3	Stålliner.....	9
6	Forbedret plastliner.....	9
6.1	Test af HDPE-liner (PE-RT) fra DOW Chemicals.....	9
6.2	GSE High Performance liner	10
7	Aluminiumsliner	11
8	Stålliner	11
8.1	Sandvik.....	12
8.2	Sanistål.....	12
8.3	Montage	13
8.4	Svejseprøve ved ESAB	13
8.4.1	Svejseprøve, MIG-svejsning	14
8.4.2	Svejseprøve, TIG-svejsning.....	15
8.4.3	Svejseprøve, induktion.....	17
8.4.4	Termisk udvidelse	18

Bilag

- Bilag 1: Testrapport fra ældningsforsøg af PP-linere, Teknologisk Institut, 2000
 Bilag 2: Testrapport fra ældningsforsøg af 2 HDPE-linere, Teknologisk Institut, 2004
 Bilag 3: Testrapport fra ældningsforsøg af HDPE-liner, Teknologisk Institut, 2011
 Bilag 4: Testrapport fra ældningsforsøg af HDPE-liner, Teknologisk Institut, 2013
 Bilag 5: Beregning af termisk udvidelse af rustfri stålliner

Udarbejdet af:

Morten Vang Jensen, PlanEnergi
 Per Alex Sørensen, PlanEnergi
 Christian Carlsen, PlanEnergi

1 Indledning og resumé

Nærværende notat udgør afrapporteringen fra et forsknings- og udredningsprojekt: "Udvikling af linere til damvarmelagre", støttet af Dansk Fjernvarmes F&U konto under aftalenummer 2012-03.

Foruden PlanEnergi, som er projektansvarlig virksomhed, har Marstal Fjernvarme, Force og Teknologisk Institut deltaget i projektet.

I løbet af projektet er testet en ny HDPE-liner fra DOW Chemicals, leveret af det østrigske firma AGRU. Desuden er mulighederne for at anvende linere af aluminium og rustfrit stål undersøgt.

Testen af HDPE-lineren viste desværre, at egenskaberne ikke var meget anderledes end egenskaberne for de hidtil anvendte HDPE-linere. Dog er en ny HDPE-liner under projektperioden introduceret af det amerikanske firma GSE. Lineren er anvendt i Dronninglund Fjernvarmes 62.000 m³ damvarmelager, som er ibrugtaget i foråret 2014. GSE har givet 20 års garanti for linerens holdbarhed ved 90 °C. Denne liner testes nu i et EUDP støttet opfølgningsprogram for store varmelagre.

Aluminium har vist sig uanvendeligt til linermateriale, fordi Ph i de senest byggede damvarmelagre er hævet til 9,8 at hensyn til risiko for korrosion.

Rustfri stållinere er anvendelige, men der findes formentligt ikke tilgængeligt mobilt svejseudstyr på markedet. Desuden er prisen for materialet ca. 3 gange så høj som prisen for HDPE, og svejsning og montering er ligeledes dyrere. Fordelen ved stållinere er høj temperaturbestandighed og at materialet er diffusionstæt også ved høje temperaturer.

1.1 Baggrund for projektet

Damvarmelagre anvendes i forbindelse med store solvarmeanlæg i tilknytning til fjernvarmenet i Danmark.

Tætning af damvarmelagre sker i dag med HDPE plastlinere, som svejses sammen på stedet. Linerne har typisk holdbarheder på 2-3 år ved 90 °C og kan derfor kun i kortere perioder årligt klare høje temperaturer, hvis levetiden skal være over 20 år. Hvis der kan findes linere med en bedre temperaturbestandighed, kan lagrenes anvendelsesmuligheder øges og lagrenes volumen formindskes eller kapaciteten øges. Projektets formål har været at finde linermaterialer, som kontinuerligt kan klare 95 °C i 20 år uden at lagrenes økonomi forringes, hvorved lagrenes anvendelsesmuligheder kan omfatte:

- Sæsonvarmelagring for solvarmeanlæg, hvor lagertemperaturen er så høj, at den kan anvendes som fjernvarmefremløb uden efteropvarmning. Endvidere vil solvarmeanlæggene kunne kombineres med andre teknologier, som kan have glæde af varmelagring (varmepumper, biogas, biomassefyret kraftvarme).
- Som sæsonvarmelager for kraftvarmeværker og affaldsforbrænding.
- Sæsonvarmelager til industriel overskudsvarme.

Forbedrede damvarmelagre vil være en økonomisk og miljømæssig gevinst for såvel fjernvarmeværker, forbrugere og samfundet. For et fjernvarmeværk med solvarme og sæsonvarmelagring vil der være en økonomisk gevinst, fordi lagrenes volumen kan reduceres. Hvis temperaturen kan hæves 10 °C i gennemsnit, vil lagrene kunne reduceres 15-30 % i størrelse. Der vil endvidere være en miljømæssig gevinst, fordi efteropvarmning af vandet fra lageret undgås i en længere periode,

og der dermed kan anvendes direkte ved fremløbstemperatur. For et kraftvarmeværk vil der være en økonomisk gevinst med sæsonvarmelagring, hvis værket kan få flere årlige driftstimer med samproduktion af el og varme og dermed blive mere fleksibelt i forhold til el-nettet (gælder f.eks. ofte for biogasanlæg), eller hvis værkets størrelse kan reduceres (ved nyanlæg). Der vil endvidere være en miljømæssig gevinst, hvis den lagrede varme erstatter varme produceret på fossile brændsler.

2 Udvikling af testmetode for linere og erfaringer med PP-liner

I 1999 etableredes et jordslangelager på 3.550 m³ ved Marstal Fjernvarme*. Som tætning af lageret valgtes en PP-liner (Poly Propylen) på grund af dens forventede varmebestandighed og svejsbarhed.

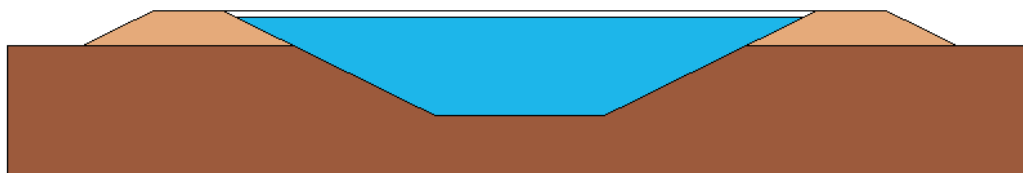
Efter etablering af jordslangelageret udviklede Teknologisk Institut en metode til forceret test af langtidsegenskaberne for plastlinere. PP-linieren anvendt i Marstal testedes efter denne metode og resultatet findes i Bilag 1. En række indkaldte leverandører og eksperter vurderede efterfølgende testmetoden som egnet til at teste langtidsegenskaberne for plastlinere til damvarmelagre.

Formålet med testen var at undersøge PP-lineres anvendelighed som bund-, side- og topliner i et damvarmelager. Resultatet var imidlertid ikke opløftende, da det viste sig, at levetiden var 1,6-1,9 år ved en konstant temperatur på 80 °C. Desuden var vanddampdiffusionen ved 80 °C 12,2 g/m²/døgn, hvilket for et lager på 100 x 100 m ville betyde, at der dagligt skulle bortventileres 122 liter vand fra låget.

De involverede linerleverandører mente imidlertid, de kunne levere linere med nye stabilisatorer, som ville give dem bedre egenskaber. PB (Polybutylen) og HDPE (Extra termisk stabiliseret high density polyethylen) nævntes tillige som mulige produkter, som kunne udvikles med de ønskede egenskaber.

3 Opbygning af eksisterende damvarmelager

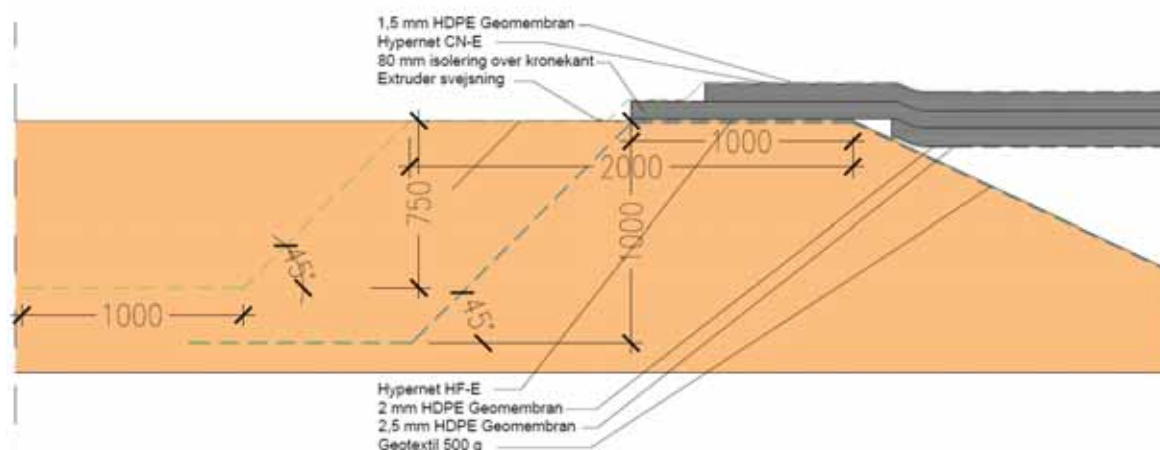
Damvarmelagre i Danmark er opbygget som udgravninger udformet som omvendte pyramide-stubbe (jf. Figur 1). Den opgravede jord lægges i en vold omkring udgravningen, således der opnås jordbalance, og lagerets volumen er dels under og dels over det oprindelige terræn.



Figur 1: Tværsnit af damvarmelager.

Siderne og bunden af lageret afrettes med sand for at undgå skarpe sten, som kan beskadige lineren. Derefter udlægges baner af Geotextil for at beskytte lineren yderligere og til sidst baner af HDPE-liner, som svejses sammen for at give en vandtæt overflade. Banerne har typisk en bredde på 6-7 m. Længden af banerne skal være store nok til, at de kan nå fra toppen til bunden af lageret i et stykke, så der ikke skal svejses på langs af lagerets sider. Lineren fastholdes i låserender rundt om lageret som vist på Figur 2.

* Måleprogram for jordslangelager Marstal Fjernvarme. PlanEnergi 2002



Figur 2: Snit gennem låg og låserender. Låserenderne er kanaler der graves fri omkring lageret. I disse kanaler placeres enderne af lineren, hvorefter de fyldes op med jord som fastlåser lineren (reference 3).

For at få vand til og fra lageret føres der typisk tre rør ind gennem bunden eller siden af lageret til tre diffusorer som placeres i hhv. top, midt og bund. En tæt samling mellem rør og liner ved rørindføringen laves typisk som en flangesamling, hvor lineren klemmes fast.

Når lageret er fyldt med vand påbegyndes lågearbejdet, som typisk består af en HDPE-liner, som flyder ovenpå vandet, der svejses og trækkes ud over vandoverfladen, så hele overfladen er dækket. Bundlinereren til låget låses som sidelineren fast i en låserende. Oven på bundlinereren til låget udlægges der nederst et drænnet, dernæst isolering og øverst endnu et drænnet, før låget lukkes af med en topliner i HDPE. Toplinereren svejses fast til lågets bundliner langs kanten af lageret. Der fastgøres et antal vakuumventiler til toplineren, som dels sikrer lineren mod vindpåvirkning og dels i kombination med drænnettene ventilerer lågkonstruktion. En HDPE-liner er ikke dampdiffusionstæt, og ventilation er derfor nødvendig, for at undgå opbygning af fugt i låget som ødelægger isoleringens egenskaber.

4 Levetid for eksisterende HDPE-linere

I forbindelse med etablering af de nuværende damvarmelagre i Marstal, har Teknologisk Institut i 2003-2004 testet to forskellige HDPE-linere og yderligere en HDPE-liner i 2010-2011 for at undersøge linerens levetid i forhold til temperaturpåvirkningen. Slutrapporterne for de to undersøgelser er vedlagt som hhv. bilag 2 og bilag 3. Den fundne levetid ved forskellige temperaturpåvirkninger ses i nedenstående tabel:

Temperatur [°C]	Levetid [år]		
	Liner 1	Liner 2	Liner 3
90	2,5	3,2	2,9
80	6,1	7,2	6,8
70	15,9	17,0	15,6
60	43,7	42,4	35,9

Tabel 1 Beregnede levetider for HDPE-linere. Liner 1 og 2 er testet af Teknologisk Institut i 2003-2004. Liner 3 er testet af Teknologisk Institut i 2010-2011.

De eksisterende damvarmelagre i Danmark fungerer primært som solvarmelagre, hvilket betyder, at temperaturen varierer i løbet af året afhængig af varmekonsum og solvarmeproduktion. Samtidig begrænses den maksimale temperatur i lageret om sommeren, således at der opnås en teoretisk levetid på over 20 år. Nedenfor ses et eksempel på en årlig temperaturvariation samt den tilhørende beregnede levetid for liner 1.

Beregningseksempel for liner 1

Måned	Vand-temperatur °C	Årlig tidfraktion t_n	Levetid ved temperatur L_n	t_n/L_n
Januar	53	0,083	94,477278	0,000879
Februar	45	0,083	198,22857	0,000419
Marts	42	0,083	252,90376	0,000328
April	45	0,083	198,22857	0,000419
Maj	62	0,083	34,846275	0,002382
Juni	68	0,083	17,837703	0,004653
Juli	72	0,083	12,629135	0,006572
August	74	0,083	11,110155	0,007471
September	74	0,083	11,110155	0,007471
Oktober	73	0,083	11,805378	0,007031
November	68	0,083	17,837703	0,004653
December	60	0,083	43,973111	0,001888
Sum				0,044164
Levetid, år				22,6

Tabel 2 Eksempel på årlig temperaturvariation, i toppen af lageret, for et damvarmelager og tilhørende levetid for HDPE-liner

5 Opstilling af løsningsmuligheder

Der er en række overordnede problemstillinger, som er afgørende i forhold til valg af linermaterialer til bund og sider af lageret samt bunden af låget.

- 1) Pris. Herunder materiale- og installationsomkostninger.
- 2) Tæthed mod vand- og dampdiffusion.
- 3) Temperaturvariationer. Som udgangspunkt skal temperaturvariationer mellem 10 °C og 95°C kunne håndteres af materialet.
- 4) Levetid på minimum 20 år ved en lagertemperatur på 95 °C.

Prisen skal som udgangspunkt være konkurrencedygtig med de eksisterende HDPE-linere. Dog kan en øget temperaturbestandighed og levetid i visse applikationer bære en højere pris.

I forhold til punkt 2 er de eksisterende linere ikke 100 % diffusionstætte, hvilket ikke betyder noget for bund og sidelinier, men har konsekvenser for låget. I de nuværende lagre etableres der ventilation for at undgå nedbrydning af isoleringen pga. fugt og varme. Ved de anvendte HDPE-linere er dampgennemtrængningen ved 80 °C i størrelsesordenen 1 g/m²/døgn.

Der er opstillet 3 løsningsmuligheder, som vurderes at være realistiske i forhold til at opfylde ovenstående kriterier, og som ønskes undersøgt nærmere:

- 1) Forbedret plastliner
- 2) Aluminiumsliner
- 3) Stålliner

5.1 Forbedret plastliner

Levetiden af plastlinere er afhængig af råmaterialet, men i høj grad også af de additiver (antioxidanter), der tilsættes råmaterialet for at opnå specifikke egenskaber. I takt med at efterspørgslen efter linere, der kan klare høj temperatur, stiger, øges interessen blandt leverandørerne for at udvikle materialer med netop denne egenskab.

Konkret havde det Østrigske firma AGRU ved projektets begyndelse tilbudt en HDPE-liner fra DOW Chemicals med betegnelsen PE-RT, som påståedes at kunne modstå 95 °C i 10 år. Databladet for lineren blev vurderet af Teknologisk Institut, som fandt det sandsynligt, at lineren kunne være bedre end de hidtil testede. Det kunne dog ikke afgøres af producentens oplysninger, hvorfor lineren skulle testes på samme måde som de hidtil testede linere. Testen tager omkring 1,5 år for en liner afhængig af linerens levetid.

Linerproducenten GSE har i løbet af projektet introduceret en ny forbedret plastliner, som de påstår, kan holde til høje temperaturer. GSE har tilkendegivet, at deres nyudviklede liner (High Performance GSE HD Smooth Geomembrane) kan modstå temperaturer op til 90 °C kontinuert i 20 år samt 95°C i kortere perioder.

5.2 Aluminiumsliner

Hydro Aluminium havde tilkendegivet, at de kan levere en tynd aluminiumsliner, som svejses på stedet. I forvejen udvikles lågelementer med aluminiumsbund, så aluminium er ikke ukendt som materiale i damvarmelagre. For at klarlægge anvendeligheden af en aluminiumsliner til damvarmelagre skal svejse- og udlægningsmetoder samt korrosionsrisici undersøges. FORCE har i forve-

jen undersøgt korrosionsrisici for lågelementer og ville derfor kunne gøre det for aluminiumslineringen. FORCE skulle endvidere vurdere Hydro Aluminiums forslag til svejsemetode og kvalitetssikring.

5.3 Stålliner

Linere i tyndpladestål (ned til 0,5 mm) har været anvendt i Tubberupvænge (DK), hvor der er anvendt en 0,4 mm sømsvejst rustfri søvandsbestandig stålliner, i flere tyske betontanke og i et forsøgslager hos DTU. Forsøgslageret er nu 10 år gammelt, og der er ikke tegn på korrosion eller utætheder. Forsøgslageret ved DTU er beskrevet i rapport fra BYG DTU, R-033 fra 2002 (Reference 1). Rapporten er udarbejdet af Alfred Heller (DTU), Carsten Wesenberg (NIRAS) og Aage Hansen (NIRAS). I forsøgslageret ved DTU er der anvendt en 0,4 mm rustfri stålliner i en kvalitet 316 (EN nr. 10028-7) som er modstandssvejset og bukket/foldet i hjørnerne. Dog har der i forbindelse med etableringen af lageret ved DTU været vanskeligt at bukke/folde de store sektioner i hjørnerne. Ud fra disse erfaringer anbefales det, at der konstrueres en krafttig rustfri stål sektion til hjørnerne, som kan sammensvejses med den rustfri stålliner.

Løsningen, med en rustfri stålliner vil være teknisk attraktiv, men den har hidtil været anset for at være for dyr og de anvendte svenske og tyske leverandører findes ikke længere. Større kraftvarmeværker vil imidlertid kunne tjene så meget på langtidsvarmelagre, at det formentligt kan blive rentabelt med en liner i tyndpladestål, da der bliver mulighed for at hæve lagertemperaturen og dermed forøge kapaciteten væsentligt. Sandvik AB og Sanistål har tilkendegivet, at de begge kan levere en sådan liner.

6 Forbedret plastliner

Fordelen ved at anvende plastlinere til damvarmelagre er de relativt lave materiale- og installationsomkostninger samt den efterhånden velkendte installationsprocedure. Derfor er problemstillingerne omkring pris, levetid og tæthed stort set løst, hvis der kan findes eller udvikles en HDPE-liner med en levetid på minimum 20 år ved 95°C. Dog vil diffusionstætheden stadig være et forhold der skal håndteres i konstruktionen. Selv en levetid på 10 år ved 95°C er en markant forbedring i forhold til de hidtil anvendte HDPE-linere. Det er derfor valgt at teste den liner (PE-RT) fra DOW Chemicals, som AGRU har tilbudt, på samme måde som de hidtil anvendte linere, for at se om leverandørens påståede levetid holder stik.

I forhold til den nye HDPE-liner fra GSE, som er specielt udviklet til applikationer med høje temperaturer, er det ligeledes interessant at teste den på tilsvarende vis som de hidtil anvendte linere for at vurdere om producentens tilkendegivelse holder stik. I forbindelse med etablering af et 60.000 m³ damvarmelager i Dronninglund, er udstedt en 20 års garanti for levetiden af GSE. Derfor anvendes denne liner i lageret i Dronninglund, som er etableret i 2013 og idriftsættes sammen med et solvarmeanlæg i januar 2014. Lineren testes i et netop startet EUDP projekt "Opfølgningsprogram for store varmelagre i Danmark" på tilsvarende vis som de hidtil anvendte linere.

6.1 Test af HDPE-liner (PE-RT) fra DOW Chemicals

Lineren er, som for de hidtil anvendte HDPE-linere, testet ved en forceret ældningstest, hvor materialet indbygges i en testopstilling med vand på den ene side af lineren og luft på den anden side

og eksponeres for høj temperatur i et klimaskab. Den komplette testrapport er vedlagt som bilag 4. Ved test af PE-RT-lineren er der anvendt en temperatur på 110°C. Der udtages under testen løbende prøver af materialet med henblik på at fastlægge udvalgte materialegenskaber. Levetiden ved den givne eksponeringstemperatur fastlægges som den tid, der går før brudforlængelsen ved et trækprøveforsøg reduceres markant. Det er karakteristisk ved ældning af HDPE-linere, at der sker en markant ændring i brudforlængelsen efter en given eksponeringstid, hvorfor dette bruges som mål for levetiden. Ud over træktest af materialet udføres der OIT-analyser[†] og visuel inspektion af materialet. Ved at bestemme oxideringstider vha. OIT-analyser kan det relative indhold af antioxidanter i materialet bestemmes, da oxideringstiden er direkte afhængig af mængden af antioxidanter.

Testen viser en markant reduktion i brudforlængelsen efter ca. 300 døgn eksponering. Samtidig viser OIT-analysen, at mængden af antioxidant og dermed også modstandsevnen mod oxidering er reduceret kraftigt. Linerens levetid ved 110°C konkluderes derfor at være 300 døgn. Til beregning af linerens levetid ved andre temperaturpåvirkninger anvendes Arrhenius ligning. Da der kun er foretaget ældningstest ved én temperatur kan ældningsfaktoren ikke bestemmes eksperimentelt og sættes derfor til 2 (ikke eksperimentelt bestemt ældningsfaktor sættes normalt til 2,0 i de fleste ældningstest). Dog viser de ældningstest, der er udført på de hidtil anvendte HDPE-linere, at ældningsfaktoren kan sættes til 2,3 ved beregning af levetiden. I Tabel 3 vises beregnede levetider for den testede liner ved begge ældningsfaktorer.

Anvendelses temperatur, °C	Levetid, døgn	Levetid, år	Levetid, døgn	Levetid, år
	Ældningsfaktor 2,0		Ældningsfaktor 2,3	
110	300	0,8	300	0,8
100	600	1,6	690	1,9
90	1200	3,3	1587	4,3
80	2400	6,6	3650	10,0
70	4800	13,2	8395	23,0
60	9600	26,3	19309	52,9

Tabel 3 Beregning af levetider ved forskellig temperaturer for den testede HDPE-liner (PE-RT) fra DOW Chemicals.

Som det fremgår af de beregnede levetider, har lineren i bedste fald en levetid på 10 år ved 80°C kontinuert, hvilket er langt fra påstanden om en levetid på 10 år ved 95°C. Overordnet er levetiden nogenlunde på niveau eller lidt bedre end de bedste af de hidtil testede linere.

6.2 GSE High Performance liner

Som nævnt er der påbegyndt, men ikke gennemført en tilsvarende test for GSE's nye liner som for de hidtil anvendte linere. Det kan derfor ikke konkluderes, om den lever op til påstanden fra GSE. GSE har foretaget en række test af lineren. Der er ingen af disse test, som er udført efter samme procedure som testen hos Teknologisk Institut, og de kan derfor ikke sammenlignes direkte. Der er dog en række testresultater fra GSE, som indikerer, at den nye High Performance liner kan have længere levetid end de hidtil testede. Bl.a. er oxidationstiderne fundet ved OIT-analyse væsentlig bedre for den nye liner.

[†] Oxidation Induction Time analyse er en følsom målemetode til at måle niveauet af antioxidanter i et plastmateriale.

Det er desuden bemærkelsesværdigt, at GSE er villige til at stille en garanti for linerens levetid i lageret i Dronninglund. Det er første gang, at det er lykkedes at få en af producenterne til at udstede en reel garanti for levetiden af lineren. For lageret i Dronninglund garanterer GSE en levetid på minimum 20 år ved op til 90°C kontinuert samt op til 95°C op til 45 dage om året. Prisen for lineren til Dronninglund var ca. 65 kr./m².

7 Aluminiumsliner

Anvendelsen af aluminium som linermateriale er diskuteret med Hydro Aluminiums afdeling i Hamborg. De overordnede krav til konstruktionen er forelagt Hydro Aluminium, som har foreslået en legering 5251 og en tykkelse på 3 eller 4 mm ud fra kravene om 95°C vand og en levetid på minimum 20 år. Den maksimale bredde på banerne er 1500 mm. Hydro Aluminium oplyser følgende egenskaber for legeringen:

Legering	5251
Trækstyrke (Rm)	210 – 250 MPa
Flydespænding (Rp)	140 – 180 MPa
Brudforlængelse (A50)	> 8%

Det vil sige, at det er en stærk, men stadig relativt sej legering, hvilket vurderes at være en fordel i forhold til at kunne tilpasse sig eventuelle ujævnheder og sætninger i lagerets bund og sider.

Det er ikke lykkedes at få hjælp af Hydro Aluminium omkring muligheder eller anvisninger for sammensvejsning af aluminiumsbanerne eller installationen i øvrigt. Det samme gælder omkring spørgsmålet om temperaturvariationer, da Hydro Aluminium oplyste, at de ikke er konstruktions-specialister.

Derfor kontaktedes Alucluster og Force. Force fandt ikke aluminium velegnet, da Ph i damvarmelagrene i Marstal og Dronninglund af korrosionshensyn i mellemtiden var hævet til 9,8. Vand ved Ph 9,8 er ikke godt sammen med aluminium. Ph-værdien skal være 6,5 – 8 ellers sker der korrosion. Så aluminium kan kun anvendes til låg over en liner, hvor der ikke er direkte kontakt med vandet i lageret.

Prisen for aluminiumslineren anslås til 20 kr./kg. For en 3 mm liner giver det en materialepris på ca. 160 kr./m², hvilket er ca. 100 kr./m² eller 170% dyrere end prisen for en HDPE-liner. Samtidig skal der pga. den begrænsede banebredde på 1.500 mm regnes med 4-5 gange så mange svejsninger som for en HDPE-membran.

8 Stålliner

Force siger om stållinere:

Ilt er ikke et problem for rustfrit stål. Korroderer på overfladen og danner oxid hinde. Der må derimod ikke være salte (slet ikke klorider) og Ph 9,8 er ok.

Klorid på ydersiden kan være et problem (spaltekorrosion, grubetæring eller pitting).

Vandkemien kan styres, så rustfrit stål kan anvendes til ind- og udløbsarrangementet.

Sort stål er ikke anvendelig, da det pga. ilt vil korrodere i tynde udgaver.

Tannin eller garvesyre kan bruges som iltbinder i fjernvarmenet, men ikke i lagre med store vandmængder.

8.1 Sandvik

Anvendelsen af tyndpladestål som linermateriale er diskuteret med Sandvik AB i Sverige. De overordnede krav til konstruktionen er forelagt Sandvik. Samtidig er de forespurgt, om de er i stand til at udføre den detaljerede konstruktionsopgave samt selve installationsarbejdet. Sandvik har som Hydro Aluminium ikke nogen konstruktionsekspertise og kan heller ikke henvise til nogen samarbejdspartnere, der er i stand til at løfte opgaven.

Sandvik anbefalede dog en 1 mm rustfri stållegering f.eks. SAF2205 (EN nr. 1.4462), og ud fra et rent korrosionsmæssigt synspunkt kan der også bruges en tyndere godstykkelse. De er usikre på korrosionsforholdene på den side af lineren, der vender mod jorden, og henviste til Korrosionscentralen i Glostrup for rådgivning om dette forhold. Den anbefalede stål kvalitet er en rustfri duplex[‡] stål.

Det oplystes af Sandvik, at stål lineren kan svejses på stedet, men ikke hvilken metode, der er velegnet til svejsningen eller hvilke test, der er behov for til at sikre kvaliteten af svejsningerne. Den maksimale banebredde som Sandvik kan levere er 340 mm, hvilket giver ca. 20 gange så mange svejsninger som for en HDPE-membran. Denne løsning anses derfor ikke for at være brugbar, grundet de mange svejsninger.

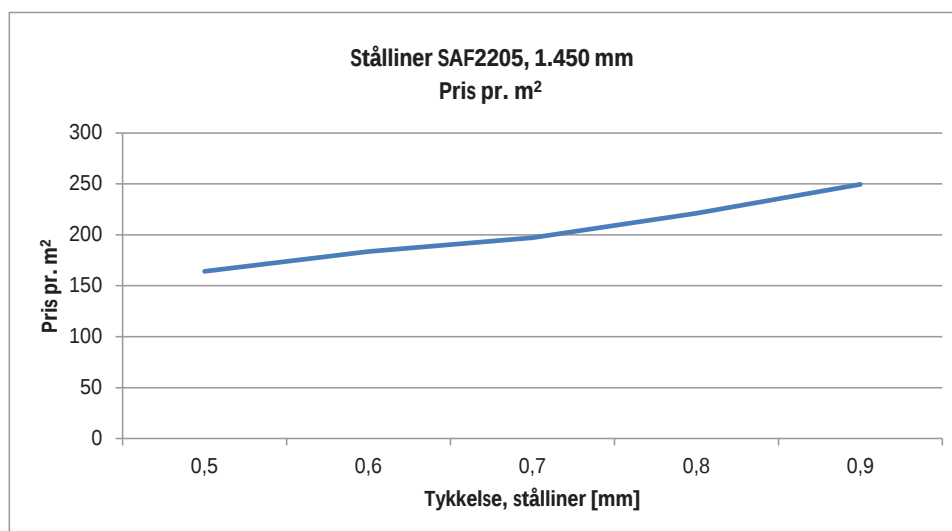
Prisen for den rustfri stål liner fra Sandvik i en standardbredde på 290 mm og en tykkelse på 1,1 mm er oplyst til ca. 615 kr./m², hvilket er ca. 10 gange så dyrt som en HDPE-liner. Derudover må der forventes en meget stor omkostning til svejsearbejde, hvis ikke der kan findes en større banebredde for den rustfri stål liner.

I forhold til temperaturudvidelse har materialet en lav udvidelseskoefficient, men det er ikke eftervist, om temperaturudvidelsen kan optages som interne spændinger i materialet, eller om temperaturudvidelsen giver problemer. Dette forhold bør undersøges nærmere.

8.2 Sanistål

Da Sandvik AB er begrænset på bredden af deres stål liner, er der blevet rettet henvendelse til Sanistål A/S i Danmark, som via deres tyske stålleverandør, tilbyder en stål liner med en bredde på op til 1.450 mm. Sanistål anbefaler ikke en bredere stål liner af hensyn til håndtering m.v. på stedet, hvor lineren skal installeres. I den nævnte bredde tilbyder Sanistål en liner fra 0,5 til 0,9 mm til en pris fra 42 til 34,5 kr./kg., hvilket giver en m²-pris på 164 til 249,6 kr./m² ekskl. montage og moms i de nævnte tykkelser.

[‡] Duplex stål's struktur er en blanding bestående af ferrit og austenit. Generelt har duplex stål en højere styrke end både de ferritiske og austenitiske.



Figur 3 Pris pr. m² ekskl. moms og montage som en funktion af tykkelsen for stållineren fra Sanistål A/S med en bredde på 1.450 mm.

Prisudviklingen for stållineren fremgår af ovenstående figur, som en funktion af tykkelsen på stållineren.

8.3 Montage

I forhold til montagen/installation af stållineren, har dette været drøftet med bl.a. Bladt Industries A/S og Valmont Industries (tidlig. DS SM som var en del af DS Gruppen A/S), som begge arbejder med større stålkonstruktioner indenfor off-shore, vindmøller, infrastruktur mm. Begge virksomheder siger sammenstemmende, at opgaven kræver specielt svejseudstyr, og der skal nytænkes i forhold til kendte svejse-teknologier. Endvidere skal der udføres kvalitetskontrol af montage- og svejsearbejdet. Ovenstående virksomheder henviste til andre virksomheder, som er specialister indenfor svejsning i rustfrit stål og tyndplade bl.a. ESAB.

8.4 Svejseprøve ved ESAB

I relation til svejsning af tyndplade stål har der været rettet henvendelse til ESAB, som er producent af tilsatsmaterialer og udstyr til svejsning og skæring. ESAB anbefalede, at der anvendes en MIG^s/MAG^{**}-svejsning da svejsehastigheden ved denne metode er væsentligt højere end eksempelvis en TIG^{††}-svejsning. ESAB anbefalede endvidere, at der anvendes en lille motoriseret traktor, der holder svejsepistolen således at svejsningen udføres i et jævnt tempo (15-150 cm/min.), og dermed bliver ensartet. I forhold til svejsemetoder tilbød ESAB at udfører en svejseprøve, for at efterprøve forskellige svejseteknikker.

For at efterprøve forskellige svejsemetoder og teknikker i en rustfri tyndplade stål, indkøbte PlanEnergi derfor et stykke af en stålliner (1x2 meter, SAF 2205 EN 1.4462, duplex-stål), som ESAB efterfølgende har udført svejseprøver på.

^s Metal Inert Gas (MIG), hvor der tilsættes argon og helium som beskyttelsesgas.

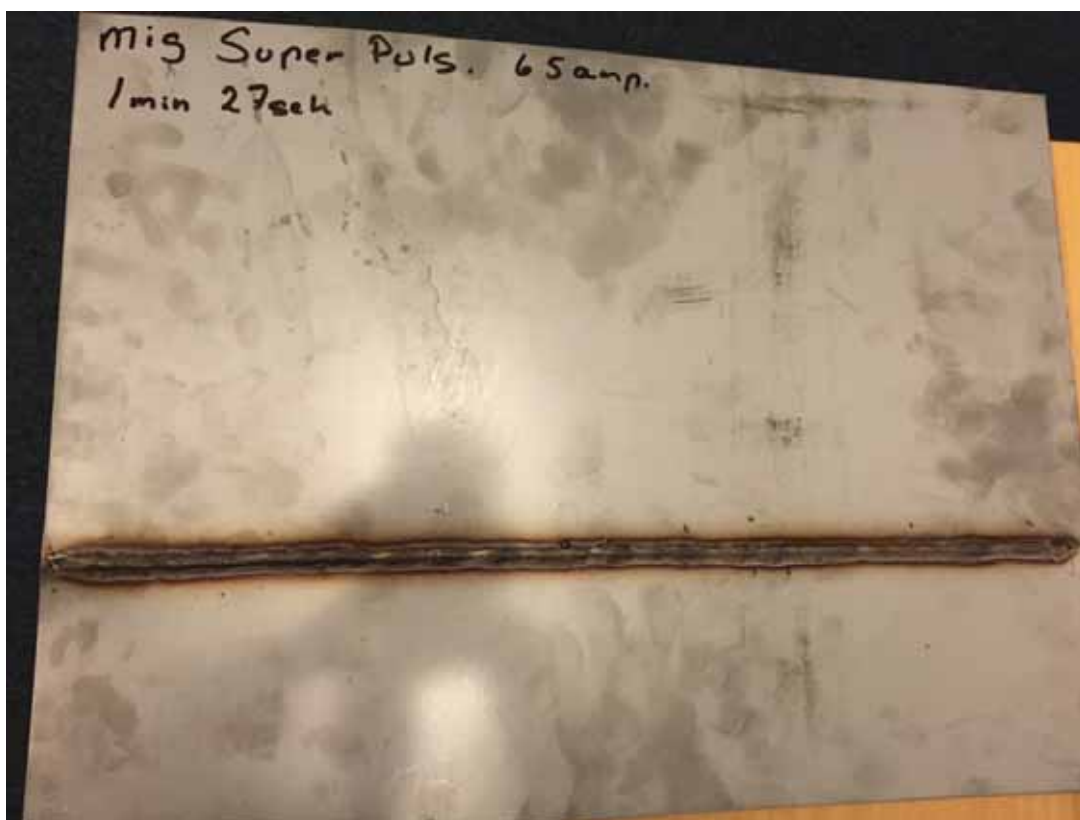
^{**} Metal Active Gas (MAG), hvor der tilsættes CO₂ som beskyttelsesgas

^{††} Tungsten Inert Gas (TIG), hvor der skabes en lysbue mellem en wolfram-elektrode og grundmaterialet. Der anvendes argon eller helium som beskyttelsesgas.

ESAB har udført en svejseprøvning med en TIG- og MIG-svejsning samt induktionssvejsning. TIG-svejsning kan være en fordel da varmetilførslen er mindre end ved MIG-svejsning, hvilket minimerer den termiske deformation, der kan opstå i forbindelse med svejsningen. Induktionssvejsning har den fordel at der ikke skal anvendes tilsatsmateriale.

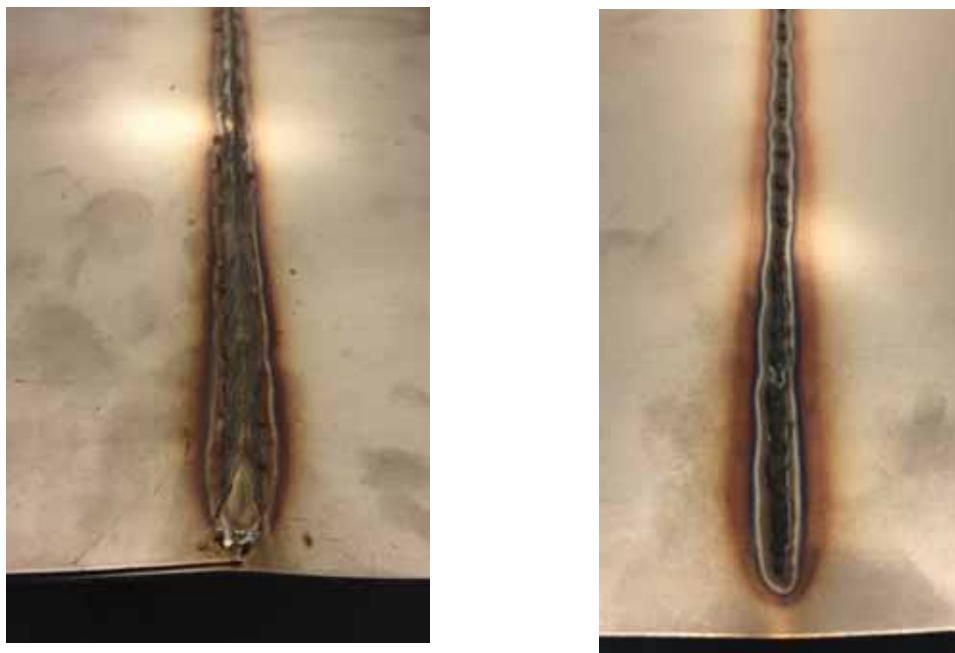
ESAB vurderer, at der kan vælges en stålliner i en mindre ædel legering eksempelvis en syrefast rustfristål (EN 1.4401, AISI 316). Dog skal det sikres/verificeres, at der ikke sker korrosion i forhold til jorden under stållineren.

8.4.1 Svejseprøve, MIG-svejsning



Figur 4: MIG-svejsning (Super Puls, 65 amp.).

Ovenstående svejseprøve er udført med overlap af to stållinere, hvor svejsningen er udført i kanten af den overlappende stålliner.



Figur 5: Nærbillede af MIG-svejsningen ved overlappet af stållineren. Tv. ses overkanten af svejsningen og Th. ses bagkanten.

Som det fremgår af ovenstående nærbillede er der store termiske-deformationer, og det vurderes derfor, at denne svejsemetode ikke er brugbar.

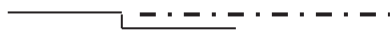
8.4.2 Svejseprøve, TIG-svejsning



Figur 6: Svejseprøvning med TIG-svejsning (Micro Puls, 65 amp.)

Ovenstående svejseprøve er udført med overlap af to stållineren (som ved MIG-svejsningen), hvor TIG-svejsningen er udført i kanten på den overlappende stålliner. Denne svejsemetode medfører forholdsvis store termiske-deformationer, og det vurderes derfor at denne svejsemetode ikke er brugbar til formålet.

For at afprøve andre samlingsmetoder har ESAB foreslået, at der bliver bukket en "fals" i den ene side af stållinerens, hvilket bevirker, at stålpladerne ikke skrider i forbindelse med montage. Endvidere bevirker falsen, at stållinerens får en større styrke. Dog vil det kræve endnu en arbejdsproces ifm. opbukket.



Ovenstående figur viser princippet i opbukket.

Svejsesprøven viser, at denne metode ligeledes ikke er brugbar, da de termiske påvirkninger ifm. svejsningen, deformerer linerens. Det vil endvidere være nødvendigt, at afdække området, hvor der svejses da TIG-svejsningen er følsom over for vejr-påvirkning, dog kan der med fordel etableres et overdækket arbejds- og svejsbord, hvor stållinerens efterfølgende trækkes på plads.



Figur 7: TIG-svejsning af stålliner, hvor der på den ene stål er bukket en fals.

TIG-svejsning (TIG-puls), med dobbelt opbuk. Svejsemetoden er afprøvet, hvor de to stålliner, der skal sammensvejses, er bukket i en 90°-vinkel. De termiske påvirkninger på stållinerens er begrænset, hvilket betyder at der ikke opstår termiske deformationer af linerens. Dog kræver TIG-svejsning, at svejsestedet beskyttes mod vejr-påvirkning, hvilket kan ske med et svejse-telt. Svejsehastigheden er relativ langsom, hvilket betyder at denne svejsemetode udelukkende er attraktiv til svejsninger i kanter, hjørner, inspektionsåbninger og andre steder, hvor der ikke kan anvendes en kontinuerlig svejsning.



Figur 8: TIG-svejsning (TIG-puls) med dobbelt opbuk. Svejsetid ca. 75 sek./meter. Lang ophæftelestid.



Figur 9: Nærbillede af TIG-svejsning (TIG-puls).

8.4.3 Svejsprøve, induktion

I forbindelse med etableringen af forsøgslageret ved DTU i 2002, blev stållineren svejset vha. induktion, hvor der blev anvendt en simpel maskine, der presser to ruller sammen omkring to opbukkede baner (lineren), der smelter pladerne sammen vha. induktion. ([BYG-DTU Rapport R-033](#)).

Denne løsning giver en række svejsetekniske fordele, da der ikke skal bruges inaktiv gas på bagsiden eller tilsatsmaterialer og man undgår forudgående ophæftning, hvilket ellers kan give nogle ujævne svejsninger. Endvidere kan de opbukkede baner tage en del af de termiske udvidelser i lageret. Dog vil området omkring svejsningen være udsat for store spændinger i stålet, hvilket skal undersøges/belyses nærmere.



Figur 10: Fra BYG-DTU Rapport R-033. Pladerne sammensvejses vha. et opbuk og induktion.

Induktionssvejsning med pulsdraft (kontinuerlig svejsning) er afprøvet på en stationær svejses-tand, hvor der er udført en kontinuerlig svejsning af to stållinere bukket i en 90°-vinkel. Svejs-hastigheden er relativ høj (ca. 52 sek./meter ex. opbuk), hvilket giver mulighed for at opnå en effek-tiv svejsning af de forholdsvis mange svejsebaner, der skal udføres i forbindelse med etableringen af et damvarmelager. ESAB har ikke en induktionssvejs i deres produktprogram, og de har ikke kendskab til andre virksomheder, der forhandler mobile/transportbare induktionssvejsere, som kan anvendes i "marken". ESAB oplyser at svejsemetoden er meget anvendt inden for automobil-industrien. Såfremt der ikke findes et kommercielt-produkt, skal en mobil/transportable indukti-onssvejs specialfremstilles. I forhold til svejskontrol bør dette forhold drøftes med FORCE eller tilsvarende kontrolinstans. Alle svejsninger vil være synlige, og en 100 % visuel kontrol, vil derfor

være mulig. I forbindelse med induktionssvejsningen, vil der ikke kunne udføres en svejsning/puls såfremt der ikke er tæt forbindelse mellem to de linere.



Figur 11: Stålliner svejset med en induktionssvejsning med pulsdraft. Svejsetid ca. 52 sek./meter. Skal ikke hæftes.



Figur 12: Nærbillede af induktionssvejsning med pulsdraft.

Som det fremgår af ovenstående figur er de termiske påvirkninger ved induktionssvejsning med pulsdraft minimale., hvilket bevirker at stållineren ikke deformeres i forbindelse med svejsningen.

8.4.4 Termisk udvidelse

For at belyse materialeudvidelsen har PlanEnergi udarbejdet beregninger på den termiske udvidelse af den rustfrie stålliner for henholdsvis en duplex stål, SAF 2205 (EN. 1.4462) samt en syrefast rustfristål, AISI 316 (EN. 1.4401). (Bilag 5) Beregningerne viser ikke større termisk udvidelse, der ikke kan optages som indre spændinger eller i opbukket, der skal udføres i forbindelse med svejsning. Dog skal der findes en løsning, der tager højde for den samlede udvidelse i alle retninger, da det ikke vurderes, at lineren kan fastholdes tilstrækkeligt til, at de udvidelser der ikke kan optages i opbukket bliver optaget som indre spændinger.

Der bør arbejdes videre med fastgørelse af lineren i låserende eller tilsvarende.

Referencer

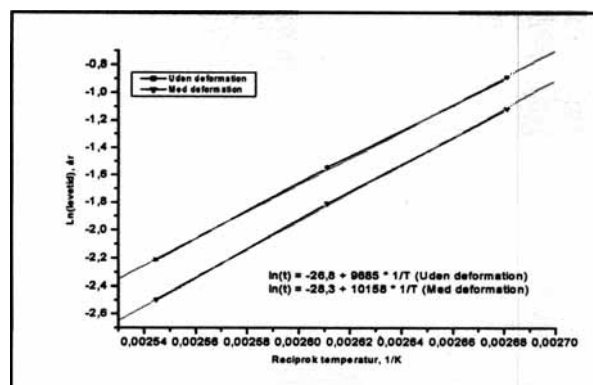
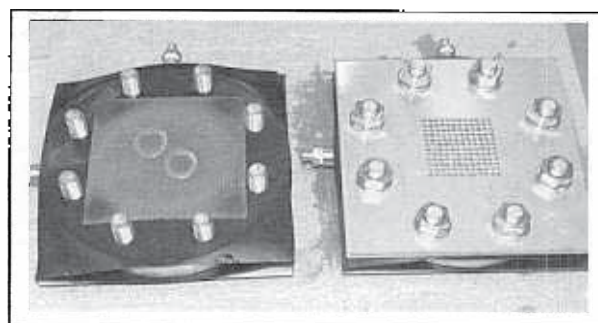
1. Udvikling af flydende lågkonstruktioner til damvarmelagre. Løsning i tyndpladestål. BYG DTU, R-033. DTU 2002.
2. Final Technical Report, SUNSTORE 2, PlanEnergi 2004.
3. Deliverable D.2.2, SUNSTORE 4. Design of the pit heat storage. PlanEnergi 2013.

Bilag 1

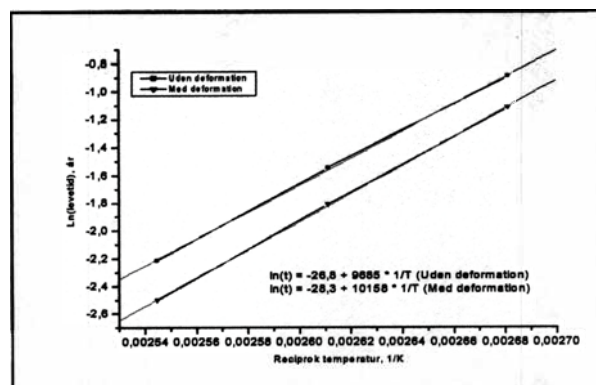
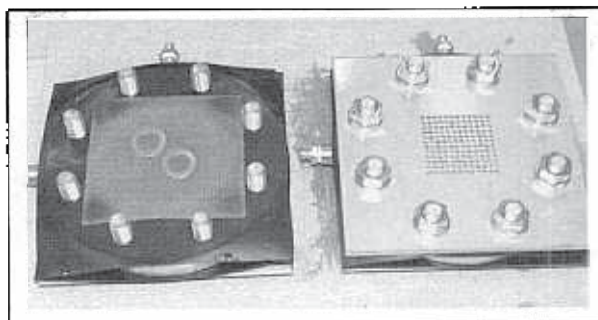
Testrapport fra ældningsforsøg af PP-linere,
Teknologisk Institut, 2000



Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre



Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre



Søren Pedersen, Teknologisk Institut
Uffe Nielsen, Plastconsult

Juli 2000

SAMMENFATNING

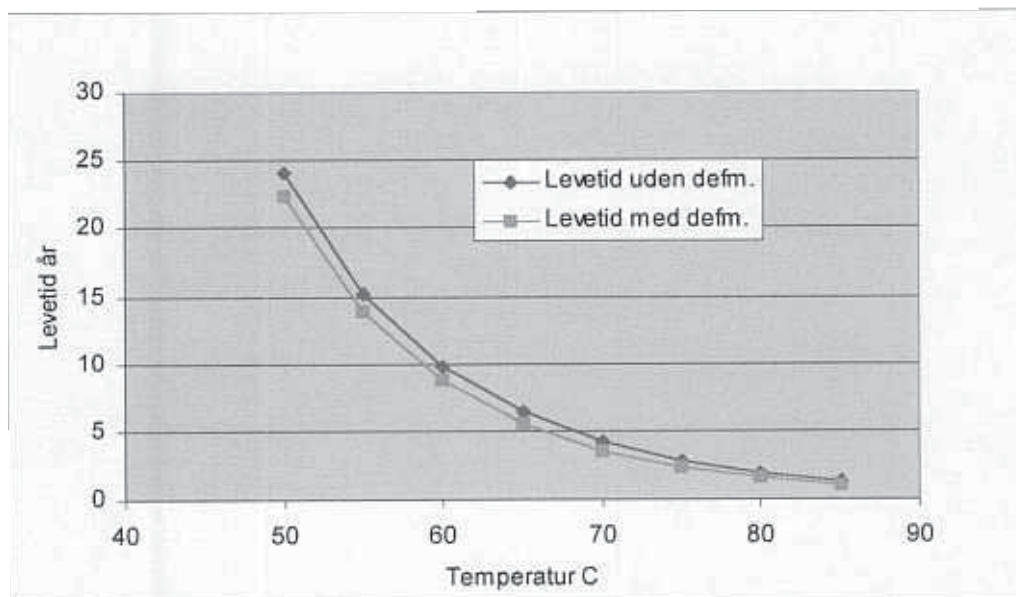
Sæsonvarmelagre udnyttes til lagring af varme fra sommer til vinter. Varmen kan være solvarme eller spildvarme fra elproduktion (60 % af den tilførte energi bliver til varme). Sæsonvarmelagring er et særligt prioriteret udviklingsområde, idet det er en forudsætning for at kunne nå de energipolitiske mål, at teknologien udvikles til rentable løsninger.

I aktuelle sæsonvarmelagre som gruslagre og damvarmelagre med et stort vandvolumen er det af afgørende betydning for lagerets holdbarhed, at linerkonstruktion er tæt.

I dette projekt er der blevet udviklet specielle prøveceller og prøvningsprocedurer, så man kan foretage prøvning ved temperaturer over 100°C. Ved prøvning med relativt korte eksponeringstider kan der herefter fås resultater, der kan anvendes til at fastlægge linerens langtidsholdbarhed ved lavere temperaturniveauer.

Et prøvningsprogram med en aktuel 1,6 mm tyk liner af en polypropylen compound er herefter blevet gennemført på Teknologisk Institut. Samtidigt har råvareproducenten Montell gennemført prøvninger med henholdsvis vand på begge sider og med luft på begge sider.

Med de i projektet fastlagte forudsætninger og beregningsmetoder kan levetiden af den prøvede liner ekstrapoleres til følgende sammenhænge mellem levetid og eksponeringstemperatur:



Udstyr og metoder giver mulighed for relativt hurtigt og billigt at optimere og sammenligne nye linermaterialer.

Konsekvenserne af temperaturbegrænsninger og temperaturoverskridelser ved en linerkonstruktion kan nu beregnes.

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	INDLEDNING	4
1.1	Baggrund.....	4
1.2	Projektets formål	4
1.3	Projektorganisation.....	5
2	LEVETIDER AF PLASTMATERIALER.....	5
2.1	Ældning af plast.....	5
2.2	Begrebet "levetid"	5
2.3	Ældningsparametre	6
2.4	Sammenhæng mellem struktur og stabilitet	7
2.5	Temperaturens indflydelse på ældningshastigheden	8
2.6	Katalysators indflydelse på ældningshastigheden	9
3	PÅVIRKNINGER AF PP-LINERE I DAMVARMELAGRE	9
3.1	Temperaturbelastninger	9
3.2	Øvrige påvirkninger	9
4	PRØVNINGER AF PP-LINER.....	10
4.1	Karakterisering af PP-liner	10
4.2	Vurdering af ældningsreaktioner	11
4.3	Ældningsprogram for PP-liner.....	11
4.4	Prøvningsmetoder og -udstyr	12
4.5	Bestemmelse af vanddampdiffusionen gennem PP-liner	13
5	ÆLDNINGSRESULTATER.....	14
5.1	Procedure for fastlæggelse af "levetid".....	14
5.2	Fastlæggelse af "levetider" ved de akutte, høje eksponeringstemperaturer	16
6	METODER OG DATA TIL FASTLÆGGELSE AF LEVETIDER VED AKTUELLE TEMPERATURER.....	17
6.1	Beregningsmetoder og -formler	17
6.2	Beregning af konstanterne i Arrhenius's ligning	18
6.3	Beregningseksempel	20
6.4	Vurdering af ældningsresultater	21
6.5	Vurdering af nedbrydningsmåden.....	21
7	DISKUSSION	22
8	KONKLUSION	23
	APPENDIKS	24

1 INDLEDNING

1.1 Baggrund

Geomembraner af plast har vist sig at være en teknisk og økonomisk god løsning; men plastmaterialernes holdbarhed ved det høje temperaturniveau er begrænset, og der er ingen prøvningsmetoder til fastlæggelse af levetiden for den aktuelle belastningstilstand med varmt vand på den ene side og luft på den anden.

Med linere af polypropylen (PP), der nu er tilgængelige på markedet, opnås en god kombination af pris og holdbarhed.

Linere af PP er anvendt til sandlageret ved Marstal Fjernvarme. Foreløbige beregninger har vist, at der her kan opnås tilstrækkelig langtidsholdbarhed ved de aktuelle temperaturbelastninger. Hvis lineren derimod skal anvendes som direkte tætning i et fremtidigt damvarmelager, vil temperaturbelastningerne komme op i et område, hvor PP's levetid reduceres til et kritisk niveau.

Levetider ved høj temperatur er på den ene side kompliceret og uoverskueligt for teknikere, der ikke har arbejdet med plast. På den anden side er det klart og entydigt, når testresultater sammenkædes med ren matematik. Det bruges dagligt som et konkret værktøj hos f.eks. rørproducenterne ved kvalitetsstyring af den løbende produktion.

Der er i dag ikke sikre og troværdige metoder til at fastlægge levetiden ved det høje temperaturniveau på grundlag af korttidstests, og der er ikke nogen dokumentation af levetiderne ved det høje niveau. Dette er en væsentlig barriere for at få fjernvarmeleverandører til at investere i sæsonvarmelagre.

1.2 Projektets formål

For at man ved fuldskalalagre skal kunne basere beregninger af levetider af PP-linere på korttidstests, er der igangsat et prøvningsprogram på Teknologisk Institut med følgende formål:

- at give fremtidige købere af sæsonvarmelagre en dokumenteret sikkerhed for langtidsholdbarheden ved givne temperatursæt
at give Varmelagergruppen et klart og entydigt billede af de forventede levetider og den usikkerhed, der ligger i de konkrete tal
at udarbejde et standardiseret prøvningsprogram til dokumentation af levetider af linere ved det høje temperaturniveau
- at udarbejde et standardiseret prøvningsforløb til kvalitetsstyring hos producenterne og til dokumentation af langtidsholdbarheden af de enkelte leverancer af PP-linere til sæsonvarmelagre
at udarbejde et beregningsgrundlag, så rådgivende ingeniører i projekteringsfasen kan fastlægge forventede levetider ved forskellige sæt af temperaturbelastninger
at skabe grundlag for at arbejde med "temperatursikring" af linere med reduktion af liner-temperaturen f.eks. ved at lægge varmevekslerrørene i en passende afstand fra lineren eller ved køling af randzoner med særlig vekslerkreds
- at skabe grundlag for at sammenligne langtidsholdbarheden af forskellige linerprodukter
at lave indledende målinger af vanddiffusionen ved det aktuelle materiale ved forskellige temperaturniveauer

Der skabes grundlag for at overføre projektets resultater til anvendelse i forbindelse med andre materialer, eksempelvis polybuthylen (PB) og tværbundet polyethylen (PEX).

1.3 Projektorganisation

Projektet finansieres med midler fra Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (UVE) og egenfinansiering fra leverandørerne.

Projektet gennemføres af Søren Pedersen, Teknologisk Institut, Materialeteknologi/Plast og Uffe Nielsen, Plastconsult med Uffe Nielsen som projektleder. Det er gennemført i samarbejde med liner-leverandøren John Hunderup A/S, liner-producenten SGS og råvare-leverandøren Montell. Se adresseliste bilag 2.

2 LEVETIDER AF PLASTMATERIALER

2.1 Ældning af plast

At de fleste materialer med tiden langsomt undergår visse ændringer er et velkendt fænomen. Ved metaller taler man om korrosion, ved mineraler om erosion, ved træ om forrådnelse.

Fælles for sådanne ændringer er, at de foregår forholdsvis langsomt. Ændringens karakter og den hastighed, hvormed ændringerne foregår, bestemmes fortrinsvis af materialets natur og af de omgivelser, som materialet befinder sig i. Som fællesbetegnelse for fænomener af denne karakter anvendes udtrykket "ældning" - et begreb, som er overført fra biologien.

Fysiske og kemiske tilstandsændringer som smeltning, mekanisk brud som følge af overbelastning samt forbrænding kommer således ikke ind under begrebet ældning.

Materialers ældning er en følge af gradvise ændringer i materialernes struktur især knyttet til det molekylære plan.

Som det er tilfældet for andre materialegrupper, undergår gruppen af plastmaterialer også ældning. De enkelte plastarter inden for gruppen udviser dog stærkt indbyrdes afvigende stabilitet, når de udsættes for forskellige tekniske miljøer. Selv inden for den enkelte plastart kan de enkelte typer afvige stærkt fra hinanden med hensyn til stabilitet, fordi man ved tilsætning af visse hjælpestoffer kan forlænge materialernes levetid med en faktor 10, 20 eller måske 50.

For at vurdere et teknisk plastproduktets ydeevne må derfor også ældningsproblematikken bringes ind i billedet.

2.2 Begrebet "levetid"

Begreber som liv og død er inden for biologien nøje knyttet til livsfunktionerne: Liv afløses af død. I den sammenhæng får begrebet "levetid" en eksakt betydning.

Set ud fra en teknisk synsvinkel er det ikke muligt at definere et materiales "død". På det tekniske plan kan man derimod sige, at "materiale døden" indtræder i det øjeblik, hvor

materialet har ændret sig i en sådan grad, at det ikke længere er i stand til at sikre, at produktet kan udøve de funktioner, som det er tiltænkt. Derfor opererer man også på det tekniske plan med begrebet "levetid" i betydningen "funktionstid" eller "brugstid".

For konstruktøren er opgaven at kunne sandsynliggøre, hvor lang "levetid" - i betydningen "brugstid" - et givet plastprodukt kan forventes at få, når det - trods ældning - fortsat skal være funktionsdueligt under givne tekniske miljøbetingelser. Der vil således ikke være tale om at gribe ind i selve ældningsforløbet, men at finde frem til ældningens konsekvenser for produktet. Ved ældning af et plastprodukt vil der altid være tale om et individuelt samspil mellem materiale og miljø, som der ofte kun kan skaffes klarhed over gennem forsøg.

I denne forbindelse vil levetiden være defineret som den tid, der forløber, inden udgangsværdien af en bestemt materialeegenskab er blevet reduceret til en vilkårligt fastlagt grænseværdi.

Hvilke materialeegenskaber der skal lægges til grund, og hvilke grænseværdier der skal vælges, afhænger af de funktioner, som man har tiltænkt plastproduktet.

Virkingen af de kemiske reaktioner, som ligger til grund for ældningen, giver sig som regel først til kende efter en forholdsvis lang påvirkningstid, der - afhængigt af produktet - kan strække sig fra måneder til mange år.

Dette forhold er imidlertid ikke foreneligt med de krav, som der ofte stilles med hensyn til en hurtig og økonomisk løsning. Derfor søger man som regel tilflugt til forsøg med såkaldt "accelereret ældning" udført under laboratoriemæssige betingelser. De principielle problemer, der opstår i forbindelse hermed, er i første række knyttet til en i mange tilfælde ukendt korrelation mellem nedbrydningshastigheden ved "kunstig" og ved "naturlig" ældning.

Selv om der i litteraturen foreligger et meget stort antal materialedata til belysning af de forskellige former for ældning, vil man alligevel i praksis stå over for flere betydelige vanskeligheder med hensyn til den generelle udnyttelse af sådanne data, da der ofte er specielle faktorer, der skal tages hensyn til.

2.3 Ældningsparametre

De parametre som i særlig grad øver indflydelse på ældningen, kan inddeles i tre hovedgrupper:

- Parametre knyttet til materialet:
Molekylstruktur, materialestruktur, urenheder, additiver
- Parametre knyttet til produktet:
Produktudformning, overfladebeskaffenhed, mekanisk spændingstilstand, sammenkobling med andre materialer
- Parametre knyttet til det tekniske miljø:
Temperatur, luftsammensætning, stråling, kemikalier, opløsningsmidler, spændingsrevneudløsende væsker, mikroorganismer osv.

Samspillet mellem disse parametre er ofte yderst komplekst, da det er mange faktorer, der har indflydelse på levetiden.

I visse tilfælde er karakteren af den samlede påvirkning og den tid, som påvirkningen finder sted i, forholdsvis veldefineret. I andre tilfælde er påvirkningen af meget kompleks karakter, ligesom der kan herske usikkerhed med hensyn til påvirkningstiden.

I tilfælde, hvor der hersker usikkerhed med hensyn til påvirkningstiden, vælger man normalt de betingelser, som er de mest ugunstige for plastmaterialet, f.eks. vedvarende påvirkning, selv om påvirkningen kun finder sted periodevis. Under disse forhold kommer man under alle omstændigheder til at undervurdere plastmaterialets stabilitet.

Når man kender de faktorer, der har indflydelse på ældningsforløbet, har man mulighed for laboratiemæssigt at studere de enkelte nedbrydningsreaktioner hver for sig. For en række reaktioners vedkommende gælder, at det er de samme mekanismer, der ligger til grund for ældning af plastmaterialet, som gælder for omdannelsen af lavmolekylære stoffer med analog molekylstruktur.

Kendskab til mulige typer af reaktioner er nødvendig for kvalitativt at kunne forudsige, hvilke former for ældning der vil ske i molekylstrukturen. I praksis vil der dog ofte være tale om et samspil mellem flere forskellige ældningsfaktorer, der gensidigt øver indflydelse på hinanden. Derved kan den samlede effekt i nogle tilfælde godt blive større, end summen af de enkelte ældningsbidrag er udtryk for.

2.4 Sammenhæng mellem struktur og stabilitet

Accelereret ældning vil være mere eller mindre tvivlsom, hvis man ikke har kendskab til de processer, som foregår i forbindelse med nedbrydningen.

I et kemisk system vil det altid gælde, at der foregår kemiske processer i systemet, indtil man har nået til en tilstand, hvor der er ligevægt i forhold til omgivelserne.

Når man således gennem accelereret prøvning forsøger at fremskynde ældningsprocessen gennem indgreb i de kemiske processer, må det ske på en sådan måde, at man ikke griber ind i de lovmæssigheder, der ligger til grund for processerne. Det karakteristiske ved enhver kemisk grundproces er således en begyndelsestilstand og en sluttetilstand.

For et kemisk system, hvori der ikke hersker ligevægt, gælder således alment, at der vil foregå en vekselvirkning mellem systemet og dets omgivelser, indtil der er indtrådt ligevægt.

De kemiske strukturenheder, der indgår i ethvert plastmateriale, antages under ældning at opføre sig kvalitativt på samme måde - eller tilnærmelsesvis på samme måde - som et lavmolekylært stof med analog sammensætning.

Man kan således forudse, at:

- polyestere og polyamider vil undergå hydrolyse, på samme måde som det almindeligvis er tilfældet for estere og amider
- polyolefiner vil undergå oxidation efter en tilsvarende mekanisme, som gælder for oxidation af alifatiske hydrocarboner
- plastmaterialer, der indeholder ketongrupper, vil kunne undergå fotolyse under påvirkning af ultraviolet lys ved bølglængder af størrelsesordenen 300 nm

Tilsvarende forudsigelser kan gøres for andre polymertyper.

2.5 Temperaturen indflydelse på ældningshastigheden

Den hastighed, hvormed en kemisk ældningsreaktion foregår, vil ud over temperaturen afhænge af:

- Reaktanternes art
Koncentrationen/intensiteten
- Tilstedeværende katalysatorer

Ældning af plast foregår gennem heterogene reaktioner, dvs. reaktioner, hvor reaktanterne befinder sig i hver sin fase. I dette tilfælde med ældning af en PP-liner vil der være tale om en reaktion mellem polymeren og ilt fra luften.

Ud over dette vil der foregå en temperaturafhængig ekstraktion af stabilisatorer fra polypropylen-materialet ud i vandfasen.

Hastigheden ved en heterogen reaktion afhænger både af den kemiske reaktionshastighed og af den hastighed, hvormed reaktanterne tilføres, og reaktionsprodukterne fjernes. Ofte er det denne diffusionsproces, der er den langsomste og dermed den hastighedsbestemmende.

Ældningshastighedens temperaturafhængighed kan ofte udtrykkes ved Arrhenius's ligning, idet der mellem hastighedskonstanten, k , og den absolutte temperatur, T , forudsættes følgende relation:

$$k = A \cdot e^{\frac{E_A}{RT}}$$

hvor A er en konstant, der er karakteristisk for den pågældende reaktion, R er gaskonstanten, og E_A er reaktionens aktiveringsenergi.

Denne ligning kan omskrives til

$$\ln k = \ln A - E_A/RT$$

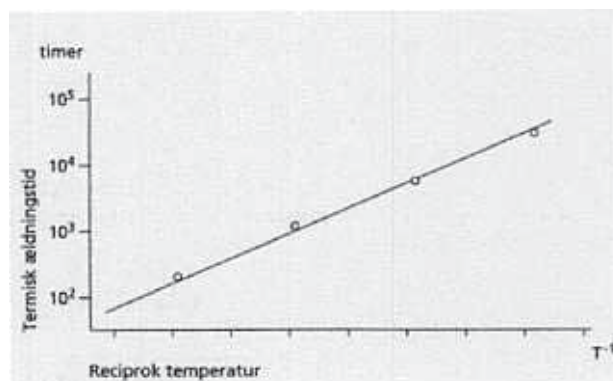
Hvis A og E_A kan betragtes som værende uafhængige af temperaturen, vil der være en lineær afhængighed mellem logaritmen til k og $1/T$. Arrhenius's ligning kan derfor ofte anvendes i forbindelse med forudsigelse af et plastmateriales levetid ved temperaturer lavere end ældningstemperaturerne ved den accelerede ældning.

Konstanterne A og E_A kan normalt kun betragtes som værende tilnærmelsesvis uafhængige af temperaturen, så længe plastmaterialets tilstand ikke ændres, dvs. så længe glasovergangstemperaturen ikke overskrides, eller materialet ikke begynder at smelte.

Figur 1 er en afbildning af en Arrhenius-ligning.

Ved mange ældningsreaktioner vil man opleve, at levetiden ændres med en faktor ca. 2, når temperaturen ændres 10 °C; dvs. at levetiden halveres ved en temperaturstigning på 10 °C.

I visse tilfælde har man dog en ganske anden temperaturafhængighed, idet ældningshastigheden forøges meget kraftigt, hvis temperaturen er over en bestemt værdi. I sådanne tilfælde kan Arrhenius's ligning ikke anvendes, og der må findes en anden sammenhæng mellem levetid og temperatur.



Figur 1 Afbildning af en Arrhenius-ligning

2.6 Katalysators indflydelse på ældningshastigheden

Hastigheden af en kemisk reaktion forøges tilsyneladende ved den blotte tilstedeværelse af visse stoffer. Dette fænomen betegnes som katalyse.

En katalysator er altså et stof, der medfører en forøgelse af hastigheden af en kemisk reaktion, uden at stoffet selv forbruges. En katalysators virkning beror på, at en reaktion, der har stor aktiveringsenergi, deles op i en række trin-reaktioner, som hver for sig har mindre aktiveringsenergi. En relativt lille formindskelse af aktiveringsenergien kan betyde en væsentlig forøgelse af reaktionshastigheden.

I forbindelse med ældning af polypropylen i vandigt miljø kan det ikke udelukkes, at nogle metalioner f.eks. jern, kobber eller aluminium kan virke som katalysatorer. Undertiden virker et reaktionsprodukt som katalysator; man taler da om autokatalyse.

3 PÅVIRKNINGER AF PP-LINERE I DAMVARMELAGRE

3.1 Temperaturbelastninger

De påvirkninger linere i et damvarmelager udsættes for, er først og fremmest temperaturbelastning op til ca. 80 °C. Det specielle ved disse påvirkninger er, at der er varm luft på den ene side af lineren og varmt vand på den anden. Temperaturen af dette vand varierer over året med en rytme, således at relativt høje temperaturer opnås i august og september og lave temperaturer i februar og marts.

3.2 Øvrige påvirkninger

Levetiden af PP mindskes med øget mekanisk spænding. Selvom der uundgåeligt vil dannes spændinger og deformationer som følge af sætninger i underlaget, regnes der som udgangspunkt ikke med mekaniske belastninger og deformationer i driftsfasen.

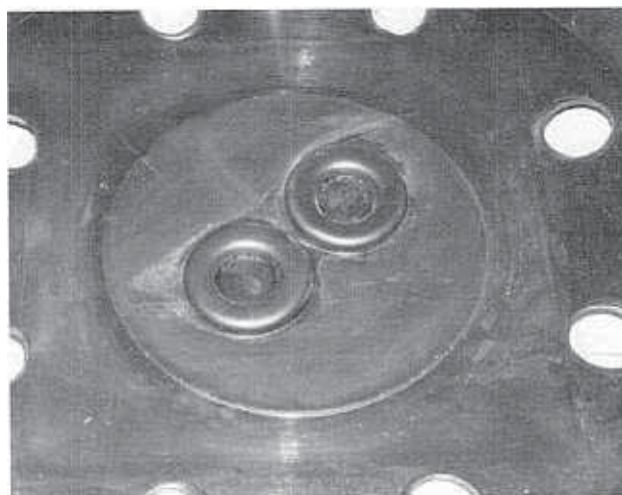
Levetider ved forskellige spændingsniveauer kan fastlægges ved langtidsprøvning; men omkostningerne ved et sådant prøvningsprogram vil være helt ude af proportioner, når man alligevel ikke har nogle konkrete spændingstilstande at forholde sig til.

Som en "blød landing" på denne problemstilling blev det i samråd med Mats Ifwarson, Studsvik Polymer, besluttet at lave prøvninger med den udefinerlige spændingstilstand, der opnås ved at lægge en metalring mellem liner og prøveværktøj, som det er vist i figur 2.

Da spændinger i en liner i drift er svære at forudkalkulere, må man nøjes med at foreskrive, *"at lineren skal indbygges på en sådan måde, at den i størst muligt omfang forbliver spændingsfri i hele dens driftsperiode"*.

På den udvendige side vil lineren blive påvirket af luftens ilt og indvendigt af mindre specifikke påvirkningsparametre fra vandet. Disse påvirkninger kan f.eks. være udvaskning af additiver, hydrolyse af additiver samt påvirkning fra metalioner opløst i vandet.

Påvirkning af sollys anses kun for at være et problem i etableringsfasen.



Figur 2 Indlagte 3 mm tykke metalringe med yderdiameter 30 mm og hul diameter 18 mm

4 PRØVNINGER AF PP-LINER

4.1 Karakterisering af PP-liner

For at kunne fastlægge den bedst mulige plan for accelereret ældning, er det nødvendigt at have et vist kendskab til det materiale, lineren er fremstillet af. For at få dette kendskab er der foretaget en analyse af den aktuelle liner.

Infrarød spektroskopisk analyse (FTIR) viser, at lineren kan karakteriseres som en polypropylen compound med et væsentligt indhold af ethylen.

Ved termisk analyse (DSC) ses smelte-peaks ved ca. 120 °C og ca. 140 °C. Dette passer godt med resultaterne af FTIR-analysen, da ren polyethylen har en smelte-peak ved ca. 120 °C og ren polypropylen ved ca. 150 °C.

Termogravimetrisk analyse (TG) viser, at linermaterialet er iblandet ca. 1,8 % carbonblack (kørnøg).

Udskrift af FTIR-analysen og af DSC-analysen er vist på bilagene 3 og 4.

4.2 Vurdering af ældningsreaktioner

Den overordnede nedbrydningsreaktion i polyolefiner, f.eks. PE og PP, er oxidation. Det betyder, at der skal være ilt til stede opløst i polymeren, før der ved temperaturer under ca. 150 °C kan optræde reaktioner, der fører til brud i kædemolekyler og dermed til de ældningsfænomener, man normalt observerer som en reduktion af materialets mekaniske egenskaber.

De påvirkninger, der fører til nedbrydning af polyolefiner, er først og fremmest forhøjet temperatur og påvirkning af UV-lys. Tilstedeværelsen af metalioner kan i visse tilfælde betyde forøget nedbrydningshastighed.

Kemiske stoffer der kan påvirke og nedbryde de stabilisatorer, der er helt nødvendige for at polyolefiner kan have god bestandighed mod varmepåvirkning og UV-lys, kan også have en indirekte nedbrydende effekt, da de fører til et for hurtigt forbrug af stabilisatorer.

I forbindelse med damvarmelagre er eksponering for UV-lys kun mulig i etableringsfasen. Da lineren er lysstabiliseret til anvendelse i det fri, tages der derfor ikke hensyn til denne nedbrydningsform i dette ældningsprogram.

De relevante påvirkninger i denne forbindelse må derfor være forhøjet temperatur og ensidig kontakt med vand, således at der er mulighed for udvaskning af stabilisatorer fra den ene side samtidig med normal luftpåvirkning på den anden side.

4.3 Ældningsprogram for PP-liner

Da ældningspåvirkningerne af PP-linere er luft på den ene side og vand på den anden side, anvendes et ældningsprogram, der under de givne omstændigheder bedst muligt modsvarer de faktiske forhold.

Da fastlæggelse af levetider ud fra korttidsprøvninger er vanskeligt, har ældningsprogrammet været drøftet på møder med specialister fra råvareleverandøren Montell, linerproducenten SGS og Mats Ifwarson fra Studsvik Polymer. Selvom der var en sund kritisk vurdering af prøvningsprogrammet, var man enige om, at de påtænkte prøvninger med det specialkonstruerede prøvningsværktøj (ældningscelle), vist på figur 3, måtte være den rigtige vej fremad.

Det tilhørende ældningsprogram er vist i nedenstående tabel 1.

Tabel 1 Ældningsprogrammet					
Eksponerings- temperatur [°C]	Eksponerings- udstyr	Ældningsmåde		Registreringsparameter	
		Luft – luft	Luft – vand	Trækprøvning	FTIR
100	Ovn	x	x 5 celler	x	x
110	Ovn	x	x 5 celler	x	x
120	Ovn	x	x 5 celler	x	x

Trækprøvningsresultaterne anvendes hovedsageligt til vurdering af nedbrydningstidspunktet. Resultater af FTIR-analysen anvendes til vurdering af nedbrydningsmekanismerne.

Da PP-linermaterialet er en propylen/ethylen compound, er det et meget højt temperaturniveau der er valgt i ældningsprogrammet. Dette skyldes, at der ikke er den nødvendige tid til at ælde materialet ved lavere temperatur, idet ældningstiden ved temperaturer under 110°C er vurderet til at være flere år.

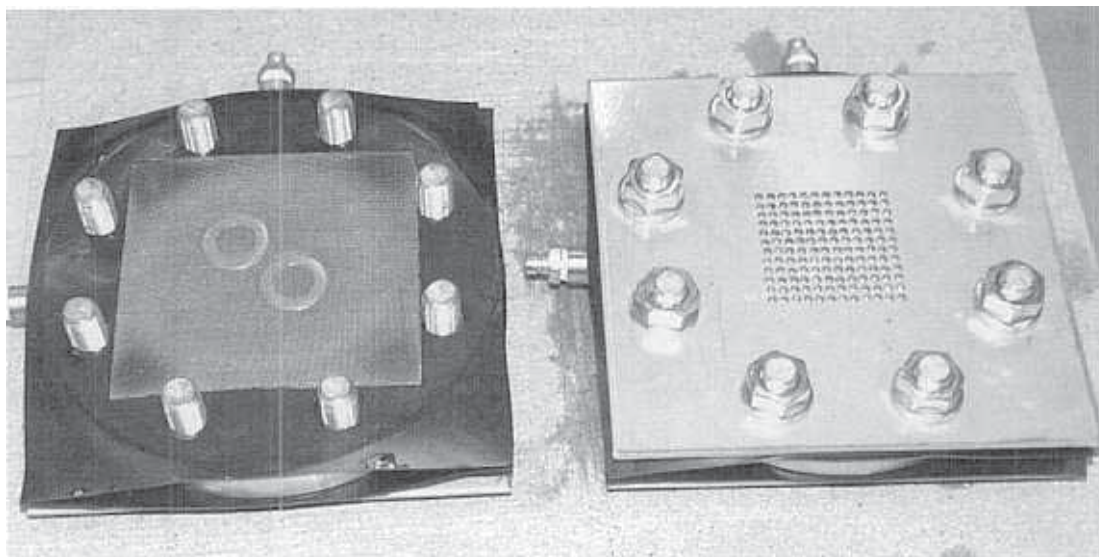
Ved at anvende det høje temperaturniveau, der er nødvendigt, hvis der skal komme brugbare resultater efter en ca. 1 års eksponering, må der dog forventes en lidt større usikkerhed, end hvis der anvendes lavere temperaturer.

4.4 Prøvningsmetoder og -udstyr

Det helt centrale udstyr til at gennemføre det fastsatte ældningsprogram er ”ældningsceller”, hvor der kan være vand på den ene side af lineren og luft på den anden side, samtidigt med at temperaturen er op til 120 °C, hvilket betyder, at der er overtryk i ”ældningscellen”.

For at tilgodese ældningsbetingelserne blev der udviklet en ældningscelle i rustfast stål. Denne er vist i figur 3. For at hindre lineren i at blive trykket ud gennem lufthullerne i yderpladerne var det nødvendigt at lægge et tyndt net af rustfast stål mellem lineren og yderpladerne.

For at kunne skifte vand under ældningsforsøgene er der i hver celle monteret til- og gangsstudse med ventiler. Vand blev skiftet manuelt en gang ugentligt.



Figur 3 Ældningscelle monteret med PP-liner

De færdigmonterede ældningsceller blev anbragt i ovne ved henholdsvis 100 °C, 110 °C og 120 °C. Temperaturen i ovnene kunne styres inden for $\pm 1^\circ\text{C}$.

Med passende intervaller blev der udtaget ældningsceller til vurdering af PP-linerens tilstand.

Efter fastlæggelse af ældningstider af både deformeret og ikke deformeret liner ved de tre temperaturer blev dataene behandlet med udgangspunkt i Arrhenius-ligningen for at fremskaffe et beregningsværktøj, der kan anvendes til den bedst mulige ekstrapolation til lavere temperaturer.

4.5 Bestemmelse af vanddampdiffusionen gennem PP-liner

Diffusionen af vanddamp gennem PP-lineren blev bestemt for at kunne vurdere, hvor meget vand der diffunderer gennem den ved forskellige temperaturer. Bestemmelsen blev derfor foretaget ved 70 °C, ved 80 °C og ved 90 °C ved en relativ luftfugtighed på 80 % RH ved alle temperaturerne.

Diffusionsbestemmelserne blev gennemført i henhold til ASTM E96 – 95 (tør kop). Resultaterne er vist i tabel 2. PP-linerens tykkelse var 1,6 mm.

Tabel 2 Vanddampdiffusionshastigheden gennem PP-lineren	
Temperatur [°C]	Vanddampdiffusionshastighed [g/m ² pr. døgn]
70	6,1
80	12,2
90	20,1

Hvert af de anførte resultater er gennemsnit af 5 enkeltresultater. Spredningen vurderes at være $\pm 10\%$ af de anførte værdier.

5 ÆLDNINGRESULTATER

5.1 Procedure for fastlæggelse af "levetid"

Ældningen af PP-lineren blev, som beskrevet i ældningsprogrammet, undersøgt ved at bestemme trækstyrke og brudtøjning som funktion af eksponeringstiden.

Levetiden af PP-lineren uden deformation blev vurderet ud fra de eksponeringstider, efter hvilke brudstyrken og brudtøjningen var reduceret til under 50 % af udgangsværdierne.

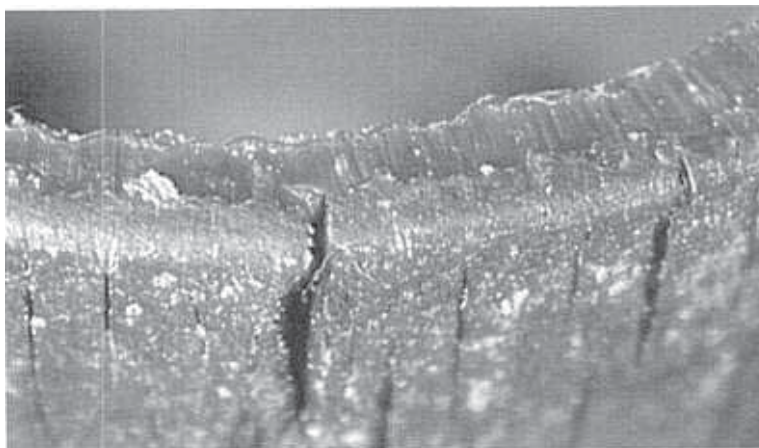
Levetiden af PP-lineren med deformation blev fastlagt som eksponeringstiden indtil lineren blev utæt ved deformationerne.

Fastlæggelsen af levetiden af PP-lineren uden deformation var dog ikke uden problemer, idet nedbrydningen ikke foregik homogent. Nedbrydningen startede på den vandeksponerede side og bredte sig herfra gennem lineren. Det betød, at den del af materialet, der vendte ud mod luften, kunne være meget lidt påvirket, samtidigt med at den del af materialet, der vendte mod vand, var totalt nedbrudt.

Denne nedbrydningsform betyder, at linerens levetid vil være stærkt afhængig af godstykkelsen, idet nedbrydningen, som før nævnt, er en kombination af udvaskning af stabilisatorer og iltpermeation gennem lineren.

Den endelige fastlæggelse af "levetiden" ud fra forsøgsresultaterne indeholder derfor nogen vurdering og er kun gældende for en linertykkelse på ca. 1,6 mm.

Foto af for- og bagside af "nedbrudt" liner er vist på figur 4.



Figur 4 Tværsnit af nedbrudt PP-liner; bemærk den inhomogene nedbrydning startende fra vandsiden (vandsiden er forrest i billedet).

Resultater af bestemmelse af mekaniske egenskaber

Bestemmelsen af mekaniske egenskaber blev foretaget både på materiale uden deformation under ældningsforløbet og på materiale med deformation.

Trækprøvningen blev foretaget iht. i ISO 527-3, 1993, men på prøvelegemer iht. DIN 53448, form A, idet prøvelegeme-dimensionerne herfra passede godt til det eksponerede areal.

Deformationshastigheden ved trækprøvningen var 200 mm pr. minut, Brudstyrke, brudtøjning og elasticitetsmodul blev beregnet.

PP-liner uden deformation gav de resultater, der er vist i tabel 3.

Tabel 3 Mekaniske egenskaber af PP-liner uden deformation				
Mærkning	Temperatur [°C]	Brudstyrke [MPa]	Brudtøjning [%]	E-modul, [MPa]
Referencemateriale - på tværs af produktionsretningen	23	19,3	1300	64
Referencemateriale - parallelt med produktionsretningen	23	19,9	1500	70
Eksposering 16 d	120	13,5	750	32
Eksposering 30 d	120	10,5 (6,3 - 14,6)	520 (115-920)	47
Eksposering 56 d	120	4,0	38	26
Eksposering 16 d	110	15,7	1000	41
Eksposering 60 d	110	12,7	820	51
Eksposering 78 d	110	5,1	220	39
Eksposering 16 d	100	16,5	1000	37
Eksposering 110 d	100	18,6	1150	37
Eksposering 120 d	100	15,2	1150	29
Eksposering 140 d	100	7,4	150	55
Eksposering 180 d	100	4,3	47	39

PP-liner med deformation gav de resultater, der er vist i tabel 4.

Tabel 4 Mekaniske egenskaber af PP-liner med deformation				
Mærkning	Temperatur [°C]	Brudstyrke [MPa]	Brudtøjning [%]	E-modul [MPa]
Referencemateriale - på tværs af produktionsretningen	23	19,3	1300	64
Referencemateriale - parallelt med produktionsretningen	23	19,9	1500	70
Eksposering 16 d	120	9,2	280	17
Eksposering 30 d	120	6,0	160	8
Utæt efter 30 døgn ved 120°C				
Eksposering 16 d	110	11,8	470	22
Eksposering 60 d	110	4,0	100	16
Utæt efter 60 døgn ved 110°C				
Eksposering 16 d	100	11,8	450	24
Eksposering 90 d	100	9,1	360	23
Eksposering 120 d	100	7,2	140	23,3
Utæt efter 160 døgn ved 100°C				

5.2 Fastlæggelse af "levetider" ved de akutte, høje eksponeringstemperaturer

Fastlæggelsen af "levetider" er lidt problematisk, da ældningen af PP- linermaterialet ,som nævnt i afsnit 5.1, ikke er homogen, men er langt hurtigst på den indvendige side mod vandet.

Nedenstående "levetider" er ud fra de fremkomne resultater fastsat at være gældende for den ældede PP-liner.

Tabel 5 "Levetider" beregnet ud fra accelereret ældning		
Eksponeringsstemperatur [°C]	"Levetid" af liner uden deformation [døgn]	"Levetid" af liner med deformation [døgn]
120	40	30
110	78	60
100	150	120

Usikkerheden på de anførte tider vurderes at være $\pm 10\%$.

6 METODER OG DATA TIL FASTLÆGGELSE AF LEVETIDER VED AKTUELLE TEMPERATURER

6.1 Beregningsmetoder og -formler

Ved beregning af aktuelle levetider ud fra data fra accelereret ældning, hvor temperaturen indgår som en væsentlig faktor, er det oftest bedst at anvende Arrhenius-ligningen, som er beskrevet i afsnit 2. Denne ligning kan dog ikke umiddelbart anvendes til beregning af aktuelle levetider, hvor der er varierende temperatur som ved et sæsonvarmelager.

Til beregning af levetider i sådanne situationer er der i standarden DS/EN 253, der omhandler præisolerede fjernvarmerør til lægning i jord, et formelsæt, der anvendes i situationer med varierende temperatur. Dette formelsæt har følgende udseende.

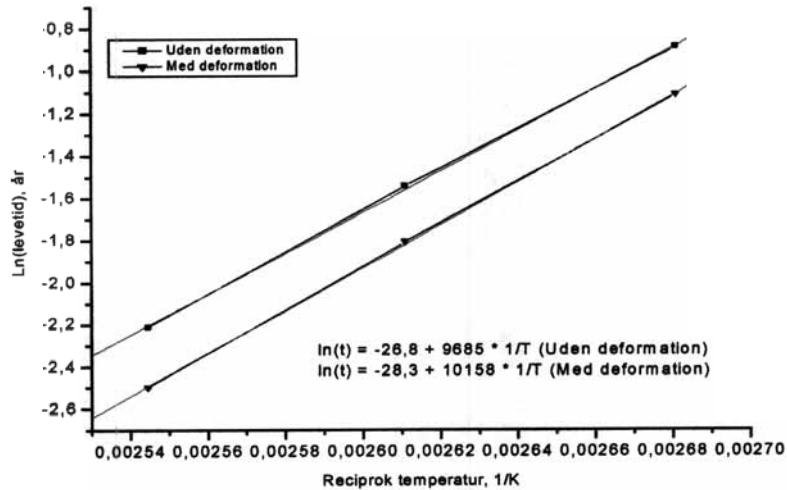
$$L = \left(\frac{t_1}{L_1} + \frac{t_2}{L_2} + \dots + \frac{t_n}{L_n} \right)^{-1}$$

hvor

- L = Forventet levetid i år af systemet ved aktuelle temperaturer
- L₁ = Forventet levetid i år af systemet ved en fast temperatur, som kan være beregnet ud fra Arrhenius's ligning
- L₂ = Som L₁, men ved en anden temperatur.
- t₁ = Årlig tidsfraktion, hvor systemet er ved den temperatur, der svarer til L₁
- t₂ = Årlig tidsfraktion, hvor systemet er ved den temperatur, der svarer til L₂

6.2 Beregning af konstanterne i Arrhenius's ligning

Ved at afbilde de fundne levetider, anført i tabel 5, efter Arrhenius fås det diagram, der er vist på figur 5, hvor den reciproke værdi af eksponeringstemperaturen i Kelvin er afsat på x-aksen og logaritmen til ældningstiden i år på y-aksen.



Figur 5 Arrhenius-afbildning af resultater fra ældningstest af PP-liner

På grundlag af denne afbildning kan følgende ligninger opstilles til beregning af logaritmen af levetiden som funktion af den reciproke værdi af temperaturen i Kelvin for henholdsvis ikke deformeret og deformeret PP-liner.

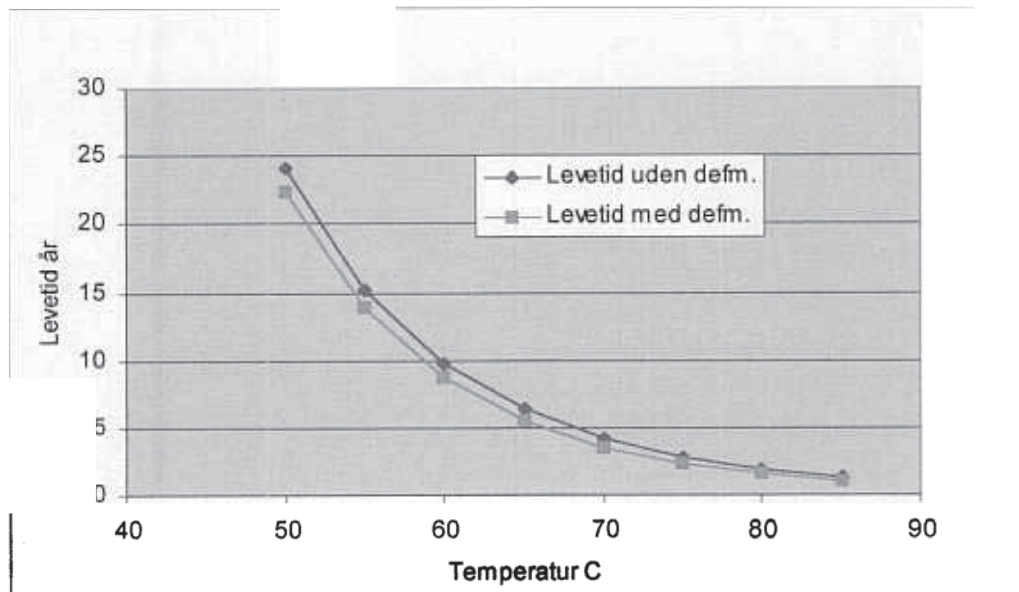
Ligning for PP-liner uden deformationer: $\ln(t) = -26,8 + 9685 \cdot 1/T$

Ligning for PP-liner med deformationer: $\ln(t) = -28,3 + 10158 \cdot 1/T$

Herudfra kan følgende sammenhænge mellem levetid og temperatur beregnes.

Tabel 6		
Beregnet levetid [år]		
Eksponeringsstemperatur [°C]	Liner uden deformation	Liner med deformation
85	1,3	1,1
80	1,9	1,6
75	2,8	2,4
70	4,2	3,7
65	6,4	5,8
60	9,8	9,1
55	15,3	14,4
50	24,2	23,3

En grafisk afbildning af disse værdier ses på figur 6.



Figur 6 Levetid beregnet på grundlag af Arrhenius' ligninger for PP-liner

De viste levetidskurver kan med god tilnærmelse udtrykkes ved følgende ikke logaritmiske ligninger:

Ligning for PP-liner uden deformationer:

$$y = -0,0007586 \cdot x^3 + 0,1785 \cdot x^2 - 14,15 \cdot x + 380,1$$

Ligning for PP-liner med deformationer:

$$y = -0,0007574 \cdot x^3 + 0,1773 \cdot x^2 - 13,96 \cdot x + 371,8$$

y = levetid i år

x = temperatur, °C

6.3 Beregningseksempel

I et sæsonvarmelager er der estimeret vandtemperaturer som funktion af årstiden som vist i tabel 7, der også indeholder et eksempel på beregning af levetid af en ikke deformeret PP-liner.

Tabel 7				
Måned	Gennemsnitlig vandtemperatur [°C].	Årlig tidsfraktion, t_n	Levetid ved temperatur, L_n	t_n/L_n
Januar	53	0.0833	18.6	0.004474
Februar	45	0.0833	35.7	0.002334
Marts	42	0.0833	44.5	0.001873
April	45	0.0833	35.7	0.002334
Maj	62	0.0833	8.2	0.01021
Juni	68	0.0833	4.8	0.01752
Juli	72	0.0833	3.5	0.02381
August	74	0.0833	3.1	0.02719
September	74	0.0833	3.1	0.02719
Oktober	73	0.0833	3.3	0.02549
November	68	0.0833	4.8	0.01752
December	60	0.0833	9.8	0.008463
Summation t_n/L_n				0.16841

Den summerede levetid er den reciprokke værdi 0.16841 altså en levetid på 5,9 år.

Hvis den tilsvarende beregning foretages med dataene for deformeret liner, fås en levetid på 5,3 år.

6.4 Vurdering af ældningsresultater

Som tidligere nævnt, er der ved denne accelererede ældning anvendt relativt høje temperaturer, og man kan derfor med god grund stille spørgsmåltegn ved, om de fremkomne resultater er troværdige.

Arrhenius-afbildningen af sammenhørende værdier af levetider og ældningstemperaturer for liner både med og uden deformation giver næsten parallelle rette linier. Dette indikerer at nedbrydningsmekanismen er ens ved de anvendte temperaturer, og at levetiden er en funktion af linertykkelsen.

Vi vurderer derfor, at resultaterne må betragtes som værende troværdige, og at det er acceptabelt at ekstrapolere ud fra dem til levetidsvurderinger ved "normale" brugstemperaturer.

Ud fra resultaterne ses der umiddelbart to muligheder for at forøge levetiden. Den ene er at anvende tykkere liner. Den anden, der er at foretrække, er at anvende et stabilisatorsystem, der vanskeligere lader sig udvaske eller nedbryde af varmt vand.

6.5 Vurdering af nedbrydningsmåden

Det er tidligere beskrevet og vist med foto, at nedbrydningen af lineren i de anvendte ældningsceller starter fra vandsiden og udvikler sig som en front gennem lineren.

At nedbrydningen foregår på denne måde, kan som nævnt skyldes, at stabilisatorer udvaskes eller nedbrydes af det varme vand. Nedbrydningen af PP-lineren, der nedenfor påvises at være en oxidation, kan næppe være forårsaget af den iltmængde, der er i vandet, da den er relativt lav i forhold til iltmængden i luften. Oxidationen af PP-lineren er snarere forårsaget af den ilt, der fra luftsiden kan diffundere ind i lineren.

Under vanddampdiffusionsmålingerne blev der efter relativt kort tid observeret en hvidlig, pulveragtig belægning udvendigt på PP-lineren. Det indikerer, at der er komponenter i stabilisatorsystemet, der for let diffunderer ud af lineren, når den anvendes ved forhøjet temperatur og måske også i fugtigt miljø.

Ved en orienterende IR-analyse blev det udsvedte materiale identificeret som en phenolisk antioxidant sandsynligvis med relativt lav molekylmasse.

Af orienterende IR-analyser ses, at når lineren er i en tilstand som er vist på fotoet figur 4, er PP-materialet på vandsiden kraftigt oxideret og på luftsiden noget mindre oxideret.

Ud fra den orienterende IR-analyse vurderer vi tillige, at der er sket oxidation både i materialets "propylen"-fraktion og i dets "ethylen"-fraktion.

Ved den del af lineren, der ikke har været i kontakt med vand, men kun med luft, ses kun en ændring, der kan tolkes som tab af stabilisatorer - ikke af egentlig oxidation.

Ovenstående peger altså på en nedbrydningsproces, hvor stabilisatorer på vandsiden udvaskes fra grundmaterialet, som herefter nedbrydes af den ilt, der diffunderer ind fra luftsiden.

Nedbrydningshastigheden må således kunne reduceres ved en anden stabilisatorløsning eller ved at øge godstykkelsen.

Som bilag er vedlagt nedenstående følgende FTIR-spektre anvendt ved vurderingen af medbrydningsmåden:

Bilag 5: Udgangsmateriale før ældning

Bilag 6: Materiale nedbrudt fra vandsiden efter ældning i 180 døgn ved 100°C

Bilag 7: Materiale nedbrudt fra luftsiden efter ældning i 180 døgn ved 100°C

Bilag 8: Materiale kun påvirket af luft efter ældning i 180 døgn ved 100°C

Bilag 9: Materiale udsvedt til luftsiden fra PP-liner anvendt til vanddampdiffusionsmåling ved 70°C

7 DISKUSSION

A: Den relativt korte levetid kan give anledning til at stille spørgsmålet, om polypropylen stadig er det bedste valg.

Med de relativt korte levetider af den anvendte polypropylen liner må andre materialemuligheder undersøges snarest. Ud over polypropylen med bedre stabilisatorer drejer det sig om polybutylen (PB) og tværbundet polyethylen (PEX), der begge anvendes til fjernvarmerør, hvor belastningssituationen er den samme med varmt vand på den ene side og luft på den anden. PB kan svejses.

Under projektet har mulighederne for at anvende PEX været drøftet med bl.a. Mats Ifwarson fra Studsvik Polymer. Hvis man blandt de metoder, der anvendes til tværbinding af PE, anvender peroxid-initiering, kan der fremstilles en liner af PE, der kan svejses og senere tværbindes til PEX med varmt vand (se bilag 1). Det er en mulighed, der bør undersøges sammen med en producent af geomembraner.

B: Med det aktuelle nedbrydningsforløb vil levetiden kunne forbedres med diffusionstætte barrierer og ved at øge godstykkelsen.

I Marstallageret er der anvendt en 2,5 mm tyk topmembran for at klarlægge mulighederne for at arbejde med denne godstykkelse i praksis. Der viste sig ingen problemer med at håndtere og svejse den tykke membran. Det er altså en forbedringsmulighed, der uden videre vil kunne realiseres.

Med produktionsanlæg der anvendes til produktion af geomembraner, kan der i en vis udstrækning produceres flerlags-løsninger. Der er altså en teoretisk mulighed for at indbygge barrierer, hvilket må drøftes med relevante producenter.

C: Vil plastløsningerne i den sidste ende være gode nok i sammenligning med dyrere stålløsninger?

En negativ overraskelse ved undersøgelsen er, at levetiden ved den aktuelle belastningstilstand er kortere end forventet. Ved et gruslager vil problematikken kunne håndteres ved at have et større isolerende gruslag mellem varmevekslerør og liner eller ved at tappe fjernvarmen fra vekslerørerne i randzonen.

En tilsvarende løsning kan bruges ved bundlineren i et damvarmelager, hvor lineren dækkes af et isolerende lag af ral med PEX-rør til køling af randzonen. Til løsninger med flydende låg vil der imidlertid være behov for linere med en bedre varmebestandighed.

Det bør bemærkes, at man efter erfaringerne fra Marstal og udlægningsforsøg med konstruktioner med flydende låg nu må betragte levetidsproblematikken som det eneste udestående problem, for at økonomiske og holdbare sæsonvarmelagre, baseret på plastbaserede linerkonstruktioner, kan realiseres.

Vi er inde i et udviklingsforløb, hvor det ikke er de tekniske barrierer, der er afgørende. Med dette projekt har man fået et vigtigt værktøj til at vurdere nye løsninger. Med projektgruppen fra det aktuelle projekt vil der herefter være mulighed for at gå videre med andre materialemuligheder og således rokke ved nogle af de barrierer, der er i et udviklingsforløb med plast, så det er vigtigt nu at holde fast i en udvikling med plastbaserede løsninger.

8 KONKLUSION

Prøvningsmetoder og -udstyr har vist sig at være hensigtsmæssige, og der er opnået overensstemmende, troværdige prøvningsresultater.

Den aktuelle belastning med vand på den ene side og luft på den anden har vist sig at være hård for den aktuelle liner, idet den afgørende nedbrydning sker, ved at stabilisatorer udvaskes, og polymeren herefter nedbrydes af ilt udefra. Prøvninger med luft på begge sider og med vand på begge sider giver længere levetider.

Prøvningerne er forløbet hurtigere end forventet uden væsentlige, uforudsete problemer. Levetiden er kortere end ventet; men det vurderes, at man med en anden stabilisatorløsning vil kunne opnå længere levetider.

Levetiden af den afprøvede liner er beregnet til 5,9 år med det temperatursæt, der er forudsat ved Marstal-lageret.

Undersøgelserne viser, at deformationer i lineren ikke i sig selv medfører, at holdbarheden reduceres; men at reduktionen udelukkende svarer til den formindskelse af linerens tykkelse, der følger af deformationen.

Udstyr og metoder giver mulighed for relativt hurtigt og billigt at optimere og sammenligne nye linermaterialer.

Konsekvenserne af temperaturbegrænsninger og temperaturoverskridelser ved en linerkonstruktion kan nu beregnes.

Appendiks

Evaluering af Rapporten "Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre".

Energistyrelsens Udviklingsprogram for vedvarende energi, j.nr. 551181/97.

Resultaterne af den gennemførte levetidsundersøgelse viste, at levetiderne for den undersøgte PP-liner var kortere end umiddelbart forventet.

På dette grundlag blev det besluttet at afholde et evalueringsmøde, hvor de involverede parter fik mulighed for at diskutere resultaterne og evt. komme med indvendinger eller korrektioner. Som uvildig ekspert deltog Mats Ifwarson Bodycote Polymer AB (Tidligere Studsvik Polymer).

De øvrige deltagere var:

John Hunderup	John Hunderup Import & Export	(JH)
David Etter	GSE Lining Technologi GmbH	(DE)
Sean Comerford	Montell UK	(SC)
Karsten Duer	Danmarks Tekniske Universitet	(KD)
Uffe Nielsen	Tidligere Plastconsult	(UN)
Søren Pedersen	Teknologisk Institut	(SP)

Mødet blev gennemført den 11. maj 2000 på Teknologisk Institut i Tåstrup. Ved dette møde blev der udarbejdet nedenstående mødereferat og herefter også nedenstående handlingsplan.

Sammenfatning af evalueringsmøde samt supplerende bemærkninger.

Som det fremgår af nedenstående referat var der enighed om, at det anvendte ædningsudstyr er væsentligt bedre med hensyn til at give sandfærdige værdier, end hvis ældningen består af en kombination af fuld vand påvirkning og fuld luftpåvirkning.

De tidligere ædningsforsøg har været gennemført med fuld påvirkning af varmt vand og luft, og dette er efter vor vurdering årsagen til, at der tidligere er estimeret relativt lange levetider ved anvendelse som liner i sæsonvarmelagre.

Med hensyn til gennemførelsen af selve testen var den eneste lidt negative bemærkning, at der var anvendt relativt høje temperaturer til polypropylen. Denne indvending var vi ganske enige i, da de høje temperaturer udelukkende var valgt ud fra den ældningstid, der var til rådighed for projektets gennemførelse.

Det viste sig dog lykkeligvis, som det fremgår af rapporten, at det ikke har haft nogen negativ indflydelse på resultatet. Udover dette var der ingen tilkendegivelse om, at resultaterne ikke var troværdige eller om ældningen kunne være gennemført på anden måde.

Den relativ korte levetid ved ældning med varmt vand på den ene side og luft på den anden side kan, ud fra de givne oplysninger, skyldes det valgte stabilisatorsystem.

Det ældede PP-materiale, hvorefter lineren er produceret, er oprindelig udviklet som erstatning for blødgjort PVC. Da der til denne anvendelse ikke stilles særlige krav til termisk stabilisering, er der tilsat et ekstra stabilisatorsystem før PP-linere blev produceret.

Udgangspunktet for denne udvælgelse var, at stabiliseringssystemet skulle være hydrolysebestandig, der var dog ingen der havde forventet, at det tilsyneladende migrerede så hurtigt ud i det varme vand, som tilfældet var.

Både Sean Comerford, Montell, GB og David Etter (DE) GSE Lining Technology, Tyskland var enige om, at det ved fremtidige udviklingsarbejder, hvor der skal tilsættes ekstra stabilisatorer, skulle tages hensyn til migration evt. i samråd med leverandører af stabiliseringssystemer.

Som det fremgår af nedenstående beslutningsreferat var der vilje til stede for at producere prøver af forbedrede PP-linere samt linere i polybutylen, PB, samt i ekstra termisk stabiliseret high density polyethylen, HDPE. Disse linere skulle vurderes af Karsten Duer med hensyn til anlægstekniske forhold.

Ved de linere, der vurderes at være anvendelige, skulle der søges midler til gennemførelse af ældningstest svarende til den gennemførte.

Mødereferat udarbejdet af Søren Pedersen

SP indledte mødet med en kort resume af projektforsøget, da det faktiske forløb var deltagerne bekendt fra skriftligt materiale, tilsendt rapporttekst.

Deltagerne havde ingen væsentlige korrigerende indvendinger til det udførte arbejde. Under fremlæggelsen af projektforsøget supplerede MI med egne erfaringer, dette var meget positivt, da det bidrogte de øvrige deltagere til en bedre forståelse for, hvad der er afgørende faktorer ved den form for påvirkninger, der er i et sæsonvarmelager.

SP bemærkede, at det gav DE og SC en bedre forståelse af, hvilke krav der må sættes til et stabilisatorsystemet i linermateriale anvendt til sæsonvarmelagre. DE oplyste, at der i forbindelse med den afprøvede PP-liner ikke havde været kontakt med leverandører af stabilisatorsystemer, men man havde primært fokuseret på systemer, der ikke kunne hydrolyseres. Ved en evt. fremtidig PP-liner ville de, DE og SC, rådføre sig med leverandøren af stabiliseringssystemer.

Udover forhold, der vedrørte den eksisterende PP-liner og de tilhørende resultater, viste MI eksempler på ældningsforløb, der indikerede, at det burde være muligt at opnå tilstrækkelig stabilitet med PP (polypropylen), men også og måske i højere grad med PB (polybutylen). PB er dog væsentlig dyrere end PP, men det betyder måske mindre i den totale sammenhæng.

Efter denne gennemgang var der en bred debat om modificeret PP materiale og om PP eller modificeret PP var det rette valg eller om PB var et bedre valg.

MI var fortalende for PB (PB 4137), men DE var i tvivl om det var muligt at producere PB folier på deres procesudstyr. SC lovede at sende PB materiale til GSE, så problemet kunne afklares.

UN syntes også, at PB burde prøves, da der ellers fremover stadig vil være et tilbagevendende spørgsmål om PB var bedre end PP til det aktuelle formål. SC var dog optimistisk med hensyn til at finde en anden PP compound, der bedre modstod de faktiske påvirkninger.

DE vurderede at der kunne foreligge PB linere i slutningen af juni (hvis produktion var mulig, dette måtte dog komme an på en prøve).

KD fremførte vigtigheden af at finde et materiale, der kunne modstå påvirkningerne, da der set fra hans synspunkt er et stort potentiale for varmelagre, ikke kun i Danmark, men i hele Europa.

KD var meget interesseret i at prøve en PB liner, således at svejsebarhed og andre anlægstekniske forhold kunne vurderes. KD er indstillet på at afvente produktion af nye linere til lågforsøgene på DTU. Flere så en god ide i, at en prøveproduktion blev anvendt og prøvet i et pilotanlæg på DTU. JH ville skrive et "handlings referat". UN skriver, på grundlag af mødets resultater, appendiks til rapporten "Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre". Dette blev senere ændret, så appendiks skrives af Søren Pedersen.

Hvis der fra GSE fremkom linere af PB eller væsentligt forbedrede PP materiale, blev det fra alle sider anført, at disse burde testes med hensyn til levetid, og at Teknologisk Institut (SP) skulle rette henvendelse til Energistyrelsen for at undersøge mulighederne for ansøgning om midler til testens gennemførelse.

Søren Pedersen

Beslutningsreferat af John Hunderup, John Hunderup Import & Export

Opfølgningsmøde på prøvningsprogram

for

fleksibel polypropylen (FPP) membran til sæsonvarmelagre

Deltagere: Sean Comerford (SC) - Montell, GB
David Etter (DE) - GSE Lining Technology, Tyskland
John Hunderup (JH) - John Hunderup Import & Export
Søren Pedersen (SP) - TI Plastteknologi, Taastrup
Uffe Nielsen (UN) - Plastconsult, Egå
Mats Ifwarson (MI) - Bodycote Polymer (tidl. Studsvik Polymer)
Karsten Duer (KD) - DTU, Afd for bygninger og energi

11.maj 2000

Teknologisk Institut, Taastrup

SP gennemgik resultat af prøvningen. Resultat var ikke tilfredsstillende, idet levetiden anses for at være for kort til brug i sæsonvarmelagre. Gruppen diskuterede derfor alternative membranmaterialer, der er mere varmebestandige end FPP. Det drejer sig om PB (polybutylen), PP-R (Random PP) og en varmebestandig HDPE membran.

Montell USA fremstiller allerede PB råvarer. Det aftaltes derfor, at SC arrangerer, at Montell USA sender min. 100 kg PB råvare til GSE Houston, Texas, så der kan udføres prøvekørsler på GSEs pilotanlæg i Houston. SC undersøger samtidig om Montell USA allerede har erfaringer med PB som membranmateriale.

DE vil fremskaffe en speciel stabilisatorpakke til deres HDPE membran, som gør den mere varmebestandig end normalt. GSE, (D eller GB) vil fremstille HDPE membranmateriale, som kan afprøves hos Teknologisk Institut sammen med PB membran fra GSE Houston.

Der forventes, at prøvemembraner kan være klar ultimo juni. Prøvning hos Teknologisk Institut kan så gå i gang umiddelbart derefter.

KD skal i sommer etablere et lille sæsonvarmelager-prøvebassin hos DTU. Hvis prøvemembraner i PB kan produceres og HDPE membraner bliver klar til tiden, vil KD gerne anvende det ene eller begge materialer i sit prøvebassin.

SC forventer afklaring om PB i USA ult. uge 21. DE regner ligeledes med at have en afklaring ult. uge 21.

Bilag 2

Testrapport fra ældningsforsøg af 2 HDPE-linere,
Teknologisk Institut, 2004

UVE-projekt "Aktiviteter vedrørende udvikling af plastlinere til sæsonvarmelagre"
ENS. J. nr. 51181/01-0065

Fastlæggelse
af levetider for
2 HDPE
plastlinere til
sæsonvarmelagre



Sammenfatning

Ældningstesten er gennemført på to typer HDPE linere til sæsonvarmelagre benævnt følgende:

”GSE HDPE Geomembran”, denne er i det efterfølgende benævnt liner 1.

”HDPE type 507”, denne er i det efterfølgende benævnt liner 2.

Ældningstesten er gennemført, som beskrevet i rapporten ”Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre”, 2000, Energistyrelsens Udviklingsprogram for vedvarende energi, j. nr. 551181/97-0074, og er som sådan en resultatmæssig udvidelse af denne rapport.

De opnåede resultater viser, at de to testede HDPE linere har en væsentlig længere levetid end den tidligere testede PP liner.

Ved de samme temperaturvariationer, der gav en levetid på ca. 6 år for PP lineren, opnås levetider på ca. 20 år for begge HDPE linerne. Resultaterne indikerer dog, at lineren mærket ”HDPE type 507” vil have den længste levetid.

Forsøg med reduceret ilttilgang til lineren medførte andre ældningsreaktioner, og de fremkomne resultater vurderes ikke at være troværdige. Det er dog vor opfattelse, at det vil have en gunstig effekt, at reducere ilttilgangen til den tørre side af lineren, men der skal gennemføres nye modificerede ældningsforsøg for at få troværdige resultater.

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	4
1.1	Projektets formål.....	4
1.2	Projektorganisation	4
2	Prøvning af linere	5
2.1	Karakterisering af HDPE linere.....	5
2.1	Ældningsprogram	5
3	Ældningsresultater	6
3.1	Procedure for fastlæggelse af levetidsbestemmelse	6
3.2	Fastlæggelse af "levetider" ved de aktuelle høje eksponeringstemperaturer	6
4	Metoder og data til fastlæggelse af levetider ved temperaturer, der er aktuelle i sæsonvarmelagre.....	9
4.1	Beregningsmetoder og -formler.....	9
4.2	Beregning af konstanterne i Arrhenius's ligning	10
4.3	Beregningseksempler.....	13
4.4	Vurdering af ældningsresultater	15
5	Diskussion og sammenfatning.....	16
6	Konklusion.....	17

1 Indledning

1.1 Projektets formål

Projektets formål er at gennemføre en acceleret ældningstest på to HDPE linere til sæsonvarmelagre.

Ældningstesten er gennemført, som beskrevet i rapporten ”Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre”, juli 2000, Energistyrelsens Udviklingsprogram for vedvarende energi, j. nr. 551181/97-0074, og er som sådan en resultatmæssig udvidelse af denne rapport.

De to undersøgte HDPE folier er valgt af civilingeniør, Ph.d. Alfred Heller, BYG-DTU, der ved dette projekts start var projektleder.

De udvalgte HDPE linere er begge fra firmaet John Hunderup Import & Eksport, Syrenvænget 4, Kirke Stillinge, 4200 Slagelse, og havde følgende mærkning:

- ”GSE HDPE Geomembran”, denne er i det efterfølgende benævnt liner 1.
- ”HDPE type 507”, denne er i det efterfølgende benævnt liner 2.

1.2 Projektorganisation

Projektet finansieres med midler fra Energistyrelsens Udviklingsprogram for Vedvarende Energi (UVE). John Hunderup Import & Eksport har leveret linermateriale.

Projektet startede med civilingeniør, Ph.d. Alfred Heller, BYG-DTU, som projektleder. Teknologisk Institut, Plastteknologi ved Søren Pedersen stod, som ved tidligere projekt, for den praktiske gennemføring af ældningstestene. Firmaet John Hunderup Import & Eksport, Syrenvænget 4, Kirke Stillinge, 4200 Slagelse stod for leveringen af HDPE linere.

Projektleder funktionen blev senere overdraget til Teknologisk Institut, Plastteknologi.

2 Prøvning af linere

2.1 Karakterisering af HDPE linere

Materialerne er karakteriseret ud fra termisk analyse, smelteforløb bestemt med DSC, carbonblackindhold bestemt med TG samt infrarød spektroskopi, FTIR.

Liner 1, GSE HDPE Geomembran:

Denne liner er fremstillet af high density polyethylen, HDPE, i en tykkelse på ca. 2,7 mm. Datablad er vist på bilag 1. FTIR spekteret, vist på bilag 2, viser, at materialet er HDPE uden andre polymerer. DSC kurven, vist på bilag 3, viser, at materialet smelter ved ca. 125°C samt at der er en begyndende smeltning ved ca. 95°C. Carbonblackindholdet er bestemt til 1,9 vægt %

Liner 2, HDPE type 507:

Denne liner er fremstillet af high density polyethylen, HDPE, i en tykkelse på ca. 2,7 mm. Datablad er vist på bilag 4. FTIR spekteret, vist på bilag 5, viser, at materialet er HDPE uden andre polymerer. DSC kurven, vist på bilag 6, viser, at materialet smelter ved ca. 125°C samt at der er en begyndende smeltning ved ca. 95°C. Carbonblackindholdet er bestemt til 2,2 vægt %

2.1 Ældningsprogram

Den accelerede ældningstest er gennemført med det samme udstyr og efter samme ideer, som blev anvendt i ”Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre”. Denne er tilgængelig på Teknologisk Instituts hjemmeside under adressen: www.teknologisk.dk/produktion/760,2.

Ved ældningen af linerne 1 og 2 er anvendt nedenstående ældningsskema. Liner 1 er testet som tidligere. Liner 2 er i stedet for deformation testet, således at der er reduceret ilttilgang til linerens bagside. Denne variant er gennemført med henblik på at vurdere i hvilken grad ældningen reduceres, hvis der er en iltstoppende membran op til linerens bagside, således at den kun påvirkes fra forsiden med iltholdigt vand.

Ældningsskema

Ældnings-temperatur, °C	Liner 1		Liner 2	
	Med ilt og uden deformation	Med ilt og med deformation	Med ilt og uden deformation	Uden ilt og uden deformation*
100	x	x	x	x
107	x	x	x	x
115**	x	x	x	x

* Med benævnelsen ”uden ilt” menes, at der ikke direkte kommer ilt til lineren fra bagsiden, svarende til en ”iltspærre”.

**Temperaturen på 115°C er meget høj for HDPE, og er kun valgt af tidsmæssige årsager. Der blev opsat ældningsceller svarende til 6 emner i hver rubrik i ovenstående ældningsskema.

3 Ældningsresultater

3.1 Procedure for fastlæggelse af levetidsbestemmelse

Prøver til test er udtaget med jævne mellemrum. For at følge nedbrydningen er, der som ved den tidligere undersøgelse, udstanset prøveemner af de ældede linerprøver, hvorpå der er foretaget bestemmelse af brudstyrke og brudforlængelse.

Ved vurderingen af "levetider" ved testtemperaturerne er der lagt mest vægt på brudforlængelsen.

Trækprøvningerne er foretaget under følgende konditioner:

Prøveemne: DIN 53448 form A

Trækprøvning: ISO 527-3, 1997 Træk hastighed: 100 mm pr. min.

Temperatur: 23°C

Som hovedkriterium for bestemmelse af "levetiden" er valgt det tidspunkt, hvor brudforlængelsen er reduceret til ca. 50%.

3.2 Fastlæggelse af "levetider" ved de aktuelle høje eksponeringstemperaturer

Ved de gennemførte test af ældet linermateriale, blev der registreret følgende værdier:

Liner 1

Mærkning	Temperatur °C	Brudforlængelse, %		Brudstyrke, MPa	
		Uden deformation	Med deformation	Uden deformation	Med deformation
Udgangsmateriale på langs af maskinretning	23	907		20,1	
Udgangsmateriale på tværs af maskinretning	23	907		20,3	
Eksponeringstid, 180 døgn	100	516	618	20,9	20,7
Eksponeringstid, 280 døgn	100	(39)*	-	21,4	15,4
Eksponeringstid, 45 døgn	107	1150	763	16,6	9,5
Eksponeringstid, 85 døgn	107	1016	731	21,5	12,8
Eksponeringstid, 130 døgn	107	1062	945	21,2	18,7
Eksponeringstid, 220 døgn	107	35	38	21,0	15,6
Eksponeringstid, 260 døgn	107	22	22	18,8	6,0
Eksponeringstid, 125 døgn	117	25	-	22,8	9,6
Eksponeringstid, 180 døgn	117	98	84	13,4	11,7
Eksponeringstid, 280 døgn	117	34	-	14,3	-

Liner 2

Mærkning	Temperatur, °C	Brudforlængelse, %		Brudstyrke, MPa	
		Med ilt- påvirkning	Uden ilt- påvirkning	Med ilt- påvirkning	Uden ilt- påvirkning
Udgangsmateriale på langs af maskinretning	23	909		19,9	
Udgangsmateriale på tværs af maskinretning	23	906		20,0	
Eksponeringsstid, 180 døgn	100	1260	507	21,8	20
Eksponeringsstid, 280 døgn	100	180	280	21,7	21,6
Eksponeringsstid, 340 døgn	100	135	226	22,3	21,0
Eksponeringsstid, 380 døgn	100	119	173	8,2	7,8
Eksponeringsstid, 440 døgn	100	102	194	8,4	7,9
Eksponeringsstid, 460 døgn	100	90	145		19,5
Eksponeringsstid, 45 døgn	107	1576	1848	21,8	22,5
Eksponeringsstid, 85 døgn	107	1174	990	21,0	21
Eksponeringsstid, 130 døgn	107	1180	886	21,1	18,8
Eksponeringsstid, 220 døgn	107	700	356	10,0	9,9
Eksponeringsstid, 260 døgn	107	135	260	9,1	9,8
Eksponeringsstid, 310 døgn	107	84	243	11,3	9,0
Eksponeringsstid, 125 døgn	117	28	661	21,6	25,4
Eksponeringsstid, 180 døgn	117	44	950	21,8	23,8
Eksponeringsstid, 280 døgn	117	68	100	22,9	22,8
Eksponeringsstid, 340 døgn	117	79	92	23,0	23,2

Som kritisk egenskab er valgt en brudforlængelse på ca. 50%. Tiderne til kritisk brudforlængelse er fundet ved interpolation og ekstrapolation af de målte data.

Den største vægt lægges på brudforlængelsen, da brudstyrken af HDPE er variabel afhængig af brudforlængelse.

Følgende tider, i døgn, til kritisk brudforlængelse er fastlagt/beregnet.

Eksponerings- temperatur, °C	Liner 1		Liner 2	
	Uden deformation	Med deformation	Med ilt	Uden ilt
100	400 døgn	400 døgn	530 døgn	700 døgn
107	200 døgn	200 døgn	330 døgn	450 døgn
115	120 døgn	120 døgn	180 døgn	300 døgn

Nøjagtigheden af de anførte værdier vurderes at være +/-50 døgn ved tider over 400 døgn og +/- 20 døgn ved øvrige tider.

Umiddelbart ses, at der ved liner 1 ikke ses nogen forskel mellem ikke deformeret og deformeret materiale. Dette skyldes formodentligt, at der kun sker en relativ lille tykkelses reduktion ved deformationen, der blev frembragt af de anvendte metalringe med en tykkelse på ca. 3 mm, en yderdiameter på 30 mm og et hul på 17 mm. Ved liner 2 ses den største effekt fra den reducerede ilttilgang ved de høje temperaturer.

4 Metoder og data til fastlæggelse af levetider ved temperaturer, der er aktuelle i sæsonvarmelagre

4.1 Beregningsmetoder og -formler

Ved beregning af aktuelle levetider ud fra data fra accelereret ældning, hvor temperaturen indgår som en væsentlig faktor, er det oftest bedst at anvende Arrhenius ligningen. Denne ligning kan dog ikke umiddelbart anvendes til beregning af aktuelle levetider, hvor der er varierende temperaturer, som ved et sæsonvarmelagre.

Til beregning af levetider i sådanne situationer er der i standarden DS/EN 253, som omhandler præisolerede fjernvarmerør til lægning i jord, et formelsæt, der anvendes i situationer med varierende temperaturer. Dette formelsæt har følgende udseende.

$$L = \left(\frac{t_1}{L_1} + \frac{t_2}{L_2} + \dots + \frac{t_n}{L_n} \right)^{-1}$$

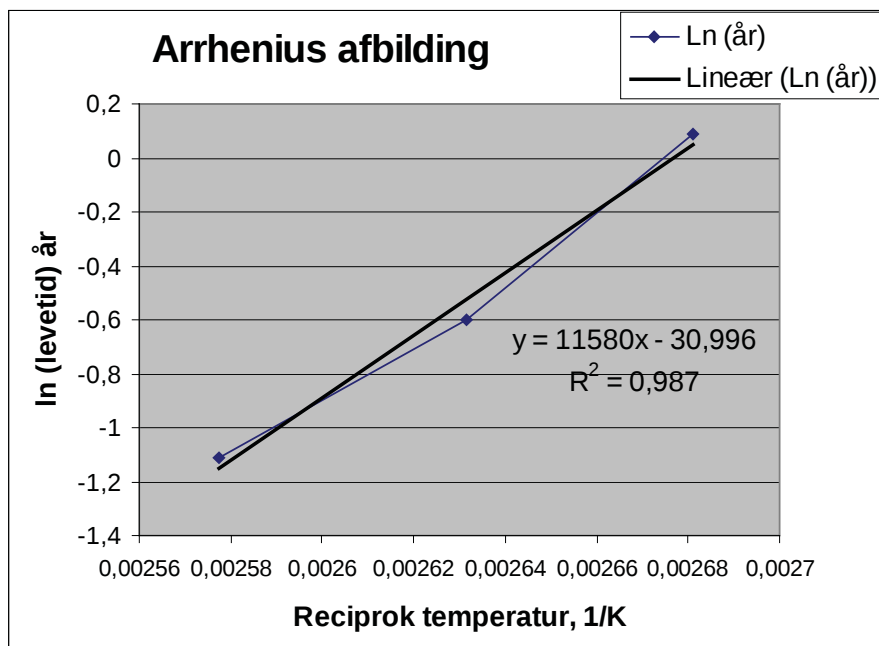
hvor

- L = Forventet levetid i år af systemet ved aktuelle temperaturer
- L₁ = Forventet levetid i år af systemet ved en fast temperatur, som kan være beregnet ud fra Arrhenius's ligning
- L₂ = Som L₁, men ved en anden temperatur.
- t₁ = Årlig tidsfraktion, hvor systemet er ved den temperatur, der svarer til L₁
- t₂ = Årlig tidsfraktion, hvor systemet er ved den temperatur, der svarer til L₂

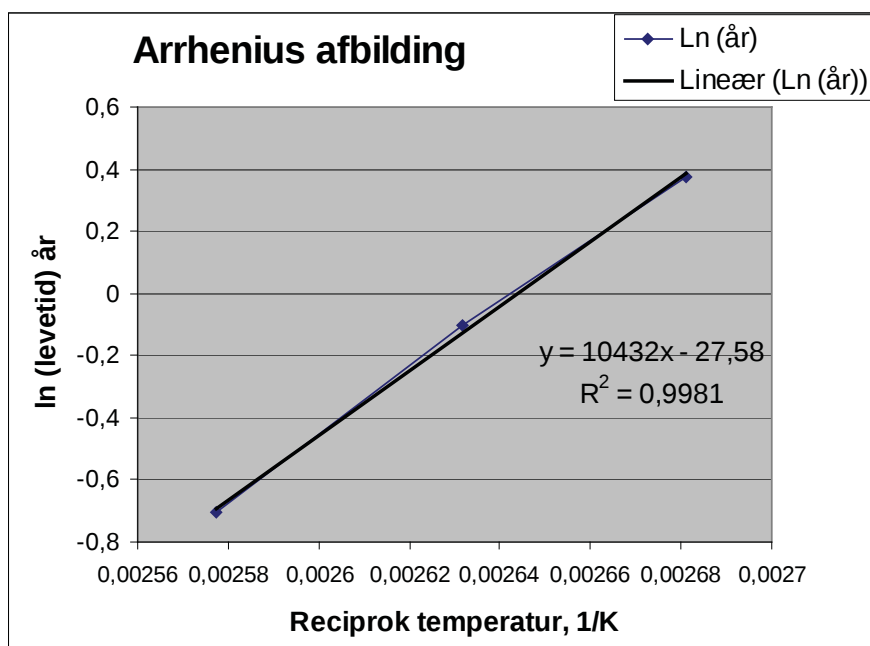
4.2 Beregning af konstanterne i Arrhenius's ligning

Ved at afbilde de fundne levetider, som er anført i afsnit 3.2, efter Arrhenius fås nedenstående afbildninger (se figur 4.2-1 - 4.2-3), hvor den reciproke værdi af eksponeringstemperaturen i Kelvin er afsat på x-aksen og logaritmen til ældningstiden i år på y-aksen.

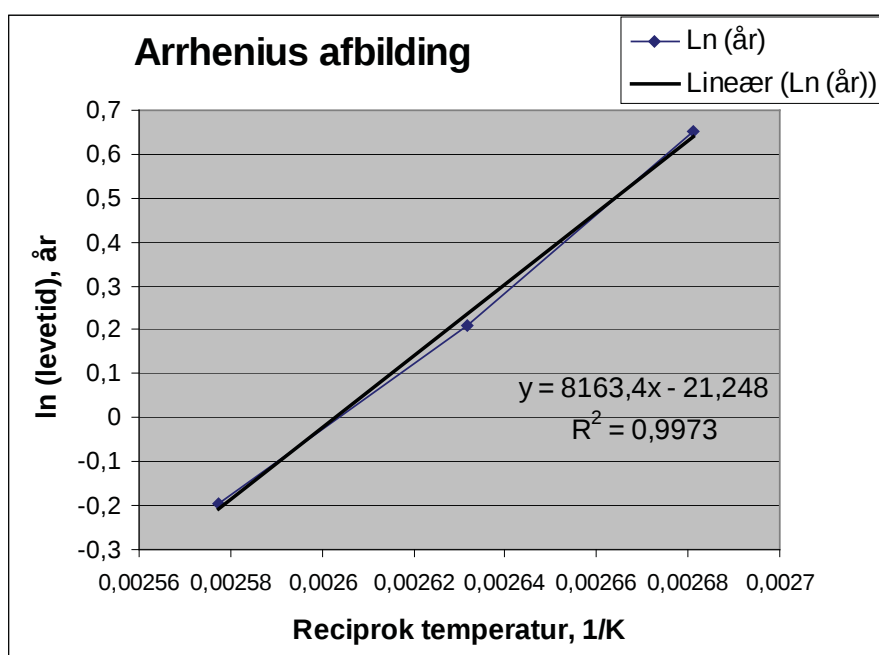
Figur 4.2-1: Arrhenius afbildning af liner 1



Figur 4.2-2: Arrhenius afbildning af liner 2 med normal ilttilgang



Figur 4.2-3: Arrhenius afbildning af liner 2 med reduceret ilttilgang



På grundlag af de fundne konstanter i Arrhenius afbildningerne kan der beregnes følgende sammenhæng mellem temperatur og levetid, år (tiden til at brudforlængelsen er reduceret til ca. 50%).

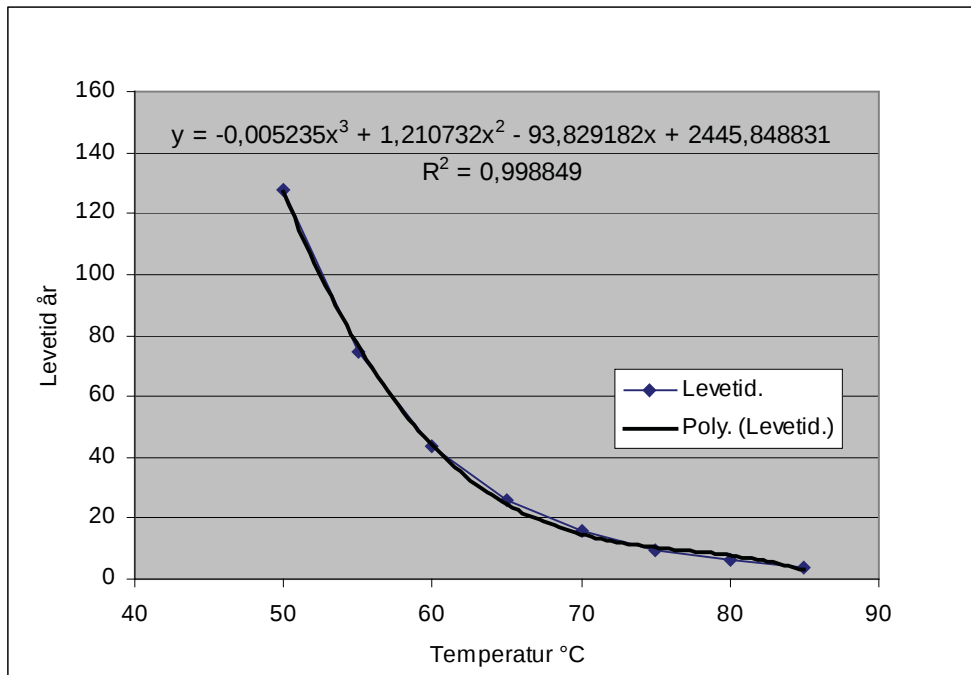
Sammenhæng mellem eksponeringstemperatur og levetid i år			
Eksponerings- temperatur, °C	Liner 1, uden og med deformation	Liner 2, med normal ilttilgang	Liner 2, uden normal ilttilgang
85	3,9	4,8	4,7
80	6,1	7,2	6,5
75	9,8	11,0	9,1
70	15,9	17,0	12,8
65	26,2	26,7	18,3
60	43,7	42,4	26,2
55	74,4	68,4	38,1
50	128	112	56

En normal grafisk afbildning af disse værdier er vist på nedenstående figurer 4.2-4 - 4.2-6.

y = levetid i år

x = temperatur i °C

Figur 4.2-4 : Levetider for liner 1 på grundlag af Arrhenius ligningen



Figur 4.2-5 : Levetider for liner 2 med ilttilgang på grundlag af Arrhenius ligningen

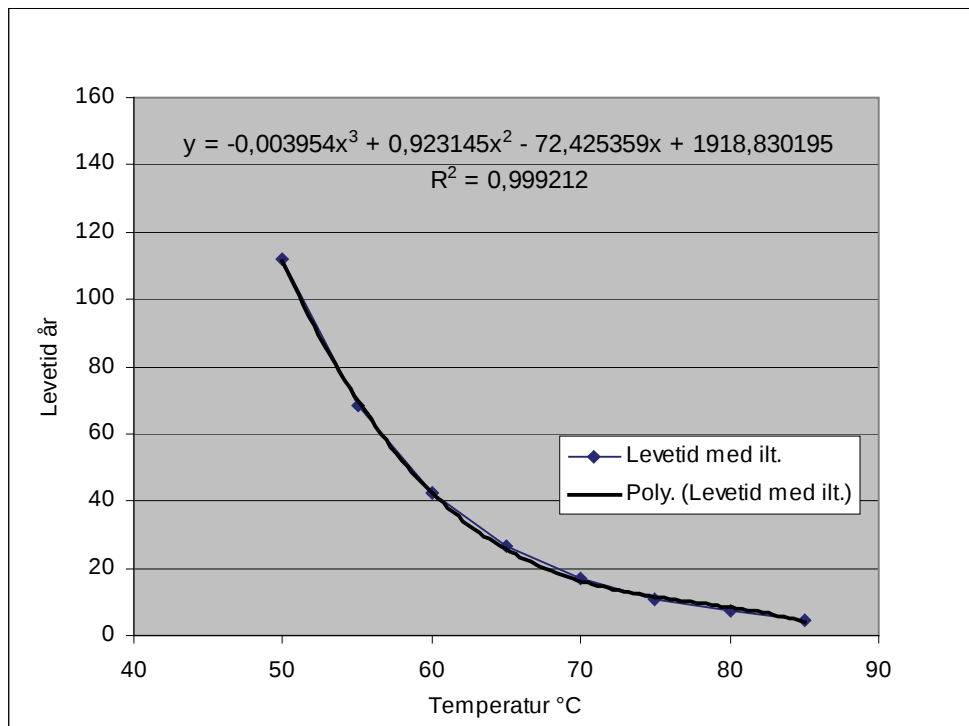
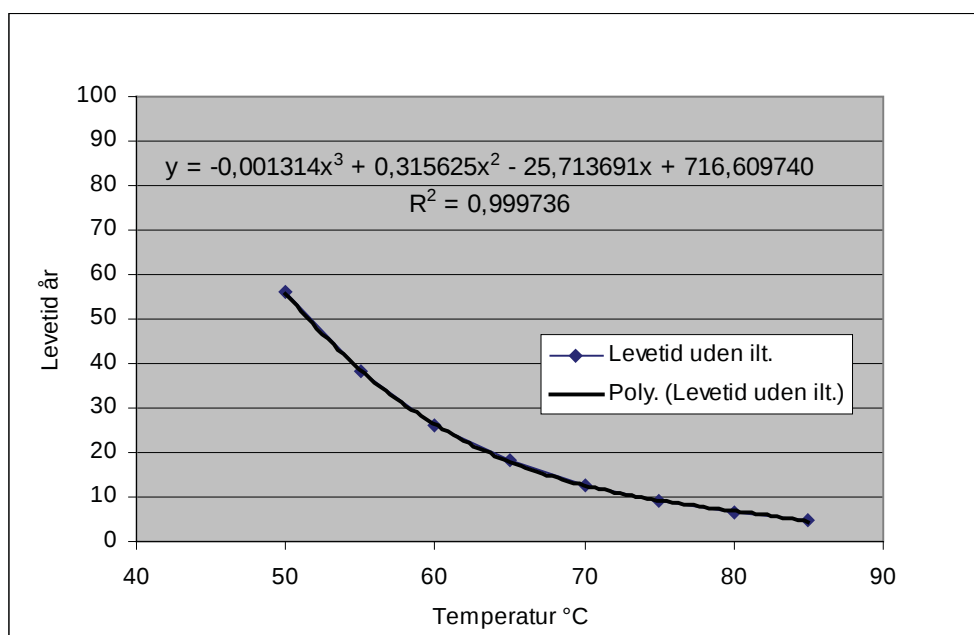


Figure 4.2-6: Levetider for liner 2 med reduceret ilttilgang på grundlag af Arrhenius ligningen



4.3 Beregningseksempler

I nedenstående beregningseksempler er anvendt samme temperaturprofil, som i oprindelige rapport "Fastlæggelse af levetider for plastlinere til sæsonvarmelagre, juli 2000".

Beregningseksempel for liner 1

Måned	Vand-temperatur °C	Årlig tidfraktion t_n	Levetid ved temperatur L_n	t_n/L_n
Januar	53	0,083	94,477278	0,000879
Februar	45	0,083	198,22857	0,000419
Marts	42	0,083	252,90376	0,000328
April	45	0,083	198,22857	0,000419
Maj	62	0,083	34,846275	0,002382
Juni	68	0,083	17,837703	0,004653
Juli	72	0,083	12,629135	0,006572
August	74	0,083	11,110155	0,007471
September	74	0,083	11,110155	0,007471
Oktober	73	0,083	11,805378	0,007031
November	68	0,083	17,837703	0,004653
December	60	0,083	43,973111	0,001888
Sum				0,044164
Levetid, år				22,6

Beregningseksempel liner 2 med iltilgang

Måned	Vand- temperatur °C	Årlig tidfraktion t_n	Levetid ved temperatur L_n	t_n/L_n
Januar	53	0,083	84,740815	0,000979
Februar	45	0,083	168,74942	0,000492
Marts	42	0,083	212,44895	0,000391
April	45	0,083	168,74942	0,000492
Maj	62	0,083	34,678405	0,002393
Juni	68	0,083	19,264135	0,004309
Juli	72	0,083	13,965435	0,005943
August	74	0,083	12,239953	0,006781
September	74	0,083	12,239953	0,006781
Oktober	73	0,083	13,045475	0,006362
November	68	0,083	19,264135	0,004309
December	60	0,083	42,566655	0,00195
Sum				0,041182
Levetid, år				24,3

Beregningseksempel liner 2 uden iltilgang

Måned	Vand- temperatur °C	Årlig tidfraktion t_n	Levetid ved temperatur L_n	t_n/L_n
Januar	53	0,083	44,750377	0,001855
Februar	45	0,083	168,74942	0,000492
Marts	42	0,083	212,44895	0,000391
April	45	0,083	168,74942	0,000492
Maj	62	0,083	34,678405	0,002393
Juni	68	0,083	19,264135	0,004309
Juli	72	0,083	13,965435	0,005943
August	74	0,083	12,239953	0,006781
September	74	0,083	12,239953	0,006781
Oktober	73	0,083	13,045475	0,006362
November	68	0,083	19,264135	0,004309
December	60	0,083	42,566655	0,00195
Sum				0,042057
Levetid, år				23,8

4.4 Vurdering af ældningsresultater

Polyethylen materialer, HDPE, bør normalt ikke påvirkes med højere temperaturer end ca. 110°C, da der over denne temperatur optræder begyndende smeltning, da smelteintervallet er relativt bredt. En begyndende smeltning kan føre til ændrede nedbrydningsforløb, da den amorf andel, hvor nedbrydningen fortrinsvis foregår, bliver forøget.

Når der alligevel er anvendt ældningstemperaturer på 115°C, 107°C og 100°C skyldes det tidsmæssige forhold, da ældningstiderne ellers, i dette tilfælde, ville blive uacceptable lange. Ved fastlæggelse af Arrhenius ligningen er der lagt størst vægt på resultaterne ved 107°C og 100°C.

Hvis der er økonomiske midler, bør der opsættes ældningscelle til mere end 6 enkeltprøver i hver ældningssituation, da det øger nøjagtigheden.

Ved liner 1 ses ingen egentlig forskel i ældningstiderne ved normalt linermateriale og materiale, der er søgt strakt ved indlægning af metalskiver. Når der ikke ses nogen forskel, skyldes det formodentligt, at der kun fremkommer en relativ lille reduktion af linertykkelsen.

Ved liner 2 ses ikke nogen forøgelse af de beregnede levetider ved at hindre ilttilgang til linerens bagside. Dette skyldes formentligt, at der optræder en anden form for nedbrydning, idet der dannes korrosionsprodukter mellem liner og den plade af rustfrit stål, der var anbragt bag lineren. Dette skyldes for ringe tilgang af ilt til ståloverfladen. De dannede metalioner kan bevirke en forøget nedbrydning af polyethylen materialet, hvis dette ikke er stabiliseret mod metalioner. Dette er forhold, der skal tages i betragtning ved anvendelsen af systemer til reduktion af iltpåvirkning.

Hovedresultatet af den gennemførte ældning er, at liner 2 ser ud til at have en lidt længere levetid end liner 1. Begge har dog beregnede levetider over 20 år med den anvendte temperaturprofil på sæsonvarmelagret.

Hvis der skal opnås en positiv effekt fra systemer, der reducerer iltpåvirkningen af folien, skal der tages højde for den vanddampdiffusion, der er gennem linermaterialet, og at bagsiden af lineren ikke kan påvirkes af metalioner.

Resultaterne fra liner 2 med reduceret ilttilgang kan derfor ikke anvendes til vurdering af effekten fra reduceret ilttilgang.

5 Diskussion og sammenfatning

De opnåede levetider på de to testede linere viser, at det er muligt at fremstille linere i high density polyethylen, HDPE, med mulighed for levetider på over 20 år med den i beregningseksemplerne anvendte temperaturprofil.

Ved ældningsforsøgene, hvor iltpåvirkningen på bagsiden af linerne blev reduceret, viste der sig ingen positiv effekt. Dette skyldes efter vor vurdering, at linermaterialet blev påvirket af metalioner fra beskyttelses pladen af rustfrit stål.

Hvis der bliver anvendt et bedre system, der reducerer iltpåvirkningen af linermaterialet uden bivirkninger, er vi ikke i tvivl om, at det har en effekt og giver længere levetider af linermaterialet.

Det er nødvendigt at gennemføre fornyede test for at opnå brugbare værdier for levetider ved linerer med reduceret ilttilgang til bagsiden.

6 Konklusion

Resultaterne fra de gennemførte ældningsforsøg viser, at de testede linere, liner 1, mærket "GSE HDPE Geomembran" og liner 2, mærker "HDPE type 507, har væsentligt længere levetider end den tidligere testede PP liner.

Ud fra de fremkomne resultater vil liner 2 forventes at have en lidt længere levetid end liner 1.

Ældningsforsøgene med reduceret ilttilgang til bagsiden af liner 2 gav ikke sande værdier, da der på grund af forsøgsparametrene tilsyneladende fremkom en utilsigtet nedbrydning fra metalioner fra den plade af rustfrit stål, der blev anvendt til at reducere ilttilgangen. Der er dog næppe tvivl om, at en reduktionen af ilttilgangen, alt andet lige, har en positiv effekt på levetiden. For at belyse effekten, er det nødvendigt at udføre nye ældningsforsøg med ændrede ældningsceller, hvor der ikke kan ske påvirkning fra metalioner.



GSE HD with BAM-Certificate No. 13/BAM IV.32/05/95
Product Data Sheet

GSE HD is a smooth, black, high quality, high density polyethylene (HDPE) geomembrane produced from specially formulated, virgin polyethylene resin. The polyethylene resin is designed specifically for durable basal lining and capping systems of landfills. **GSE HD** contains approximately 97.5% polyethylene, 2.5% carbon black and trace amounts of antioxidants and heat stabilizers. **GSE HD** has outstanding chemical resistance, mechanical properties, environmental stress crack resistance, dimensional stability and thermal aging characteristics.

Tested Property	Unit	Test Method	Minimum Value
Thickness ⁽¹⁾	mm	DIN EN ISO 2286-3	2.5
Density	g/cm ³	DIN 53479 - A	0.94
Tensile properties (each direction)		DIN EN ISO 527-3 Type 5, 100 mm/min	
Strength at yield	MPa ⁽¹⁾		16
Elongation at yield	%	l ₀ = 50 mm	10
Strength at break	MPa ⁽¹⁾		26
Elongation at break	%	l ₀ = 50 mm	700
Tear resistance	N	DIN 53515	335
Puncture resistance	N	FTMS 101, meth 2065	550
Carbon black content	%	ASTM D 1603	2.0
Carbon black dispersion	Category	ASTM D 5596-94	C 1
Dimensional stability (each direction)	%	DIN 53377 (120 °C/1h)	≤ 1.00
Melt flow index	g/10 min	DIN EN ISO 1133 (190 °C/5.0 kg)	2.2
Reference Property	Unit	Test Method	Nominal Value
Environmental stress crack (NCTL)	h	ASTM D 5397, Appendix	≥ 200
Oxidative induction time	min	ASTM D 3696, 200°C, Pure O ₂ , 1 atm	100
Puncture resistance	N	DIN EN ISO 12236	6000
Multiaxial elongation	%	similar to ASTM D 5617	15
Low temperature brittleness	°C	ASTM D 746	- 70
Roll width	m	---	7.5
Roll length (approx.)	m	---	80
Roll weight (approx.)	kg	---	1,500

(1): 1 MPa = 1 N/mm²

GSE HD with BAM-Certificate is produced at GSE Rechlin plant, Germany

This information is provided for reference purposes only and is not intended as a warranty or guarantee. GSE assumes no liability in connection with the use of this information. Check with GSE for current, standard minimum quality assurance procedures.

This information could be subject to change without prior notice.

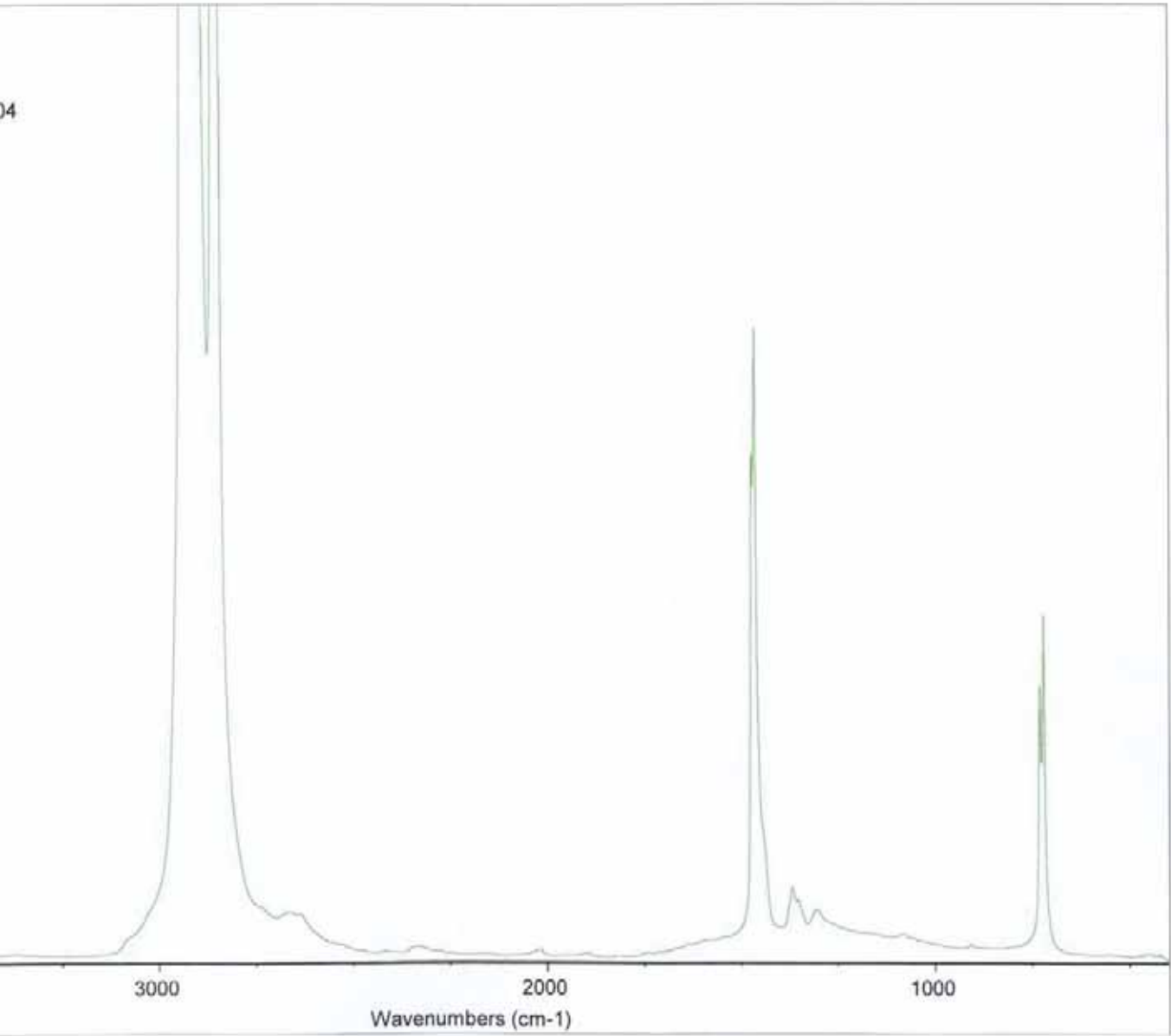
European Headquarters
GSE Lining Technology GmbH
 Großmooring 4
 D-21079 Hamburg
 Germany
 Tel.: +49-40-76742-0
 Fax: +49-40-76742-34
 e-mail: europe@gseworld.de

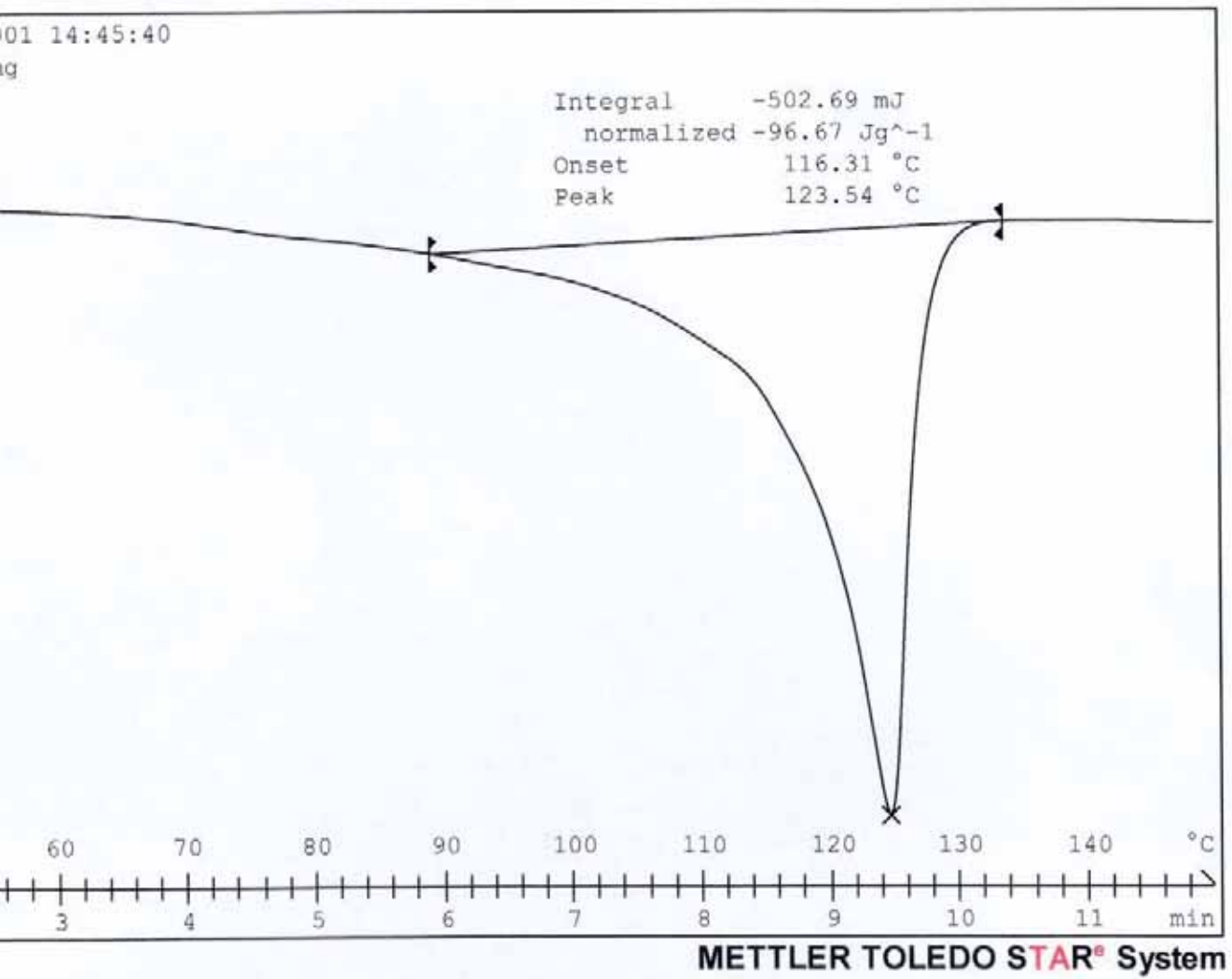
Corporate Headquarters
GSE Lining Technology, Inc.
 19103 Gundle Road
 Houston, Texas 77073
 USA
 Tel: +1-281-443-8564
 Fax: +1-281-875-6010

Other Production facilities & Sales Offices
 Thailand
 United Kingdom
 Egypt
 Jordan
 Australia



03-04-04-WH-25





Technisches Datenblatt 1052**Type PEHD 507 glatt/glatt**

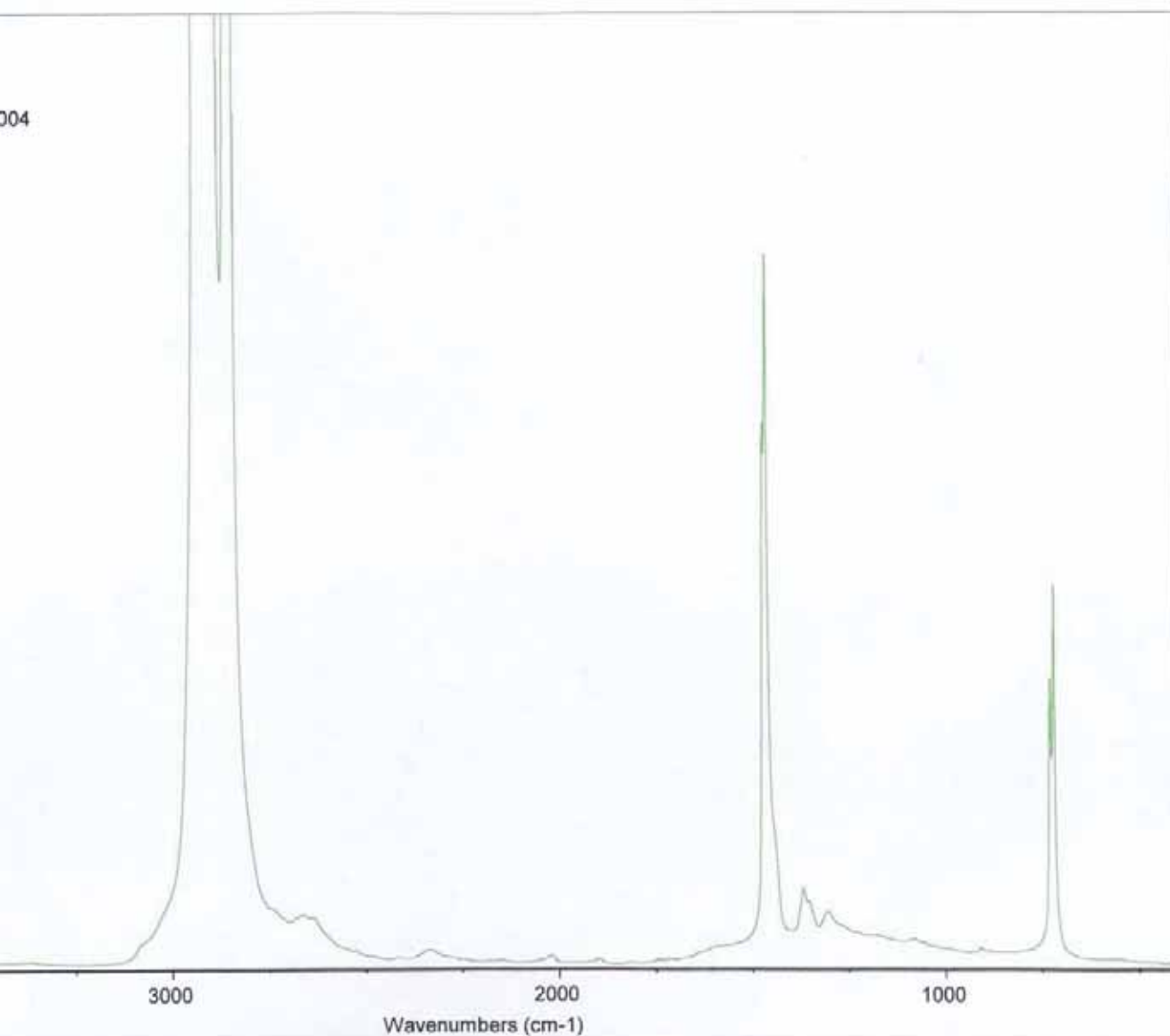
Datum: 09.02.2002

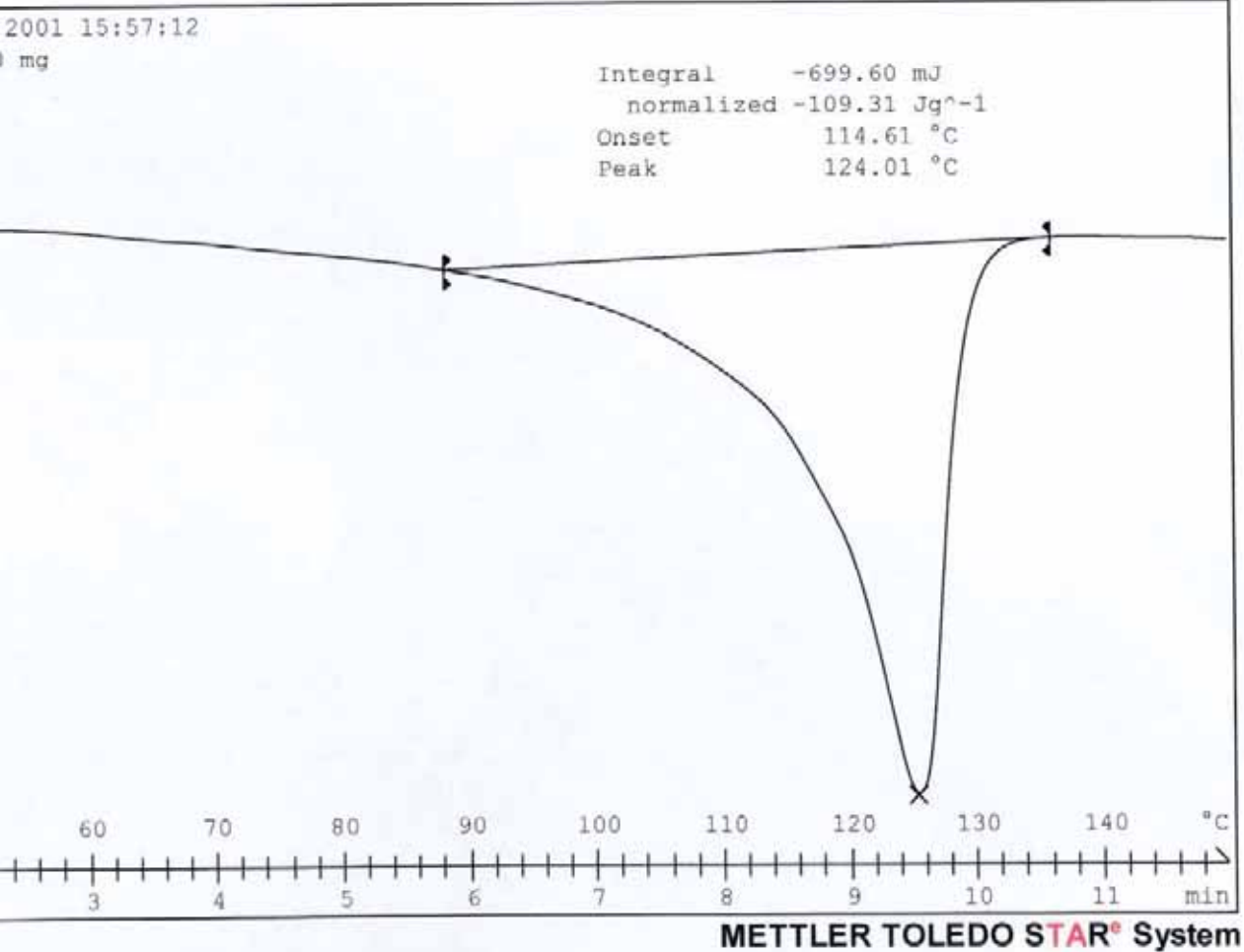
	ASTM	DIN	Einheit	1,50 mm	2,00 mm	2,50 mm	3,00 mm
Bräute	D 1593		mm	3050 5100 9400	3050 * 5100 * 9400	3050 * 5100 * 9400	3050 * 5100 * -
Dicke	D 1593	53353	mm	1,50	2,00	2,50	3,00
Dichte	D 792	DIN EN ISO 1183	g/cm³	0,942	0,942	0,942	0,942
Rußgehalt	D 1603-73	DIN EN ISO 11358	%	2	2	2	2
NCTL - Test Appendix	D 5397	/	h	> 200	> 200	> 200	> 200
Schmelzindex 190/5	D 1238 Cond. P 190/5	DIN ISO 1133	g/10 min	2,4	2,4	2,4	2,4
Streck- spannung	D 638	DIN EN ISO 527-3	N/mm²	16	16	16	16
Streck- dehnung	D 638	DIN EN ISO 527-3	%	12	12	12	12
Reiß- festigkeit	D 638	DIN EN ISO 527-3	N/mm²	25	25	25	25
Reiß- dehnung	D 638	DIN EN ISO 527-3	%	700	700	700	700
Weiterreiß- widerstand	D 1004	53515	N/mm	130	130	130	130
Kältebruch bei -20°C		DIN EN 1876-1	—	kein Bruch	kein Bruch	kein Bruch	kein Bruch
Biaxiale Dehnung		Based on DIN 53861	%	15	15	15	15
Fallhöhe		16726	mm	1100	1600	2000	2400
Maß- änderung 1h / 120°C	D 1204	53377	%	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1

Datei: 1052 507 GLATT GLATT D

Die genannten Werte sind Mittelwerte einer Messung über die bisherige Produktion. Diese Daten sind Richtwerte, die in unseren Labors und/oder bei Prüfinstituten ermittelt wurden. Das Recht auf Produktänderung ohne Ankündigung ist vorbehalten.

* Standard Produkt





Bilag 3

Testrapport fra ældningsforsøg af HDPE-liner,
Teknologisk Institut, 2011



PlanEnergi Nordjylland
Att.: Per Alex Sørensen
Jyllandsgade 1
9520 Skørping

17. juni 2011
sfp-ipa/eta

Ældningstest på 2,5 mm HD-PE Junifol fra JUTA til varmelager, afslutning

Ældningstesten på ovennævnte folie gennemføres som beskrevet i vort tilbud dateret 11. august 2010. Accepteret på mail dateret 7. september 2010.

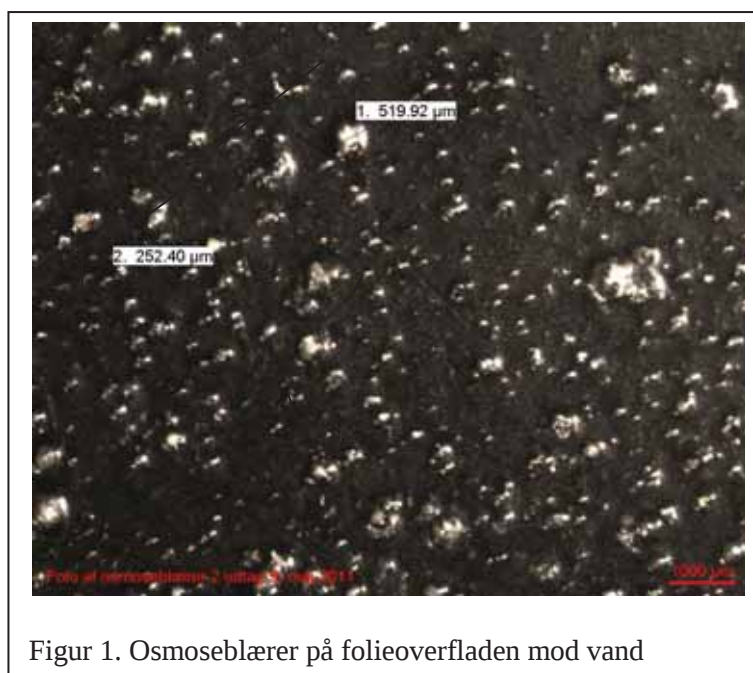
Ældningen har nu forløbet i ca. 7 måneder (31 uger), og 2 udtagninger er gennemført. Der er udført sammenlignende test med en upåvirket folie. Årsagen til at der kun blev udtaget 2 udtagninger er, at membranen blev ældet hurtigere end forventet.

For at følge ældningen er der udført en visuel undersøgelse og en infrarød spektroskopisk analyse, FTIR, af den vandpåvirkede overflade for at se evt. forandringer og oxidation af HD-PE materialet, samt bestemmelse af mekaniske egenskaber (efter ISO 527), E-modul, flydespænding, forlængelse ved flydning, brudstyrke og brudforlængelse.

Undersøgelserne gav følgende resultater:

Visuel undersøgelse efter et halvt år, 26 uger

På den påvirkede overflade ses små osmoseblærer i overfladen af folien, foto er vist på fig. 1.



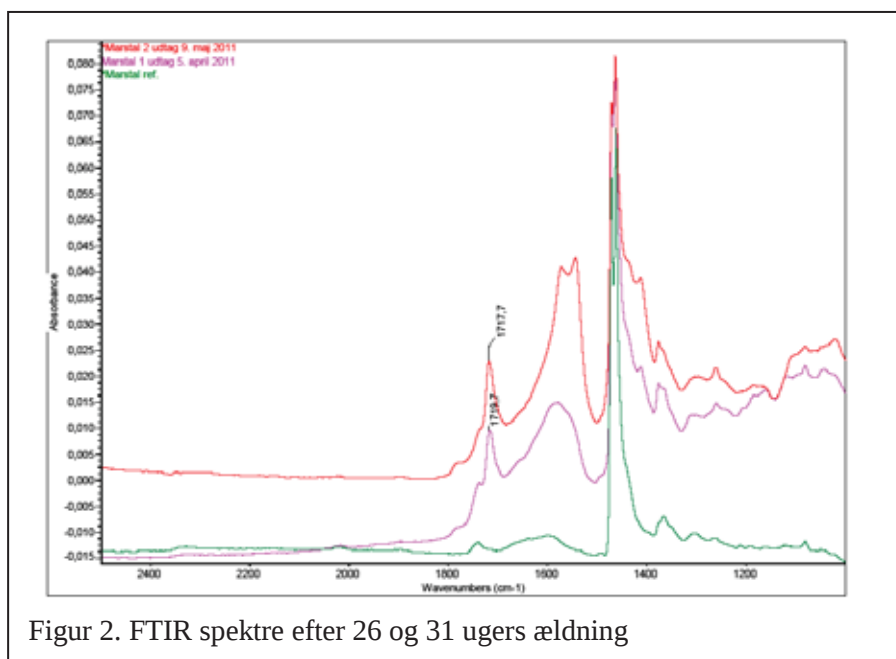
Figur 1. Osmoseblærer på folieoverfladen mod vand

FTIR analyse efter 6 og 7 måneders (26 og 31 uger) ældning

FTIR analysen er gennemført med ATR teknik og gav følgende resultater:

Efter 6 måneders ældning ses en tydelig oxidation af HD-PE materialet, der er i kontakt med vand. Efter 7 måneder er der sket en yderligere oxidation.

FTIR spekter er vist på fig. 2.



Figur 2. FTIR spektre efter 26 og 31 ugers ældning

Mekaniske egenskaber

Følgende mekaniske egenskaber er bestemt ved reference materiale og efter 6, 7 og 8 måneders ældning.

Ældningstid, måneder	E-modul, MPa	Flyde- spænding, MPa	Forlængelse ved flyd- ning, %	Brudstyrke, MPa	Brudfor- længelse, %	Bemærk- ninger
0, ref	712	19,5	12	22,2	790	
6	590	18,9	13,5	13,0	150	*1
7	695	19,7	7,6	19,4	8,4	*2
8	HDPE materialet er sprødt og knækker ved selv små deformationer					

*1. Ved træktesten starter flydningen normalt, men den forløber ikke så langt på grund af et tyndt sprødt lag på overfladen, der har været vandpåvirket. Foto er vist på fig. 3.

*2. Der opnås ikke flydning i materialet, bruddet starter i forbindelse med strækningen.

Membranen har tabt så meget i fleksibilitet, at der opstår revner ved bøjning af denne. Dette gælder både hvor der bøjes over vandpåvirket side og luftpåvirket side. Foto er vist på fig.

4.



Figur 3. Foto af strækzone med revnet overflade



Figur 4. Foto af testemner bøjet en gang i hånden

Sammenfatning efter 7 måneders (31 ugers eksponering) ved 110 °C

Ved en visuel undersøgelse kan der efter 6 måneders ældning ses mange mindre osmose-blærer på den vandpåvirkede side af membranen. Disse er mere eller mindre punkterede efter 7 måneders ældning. Dette indikerer, at HDPE materialet i væsentlig grad har mistet fleksibilitet.

Ved FTIR analysen ses en udvikling i oxidationen, der sker nedbrydning af overfladen, der har været påvirket med varmt vand.

Ved trækprøvningen ses at der ikke sker nogen egentlig flydning i materialet, før der opstår brud i folien. Brudforlængelsen er reduceret til under 10 %.

Det vurderes, at folien på dette stade ikke vil kunne modstå selv mindre deformationer.

Resultaterne fra træktesten viser, at membranen efter 7 måneders accelereret ældning ved 110 °C er nedbrudt i en sådan grad, at de mekaniske egenskaber er utilstrækkelige.

Det er vor vurdering, at levetiden ved den accelererede ældning er længere end 6 måneder men mindre end 7 måneder. Levetiden ved ældningen ved 110 °C sættes til 29 uger.

Fastlæggelse af ældningsfaktor

Ved tidligere gennemførte test af HDPE membraner, "Fastlæggelse af levetider for 2 HDPE plastlinere til sæsonvarmelagre, UVE-projekt "Aktiviteter vedrørende udvikling af plastlinere til sæsonvarmelagre" ENS. J. nr 51181/01-0065", ses at ældningsfaktoren, den faktor ældningshastigheden ændres med ved 10 °C temperaturændring, er over 2.

Der vælges en ældningsfaktor på 2,3, da dette er, hvad der ses ved den bedste HDPE membran i ovennævnte projekt. Den generelle ældningsfaktor, der ofte anvendes ved termiske ældningsforsøg, er 2.

Beregning af levetid i sæsonvarmelager

Ved beregningen af levetid er der anvendt samme temperaturprofil som i ovennævnte projekt, da dette giver mulighed for sammenligning med lignende membraner.

Med udgangspunkt i en ældningsfaktor på 2,3 kan der beregnes følgende levetider med udgangspunkt i det opnåede resultat på 29 uger ved 110 °C.

Temperatur, °C	Levetid, uger
110	29
100	67
90	153
80	353
70	812
60	1867
50	4293
40	9874

Denne sammenhæng kan udtrykkes med følgende formel:

$$\text{Levetid i uger} = 276314,83 \cdot e^{(-0,083291 \cdot \text{temperatur i } ^\circ\text{C})}$$

Med dette udtryk kan der, efter samme metode som i ovennævnte projekt, beregnes en levetid på 22,1 år, se nedenstående beregning.

Måned	Temp. C	Levetid, uger	Levetid, år	Tidsfraktion	Tidsfraktion/levetid
Januar	53	3344	64,3	0,0833	0,001295
Februar	45	6511	125	0,0833	0,000665
Marts	42	8359	161	0,0833	0,000518
April	45	6511	125	0,0833	0,000665
Maj	62	1580	30,4	0,0833	0,002741
Juni	68	959	18,4	0,0833	0,004519
Juli	72	687	13,2	0,0833	0,006305
August	74	582	11,2	0,0833	0,007448
September	74	582	11,2	0,0833	0,007448
Oktober	73	632	12,2	0,0833	0,006853
November	68	959	18,4	0,0833	0,004519
December	60	1867	35,9	0,0833	0,002321

Sum af tidsfraktion/år = 0,045297. Dette giver en levetid på $1/0,045297 = 22,1$ år

I det nævnte projekt blev der fundet følgende levetider for ældede membraner:

Membran 1: 22,6 år

Membran 2: 24,3 år

Konklusion

På grundlag af den gennemførte ældningstest vurderes membranen 2,5 mm HD-PE Junifol fra JUTA at have nær samme ældningsegenskaber som membran 1 og lidt dårligere ældningsegenskaber end membran 2.

Er der spørgsmål til den gennemførte ældningstest, kan de rettes til undertegnede.

Med venlig hilsen

Plastteknologi



Søren Pedersen
Akademiingeniør

Telefon: 72 20 31 15 (direkte)

Email: sfp@teknologisk.dk

Opgaven er udført iht. Teknologisk Instituts almindelige vilkår for rekvirerede opgaver, hvoraf et eksemplar vedlægges.

Teknologisk Instituts almindelige vilkår for rekvirerede opgaver

Generelt

Vilkårene er gældende mellem Teknologisk Institut (Instituttet) og en kontraktpartner (rekvirenten) for alle opgaver udført af Instituttet, herunder fx rådgivning, undervisning, informationssøgning og formidling, prøvning, undersøgelser, salg og udlejning. Vilkårene er også gældende i andre og senere aftaler mellem Instituttet og rekvirenten, medmindre andet er aftalt. Modstående eller afvigende bestemmelser i den af rekvirenten afgivne ordre eller accept finder ikke anvendelse, medmindre de skriftligt er accepteret af Instituttet.

For opgaver vedrørende certificerings-, inspektions- eller godkendelsesordninger gælder dog Instituttets 'Almindelige vilkår for certificerings-, inspektions- eller godkendelsesordninger tilknyttet Teknologisk Institut'.

1. Opgaveindhold

- 1.1 Opgavens art, indhold og økonomiske betingelser angives i en skriftlig aftale. Ændringer af aftalen skal ske skriftligt.
- 1.2 Tidsplaner, prisoverslag mv. er angivet som et skøn, medmindre andet skriftligt er aftalt. Såfremt Instituttet forudser væsentlige pris-mæssige eller tidsmæssige overskridelser af aftalen eller væsentlige hindringer for opgavens udførelse orienteres rekvirenten, hvorefter denne er berettiget til at ændre eller standse arbejdet, jf. pkt. 6.1.
- 1.3 Instituttet er berettiget til aftalt vederlag for udført arbejde uafhængigt af, om de af rekvirenten forventede resultater opnås, medmindre det skriftligt er aftalt mellem parterne, at Instituttets vederlag er betinget af, at konkrete, specificerede resultater opnås.
- 1.4 Instituttet er berettiget til at lade opgaver udføre af tredjemand.

2. Diskretionspligt

- 2.1 Instituttet udviser sædvanlig diskretion med hensyn til omtale af opgaveløsninger og af indgåede aftaler. Ønsker rekvirenten egentlig hemmeligholdelse, fx af knowhow hos rekvirenten, som Instituttet bliver gjort bekendt med under en opgaves løsning, skal der indgås særlig, skriftlig aftale herom.
- 2.2 Såfremt et forsøgs- eller udviklingsarbejde fører til resultater af almindelig interesse, kan Instituttet lade disse resultater offentliggøre, medmindre andet måtte være aftalt i en hemmeligholdelsesaftale som nævnt i pkt. 2.1.
- 2.3 Når Instituttet påtager sig en opgave, hvori indgår vurdering af en ydelse præsteret af tredjepart, skal rekvirenten respektere, at Instituttet kan henvende sig til tredjeparten eller til andre relevante personer for at søge oplysninger til brug ved opgavens løsning.
- 2.4 Instituttet er til enhver tid berettiget til at meddele oplysninger, som Instituttet ifølge lovgivningen har en forpligtelse til at afgive.
- 2.5 Bliver Instituttet som led i løsningen af rekvirerede opgaver opmærksom på forhold, som efter Instituttets skøn indebærer risiko for væsentlige skadevirkninger på helbred eller miljø, kan Instituttet om fornødent underrette rekvirenten herom. Såfremt rekvirenten ikke herefter, så hurtigt som forholdene tilsiger det, foretager det fornødne for at forhindre eller begrænse risikoen for væsentlige skadevirkninger på helbred eller miljø, er Instituttet, uanset særskilt aftale om diskretion eller hemmeligholdelse, berettiget til at videregive sin viden til relevante instans.

3. Omtale af resultater m.m.

- 3.1 Instituttets rapporter må af rekvirenten kun offentliggøres i deres helhed.
- 3.2 Rekvirenten må ikke omtale eller henvise til Instituttet eller Instituttets medarbejdere i reklame- og markedsføringsforanstaltninger, medmindre der på forhånd i hvert enkelt tilfælde er indhentet skriftlig tilladelse hertil fra Instituttet. En meddelt tilladelse bortfalder, hvis rekvirenten standser eller udskyder arbejdet med en opgave, jf. pkt. 6.1
- 3.3 Udleveret kursusmateriale må ikke mangfoldiggøres. Udleveret kursusmateriale er Instituttets ejendom.
- 3.4 Instituttet har ret til at forlange tilbagelevering fra rekvirenten af de af Instituttet udarbejdede rapporter mv. med tilhørende dokumenter, såfremt Instituttet konstaterer fejl eller mangler i disse.

4. Rettigheder vedrørende opgavens resultater

- 4.1 De materielle resultater, Instituttet frembringer i forbindelse med en rekvireret opgave og retten til at udnytte dem, tilhører alene rekvirenten. Resultater, som foreligger i form af materielle genstande, såsom prototyper, udleveres til rekvirenten på dennes anmodning, så snart slutfregning har fundet sted.
- 4.2 Knowhow og andre immaterielle rettigheder, som Instituttet udvikler eller konstaterer i forbindelse med opgavens løsning, tilhører Instituttet, medmindre andet er skriftligt aftalt. Af rekvirenten kan sådanne rettigheder udnyttes til rekvirentens eget brug i det af parterne skriftligt aftalte eller klart forudsatte omfang.

5. Honorar og betalingsbetingelser

- 5.1 Rekvirerede opgaver udføres som regningsarbejde efter de af Instituttet til enhver tid fastsatte timepriser med tillæg for transportudgifter og andre udlæg.
- 5.2 Instituttet forbeholder sig ved længerevarende opgaver løbende at regulere de under pkt. 5.1 nævnte timepriser med et varsel på 30 dage.
- 5.3 Instituttet har ret til at á conto-fakturere månedsvis bagud.
- 5.4 Ved overskridelse af betalingstiden for Instituttets tilgodehavender beregnes rente med 1½% pr. påbegyndt måned.

6. Ændrings- og afbestillingsret

- 6.1 Beordrer rekvirenten arbejdet standset eller udskudt, jf. pkt. 1.2, skal allerede udført arbejde betales efter regning, ligesom rekvirenten skal refundere Instituttet de udgifter vedrørende det afbestilte eller udskudte arbejde, som Instituttet uanset afbestillingen eller udskydelsen allerede har påtaget sig at afholde, såsom udgifter til tredjemand, særligt udstyr eller lokaler mv.
- 6.2 Ændring af en opgaves karakter eller omfang i øvrigt kan alene ske med Instituttets skriftlige samtykke.

7. Ansvarsregulering

- 7.1 Instituttet er efter dansk rets almindelige erstatningsregler ansvarlig over for rekvirenten for fejl og forsømmelser ved opgavens løsning med de begrænsninger, som følger af punkterne 7.2-7.12. I intet tilfælde er Instituttet ansvarlig for tabsforvoldende forhold eller begivenheder, som ikke skyldes Instituttets fejl eller forsømmelser.
- 7.2 Standses eller udskydes arbejdet med en opgave, jf. afsnit 6, er Instituttet uden ethvert ansvar for eventuelle mangler eller fejl ved det allerede udførte arbejde.
- 7.3 Instituttet er ikke ansvarlig for skader, som indtræffer i forbindelse med anvendelse af en af Instituttet afgivet rådgivning eller prøvnings/kontrolrapport, hvis anvendelsen ligger uden for rammerne af den stillede opgave eller det beskrevne formål.
- 7.4 Afsluttes Instituttets arbejde ikke med en rapport eller levering af en ydelse, eller består ydelsen i en udtalelse, om hvilken det er anført, at den hviler på en skønsmæssig bedømmelse eller vurdering, er Instituttet ikke ansvarlig medmindre, der foreligger grov uagtsomhed hos Instituttet.
- 7.5 Instituttet er kun ansvarlig for forsinkelse i forbindelse med udførelse af opgaver for rekvirenten, såfremt Instituttet særskilt har påtaget sig skriftlig indeståelse for opgavens færdiggørelse til et bestemt tidspunkt.
- 7.6 Instituttet er ikke ansvarlig for ansvarspådragende forhold udvist af tredjemand, medmindre tredjemand er antaget af Instituttet uden at være bragt i forslag af eller er godkendt af rekvirenten.
- 7.7 Er en eller flere andre udover Instituttet ansvarlige over for rekvirenten, hæfter Instituttet kun for så stor en del af rekvirentens tab, som svarer til den del af den samlede skyld, der er udvist af Instituttet.
- 7.8 Har Instituttet påtaget sig på rekvirentens vegne at føre tilsyn med, at ydelser, fra tredjemand til rekvirenten er kontraktmæssige, er Instituttet kun ansvarlig for det tab, rekvirenten måtte lide ved, at Instituttet ikke rettidigt har påtalt, at en ydelse ikke er kontraktmæssig. Instituttets ansvar er således subsidiært i forhold til det ansvar, der af rekvirenten kan gøres gældende mod den pågældende tredjemand, og Instituttets ansvar er i øvrigt undergivet de øvrige begrænsninger i dette afsnit 7.
- 7.9 Har Instituttet modtaget prøver eller materiel fra rekvirenten, er Instituttet alene ansvarlig for tab eller beskadigelse af det modtagne, hvis det er aftalt skriftligt med rekvirenten, at de nævnte prøver/materiel skal tilbageleveres. Endvidere er Instituttets ansvar i et sådant tilfælde betinget af, at det dokumenteres, at Instituttet har udvist grov uagtsomhed, og Instituttets ansvar kan i intet tilfælde overstige materiale-værdien af den modtagne prøve eller det modtagne materiel. Hvis tilbagelevering af prøver og materiel ikke er aftalt, vil opbevaring på Instituttet kun ske indtil 6 måneder efter opgavens afslutning.
- 7.10 Instituttet kan maksimalt gøres ansvarlig for rekvirentens direkte tab. Instituttet er således ikke ansvarlig for driftstab, tabt indtjening eller andet indirekte tab. I intet tilfælde kan Instituttets samlede ansvar overskride 1.000.000 kr. pr. skade med undtagelse af ansvar for personskader i henhold til gældende lovgivning.
- 7.11 Hvis Instituttet af tredjemand bliver gjort ansvarlig for person-, tings- og formueskade, som er forvoldt af Instituttets arbejde, herunder for produktansvar, er rekvirenten forpligtet til at skadesløsholde Instituttet for ethvert ansvar, som ligger udover, hvad rekvirenten måtte kunne gøre gældende mod Instituttet efter reglerne i dette afsnit 7. Instituttet kan kræve, at rekvirenten overtager førelsen af en sådan sag på Instituttets vegne.
- 7.12 Instituttet kan ikke gøres ansvarlig for skader, som ikke skriftligt er gjort gældende inden tre år efter Instituttets levering af den ydelse, på hvilken ansvar begrundes. Instituttets ansvar er i øvrigt betinget af, at rekvirenten reklamerer skriftligt straks, når rekvirenten er eller burde være blevet opmærksom på tilstedeværelsen af et muligt erstatningsansvar for Instituttet. Uanset nævnte tre års frist er Instituttet uden ansvar for skader, som det med den viden og teknik, som forelå på tidspunktet for opgavens udførelse, ikke var muligt at forudse.

8. Tvister

- 8.1 Enhver tvist mellem Instituttet og rekvirenten afgøres efter dansk ret ved Retten i Glostrup.

Februar 2009

Bilag 4

Testrapport fra ældningsforsøg af HDPE-liner,
Teknologisk Institut, 2013



PlanEnergi Nordjylland
Att.: Per Alex Sørensen
Jyllandsgade 1
9520 Skørping

Gregersensvej
DK-2630 Taastrup
Telefon 72 20 20 00
Telefax 72 20 20 19

info@teknologisk.dk
www.teknologisk.dk

30. maj 2013
ipa-sfp/naan

Ældningstest på 2,5 mm HD-PE liner fra AGRU til varmelager – afsluttende rapport

Ældningstesten på ovennævnte folie gennemføres som beskrevet i vores tilbud dateret 3. maj 2012.

Ældningen har nu stået på i 348 døgn, og syv udtagninger er gennemført. Der er udført sammenlignende test med en upåvirket folie (reference).

For at følge ældningen er der udført en visuel undersøgelse af vandpåvirkede overflader af de udtagne prøver af lineren samt en mekanisk test af dem. Ved mekanisk test bestemmes følgende egenskaber (efter ISO 527): E-modul, flydespænding, forlængelse ved flydning, brudstyrke og brudforlængelse.

Resultater

Visuel undersøgelse efter ældning ved 110 °C i 100, 149, 198, 250, 269, 304 og 348 døgn
Den vandpåvirkede overflade viser ingen tegn på nedbrydning

Mekaniske egenskaber

Mekaniske egenskaber vist i tabel 1 er bestemt ved referencemateriale og efter 100, 149, 198, 250, 269, 304 og 348 døgns ældning ved 110 °C.

Tabel 1. Mekaniske egenskaber af ældet membran

Ældningstid, døgn	E-modul, MPa	Flyde- spænding, MPa	Forlængelse ved flydning, %	Brudstyrke, MPa	Brudfor- længelse, %
0 – Ref. langs	580	23,1	12,5	Ingen brud	>700
0 – Ref. tværs	616	23,1	11,7	Ingen brud	>700
100	632	25,7	12,4	Ingen brud	> 700
149	636	26,3	12,0	Ingen brud	> 700
198	499	24,8	17,8	Ingen brud	>700
250	529	26,1	12,1	16,2	116
250R *	519	26,3	18,2	15,7	162
269	587	26,2	12,5	Ingen brud	>600
304	480	25,9	12,1	20,4	<20 **
348	543	27,2	11,9	14,1	61

*R-retest. Der var udtaget ekstra prøver for at verificere testens resultater yderligere.

** 4 prøver knækker med det samme. To andre prøver har forlængelse på 110 og 180 %.

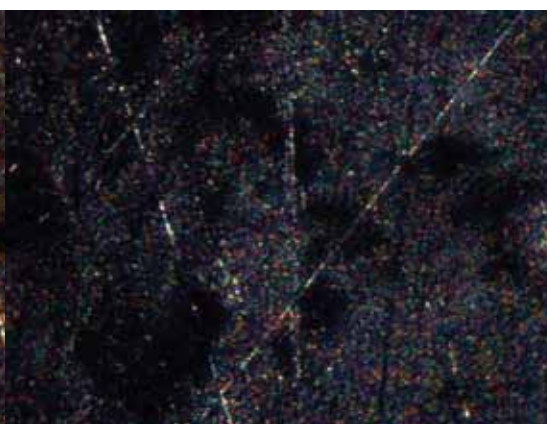
Efter 198 døgns ældning ved 110 °C har HDPE-membranen bibeholdt sine mekaniske egenskaber i stor udstrækning. E-modulet er lidt reduceret og forlængelse ved flydning lidt forøget.

Efter 250 døgn viser HDPE-materialet signifikant mindre forlængelse i sammenligning med referencemateriale. Selvom de mekaniske egenskaber er forværret, viser membranens overflade ingen tegn på nedbrydning (se figur 1 og 2).

Overraskende nok viser prøver udtaget efter 269 døgn ingen brud op til 600 %. Forklaringen på reduceret forlængelse for membran ældet for 250 døgn kan ligge i lokal temperaturvariation og /eller kan være tegn på variation i testmateriale.



Figur 1. Membranoverflade - reference



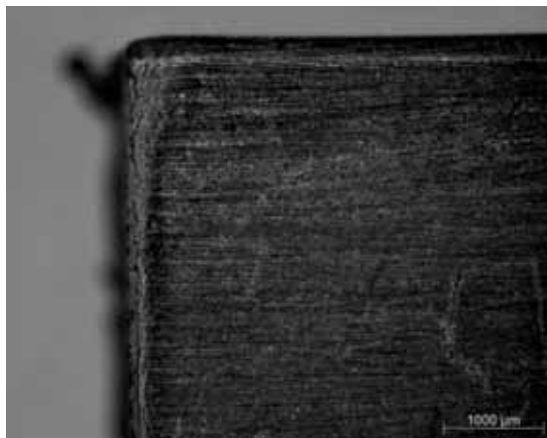
Figur 2. Membranoverflade. Udtag 4 – efter 250 døgns ældning

For at kunne be-/afkræfte de mulige nedbrydnings tendenser, blev der udført OIT (oxidation induction time)-analyse. Resultater vises i figur 11.

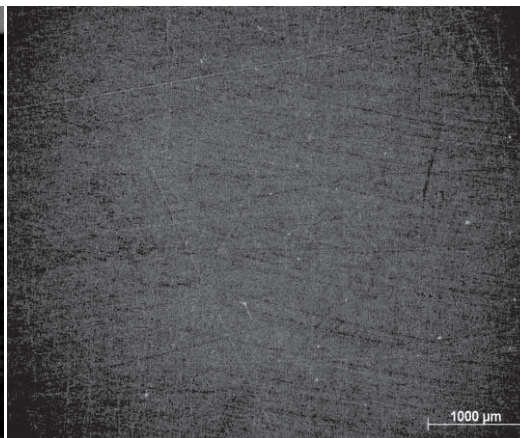
Efter 304 døgn viser HDPE-membranen ringe forlængelse. Den ligger under 20 % for fire prøver og på ca. 110 og 180 % på de resterende to prøver.

Efter 348 døgn accelereret ældning er HDPE-membran skør og viser sprød brud og brudforlængelse mellem 12 og 100 %.

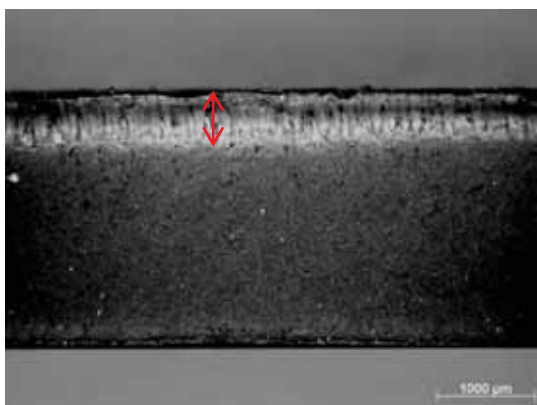
Selve membranens overflade viser ingen tegn på destruktion, se billeder i figur 3 og 4. Tværsnit af membran viser uhomogen brud. Generelt er materialet sprødt. Små områder mod vandside viser resterende elastiske egenskaber, se billeder i figur 4, 5, 6, 7, 8 og 10. Det ser ud til at membran fra udtag syv (efter 348 døgn) er mere skør end membran fra udtag seks (efter 304 døgn).



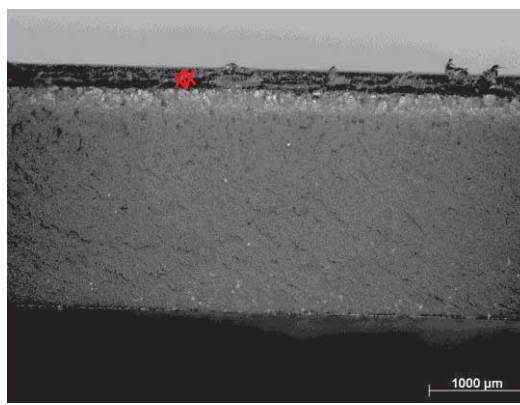
Figur 3. Membrans overflade efter 304 døgn ældning. Prøve 6



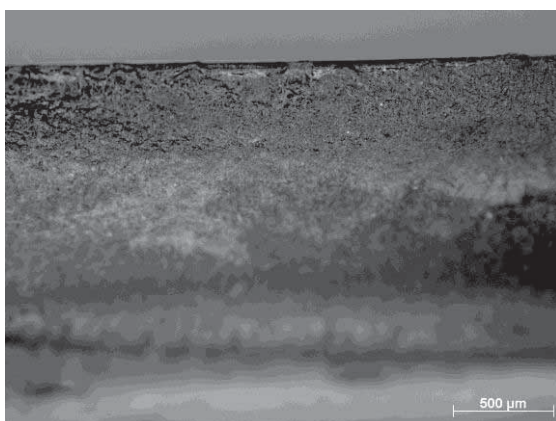
Figur 4. Membrans overflade efter 348 døgn ældning. Prøve 1



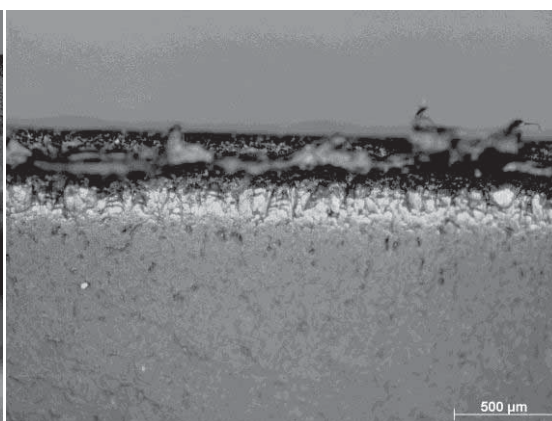
Figur 5. Tværsnit af membran, 304 døgn ældning ved 110 °C. Prøve 6. Røde pile viser område med elastisk karakter.



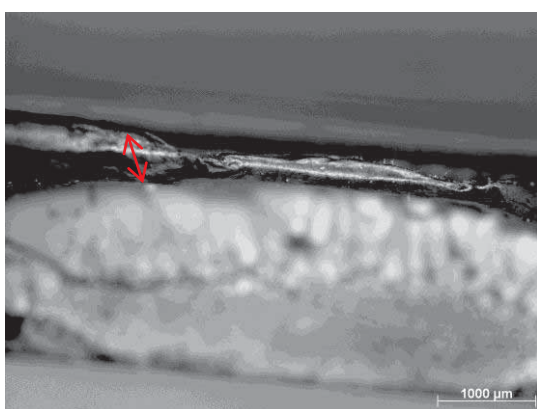
Figur 6. Tværsnit af membran, 348 døgn ældning ved 110 °C. Prøve 4. Røde pile viser område med elastisk karakter.



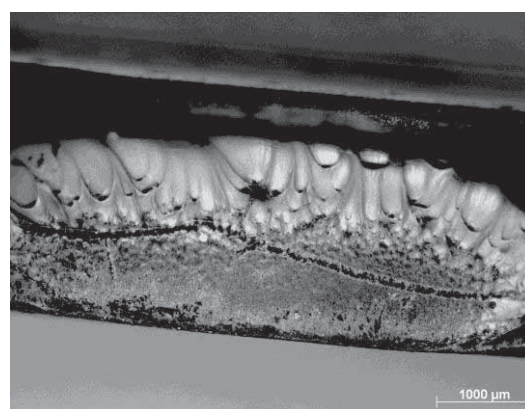
Figur 7. Tværsnit af membran, 304 døgns ældning ved 110 °C. Forstørrelse af membran fra fig. 5



Figur 8. Tværsnit af membran, 348 døgns ældning ved 110 °C. Forstørrelse af membran fra fig. 6



Figur 9. Tværsnit af membran. 304 døgns ældning ved 110 °C. Prøve 1. Røde pile viser elastisk område

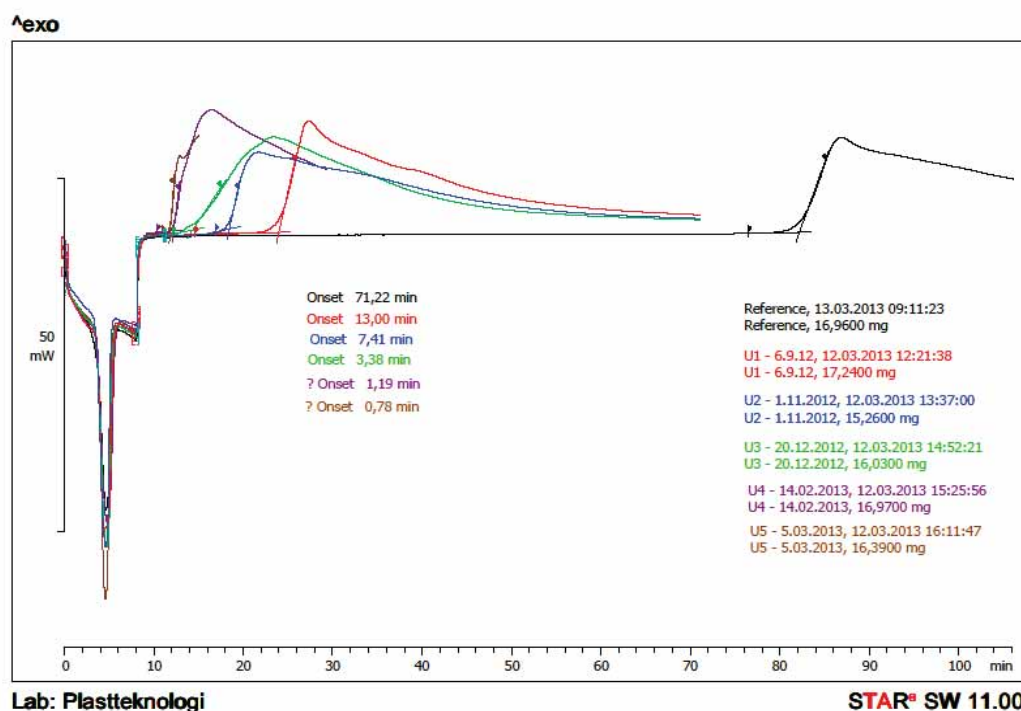


Figur 10. Tværsnit af membran. 304 døgns ældning ved 110 °C. Prøve 1

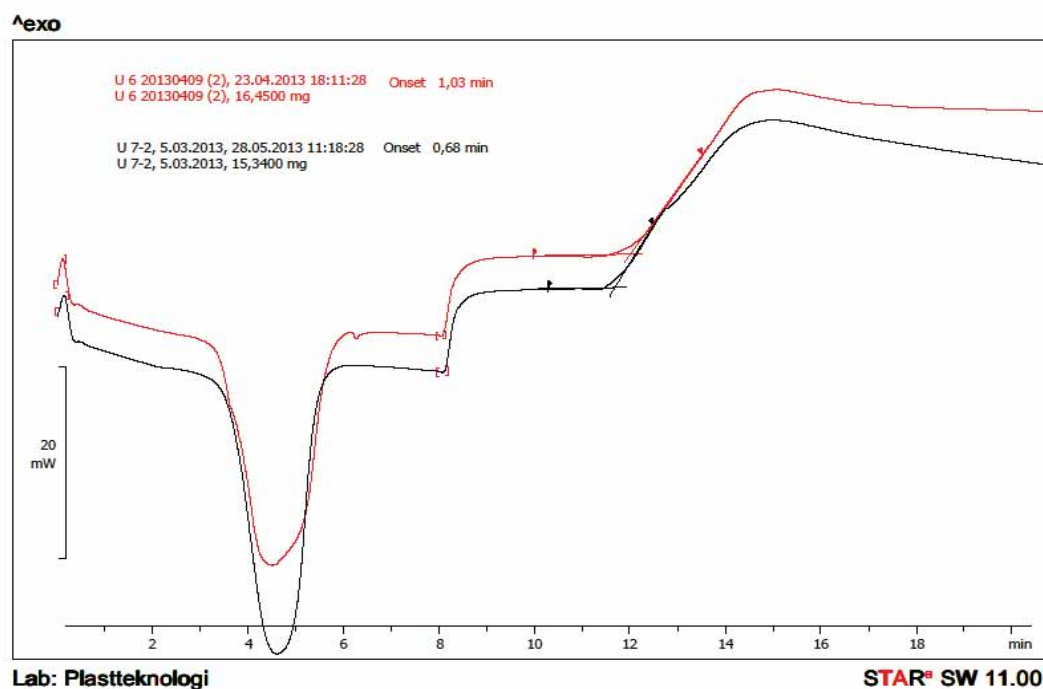
OIT-analysen viser, at membranen ældet i 304 døgn indeholder små mængder af antioxidant på niveau fra sidste måling (efter 269 døgn), se figur 12. Membranen ældet i 348 døgn viser OIT på 0,7 min, se figur 12. Resultater af OIT-målinger vises i tabel 2 nedenfor.

Tabel 2 Oxideringstider for HDPE-membran

Ældningstid, døgn	Oxideringstid; min
Reference -0	71,2
100	13,0
149	7,4
198	3,4
250	1,2
269	0,8
304	1,0
348	0,7



Figur 11. OIT-kurver for HDPE-materiale efter 0 (reference), 100 (U1), 149 (U2), 198 (U3), 250 (U4) og 269 (U5) døgn. Oxideringstid er direkte afhængig af mængden af antioxidant. Oxideringstider vises i tabel 2.



Figur 12. Oxiderings OIT-kurver for HDPE-materiale efter ældning i 304 (sort) og 348 (rød) døgn ved 110 °C. Oxideringstider vises i tabel 2.

Ud fra oxideringstider kan det konkluderes, at HDPE-membranen har mistet sin antioxidant i stort omfang og derfor også sin modstandskraft mod oxidering. OIT-bestemmelser fra udtag efter 250, 269, 304 and 348 døgn viser sammenlignelige værdier. OIT-analysen burde udføres mindst tre gange for at kunne se variationen.

Sammenfatning efter 304 og 348 døgn eksponering ved 110 °C

Ved en visuel undersøgelse kan der ikke ses tegn på materialenedbrydning for begge udtag. Ved bøjning af membranen opstår revner både på vand og luftpåvirket side for begge udtag.

Trækprøvningstest viser kraftigt forringelse i membranens forlængelse. Membranen har mistet sin elasticitet og er blevet skør. Man vurderer, at folien er blevet modtagelig overfor mindre deformationer efter ca. 300 døgn ældning.

Beregning af levetid

Til beregningen af membranens levetid bruges Arrhenius ligning, hvor ældningsfaktor antages til at være 2,0 (ikke eksperimentalt bestemt ældningsfaktor sættes normalt til 2,0 i de fleste ældningstest).

Tidligere gennemførte ældningstest af HDPE-membraner "Fastlæggelse af levetider for 2 HDPE plastlinere til sæsonvarmelagre, UVE-projekt januar 2004" viste, at ældningsfaktoren kunne sættes til 2,3 ved beregning af levetiden.

I tabel 3 vises beregning af levetider for den testede membran ved begge ældningsfaktorer.

Tabel 3. Beregning af levetider af den testede HDPE-membran

Anvendelses temperatur, °C	Levetid, døgn	Levetid, år	Levetid, døgn	Levetid, uger
	Ældningsfaktor 2,0		Ældningsfaktor 2,3	
110	300	0,8	300	0,8
100	600	1,6	690	1,9
90	1200	3,3	1587	4,3
80	2400	6,6	3650	10,0
70	4800	13,2	8395	23,0
60	9600	26,3	19309	52,9

Beregning af membranens levetid i forhold til den tidligere brugte temperaturprofil i sæsonvarmelager ved anvendelse af ældningsfaktor på 2,0 vises i tabel 4.

Tabel 4. Temperatur profil i bassinet og beregning af levetiden af HDPE membran

ÆLDNINGSFAKTOR 2,0					
Måned	Vandtemp. °C	Årlig tidsfraktion, t_n	Levetid ved temp. L_n , døgn	Levetid ved temp. L_n , år	t_n / L_n
Januar	53	0,083	15858	43,45	0,001910446
Februar	45	0,083	27540	75,45	0,001100029
Marts	42	0,083	33874	92,81	0,000894345
April	45	0,083	27540	75,45	0,001100029
Maj	62	0,083	8522	23,35	0,003554934
Juni	68	0,083	5633	15,43	0,005378107
Juli	72	0,083	4274	11,71	0,007087527
August	74	0,083	3723	10,20	0,008136308
September	74	0,083	3723	10,20	0,008136308
Oktober	73	0,083	3989	10,93	0,007593833
November	68	0,083	5633	15,43	0,005378107
December	60	0,083	9783	26,80	0,003096698
Sum					0,053366672
Levetid, år					18,7

Beregning af membranens levetid i forhold til den tidligere brugte temperaturprofil i sæsonvarmelager ved anvendelse af ældningsfaktor på 2,3 vises i tabel 5.

Tabel 5. Temperaturprofil i bassinet og beregning af levetiden af HDPE-membran

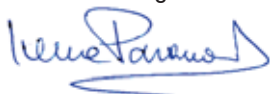
ÆLDNINGSFAKTOR 2,3					
Måned	Vandtemp. °C	Årlig tidsfraktion, t_n	Levetid ved temp. L_n , døgn	Levetid ved temp. L_n , år	t_n / L_n
Januar	53	0,083	36869	101,01	0,000822
Februar	45	0,083	71620	196,22	0,000423
Marts	42	0,083	91869	251,70	0,00033
April	45	0,083	71620	196,22	0,000423
Maj	62	0,083	17468	47,86	0,001734
Juni	68	0,083	10616	29,09	0,002854
Juli	72	0,083	7617	20,87	0,003977
August	74	0,083	6452	17,68	0,004696
September	74	0,083	6452	17,68	0,004696
Oktober	73	0,083	7010	19,21	0,004322
November	68	0,083	10616	29,09	0,002854
December	60	0,083	20622	56,50	0,001469
Sum					0,028598
Levetid, år					35,0

Konklusion

Ud fra de gennemførte undersøgelser vurderes membranens levetid til 18,7 år ved brugstemperaturer som vist i tabel 4 og ved antagelse at ældningsfaktor har værdi 2,0. Hvis vi antager, at ældningsfaktor er 2,3 (ligesom ved tidligere undersøgelser) vil levetiden være 35,0 år.

OIT-analysen viser en eksponentiel afhængighed mellem antioxidanter i membranen og ældningstiden. Flere undersøgelser er nødvendige for bedre bedømmelse af sammenhængen mellem antioxidantniveau og membranens levetid.

Med venlig hilsen
Plastteknologi



Irena Paradowska
M.Sc.Chem. Eng.

Telefon: 72 20 31 41 (direkte)
Email: ipa@teknologisk.dk

Opgaven er udført iht. Teknologisk Instituts almindelige vilkår for rekvirerede opgaver, hvoraf et eksemplar vedlægges.

Bilag 5

Længdeudvidelse, PlanEnergi



Snit A-A
(20)3 03

88.140
 $\Delta L_A = 89 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 106 \text{ mm}$

36.638
 $\Delta L_A = 37 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 44 \text{ mm}$

52.646
 $\Delta L_A = 53 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 63 \text{ mm}$

37.805
 $\Delta L_A = 38 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 45 \text{ mm}$

$L = 113.14$
 $\Delta L_A = 115$
 $\Delta L_B = 136$

1300

ø200 mm PVC rør PN20

12.600
 $\Delta L_A = 23 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 27 \text{ mm}$

ø82/90mm
 ø82/90mm
 ø82/90mm
 ø82/90mm
 ø82/90mm
 ø82/90mm

100mm portgraves og
 erstattes af harpet sand, 3000
 som komprimeres til
 samme niveau som
 omgivelser

$\Delta L_A = 48 \text{ mm}$
 $\Delta L_B = 57 \text{ mm}$