

Materialteknik

1165

Handbok – Statusbedömning av polymera material i rökgassystem

Stefanie Römhild

**Handbok – Statusbedömning av polymera material
i rökgassystem**

**Handbook – Status assessment of polymeric
materials in flue gas cleaning systems**

Stefanie Römhild

M08-821

Abstract

This report focuses on the use of plastic process components in the flue gas cleaning units of incineration plants. It aims to shortly introduce the main polymeric materials used in flue gas cleaning equipment, i.e. fibre reinforced plastics (FRP) and thermoplastic materials such as polypropylene (PP) and fluoropolymers, and to discuss their use in e.g. scrubbers, flue gas ducts, flue gas stacks and other equipment with respect to typical damage mechanisms and service life. The use, advantages, disadvantages and limitations of different non-destructive (NDT) inspection techniques, explored within the project, are discussed. Ways to inspect plastic process equipment, to assure quality and to increase the service life are addressed. An outlook on the development of the use of NDT techniques for polymeric materials in process equipment is given.

The project was financed by Värmeforsk to 75 % and to 25 % by the plastic research program at Swerea KIMAB. The reference group consisted of Roger Lundberg (Mälarenergi), Anders Eklund (Fortum Värme), Per-Åke Björnstedt (Söderenergi, ÅF Inspection and Materials Technology), Lena Morén (Ahlstrom Powers) och Pernilla Utterström (Inspecta Sweden AB). Also Gunnar Bergman, his work and experience contributed strongly to this report.

Sammanfattning

I dagens system med avancerade energiåtervinningssystem och bättre rökgasrening används i allt större utsträckning polymera material i de fall där miljön är alltför korrosiv för metalliska material. Typiska polymera material är glasfiberarmerad esterplast (GAP), glasflakefyllda beläggningar, PP och fluorplaster. De allt större kraven på effektivitet och lönsamhet hos dagens värme-/kraftvärmeverk och industri-anläggningar innebär att även de polymera materialen ställs inför större påfrestningar i form av ökade temperaturer, temperaturväxlingar, ändringar i bränslesammansättning och därmed rökgassammansättning samt längre drifttider. Kunskapen om hur driftförhållanden påverkar polymera material upplevs dock generellt bristfällig och en kontinuerlig bedömning av materialens status är därför nödvändig. Projektets övergripande mål har därför varit att utvärdera och ta fram enkel metodik för statusbedömning av polymera material som används i rökgasanläggningar under olika driftförhållanden med syfte att underlätta och optimera förebyggande underhåll samt bedömning av kritiska skador. Målsättningen var även att sammanställa erfarenheter och kunskap av användning av polymera material i rökgasreningssystem. Projektet innefattade en inventering av erfarenheter med avseende på prestanda för polymera material i rökgasreningssystem. Prover från avställda anläggningar och anläggningar i drift samlades in för analys och statusbedömning. Inverkan av processer där det doseras svavel vid förbränningen på prestanda hos GAP studerades i fältexperiment. Oförstörande provningsmetoder utvärderades för statusbedömning av polymera material med praktiska experiment på laboratorium.

Projektets resultat återges i form av en handbok som riktar sig framförallt till anläggningsägare och driftpersonal på förbränningsanläggningar och inom cellulosaindustrin. Ett inledande kapitel beskriver typiska polymera material (GAP, PP, PVC, fluorplaster och flakebeläggningar) för användning i rökgasreningssystem samt de korrosionstyper som kan förekomma. Inventeringen av processutrustning är indelad efter processkomponent och behandlar skrubbrar, rökgaskanaler, skorstenar, inredning och kringutrustning. Olika typiska skador illustreras för komponenterna tillverkade med olika material. I efterföljande kapitel beskrivs olika oförstörande provningsmetoder (värmekamera, ultraljud, fuktmätare, penetrantprovning, spektroskopiska metoder, digitalröntgen, terrahertzvågor samt andra hjälpmedel) med för- och nackdelar samt med de begränsningar metoderna har idag. Resultaten arbetas in i avsnitt om inspektion och statusbedömning (kapitel 5), åtgärder för förlängning av livslängd (kapitel 6) och allmänna rekommendationer (kapitel 7). Inverkan av olika skador på livslängd och möjliga åtgärder diskuteras. Handboken avslutas med en utblick över utvecklings- och förbättringsbehov hos oförstörande provningsmetoder. Många tekniker befinner sig fortfarande under utveckling och behöver förbättras. De redovisade resultaten kan vara till nytta för anläggningsägare och underhållspersonal i frågan om att upptäcka skador och bedöma åtgärder i form av egenarbete eller inkoppling av andra inspektions- eller underhållsföretag.

Nyckelord: Polymera material, rökgasrening, glasfiberarmerad plast (GAP), skador, statusbedömning, oförstörande provning

Executive Summary

In today's flue gas cleaning systems with advanced energy recovery systems and improved flue gas cleaning, the use of polymeric materials has continuously increased in applications where the flue gas environment is too corrosive to be handled with metallic materials. Typical polymeric materials used are fibre reinforced plastics (FRP), glassflake-filled linings, polypropylene (PP) and fluoropolymers. Demands on increased profitability and efficiency at incineration plants involve that also polymeric materials have to face more demanding environments with increased temperature, temperature changes, changes in fuel composition and therewith fluegas composition and longer service intervals. The knowledge on how polymeric materials perform in general and how these service conditions influence them, is, however, poor and continuous status assessment is therefore necessary. The overall aim of this project has been to assess simple techniques for status assessment of polymeric materials in flue gas cleaning equipment and to perform an inventory of present experience and knowledge on the use of polymeric materials. The project consisted of an inventory of present experience, analysis of material from shut-down plants and plants still in service, field testing in a plant adding sulphur during combustion and the assessment of different non-destructive testing (NDT) methods by laboratory experiments.

The results of the project are summarised in the form of a handbook which in the first place addresses plant owners and maintenance staff at incineration plants and within the pulp and paper industry. In the introductory chapter typical polymeric materials (FRP, flake linings, PP and fluoropolymers) used in flue gas cleaning equipment are described as well as the occurring corrosion mechanisms. The inventory of process equipment is divided into sections about scrubbers, flue gas ducts, stacks, internals and other equipment such as storage tanks. Typical damages are illustrated for different construction materials. The following chapter describes various NDT techniques (thermal imaging, ultrasonic, moisturemeter, spectroscopic methods, digital X-ray, terahertz technique and other technical aids with respect to advantages, disadvantages and limitations at present. The results are worked into the following chapters on inspection and status assessment (chapter 5), measures to increase service life (chapter 6) and general recommendations (chapter 7). The impact of different types of damages on the service reliability is discussed. In the end of the report is an outlook with possibilities, development and needs for improvement for different NDT techniques. Many of the techniques are still under development and need to be improved. The presented results are of use for plant owners and maintenance staff when performing inspections, detecting and assessing damages and evaluating measures in terms of own work or engaging inspectorates or other maintenance companies.

Keywords: Polymeric materials, flue gas cleaning, fibre reinforced plastics (FRP), damage, status assessment, non-destructive testing

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	PROJEKTETS OMFATTNING.....	2
1.3	RAPPORTENS STRUKTUR	2
2	POLYMER MATERIAL FÖR RÖKGASRENING- OCH KRINGUTRUSTNING	4
2.1	GLASFIBERARMERAD PLAST (GAP)	4
2.2	VANLIGA TERMOPLASTER	8
2.3	FLAKEBELÄGGNINGAR.....	9
2.4	KORROSIONSSKADOR I PLAST	9
3	INVENTERING AV ERFARENHETER FRÅN PROCESSUTRUSTNING I PLAST.....	15
3.1	SKRUBBRAR	15
3.2	ANDRA PROCESSKOMponenter I NÄRHETEN AV SKRUBBERANLÄGGNINGEN	24
3.3	RÖKGASKANALER	26
3.4	SKORSTENAR.....	31
3.5	KRINGUTRUSTNING	36
4	GENOMGÅNG AV OLIKA PROVNINGSMETODER	40
4.1	VÄRMEKAMERA (INFRARED THERMOGRAPHY).....	40
4.2	ULTRALJUDSTEKNIK FÖR TJOCKLEKSMÄTNING OCH DETEKTERING AV DEFEKTER	44
4.3	UNDERSÖKNING AV FUKTSKADAT LAMINAT MED FUKTMÄTARE.....	46
4.4	IDENTIFIERING AV HARTSMATRISEN MED SPEKTROSKOPISKA METODER	49
4.5	IDENTIFIERING AV SPRICKOR MED PENETRANT.....	51
4.6	BARCOLMÄTARE	54
4.7	DIGITAL RÖNTGEN	55
4.8	OFÖRSTÖRANDE PROVNING MED TERRAHERTZVÅGOR	57
4.9	ANDRA HJÄLPMEDEL	59
5	INSPEKTION OCH STATUSBEDÖMNING AV PROCESSUTRUSTNING I POLYMER MATERIAL	61
5.1	REGLERVERK KRING BESIKTNING, KVALITETSKONTROLL OCH INSPEKTION.....	61
5.2	KVALITETSKONTROLL OCH INSPEKTION AV NY UTRUSTNING.....	63
5.3	UNDERHÅLLSINSPEKTIONER	64
5.4	BETYDELSE AV OLIKA DEFEKTER FÖR FORTSATT DRIFT OCH LIVSLÄNGD.....	67
6	ÅTGÄRDER FÖR ÖKAD LIVSLÄNGD	71
6.1	INVÄNDIG REPARATION AV GAP.....	71
6.2	BELÄGGNINGAR PÅ STÅLYTOR.....	72
7	ALLMÄNNA REKOMMENDATIONER.....	74
7.1	UPPHANDLING	74
7.2	MATERIALVAL FÖR ÖKAD DRIFTSÄKERHET OCH LIVSLÄNGD	75
8	UTBLICK	77
9	REFERENSER	78

Bilagor

BILAGA A – STATUSBEDÖMNING NORRSUNDETS SKRUBBERANLÄGGNING

BILAGA B - FÄLTTEST VID MÄLARENERGI

BILAGA C – VÄRMEKAMERA

BILAGA D – ULTRALJUD

BILAGA E - FUKTMÄTARE

BILAGA F - SPEKTROSKOPISKA METODER

BILAGA G - IDENTIFIERING AV SPRICKOR MED PENETRANT

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Traditionellt har metalliska material varit det huvudsakliga konstruktionsmaterialet för processutrustning i rökgasanläggningar i värme-/kraftvärmeverk och industri-anläggningar. I dagens system med avancerad energiåtervinning och bättre rökgasrening används i allt större utsträckning polymera material i de fall där miljön är alltför korrosiv för de flesta metalliska material. Typiska polymera material är framförallt glasfiberarmerad esterplast (GAP), men även glasflakefyllda beläggningar, PP och fluorplaster. De allt större kraven på effektivitet och lönsamhet hos dagens värme-/värmekraftverk innebär att även de polymera materialen ställs inför allt större påfrestningar i form av ökade temperaturer, temperaturväxlingar, ändringar i rökgassammansättning beroende på ändringar i bränslesammansättning, samt längre drifttider.

Kunskapen om hur driftförhållanden påverkar polymera material är generellt bristfällig och en kontinuerlig bedömning av materialens status är därför nödvändig. Ett välplanerat underhåll är viktigt och kommer att bli allt viktigare för att minimera drift- och underhållskostnader genom att undvika oönskade driftstopp. Ur ett ekonomiskt och ekologiskt perspektiv finns samtidigt krav på ett maximalt utnyttjande av materialen i processkomponenterna för en ökad livslängd. Erfarenheter från kontakt med underhållsansvariga via t.ex. Korrosionsnätverk för förbränningsanläggningar (Swerea KIMAB) har dock visat att statusbedömning och underhåll av de polymera materialen oftast anses som ett problem i jämförelse med metalliska material. För att öka förtroendet för användning av polymera material i processutrustning är det därför viktigt att utveckla verktyg för bättre statusanalyser och att sammanställa erfarenheterna om polymera materials långtidsegenskaper som underlag för livslängdsbedömningar.

Projektets övergripande mål har varit att utvärdera och ta fram enkel metodik för statusbestämning av polymera material som används i rökgasanläggningar under olika driftförhållanden med syfte att underlätta och optimera förebyggande underhåll samt bedömning av kritiska skador. Målsättningen var även att sammanställa erfarenheter och kunskap av användning av polymera material i rökgasreningssystem för att pålitligt och säkert kunna bedöma konsekvenser av skador, deras relevans, den återstående livslängden, samt för att kunna rekommendera lämpliga åtgärder. Informationen kan även vara till nytta vid inköp av ny utrustning.

Projektet finansierades till 75 % av Värmeforsk och till 25 % av medlemsprogrammet ”Corrosion properties of polymeric materials” vid Swerea KIMAB. I referensgruppen ingick Roger Lundberg (Mälarenergi), Anders Eklund (Fortum Värme), Per-Åke Björnstedt (Söderenergi, ÅF Konsult), Lena Morén (Ahlstrom Powers) och Pernilla Utterström (Inspecta Sweden AB). Även Gunnar Bergman bidrog mycket med sitt arbete och sin långa erfarenhet av användning av polymera material i processutrustning.

1.2 Projektets omfattning

Projektarbetet innefattade en inventering av litteraturen och erfarenheter med avseende på prestanda för polymera material i rökgasreningsanläggningar under normala och avvikande förhållanden, både idag rådande och framtida driftförhållanden med hänsyn till nya processer och processbetingelser. Prov från avställda anläggningar och anläggningar i drift samlades in för närmare analys och statusbedömning på laboratorium. Här ingick även värme-/kraftvärmeverk och värmeanläggningar i drift inom cellulosa- och pappersindustrin. Inverkan av nya processer på polymera material, t.ex. Chlorout[®]-liknande processer där man doserar svavel vid förbränning, studerades i fältexperiment. Vidare så utvärderades oförstörande provningsmetoder för statusbedömning av polymera material med avseende på för- och nackdelar med praktiska experiment på laboratorium. Resultaten sammanfattas i rekommendationer kring stegvis statusbedömning av polymera material, en diskussion hur olika skador påverkar livslängden och mer allmänna rekommendationer.

1.3 Rapportens struktur

Enligt önskemål från referensgruppen är rapporten utformad som en handbok som ska ge läsaren möjlighet att snabbt få en överblick över området samt ge vägledning hur man kan gå till väga vid till exempel inspektion eller vad man ska tänka på vid upphandling. Rapporten redovisar därför inte resultaten i detalj och den mer intresserade läsaren hänvisas till bilagorna.

Handboken är indelad enligt följande:

- Kapitel 1. Inledning
- Kapitel 2. Polymera material i rökgasrenings- och kringutrustning
- Kapitel 3. Inventering av erfarenheter från processutrustning i plast
- Kapitel 4. Genomgång av olika provningsmetoder
- Kapitel 5. Inspektion och statusbedömning av processutrustning i polymera material
- Kapitel 6. Åtgärder för ökad livslängd
- Kapitel 7. Allmänna rekommendationer
- Kapitel 8. Utblick

Kapitel 2 ger en introduktion i de typiska polymera material som används i rökgasrenings- och kringutrustning (GAP, termoplastmaterial, flake) samt typiska skador eller korrosionsmekanismer som kan uppträda vid användning av sådana material. Kapitel 3 sammanställer erfarenheter och kunskap kring användning av polymera material i rökgasreningssystem. Kapitel 4 redovisar resultaten från undersökningen av olika oförstörande provningsmetoder för processutrustning i polymera material. Deras för- och nackdelar samt begränsningar är beskrivna. I kapitel 5 behandlas förfarande för inspektion och statusbedömning av processutrustning i nyskick och efter användning. Det hänvisas även till regelverk kring besiktning och inspektion av processutrustning. Kapitel 6 beskriver åtgärder för ökad livslängd med hänsyn till reparation och beläggningar på stålytor. I kapitel 7 ges allmänna rekommendationer kring upphandling och materialval. Slutligen ger Kapitel 8 en utblick riktad framförallt mot statusen av oförstörande provningsmetoder idag och i framtiden.

I bilagorna kan ytterligare information kring mer detaljerade resultat från undersökning av prov från avställda anläggningar och fälttester. Utvalda oförstörande provningsmetoder redovisas mer i detalj.

2 Polymera material för rökgasrenings- och kringutrustning

Detta kapitel beskriver kort de vanligaste polymera materialen som används i rökgasrenings- och processutrustning samt vilka skador som kan uppträda i materialen. Vanligast är glasfiberarmerad plast (GAP) som används i både stora konstruktioner som skrubbrar och skorstenar samt i mindre konstruktioner som rörledningar och lagringstankar. Andra plaster som används är polypropen (PP), fluorplaster och till viss del även polyvinylklorid (PVC). Även glasflake-beläggningar/flakelinings på stål eller GAP på stål eller betong kan förekomma. I vissa fall används termoplaster i kombination med GAP (termoplastlinad GAP).

2.1 Glasfiberarmerad plast (GAP)

GAP är ett kompositmaterial som består av en hartsmatris i form av en hårdplast och en glasfiberarmering. I rökgasreningsprocessen förekommer GAP främst i skrubbrar, skorstenar, tankar, rökgaskanaler och rörledningar. Typiska hårdplaster som används för tillverkning av processutrustning i GAP omfattar bisfenol A epoxi-baserad vinylester, novolack epoxy-baserad vinylester, bisfenol A fumarat-baserad polyester, samt på senare tid även uretan-modifierade vinylesterhartser. Hartstyperna skiljer sig i temperatur- och kemikaliebeständighet. Tabell 1 visar en sammanställning av hårdplasterna med några vanliga handelsnamn. Derakane, Atlac och Dion avser produkter från Ashland, DSM Composite Resins respektive Reichhold. Det finns dock även andra tillverkare av hårdplast för processutrustning. Tabellen redovisar även HDT (Heat distortion temperature) eller motsvarande glastransitionen mätt med DSC (termisk analys). HDT är definierad som den temperatur som ger en viss böjning i böjprovning med specificerad last (ISO 75) och avser alltså mjukningstemperaturen. Enligt olika designstandarder ska design-temperaturen ligga minst 20°C under HDT. Novolackhartserna och framförallt Derakane 470 HT har således de högsta användningstemperaturerna. I applikationer som skorstenar rapporteras användning av GAP med lämpligt harts vid temperaturer upp till 180°C.

Tabell 1. Sammanställning av olika hårdplasttyper med olika handelsnamn och information om HDT/T_g.

Table 1. Different types of thermoset resin including selected commercial names and information on HDT/T_g.

Hårdplasttyp	Kommersiella produkter	HDT enligt datablad/T _g från DSC mätning
Bisfenol A epoxi-baserad vinylester	Derakane 411, Atlac 430, Dion 9100	Ca 100-105/120-125°C
	Derakane 441	Ca 120/132°C
	Dion 9700	160°C HDT
Novolack epoxy-baserad vinylester	Derakane 470, Atlac 590, Dion 9400	Ca 130-140/155-160°C
	Derakane 470HT	180°C HDT
Bisfenol A fumarat-baserad polyester	Atlac 382	Ca 120/130-135°C

Uretan-modifierad vinylesterharts	Atlac E-Nova FW2045	Ca 145/155-160°C
-----------------------------------	---------------------	------------------

Hartset är löst i ett lösningsmedel (styren) som deltar i tvärbindnings- eller härdreaktionen. Vanligtvis används en peroxid som härdare (tex MEK peroxid) tillsammans med en accelerator (cobalt-baserad) för att starta härdreaktionen. I vissa fall används även DMA (dimetylanilin) som promotor i härdsystemet, t.ex. vid låga temperaturer. Härdreaktionen är exoterm, d.v.s. värme frigörs. Det finns därför begränsningar i hur tjockt ett laminat kan tillverkas i ett steg. Ett tjockare laminat måste därför tillverkas i flera steg med en mellanhärdning. Tiden för mellanhärdning får inte vara för lång. I kontakt med syre eller luft avtar härdreaktionen pga luftinhibering och ett ytskikt med låg uthärtningsgrad bildas.

Armeringen i GAP består främst av glasfiber. Man skiljer både mellan de olika armerings- och glastyperna. Olika glastyper är bland annat E-glas, C-glas och borfritt glas. Dessa glastyper skiljer sig i sin kemiska sammansättning och därmed också i sin korrosionshårdighet mot basiska och sura miljöer. Borfritt glas har t.ex. bättre korrosionshårdighet i sura miljöer än vanligt E-glas och rekommenderas därför ofta i sådana miljöer. C-glas används främst i ytmattor.

Olika armeringstyper omfattar ytmatta, matta av huggen fiber (chopped strand mat, CSM), rovingväv (woven roving) eller kontinuerlig armering (roving). Även 3-D matta förekommer, som skapar en luftspalt i laminatgodset. Tabell 2 och Figur 1 visar en sammanställning över olika armeringstyper.

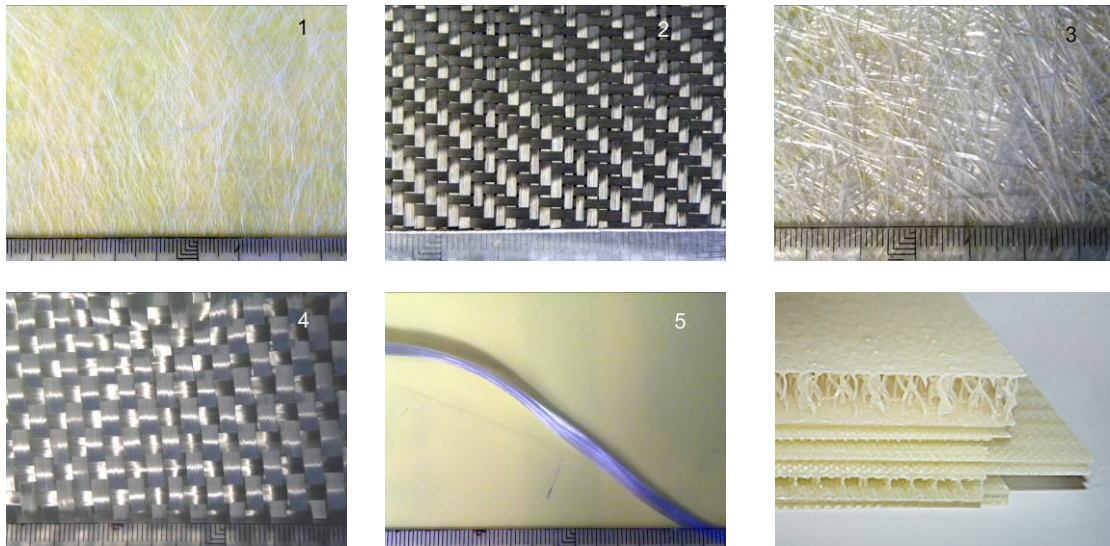
På glasytan appliceras i tillverkningsprocessen en tunn beläggning eller ett överdrag, en s.k. sizing, som bland annat ska skydda fibrerna vid tillverkningen och ge god vidhäftning och vätning vid lamineringen. I CSM matta hålls fibrerna ihop av ett bindemedel som för laminat i processutrustning ska vara pulverbunden.

Tabell 2. Armeringstyper använda för GAP processutrustning.

Table 2. Different types of reinforcement for FRP process equipment.

Armeringstyp	Material	Användning
Ytmatta	C-glas Borfritt glas (Advantex) Syntetisk ytmatta som polyester eller PAN Kolfiber som väv eller matta	Används i spärrskiktets insida för att bygga upp ett hartsrikt skikt med bra motstånd mot kemikalieangrepp. Kolfibermattan kan användas i applikationer där det finns risk för ytsprickbildning.
Matta av huggen fiber	E-glas Borfritt glas (Advantex)	I spärrskiktet och tillsammans med rovingväv i handupplagt styrkelaminat
Rovingväv	E-glas Borfritt glas (Advantex)	I handupplagt styrkelaminat
Roving	E-glas Borfritt glas (Advantex)	I fiberlindat styrkelaminat
3-D matta	E-glas (Parabeam)	Mattan reser sig då den impregneras med harts och en luftspalt bildas. Används i fall där temperaturen eller

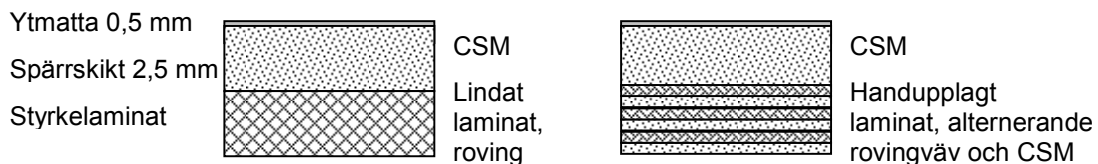
		temperaturgradienter är höga så att det kan finnas risk för delamineringar (skiktningar) eller som läckagekontroll.
--	--	---



Figur 1. Olika armeringstyper för GAP: 1 C-glas ytmatta, 2 Kolfiberytmatta, 3 Matta av huggen fiber (CSM), 4 Rovingväv, 5 Roving, 6 3-D matta (impregnerad med harts).

Figure 1. Different types of reinforcement for FRP: 1 C-glass veil, 2 Carbon fibre woven roving for use as surface veil, 3 Chopped strand mat (CSM), 4 Woven roving, 5 Roving, 6 3-D mat (resin-impregnated).

GAP-konstruktioner kan tillverkas i processer som fiberlindning, men även genom handuppläggning. Vid handuppläggning kan många olika och komplicerade geometrier tillverkas till skillnad med fiberlindning som begränsas till cirkulära geometrier. I olika standarder som PLN 1983¹, PRN 1988², BS 4994³, AD-Merkblätter⁴ och SS-EN 13121⁵ är det specificerat att en GAP-konstruktion för bruk i processutrustning ska bestå av ett s.k. spärrskikt (corrosion barrier) på insidan med en tjocklek på vanligtvis 2,5 – 3 mm och en lastbärande del, styrkelaminatet, Figur 2. Spärrskiktet har uppgiften att skydda styrkelaminatet från eventuella korrosionsangrepp och är uppbyggt av ytmatta och matta av huggen fiber. Styrkelaminatet dimensioneras utan att ta hänsyn till tjockleken och de mekaniska egenskaperna hos spärrskiktet.



¹ PLN Plastkärlnormer, Tryckkärlskommissionen, 1983

² PRN Plaströrledningsnormer, 1988

³ British standard 4994:1987; "Design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics".

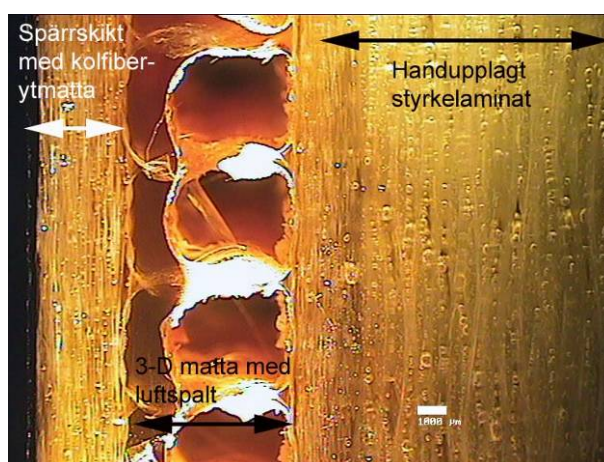
⁴ AD-Merkblätter N1 "Druckbehälter aus textilglasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK)", AD 2000-Merblatt, Ausgabe Oktober 2000

⁵ EN 13121-3:2008; "GRP vessels and tanks for use above ground – Part 3: Design and Workmanship"

Figur 2. Schematisk ritning av lindat och handupplagt laminat med spärrskikt och styrkelaminat.

Figure 2. Schematic drawing of filament-wound and hand-laid-up laminate consisting of a corrosion barrier and a structural laminate.

Fiberlindat styrkelaminat tillverkas med kontinuerlig roving. I handupplagt styrkelaminat används växelvis matta av huggen fiber och rovingväv. Glashalten i spärrskiktet är ca 25 till 30 vikts%, men högre i lindat laminat, och även i handupplagt styrkelaminat. Figur 2 visar schematiska ritningar över olika laminatuppbyggnader. 3-D matta används t.ex. mellan styrkelaminat och spärrskikt för att skapa en luftspalt, Figur 3.



Figur 3. Polerat tvärsnitt som visar ett laminat med 3-D väv mellan spärrskikt och styrkelaminat.

Figure 3. Polished cross-section of a laminate with a 3-D fabric between the barrier layer and the structural laminate.

Den speciella uppbyggnaden hos GAP processutrustning med ett styrkelaminat och ett spärrskikt tillåter således ett visst korrosionsangrepp så länge spärrskiktet har förmågan att skydda styrkelaminatet. Detta innebär även att ett GAP-laminat kan repareras genom att det gamla spärrskiktet blåstras bort och ett nytt skikt byggs upp, vilket i vissa fall förlänger livslängden på en GAP-konstruktion.

Vid en mycket korrosiv miljö kan spärrskiktet ersättas av en termoplastlining med bättre korrosionshårdighet. För en bra funktion är det oftast önskvärt med bra vidhäftning mellan linern och GAP materialet, vilket kan fås genom ytbehandling, t.ex. med en primer eller mekanisk förankring. Ett GAP-laminat tillverkat med matta av huggen fiber (CSM) appliceras även ibland direkt på stål eller betong. Även i detta fall är vissa åtgärder nödvändiga för att uppnå bra vidhäftning mellan GAP materialet och underlaget.

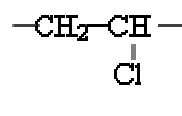
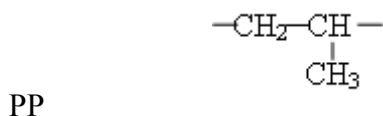
Mer information finns även tillgänglig i olika tekniska dokument utgivna av hartstillverkarna^{6 7 8}.

2.2 Vanliga termoplaster

Polypropen (PP, Figur 4) används främst i skrubbrar som material för avvattningsgaller och fyllkroppar samt i rörledningar och tankar. I förbränningsanläggningar med mycket korrosiva rökgaser som t.ex. anläggningar för industriavfall kan PP även förekomma som lining i GAP-skrubbrar. Den maximala användningstemperaturen ligger på ca 110°C respektive 140°C vid långvarig respektive kortvarig användning (utan mekanisk belastning). PP har god hårdighet mot både sur och alkalisk miljö och förekommer i olika typer, som PPH (homopolymer), PPR (random copolymer) och PPB (blockpolymer). PPH innehåller endast polypropenenheter i polymerkedjan. PPR och PPB är sampolymerer av propen och mestadels eten. I jämförelse med PPH är mjukningstemperaturen något lägre, materialet är mer flexibelt med något förbättrad slagseghet vid låga temperaturer för de två sistnämnda. Polypropen är känslig för oxidativ nedbrytning vilket medför att olika typer av stabilisatorer måste tillsättas för att öka livslängden. Mängden aktiv stabilisator som finns kvar efter tillverkning av olika halvfabrikat och komponenter är oftast en kvalitetsaspekt som bör tas hänsyn till vid inköp av utrustning i PP.

Polyvinylklorid (PVC, Figur 4) och i vissa fall även klorerad polyvinylklorid (CPVC) förekommer främst i olika typer av processledningar och möjligen även som liningmaterial i tankar. Den maximala användningstemperaturen hos PVC ligger på 60°C (mjukningstemperatur 70 – 80°C). CPVC tillverkas genom att efterklorera PVC vilket ökar mängden klor i polymerkedjan. Därmed höjs även mjukningstemperaturen (ca 110 – 120°C) vilket medför att CPVC kan användas vid högre temperatur än PVC. Även PVC och CPVC har bra kemikaliehårdighet mot syror och många baser. Fysikalisk åldring samt angrepp av vissa kemikalier som t.ex. salpetersyra eller oxidativa kemikalier som klordioxid kan medföra en viss försprödning vilket kan göra materialet känsligt för slag. Inom ramen för detta projekt har dock inga negativa erfarenheter med PVC och CPVC rapporterats.

Fluorplaster är kända för mycket god kemikaliehårdighet, låg permeabilitet och hög temperaturresistens. Fluorplaster som PVDF (polyvinylidenfluorid) och PTFE (polytetrafluoreten, Teflon), Figur 4, används tex som lining i kondensorn i den våttorra övergångszonen, i rörledningar för koncentrerade syror samt i värmeväxlare. PTFE kan användas vid temperaturer upp till 260°C och PVDF upp till 140°C.



⁶ Ashland, Fabricating Tips – Composite Polymers, Bulletin #2898, 2005

⁷ DSM Composite Resins, Anti-Corrosion Guide, DRS-MBACGEEN0106-2, 2006

⁸ Reichhold, Chemical Resistance Guide



Figur 4. Struktur på PP, PVC, PVDF och PTFE.

Figure 4. Structure of PP, PVC, PVDF and PTFE.

2.3 Flakebeläggningar

Flakebeläggningar appliceras som korrosionsskydd på metallytor och består av ett hårdplastmaterial som innehåller glasflake samt eventuellt fyllmedel och pigment. Glasflaken är små, tunna flagor av glas som används för att minska permeabiliteten genom beläggningen och förbättra de mekaniska egenskaperna (nötning). Vid optimal applicering av flakebeläggningen orienteras alla glasflake parallellt till stålytan varvid diffusionsvägarna ökar, vilket medför att permeabiliteten minskar. Hårdplaster som används i flakebeläggningar är tex vinylester eller novolackhartser beroende på miljö och temperatur.

Flakebeläggningar kan appliceras på en metallyta genom målning eller sprutning. Ytbehandlingen av stålytan samt tjockleken på beläggningen är två kritiska faktorer för en hållbar beläggning med god funktion. Om föroreningar finns på metallytan innan beläggningen appliceras kan blåsbildning uppstå. En tumregel säger att den rekommenderade tjockleken för en flakebeläggning är ca 1,5 mm. Tunnare beläggningar ger inte tillräckligt med skydd. En för tjock eller ojämn beläggning kan resultera i spänningar i materialet p.g.a. värmeutvidgning och vattenabsorption, vilket kan leda sprickbildning och delaminering.

2.4 Korrosionsskador i plast

Polymera material kan, liksom metalliska material, drabbas av korrosion. Korrosionstyperna som finns beskrivna för metalliska material förekommer i stort sett även för plaster⁹. Utöver det finns det även andra skadetyper som är specifika för plaster eftersom de är genomsläppliga för vätskor och gaser. Tabell 3 ger en kortfattad översikt över de olika korrosionstyper som kan uppträda i polymera material som används i processutrustning. Skador till följd av olika typer av korrosion illustreras i Figureerna 5 till 8.

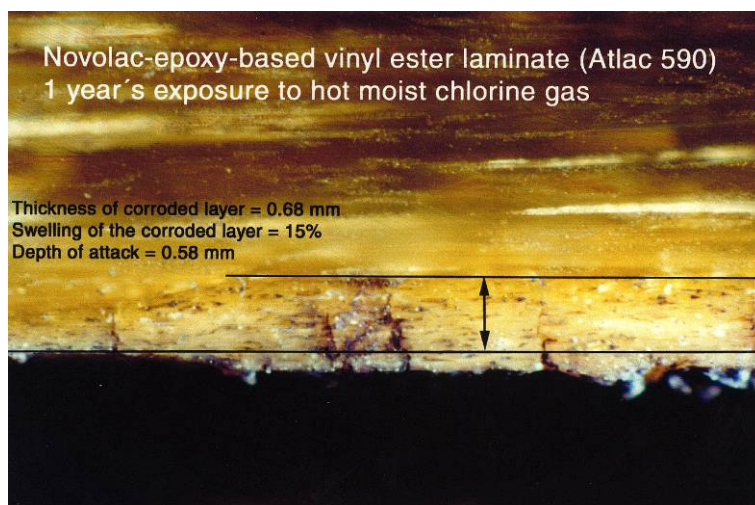
Tabell 3. Översikt över olika korrosionstyper i plast.

Table 3. Overview of different corrosion mechanisms in polymers.

Korrosionstyp	Typ av skada	Exempel
Allmän korrosion	Bortfrätning av materialet eller bildandet av ett korroderat skikt med nedsatta mekaniska egenskaper som medför godsfortunning med	I miljöer som innehåller salpetersyra, klordioxid eller klor.

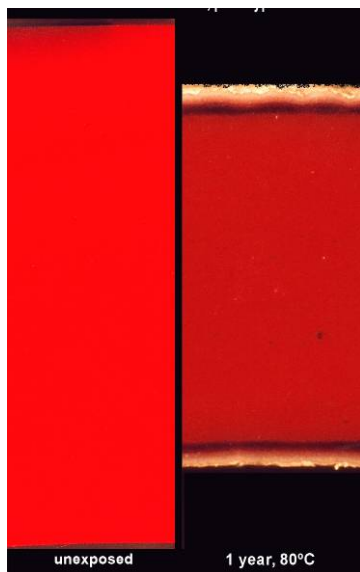
⁹ Bergman G; Chemical Engineering Progress, 97, 12 (2001), 55–59

	tiden.	
Erosions-korrosion	Lokal bortfrätning av material vid hög strömningshastighet av vätska i fall av allmän korrosion.	I skrubbrar vid dyslansar eller vid T-stycken
Lokal korrosion, spaltkorrosion	Lokala korrosionsangrepp p.g.a. lokala variationer i processmiljön.	I klorat/hypokloritmiljöer i områden med stillastående vätska. I skarvar eller svetsar som innehåller spalter.
Galvanisk korrosion	En sällsynt korrosionstyp som kan förekomma i kolfiberarmerad plast.	Laminat med kolfiber i kontakt med mindre ädel metall.
Diffusion	Vätskor och gaser kan diffundera genom polymera material beroende på sin och polymerens beskaffenhet. Detta kan medföra förändringar i materialet, nedbrytning, reaktion med tillsatser, korrosion på bakomliggande material.	Vatten, syror som saltsyra och salpetersyra, lösningsmedel och organiska ämnen kan diffundera genom plasten samt absorberas och även ha mjukgörningseffekt.
Svällning	Den diffunderande substansen absorberas av plasten till en viss mängd som är beroende av substansens och polymerens beskaffenhet. Detta kan medföra svällning och även sprickbildning vid mycket kraftig absorption.	Svällning av GAP och termoplaster i lösningsmedel. Men även vatten kan orsaka viss svällning.
Spännings-korrosion	Spänningskorrosion sker under samtidig inverkan av dragspänning och en kemikalie. Den kan förekomma i termoplaster (Environmental stress cracking) och i GAP. I GAPen är det glasfiberarmeringen som kan vara känslig för spänningskorrosion. Spänningskorrosionshavier kan vara mycket farliga eftersom de oftast uppträder plötsligt och utan förvarning.	Framförallt haverier av tankar och ledningar för koncentrerade syror, som saltsyra eller svavelsyra, har rapporterats. Har även förekommit i miljöer innehållande klordioxid.
Ytsprick-bildning/yt-crackelering	Efter vätskeabsorption under drift och efterföljande uttorkning vid stopp eller termisk chock kan sprickor till följd av dragspänningar i ytan bildas.	Sprickor i spärrskiktet hos skorstenar eller skrubbrar i GAP som utsätts för omväxlande våta och torra förhållanden.
Blåsbildning	Förekommer främst i GAP och beror på en osmosprocess som orsakas av diffunderande vatten och lösliga ämnen i laminatet. Vätskefyllda, trycksatta blåsor mellan spärrskikt och styrkelaminat bildas som i vissa fall kan spricka.	Blåsbildning uppträder ofta i skrubbrar och skorstenar.
Delaminering	Förekommer främst i kompositmaterial som GAP. Skiktningar mellan olika laminatlager uppstår.	Delaminering i GAP rökgaskanaler eller skorstenar som har utsatts för hög temperatur.
(Mikrobiell korrosion)	Angrepp på plasten genom mikroorganismer.	



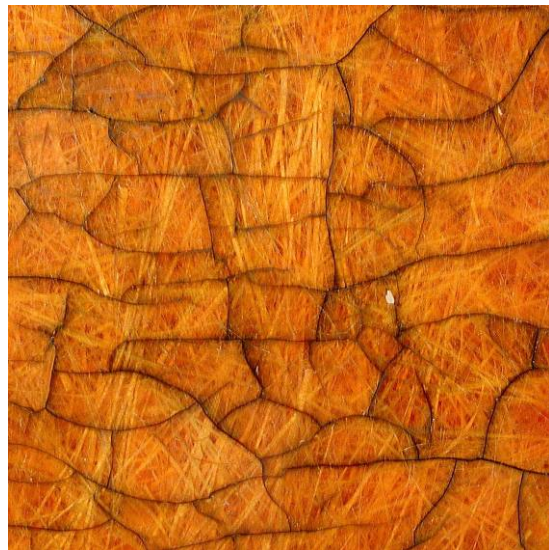
Figur 5. Exempel på allmän korrosion i GAP exponerat för varm och fuktig klorgas. Ett sprött korroderat skikt har bildats.

Figure 5. Example of uniform corrosion in FRP exposed to hot wet chlorine gas. A brittle corroded layer has formed.



Figur 6. Exempel på allmän korrosion i PVC. Bilden visar ett polerat tvärsnitt av oexponerat röd PVC jämfört med material exponerat för kloratelektrolyt vid 80°C i ett år. En bortfrätning av materialet har skett.

Figure 6. Example of uniform corrosion in PVC. A cross-section of unexposed red PVC compared to material exposed to chlorate electrolyte environment for one year at 80°C is shown. A wall thickness reduction has occurred.



Figur 7. Typisk ytkrackerling/ytsprickbildning i GAP till följd av uttorknings- och åldringsprocesser eller termisk chock.

Figure 7. Typical surface/mud cracking in FRP as a result of desorption and ageing processes or thermal chock.



Figur 8. Omfattande delamineringsskador i GAP laminat där delaminering har skett både i spärrskiktet (nederst) och i styrkelaminatet nära spärrskiktet (mitten).

Figure 8. Extensive delamination damage in FRP. Delamination occurred in both the barrier layer and in the structural laminate.

I samband med GAP måste även laminatets påverkan genom vatten nämnas. Vatten diffunderar lätt genom GAP vid högre temperaturer och kan påverka hartsmatrisen, glasfibrerna samt gränsskiktet mellan harts och glasfiber. Exempelvis, så kan polyesterhartser vara känsliga för hydrolysreaktioner i kontakt med vatten. Mikrodelamineringar, som är lokala släppningar mellan harts och glasfiber, kan framförallt bildas i glasfiberarmering som CSM, Figur 9. Vatten kan även reagera med glasfiberarmeringen som då kan tappa i styrka. Processerna medför därför ofta en nedgång av de mekaniska egenskaperna som E-modul och brotthållfasthet med tiden. Oftast påverkas brotthållfastheten kraftigare än E-modulen. Vattendiffusion kan även bidra till osmosblåsbildning, vilket visas i Figurerna 10 och 11. Absorberat vatten kan leda till svällning. Vid desorption av vatten från materialet kan däremot dragspänningar bildas i ytan vilket kan leda till ytsprickbildning eller ytkrackelering om spänningarna överskrider materialets brotthållfasthet (Figur 7). De olika korrosionsmekanismerna illustreras även mer i detalj i kapitel 4 ”Inventering av erfarenheter från processutrustning i plast”.

Skador kan naturligtvis uppträda om de mekaniska påkänningarna är för stora på materialet, vilket för GAP t.ex. kan leda till sprickbildning och delaminering. Speciellt för GAP är att sprickbildning och skademekanismer börjar långt innan totalbrottet uppträder. Enligt PLN tillåter man därför endast maximalt 0,2 % töjning i GAP-konstruktioner genom användning av en säkerhetsfaktor och andra designfaktorer.

För termoplastiska material är det viktigt att veta att de mekaniska egenskaperna är tids-, miljö- och temperaturberoende eftersom termoplaster är viskoelastiska material. Ett exempel är krypbrott hos PE-rör exponerat för vatten vid 6 bar (PN 6, DN 100) där röret designats för ett väntat brott efter ca 50 år vid en användningstemperatur av 20°C. Ökas temperaturen till 60°C kan brott uppstå redan efter en månad vid samma tryck.



Figur 9. Polerat och infärgat tvärsnitt av CSM laminat med kraftiga mikrodelamineringar som synliggörs av den blå infärgningen.

Figure 9. Polished and dye-stained cross-section of a CSM laminate with microdelaminations (visible from the blue staining).



Figur 10. Polerat och infärgat tvärsnitt ett rör med blåsbildning mellan spärrskikt och styrkelaminat.

Figure 10. Polished and dye-stained cross-section of a FRP pipe with blistering damage between the barrier layer and the structural laminate.



Figur 11. Blåsbildning i en rökgasskrubber. Blåsorna hade en diameter av 5 till 10 cm.

Figure 11. Blistering in a flue gas cleaning scrubber. The blisters had a size of 5 to 10 cm in diameter.

3 Inventering av erfarenheter från processutrustning i plast

Detta kapitel beskriver drifterfarenheter och vanliga skador för olika typer av material i olika delar i rökgasreningsanläggningen (skrubber, skrubberns inredning, rökgaskanaler, skorstenar, kringutrustning som t.ex. tankar). Erfarenheterna baseras mestadels på resultat från utredningar och inspektioner utförda av plastgruppen på Swerea KIMAB med Gunnar Bergman i spetsen. Det kan även hänvisas till Bulletin 98¹⁰ och Bulletin 99¹¹ publicerade av Gunnar Bergman som har bidragit med ”case”.

3.1 Skrubbrar

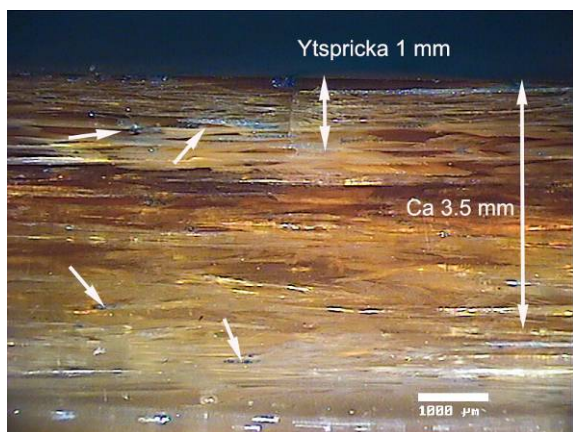
3.1.1 Glasfiberarmerad plast - GAP

Ytsprickor, försämring av mekaniska egenskaper, allmänna åldringseffekter

Vattnet i skrubbermiljö och de olika tillsatserna resulterar i allmänna åldringseffekter på GAP-laminat. De mekaniska egenskaperna förändras vilket medför en försämring i brottspänning och E-modul. Det leder även till en viss försprödning av hartsmatrisen, vilket kan leda till ytkrackerling eller ytsprickor vid uttorkning och termisk chock. Ytsprickornas djup kan variera och motsvarar oftast endast ytmattaskiktets tjocklek. Ibland kan de dock tillta i djup, och då resultera i lokala angrepp som kan nå styrkelaminatet, vilket är mer kritiskt.

¹⁰ Bergman, G., Plaster och gummi i olika kemiska miljöer, Bulletin 98, Korrosionsinstitutet, 1985

¹¹ Bergman, G., Korrosion på plaster och gummi i processutrustningar, Bulletin 99, Korrosionsinstitutet, 1987



Figur 12. Polerat och infärgat tvärsnitt av laminat från skrubberns sulfatsteg som visar den typiska bruna missfärgningen och ytsprickor.

Figure 12. Polished and dye-stained cross-section of laminate from the intermediate part of the scrubber showing the typical brown discoloration and surface cracks.

Vid nedläggningen av Stora Ensos bruk vid Norrsundet togs prover från en 30-årig skrubber (Atlas 382, se även Bilaga A). Skrubbern processade rökgaser från en sodapanna och var byggd med tre våningsplan (kloridsteg, sulfatsteg, värmeåter-vinning). Nedre planet (kloridsteget) reparerades efter 20 år p.g.a. sprickbildning och delamineringsskador, som antagligen var relaterade till exponering för heta och torra rökgaser. Reparationslaminatet (novolackharts) verkade vara i god kondition efter 10 år i drift. Även det ursprungliga laminatet i andra och tredje våningsplanen var i förhållandevis god kondition. Laminatet uppvisade dock en typisk brun missfärgning av harts-matrisen, som normalt innebär förekomst av viss försprödning, Figur 12.

Även ytsprickor hade bildats som resulterat i en minskning av brotthållfastheten med upp till 50 % för hela laminatgodset.

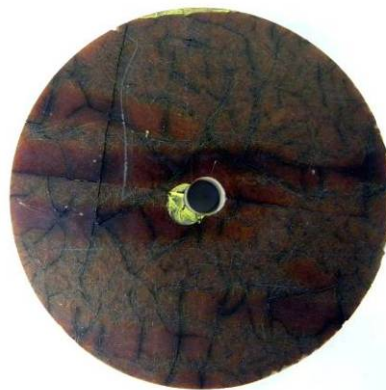
Även styrkelaminatets brotthållfasthet var kraftigt påverkat efter att spärrskiktet hade avlägsnats. Däremot hade E-modulen inte ändrat sig påtagligt under 30 år i drift. Undersökningen visade visuellt och i mikroskop inga kritiska skador vilket skulle motivera ett omedelbart utbyte av skrubbern. Men minskning i brotthållfastheten och sprödheten även i styrkelaminatet motiverar dock att skrubbern borde ha bytts eller att en invändig reparation borde ha genomförts för att minska risken för sprickbildning från insidan vid fortsatt drift.

Statusen hos laminat från skrubberns inloppsdel efter vattenindysningen och från skrubberns bottendel vid Boden Energi (avfallsförbränning) undersöktes efter ca 18 år i drift, Figurer 13 och 14. Rökgaserna har en temperatur av ca 160°C innan vattenindysningen och därefter ca 60 – 65°C. Laminatet i inloppsdelen visade kraftig missfärgning och sprickbildning och analys av tvärsnitt visade att skadorna hade nått styrkelaminatet. På grund av försvagningen av laminatet rekommenderades ett utbyte. Skrubberns bottendel däremot uppvisade mindre omfattande skador. Ytsprickor med ett djup som motsvarande spärrskiktets tjocklek observerades. Efter undersökning av de mekaniska egenskaperna hos styrkelaminatet bedömdes att skrubberns bottendel kunde repareras invändigt. Termisk analys visade att skrubbern troligen hade utsatts för heta rökgaser (ca 110 – 120°C), vilket kan förklara den omfattande ytkrackerlingen.



Figur 13. Laminat från skrubberns inloppsdel vid Boden Energi. Insidan av skrubberväggen hos en uttagen rondell (Ø ca 8 cm).

Figure 13. Laminate from the inlet of the scrubber at Boden Energi. The inner surface of the scrubber wall is shown in a cut-out (Ø ca 8 cm).



Figur 14. Laminat från skrubberns botten-del vid Boden Energi. Insidan av skrubberväggen hos en uttagen rondell (Ø ca 8 cm).

Figure 14. Laminate from the bottom part of the scrubber at Boden Energi. The inner surface of the scrubber wall is shown in a cut-out (Ø ca 8 cm).

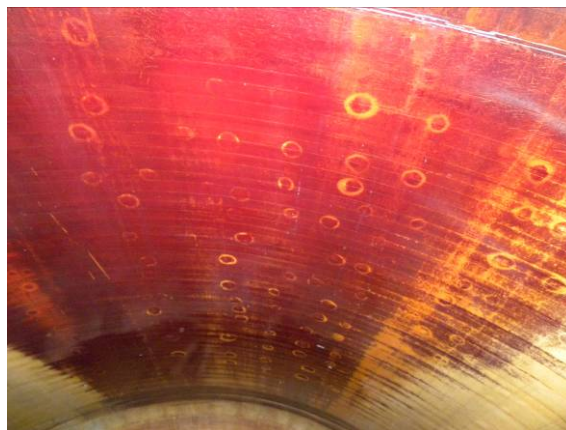
Under längre tid har Swerea KIMAB följt en skrubber vid en anläggning för rening av rökgaserna från förbränning av industriavfall där laminatet är tillverkat med ett novolackharts och en kolfibermatta som ytmatta för att minska risken för ytsprickbildning. I de flesta delarna kunde kolfiberväven förhindra sprickbildning men i en del områden hade dock för lite harts använts vid tillverkning av ytmattaskiktet. Efter några år i drift låg kolfibermattan fri, vilket resulterade i uppkomsten av lokala delamineringar. Även sprickor hade uppkommit och växt till sig under åren i drift. Efter ca 10 år i drift hade ytsprickorna nått ett djup som nästan motsvarade spärrskiktets tjocklek. Invändig reparation rekommenderades för att förlänga skrubberns livslängd.

Blåsbildning

Blåsbildning är en vanlig förekommande skada i GAP i vattenhaltiga miljöer, framförallt i skrubbar, Figur 15. Blåsbildningen är relaterad till osmotiska processer som styrs av vattenaktiviteten, d.v.s. av koncentrationen av lösta substanser, temperaturgradienten samt materialval. Orsaker till blåsbildning finns närmare beskrivna i ref 6¹². Blåsorna bildas vanligtvis i spärrskiktet intill gränsskiktet till styrkelaminatet. De är vätskefyllda och kan ha högt inre tryck. Blir trycket tillräckligt stort kan blåsorna spricka upp. Erfarenheten har visat att blåsbildningsskadorna kan uppkomma redan efter relativt kort tid i drift, d.v.s. redan efter 1 till 2 år, medan det i andra fall kan ta 5 år eller längre.

¹² Römhild, S, Bergman, G, Eriksson P, Blistering in Constructions of Fibreglass Reinforced Ester Plastics (FRP) – Causes and Countermeasures, Värmeforsk projektrapport M5-501, 2006

Blåsbildning inträffade i tre stycken GAP-skrubbar (HCl, SO₂ och bromskrubber) installerade i en förbränningsanläggning för miljöfarligt avfall i Danmark¹³. Skrubbrarna är tillverkade med ett vinylesterharts samt med både borfritt och vanligt E-glas. Redan efter 2 år i drift hade ett större antal osmosblåsor bildats i alla skrubbrarna. Först relaterades skadorna till att skrubbrarna inte hade efterhärdat före drift. Termisk och mikroskopisk analys indikerade dock att detta troligen inte var orsaken. Blåsbildningen berodde heller inte på kvalitetsbrister vid tillverkningen. Materialvalet kan ha spelat in. Skrubbrarnas spärrskikt reparerades på garanti.



Figur 15. Exempel på blåsbildning i en skrubbervägg. Diametern på blåsorna ca 10 – 15 cm.

Figure 15. Example of blistering in a flue gas scrubber. Blister diameter about 10 – 15 cm.

I Högdalenverket upptäcktes begynnande blåsbildning i en liknande skrubberanläggning efter ca 5 – 6 år i drift. Blåsorna hade bildats i skrubberns bottendel i ett område som varit utsatt en extra stor temperaturgradient till följd av luftströmningar på utsidan. En erfarenhet är att osmosblåsor oftare uppträder i laminat som utsätts för stora temperaturgradienter än t.ex. i isolerade konstruktioner. Blåsorna har inte åtgärdats men inspekteras varje år. Antalet har tilltagit, men blåsorna har inte spruckit upp.

Sundsvall energi byggde en ny rökgasreningsanläggning i glasfiberarmerad esterplast 2005. Osmosblåsor uppkom i en av skrubbrarna efter drygt ett år, d.v.s. inom garantitiden. Skrubbern reparerades enligt garanti och därefter har ingen ny omfattande blåsbildning upptäckts.

Delamineringsskador pga hydrolysis vid val av fel harts eller glasfiber

Hos SCA Östrand fick en kloridtvätt (quench) bytas och senare fick skrubbern genomgå omfattande reparation till följd av hydrolysskador relaterade till olämpligt hartsval i laminatet. Skrubberanläggningen byggdes 1981 och användes för att återvinna värme och kemikalier ur rökgaserna från en sodapanna. Man använde ett tereftalsyrabaserat polyesterharts i styrkelaminatet och ett harts med god hydrolyshärdighet i spärrskiktet (Atlac 382). Efter ca 5 till 6 år uppstod blåsor/delamineringar vilket berodde på att vatten hade diffunderat genom spärrskiktet och kritiskt skadat styrkelaminatet. Samma typ av skador uppträdde i kloridtvätten. Laminatet var här tillverkat med HET-syrabaserat polyesterharts. Storskaliga delamineringar uppstod även i en venturiskrubbebehållare som tillverkats med sprutning där E-glasroving med hög halt

¹³ Bergman, G., Investigation of the causes of blistering in three FRP flue gas scrubbers in Denmark, Report C 2005:1, Swedish Corrosion Institute, 2005

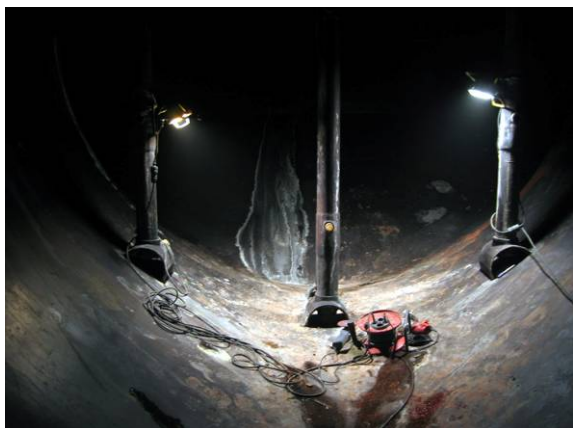
av polyvinylacetat i sizingen användes. Delamineringsskadorna var relaterade till den undermåliga kvalitén hos glasfiberarmeringen.

Delamineringsskador

I vissa fall kan en skrubber även utsättas för heta rökgaser om vattenindysningen inte fungerar. Detta kan leda till delamineringsskador. Ett exempel på detta är Norrsundet där storskaliga delamineringsskador uppkommit i en skrubber på sodahustaket p.g.a. nödkylningen inte fungerat. Delamineringar hade uppstått i hela skrubberväggen som fick repareras. Även i reparationslaminatet hade delamineringsskador uppkommit p.g.a. upprepade varmkörningar.

Skador i quenchen eller inloppsdel

Quenchen är delen av skrubbern som utsätts för mycket tuffa förhållanden p.g.a. av temperatur- och fuktväxlingar och lågt pH. I en av Högdalenverkets skrubbrar uppkom omfattande delamineringar och sprickbildning i quenchen efter ca 7 år i drift, Figur 16. Från skarven mellan rökgaskanalen och quenchen och ca en meter inåt i quenchen fanns stora delamineringar i laminatet. Det fanns även flera stora hål i laminatet där quenchvätskan trängt in i laminatet. En spricka fanns i skarven mellan quench och rökgaskanal, Figur 17.



Figur 16. Översiktbild över quenchen.

Figure 16. Overview showing the quench.



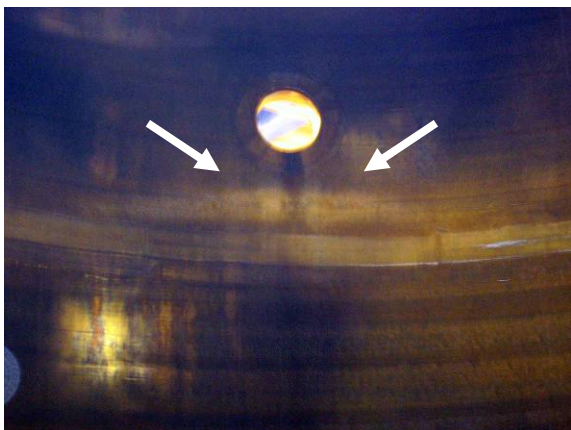
Figur 17. Skada i skarven mellan quench och rökgaskanal.

Figure 17. Damage in the joint laminate between the quench and the flue gas duct.

Laminatet var mycket sprött och såg nästan bränt ut. Spärrskiktet slipades bort och quenchen reparerades invändigt med ett novolackharts och kolfiberytmatta. Den har fungerat bra i fem år. Endast lokala delamineringar eller lokala skador förekom som lätt kunde åtgärdas. Dessa skador var antagligen relaterade till att förhållandena i skrubbern inte varit optimala när reparationen utfördes (relativt hög temperatur och hög fukthalt i luften). Se även sida 22, inloppsdel skrubber Boden Energi.

Nötningsskador vid tex dyslansar eller fallrännor

På grund av det höga trycket och förekomsten av partiklar, t.ex. kalkslurry, kan nötningsskador uppkomma i GAP laminat där vattnet från t.ex. dyslansar träffar skrubberväggen eller i fallrännor, Figurer 18 och 19. Skadorna är till en början ofta begränsade till det yttersta skiktet och motiverar då ingen omedelbar reparation. Vid reparationsbehov kan nötningsskadorna lätt repareras genom slipning och påläggning av nytt laminat. I vissa fall använder man sig av tillsatser som kiselkarbid i spärrskiktet för att öka nötningshårdigheten.



Figur 18. Nötningsskada i skrubberhölje under en dyslans.



Figur 19. Lokal nötningsskada i skrubberns bottendel under en fallränna.

Figure 18. Erosion damage in a scrubber below a spray-inlet.

Figure 19. Local erosion damage in the bottom part of a scrubber below a drain.

Dimensionerings- och konstruktionsfel

Vid en kvalitetskontroll av en skrubberanläggning som var dimensionerad för undertryck upptäcktes det att beräkningarna hade gjorts med värden på E-modulen för efterhärdat laminat fastän uthärdningsgraden som uppnåts under drift var mycket låg. Låg uthärdningsgrad kan påverka E-modulen negativt. Dessutom var godstjockleken mindre än den specificerade. Beräkningar på faktisk tjocklek och E-modul visade att skrubbern inte skulle klara undertrycket med föreskrivna säkerhetsmarginaler och utvändiga förstärkningsringar fick appliceras.

I ett annat fall med en skrubber dimensionerades balkarna, som skulle bära fyllkropparna, för klent. Man hade bortsett från lasten från vattnet som tillkommer under drift. Detta upptäcktes vid en inspektion på plats innan skrubbern togs i drift. Balkarna fick förstärkas i efterhand.

I skrubbern för rökgaserna från en sodapanna vid Norrsundets bruk (en annan skrubber än den som undersökts inom ramen för projektet) upptäcktes ett haveri efter endast 4 år i drift. Det mesta av skrubberns inredning i form av mellanbottnar, dysbankar och liknande hade fallit ner på skrubberns botten. Efter en undersökning fastställdes orsaken till skadorna att centrumrännan i den övre mellanbotten med stor sannolikhet hade varit helt eller till större delen vattenfylld vid ett eller flera tillfällen under de första åren i drift. Skador i form av släppning och brott i infästningslaminat inträffade eftersom ränn- och avloppskonstruktionen och infästningarna inte varit utformade och dimensionerade för en sådan belastning.

Laminatkvalitet avvikande från specifikationen

Ibland kan laminatkvaliteten avvika från specifikationen vad gäller typ av harts, armering eller tillsatser. Ett exempel är skrubberlaminatet vid Högdalenverket linje P4, som inte uppfyllde specifikationen vid tillverkningskontroll gällande halten av kiselkarbid i spärrskiktet. Upphandlingens kravspecifikation hänvisade till att kiselkarbidhalten behövdes för att reducera nötningen. Halten var ca 3 – 5 vikts% istället för den specificerade på 30 vikts%. Nötningsskador under dyslansarna uppkom inom garantitiden.

Skador på skrubberns inredning

Balkar, infästningar till balkar och bärande delar som bottnar bör inspekteras noggrant för statusförändringar eller sprickbildning. GAP-konstruktionen, som bär avvattningsgallerna i en rökgasskrubber som ingår i en anläggning för kondensering och rening av rökgaser från en avfallsförbränningsanläggning fick bytas efter ca 7 år i drift. Det handupplagda laminatet var uppbyggt med spärrskikt på varje sida med styrkelaminatet i mitten. Rökgaserna kunde angripa laminatet från båda hållen och spärrskikten i laminatet hade angripits och åldrats kraftigt. Sprickor med ett djup upp till spärrskiktets tjocklek hade bildats och materialet var försprödat. Brotthållfasthetens nedgång kan ha varit så hög som 80 % enligt en jämförelse mellan uppmätta och teoretiska värden. Den främsta anledningen till hållfasthetssänkningen bedöms vara att sprickorna i spärrskikten fungerar som anvisningar för sprickpropageringen in i styrkelaminatet. I samma skrubber upptäcktes även allvarlig sprickbildning i en lastbärande balk som fick bytas. Spänningskorrosion kan ha varit anledning till den kritiska spricktillväxten.

I Högdalenverket uppkom problem med skador på dyslansar. Dyslansarna består av ett rör med en minskande diameter i slutet, Figur 20. Dysanordningen består av en tung keramikkonstruktion som fästs på lansen med fläns. Sprickbildning mellan rör och flänsen till dysanordningen ledde till att flera munstycken föll till skrubberns botten vilket resulterade i slagskador i laminat och skador i pumpar. Skadorna berodde på konstruktionen hos dyslansen där glasfiberarmeringen inte applicerats genomgående mellan rör och den fläns som höll fast det keramiska munstycket.



Figur 20. Dyslansar uttagna från skrubbern. Pilen markerar var sprickbildning skedde.

Figure 20. Spray nozzles from the scrubber. The arrow indicates where cracks formed.

I en annan skrubber vid Högdalenverket upptäcktes skador vid balkinfästningar på demisterplanet vilket kan medföra att processmediet kan tränga in i laminatet, Figur 21. Detta åtgärdades vid påföljande stopp för att förhindra att skadorna förvärrades. Skadade balkinfästningar hittades även i den övre delen av planet. Året efter hittades även skador på mindre balkar som bär demistern, Figur 22. Dessa skador bedömdes inte vara av omedelbar kritisk karaktär men åtgärd rekommenderades vid nästa större stopp.

I vissa fall görs infästningar eller reparationer med överflödigt harts. Detta hartsrika skikt kan sedan flaga och spricka, Figur 23. Sådana skador har dock sällan praktiskt betydelse. Däremot behöver en spricka som t.ex. i rännan i skrubberns nedre del, Figur 24, åtgärdas. Denna spricka uppkom efter ca 6 år i drift.



Figur 21. Skadad balkinfästning i demisterplan.

Figure 21. Damaged connection between beam and scrubber wall.



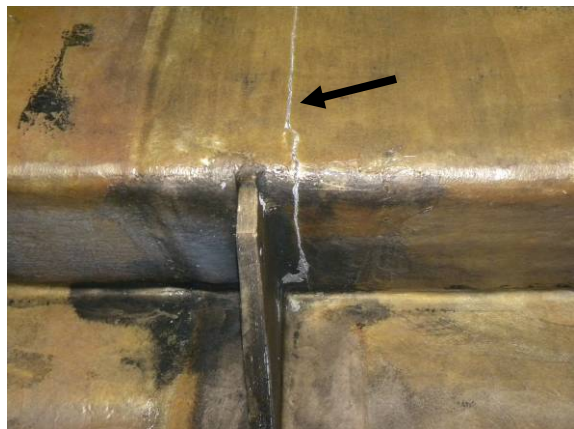
Figur 22. Skada på mindre balk som bär demisterplan.

Figure 22. Damage in one of the minor beams carrying the demister.



Figur 23. Tunt lager av överskottsharts som har lossnat från anliggande laminat.

Figure 23. Excess resin showing flaking.



Figur 24. Spricka i ränna vid skrubberns vägg som bör åtgärdas. Uppkom efter ca 6 år i drift.

Figure 24. Crack in water drain located at the scrubber wall. Formed after ca 6 years in service.

Skador i andra delar tillhörande skrubbern

Blåsbildning och kraftig fuktpåverkan upptäcktes i NH_3 -strippern i Gärdstadsverket i Linköping efter ca 2 år i drift, Figur 25. På vissa ställen hade fuktvärdet ökat till ca 60 (normalt ca 40) även i laminat utan synlig osmosblåsa. Ljudet vid knackning var dock utan anmärkning. Det föreligger inga andra erfarenheter kring användning av GAP i sådana miljöer. Generellt rekommenderas inte GAP i kontakt med NH_3 -miljöer, men det gäller höga koncentrationer. Materialets status vid inspektionen motiverade åtgärder men rekommendationen var att följa laminatets status med tiden för att kunna upptäcka kritiska förändringar.



Figur 25. Blåsbildningsskada i NH_3 -strippern.

Figure 25. Blistering damage in the NH_3 -stripper.

3.1.2 GAP-skrubbar med termoplastlining

Under mycket aggressiva förhållanden som t.ex. vid rening av avgaser från förbränning av industriavfall är termoplastlining av PP lämplig för att öka korrosionshårdigheten eller nötningshårdigheten.

Termoplastlining kan vara känslig för släppning. Ett exempel som illustrerar detta är ett fall där en PP-liner släppte från GAP materialet i en skrubber redan efter några år i drift. Skrubbern ingick i ett rökgasreningssystem för avgaser från förbränning av farligt kemikalieavfall (SO_2 , NO_x , HCl och HF i avgaserna). Orsaken till släppningen kan ha varit diffusion av gaserna genom linern och angepp på bakomliggande GAP material. Man hittade även en uthärtningsdefekt i laminatet bakom linern som kan ha bidragit till släppningen.

3.1.3 Skrubbar gjorda i flakebelagt stål

Igelstaverket i Södertälje har tre olika skrubbar eller reaktorer i stål som i efterhand har belagts med flakebeläggning för att klara de korrosiva förhållandena, Tabell 4. De var tidigare belagda med ett material som betecknades som "Guneton", vilket antagligen är en gummering. Materialet korroderade och nöttes bort och ersattes sedan med flakebeläggning (reaktor 2). Skrubbararna har inte kunnat inspekteras inifrån sedan flakebeläggningen applicerades utan endast visuellt kontrollerats genom manluckor med begränsad insyn. Dessa inspektioner indikerade god materialstatus. För linje 3 (Chemflake) valde man att endast belägga ytor med stor diameter utan kanter och hörn p.g.a. av tidigare erfarenheter med delamineringar. För ytor med hörn och kanter valde man istället att byta ut SS1312 mot ett bättre rostfritt stål (EN 1.4462) för att lösa korrosionsproblemen.

Tabell 4. Erfarenheter med skrubbrar i flakebelagt stål vid Igelstaverket.

Table 4. Experience from flake-lined steel scrubbers at the Igelsta plant.

	Linje 1	Linje 2	Linje 3
Bränsle	Industriavfall (korrosiv miljö)	Torv (snäll)	Fuktiga bränslen, visst industriavfall (korrosiv miljö)
Stål	SS1312	SS1312	SS1312
Temp in	145	130	145
Temp ut	115	85	115
Temp peak			> 150
Beläggning	Chemflake	Ceilmate 232	Chemflake special
Byggt	2001	2004	2006
Erfarenhet	Verkar vara bra.	Verkar vara bra.	Verkar vara bra.

3.1.4 Gummerade skrubbrar

I dagsläge finns det ingen kännedom av användning av gummerade skrubbrar i Sverige (endast erfarenheten från Igelstaverket). En anledning kan vara att kostnaderna för en gummering är höga i jämförelse med andra alternativ.

3.2 Andra processkomponenter i närheten av skrubberanläggningen

3.2.1 Rök-gaskondensor i metall med fluorplastskydd

Polymera material i form av fluorplaster används ofta i kondensorn, s.k. ”kjol”, som korrosionsskydd i den våt-torra övergångszonen, dvs under indysningen, Figur 26. Exempel på anläggningar är Igelstaverket och Mälarenergi. I många fall bucklar kjolen ut från väggen som ett resultat av att liningen gjorts utan vidhäftning till stålet, d.v.s. som loose lining. Trots detta verkar ”kjolen” kunna ge ett fullgott korrosionsskydd. Inga kända problem har rapporterats. Utbucklingen kan förklaras genom värmeutvidgning vid höga temperaturer och relaxationseffekter.



Figur 26. ”Kjol” i kondensor vid indysningen som skyddar underliggande stålmaterial.

Figure 26. Protection of the condensor by a fluoroplastic liner.

3.2.2 Rök-gaskondensor - Chlorout och liknande processer

Fältprovning av GAP material har utförts av Swerea KIMAB i rök-gaskylaren (torra och våta zonen) vid Bristaverket och i den torra delen av rök-gaskondensorn vid Mälarenergi AB. (För mer information se ref 8¹⁴ och Bilaga B.) Bristaverket hade under provningssäsongen använt den s.k. Chlorout-processen, där ammoniumsulfat tillsätts vid förbränningen för att minska problemen med korrosion på bl.a. värmeöverförande ytor i överhettare. Vid Mälarenergi AB testades en liknande process som Chlorout, dvs alternativt till Chlorout-principen doseras elementärt svavel i form av granuler på bränslebandet på väg in i anläggningen. Prov exponerades i inloppsdel till kondensorn (torra delen) under säsongen 2009/2010. Utifrån analyserna av GAP-proverna exponerade i Bristaverkets kylare, som visade en kraftig grön missfärgning, som annars endast uppstår när saltsyra diffunderar in i laminatet, drogs slutsatsen att rök-gaserna innehållit saltsyra. Saltsyra bildas normalt när Chlorout-processen, används och halten saltsyra i rök-gaserna beror delvis av kloridhalten i bränslet. Bränslets kvalitet under rådande driftssäsong tros ha innehållit höga halter av klorider. Proven exponerade vid Mälarenergi AB hade samma gröna missfärgning som i Bristaverket. Även i detta fall är det troligt att saltsyra bildats som sedan diffunderat in i GAP-materialet. Diffusionen var i båda fallen mycket snabb, d.v.s. efter en driftssäsong var hela laminatgodset (tjocklek ca 10 till 12 mm) penetrerat. Från gjorda undersökningar drogs slutsatserna att Chlorout-processen och andra liknande processer, där saltsyra kan bildas, kan påverka GAP-laminat kraftigt. Förekomsten av (antagligen mindre halter) saltsyra i rök-gaserna vid hög temperatur verkar kunna leda till en mycket snabb saltsyradiffusion i den torra zonen av rök-gaskondensorn eller kylare. De mekaniska egenskaperna hos GAP-laminat kan påverkas negativt i form av nedgång i brotthållfasthet med eventuell ytsprickbildning till följd om inte en kolfibermatta använts i ytmattaskiktet. Rovingväven i styrkelaminatet visade lokala angrepp med ökad känslighet för delamineringsskador vid böjbelastning. Försprödning av hartsmatrisen och ytmattaskiktet har mindre effekt på laminat som tillverkats med kolfiberytmatta istället för tex Advantex ytmatta. Normalt är det inte några problem att använda GAP som konstruktionsmaterial i applikationer med saltsyra. Om koncentrationen av saltsyra är hög i kombination med höga temperaturer eller om Chlorout-processen eller någon liknande process ska införas rekommenderas att laminatets status kontrolleras regelbundet.

3.2.3 Uppfuktare med PP värmeväxlare

I Igelstaverket linje 3 har under ca 17 till 20 år PP-material använts i en värmeväxlare som sitter efter rök-gaskylaren. Värmeväxlaren roterar och växlar energi mellan rök-gas och luftdelen genom att ta upp genomströmmande luft i lamellerna och transportera den till den andra delen. På rök-gasdelen är temperaturen ca 50°C och 25 – 35°C före respektive efter värmeväxlaren. På denna sida spolas rotorn och borde därför vara fuktmättad. På luftsidan är temperaturen 10 – 25°C och 30 – 48°C före respektive efter. Temperaturvariationerna beror av utetemperaturen. Luften upphettas till ca 180°C i ett batteri efter rotorn för att garantera torr luft. Vid revisionsstoppet 2009 verkade

¹⁴ Nordling M, Römhild S, Bergman G, ”Korrosion i våttorr zon i rök-gaskondensor”, Forskningsrapport KIMAB 2008-123, Swerea KIMAB, Juli 2008.

värmeväxlaren opåverkad. 2010 upptäcktes dock lokalt skador på värmeväxlarens ovansida, Figurer 27 och 28. Undersökningar på materialet visade att PP-materialet var kraftigt oxiderat och mycket sprött vilket ofta är en naturlig följd av långvarig exponering vid höga temperaturer. Oxidation av PP börjar även ofta lokalt på ett ställe och sprider sig sedan därifrån vilket kan förklara de lokala angreppen. Den uppnådda livslängden får anses som mycket god.



Figur 27. Roterande värmeväxlare bestående av PP-lameller.



Figur 28. Närbild av skadan. PP-materialets ursprungliga färg var blå.

Figure 27. Rotating heat exchanger made of PP material.

Figure 28. Close-up showing one of the damaged areas. The unexposed PP material was blue.

3.3 Rökaskanaler

3.3.1 GAP

Rökaskanaler kan tillverkas i rent GAP-material och det finns olika tillverkningsätt beroende på om tvärsnittet är runt eller fyrkantigt (fiberlindat laminat, handupplagt laminat, tunt laminat med yttre förstärkning, wet-in-wet). Då materialet utsätts för höga temperaturer eller stora temperaturgradienter kan delamineringar uppstå. Även hartsmatrisen kan påverkas av höga temperaturer. Ytskador i form av sprickbildning och bortnötning av material brukar mest uppträda i den våt-torra övergångszonen där hög temperatur leder till materialförsprödning som i samband med sorptions- och desorptionsprocesser i sin tur kan leda till finmaskig krackelering och bortnötning av materialet. Vid hög temperatur kan lokala korrosionsangrepp uppträda vid sprickorna.

Norrsundet, handupplagt laminat, rökaskanalen till skrubbern (>150°C)

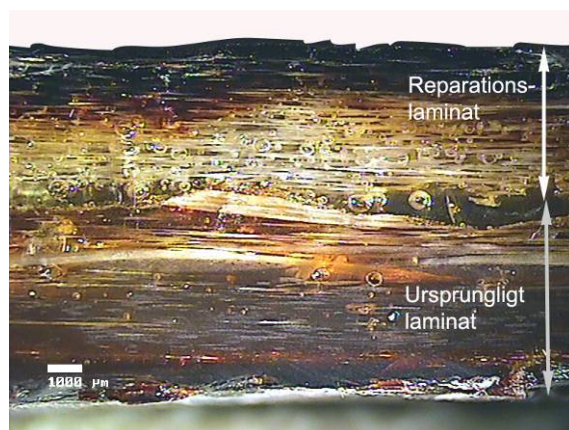
Rökaskanalen med fyrkantigt tvärsnitt var 30 år gammal vid inspektionen och provtagningen. En invändig reparation hade utförts efter ca 20 år. Ursprungligen tillverkades rökaskanalen med ett bisfenol A polyester harts (Atlac 382) genom handuppläggning. Undersökningar av det reparerade laminatet visar att styrkelaminatet hade påverkats kraftigt av förhållanden i rökaskanalen under de första 20 åren och att blästring delvis hade skett in till styrkelaminatet, Figurer 29 och 30. Reparationen utfördes med ett novolackharts. Termisk analys visade att temperaturen kan ha varit så

hög som 170°C i den torra delen efter reparationen. Atlac 382 har en mjukningstemperatur på ca 130°C, vilket är alldeles för lågt för dessa temperaturer. Novolackhartet som användes vid reparationen är mer lämpligt för dessa temperaturer och laminatet i den heta torra delen har därför klarat sig bra under de senaste 10 åren i drift. Endast ytmattaskiktet visar angrepp. Rökgaserna kyls med spraylösning vid skrubberns inlopp så att den våt-torra zonen ligger i rökgaskanalen. På grund av temperaturväxlingarna i denna zon har materialet blivit sprött och delvis blivit bortnött, Figur 29. Angreppsdjupet är här mycket högre och en ny reparation hade kunnat vara motiverad efter ytterligare någon tid vid fortsatt drift. I den våta delen av rökgaskanalen var reparationslaminatet i mycket bra skick.



Figur 29. Närbild av den våt-torra övergångszonen i rökgaskanalen. Nederst kan den våta delen (rödbrun missfärgning) ses.

Figure 29. Close-up of the wet-dry transition zone in the flue gas duct. Below the wet part (red-brown discoloration) can be observed.



Figur 30. Polerat tvärsnitt som visar reparationslaminatet och det underliggande ursprungliga laminatet från den våt-torra övergångszonen.

Figure 30. Polished cross-section showing the repair laminate of the flue gas duct exposed to flue gases in the wet-dry transition zone.

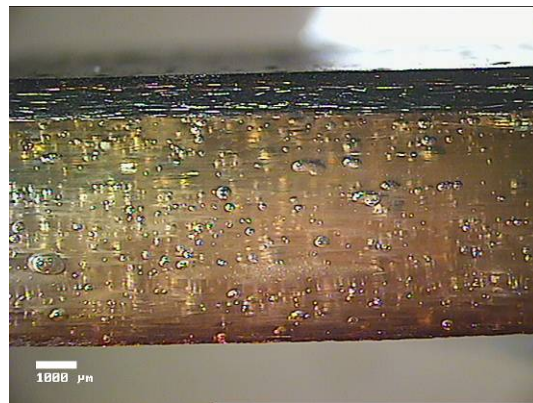
Norrsundet, rökgas kanal till skrubber på taket

Kanalen är fyrkantig och tillverkades med ett novolackharts (Derakane 470) genom handuppläggning och var ca 10 år gammal vid provtagning. För att minska risken för delamineringsskador valde man att tillverka laminatet med förhållandevis låg tjocklek. För att uppnå önskad styvhet förstärktes kanalen därför utvändigt med balkar, Figur 31.



Figur 31. Rökgas kanal med yttre förstärkning.

Figure 31. Flue gas duct with outer reinforcement.



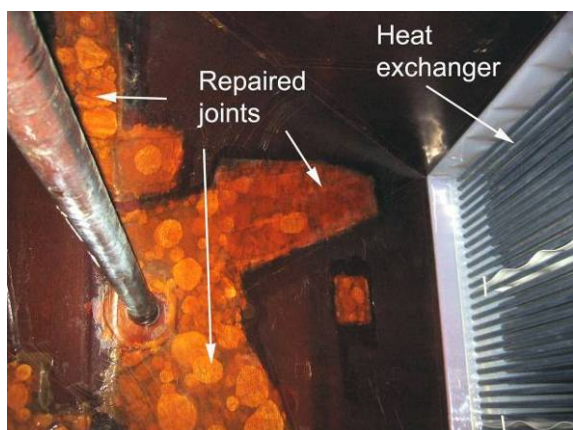
Figur 32. Tvärsnitt av laminatet som är i mycket bra skick fastän den antagligen har utsatts för temperaturer upp till 170 – 200°C.

Figure 32. Cross-section of the duct laminate being in good condition although it was exposed to temperatures of 170 – 200°C.

Insidan skyddades mot ytkrackelering med en kolfiberväv. Undersökningar visade att laminatet kan ha utsatts för temperaturer upp till ca 170°C eller mer. Inga ytsprickor upptäcktes. Laminatet föreföll att vara i bra kondition, Figur 32, och kunde antagligen ha använts en lång tid framöver vid samma driftförhållanden. Quenchen (kloridtvätten) ligger i inloppsdelens av skrubbern men ingen inspektion kunde utföras på denna del.

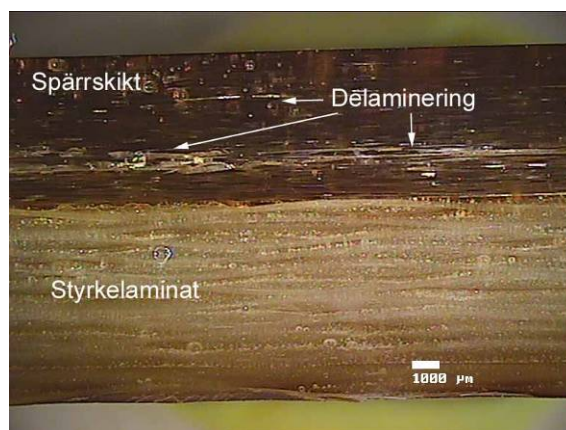
Delamineringsskador i rökgas kanal mellan skrubber och skorsten

Delamineringsskador uppkom i en konad del av rökgas kanalen samt i skarvar och reparationer mellan skrubberns utlopp och skorstenen i närheten av en påvärmare, Figur 33. Rökgaserna har normalt en temperatur på ca 60 – 70°C i rökgas kanalen efter påvärmaren. Det visade sig dock att en angventil till påvärmaren inte var tät under kortstoppen vilket resulterade i att den ”läckte värme” med temperaturer upp till 140 – 150°C. Undersökningar visade även att den konade delen av rökgas kanalen var tillverkad med ett annat harts än specificerat, d.v.s. ett bisfenol A epoxibaserat vinylesterharts istället för ett novolackharts. Mjukningstemperaturen T_g låg vid 110°C vilket innebär att delamineringsskador kunde uppkomma när påvärmaren värmd kanal under driftstop till temperaturer upp till 140 - 150°C. Delamineringarna var djupgående så ett byte av den konade delen rekommenderades. I skarvarna hade man däremot använt rätt hartstyp av ett visst fabrikat/märke. Studier på laboratorium visade dock att detta fabrikat hade sämre temperatur- och delamineringsresistens än ett harts av samma typ från en annan tillverkare. I motsats till skadan i konan var dessa delamineringar begränsade till en mindre yta (diameter ca 15 – 20 cm) samt enbart ytliga, Figur 34. Man valde att reparera skarvarna med det mer temperaturbeständiga hartset samtidigt som ångventilen till påvärmaren reparerades. Sedan dess har inga delamineringsskador rapporterats.



Figur 33. Delamineringsskador i reparationslaminat/skarvar i anslutning till påvärmaren.

Figure 33. Delamination damage in the repair laminate and joints close to the heat exchanger.



Figur 34. Ytliga delamineringar i spärrskiktet.

Figure 34. Delamination damage close to the surface in the barrier layer.

”Wet-in-wet”-laminat

”Wet-in-wet”-laminat används framförallt i Tyskland där spärrskikt och styrkelaminat tillverkas utan mellanhärdning så att spärrskiktet trycks ihop och därför får en högre glashalt än vid tillverkning med mellanhärdning. Skillnaden i glashalt mellan spärrskikt och styrkelaminat blir då mindre. Eftersom detta kan minska spänningar till följd av temperaturväxlingar och temperatur- och fuktgradienter i laminatet, anses ett sådant ”wet-in-wet”-laminat ge bättre motstånd mot både delamineringar och blåsbildning. Erfarenheten beträffande delaminerings- och blåsbildningsskador är bra^{15 16 17}.



Figur 35. Skada genom svavelsyraangrepp i rökkanal gjord med wet-in-wet tekniken. Styrkelaminatet är synligt.

¹⁵ Nonhoff, G., Lux, R., “20 Jahre Erfahrung mit GFK-Bauteilen mit wasserdampfgesättigten Medien”, information material from Christen & Laudon

¹⁶ ”WDD Test an 10 Laminatproben – Beurteilung und Fotodokumentation”, RWE Energie, Zentralinstitut für Chemie, Materialprüfung und Qualitätssicherung, Umweltschutz, Technologie, Investigation report, 1993

Nackdelen med denna typ av laminat är att spärrskiktet blir tunnare än vid mellanhärdning, ca 1 mm jämfört med 2,5 till 3 mm.

Figure 35. Inner surface of a wet-in-wet flue gas duct damaged by sulphuric acid attack. The structural laminate is visible.

I mycket aggressiva miljöer kan därför kemisk påverkan leda till minskat livslängd p.g.a. att spärrskiktet förbrukas, Figur 35. Även en reparation kan vara svårare än i vanligt laminat när styrkelaminatet är frilagt och behöver slipas innan nytt laminat kan läggas. Det är inte känt om ”wet-in-wet”-laminat används i Sverige idag.

3.3.2 Rökgaskanaler i stål med GAP-beläggning

Erfarenheter från rökgaskanaler i stål med GAP-beläggning finns främst från Igelstaverket. Igelstaverket byggdes 1982 då vanligt kolstål valdes för alla delar i rökgasystemet. 1993 installerades rökgaskondensering på linje 3 tillsammans med efterföljande rökgaskanaler, förvärmning/uppfuktning av renluft och rökrör. Linje 3 körs idag med fuktiga bränslen och har tillsammans med linje 1 de största korrosionsproblemen. Man tillsätter periodvis ca 5 % industriavfall som bränsle. Rökgaskondenseringen består av fyra steg: E-filter, skrubber eller reaktor, slangfilter och rökgaskondensorn. Rökgaserna har följande sammansättning: svavel total 75 ppm, klorid total 11 ppm, pH ca 3,5, kondensor: in 115°C, ut ca 50°C, lägsta temperatur 30°C. De andra linjerna har endast en rökgasrening utan kondensering och använder andra bränslen. Efter ombyggnationen uppstod korrosionsproblem. Korrosionsproblemen har genom åren lösts genom att successivt byta ut kolstålet mot ett bättre rostfritt stål (EN 1.4462) eller genom beläggning med GAP eller flake.



Figur 36. Exempel på GAPat stål i värmeväxlaren/uppfuktaren.

Figure 36. FRP coated steel heat exchanger in flue gas duct system.

Alla GAPade ytor var överlag i mycket bra skick efter ca 15 år i drift. Inspektionerna utfördes med gnistprovning. Man fick genomslag vid alla ändtor och kanter som fick ”nödrepareras”. De klarade därefter gnistprovningen och har därefter hållit. Även vid inspektion 2009 föreföll kanalerna vara i bra skick, Figur 36.

En rökgasreningsanläggning av en annan förbränningsanläggning, som togs i drift 1990/91, byggdes med rökgaskanaler i stål belagda GAP och gummibelagd rökgasfläkt. På grund av nedbrytningen av gummit belades även fläkthuset 1998

med GAP. GAP-rökrör installerades i skorstenen som ursprungligen var belagd med flake, men som skadats genom delamineringar. Vid inspektion 2004 upptäcktes inga betydande skador hos GAP-beläggningen i kanalen som ansluter till skorstenen. Även

¹⁷ Lux, R., „Bericht über Blasenbildung in GFK-Bauteilen und deren Vermeidung“, internal document, Christen & Laudon, 2006

den nedersta delen av rökröret verkade vara i bra kondition. Antagligen hade kanalen och rökröret inte utsatts för hög temperatur under drift. GAP-beläggningen i rökgasfläkten hade delaminerat efter 6 år och lokala skador hade uppkommit vid övergångar. Trots delamineringen fungerade rökgasfläkten bra.

3.3.3 Flakebelagda kanaler

Högdalenverket har för linje P4 valt att belägga rökgaskanalerna, som är tillverkade i stål, med en flakebeläggning för att skydda mot de korrosiva rökgaserna. Rökgaskanalen har ett fyrkantigt tvärsnitt med många hörn och kanter. Efter exponering för hög temperatur uppkom storskaliga delamineringsskador. Anledningen till detta vara sannolikt att flakebeläggningen hade applicerats med ett för tjockt skikt. Materialet var valt för att klara de höga temperaturerna. Delamineringar uppkom främst där flakebeläggningen var mycket tjock och vid kanter och hörn, Figur 37.



Figur 37. Flakeliningen har lossnat vid kanter och hörn i rökgaskanalen och där den applicerades för tjockt.

Figure 37. Delamination of the flake lining at edges in the duct and where the coating thickness was too high.

3.3.4 Gummerade kanaler

Gummerade rökgaskanaler eller gummerade stålkonstruktioner överhuvudtaget används numera rätt sällan för rökgasapplikationer. Detta beror antagligen mestadels på kostnaderna. Ett exempel med en gummerad rökgasfläkt ges under rubrik 3.2.1. Gummeringen fick ersättas efter 7 – 8 år p.g.a. nedbrytning.

3.4 Skorstenar

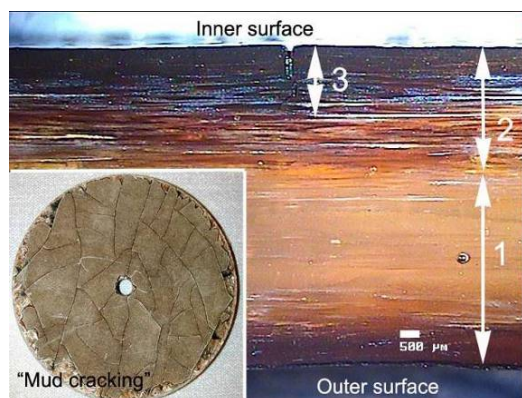
Erfarenheten är att korrosionsriskerna med rökgaserna från förbränningsanläggningar oftast är för stora för att en skorsten ska kunna tillverkas i stål. Alternativet är då att väljer en beläggning, som flake eller GAP, eller att bygga skorstenen enbart i GAP. I vissa fall används även GAP skorstenar linade med ett termoplastmaterial. Vid design av en skorsten måste egenvikt, buckling, vindlaster, dynamiska egenskaper och kemisk påverkan beaktas. GAP-skorstenar kan byggas som fristående konstruktion, som då stöds genom stålkonstruktioner eller med spända kablar, eller som en GAP-pipa i en betongkonstruktion, som tar upp alla vindlaster. Rätt installation, vilket bland annat innebär att skorstenssegmenten placeras rakt, är viktig för driftsäkra konstruktioner med lång livslängd.

3.4.1 GAP

Ytkrackerlingsskador

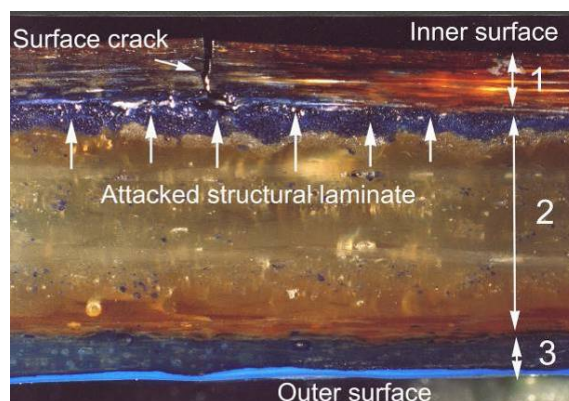
Skorstenarna i Nymölla och Korsnäs är två bra exempel på GAP-skorstenar med lång livslängd, 31 år respektive 37 år gamla. De har dock påverkats under driften av ytkrackelering med olika effekter på laminatets status. Nymölla-skorstenen används för fuktiga rökgaser (70°C, pH 2-3) från en skrubber för en bark-/oljaeldad panna. Den ersatte en skorsten i rostfritt stål SS2343 som kollapsade efter bara 5 år p.g.a. korrosionsskador. Skorstenen utsattes då för omväxlande våa rökgaser från en ventuirskrubber och varma torra rökgaser från en barkeldad panna. GAP-skorstenen är 90 m hög, 2,8 m i diameter, väger 12 t och installerad i en betongpipa med glidstöd. Den tillverkades av ett bisfenol A polyesterharts av typ Atlac 382 med E-glas armering. Laminatets status i skorstenen har analyserats vid ett antal olika tillfällen under åren i drift. Ytkrackeleringar och kraftig missfärgning av spärrskiktet bildades redan tidigt under drift, Figur 38. Detta innebar en minskning av brotthållfastheten och E-modulen av hela laminatgodset (spärrskikt och styrkelaminat). Vid en kontroll efter 28 år i drift hade styrkelaminatets mekaniska egenskaper dock inte minskat till en kritisk nivå varför skorstenen ansågs kunna användas ytterligare några år. Vid den senaste kontrollen hade ytsprickbildningen inte förvärrats, men E-modulen hade avtagit ytterligare, samt styrkelaminatet verkade mer känsligt för sprickbildning. Rekommendationerna var att ersätta skorstenen under ett av de kommande driftstoppen.

I Korsnäsverkets skorsten medförde ytkrackelering större skador. Skorsten byggdes 1971/72 och används för rökgaser från en sodapanna (60°C). Den är idag 70 m hög, har en diameter på 3,6 m och avlastas med hjälp av en stålkonstruktion. Vid en inspektion efter 13 år i drift hade 1 – 2 mm djupa ytsprickor bildats som vid ett senare tillfälle efter 30 år hade nått styrkelaminatet och angripit det, Figur 39. Inga tecken på att laminatet skulle ha varit överbelastat hittades. E-modulen hade sjunkit endast ca 20 % varför det rekommenderades att ett omedelbart utbyte av skorstenen inte vara nödvändig, men att ett utbyte skulle planeras inom loppet av 5 år. Skorstenen används än idag, men statusen kontrolleras regelbundet genom inspektion och rondelluttag. Man valde att fortsätta driften av skorstenen med hänvisning till de höga säkerhets- och designfaktorerna som användes vid dimensioneringen. Ingen kritisk ökning av angreppen på styrkelaminat eller ytterligare nedgång av E-modulen har observerats.



Figur 38. Innerytan och ett polerat tvärsnitt av laminatet från Nymölla skorstenen efter 28 år i drift. 1) styrkelaminat, 2) spärrskikt, 3) ytspricka med ett djup på ca 1.6 mm.

Figure 38. Inner surface showing mud or surface cracking and polished cross-section of the Nymölla stack laminate after 28 years in service. 1 structural laminate, 2 barrier layer, 3 surface crack.



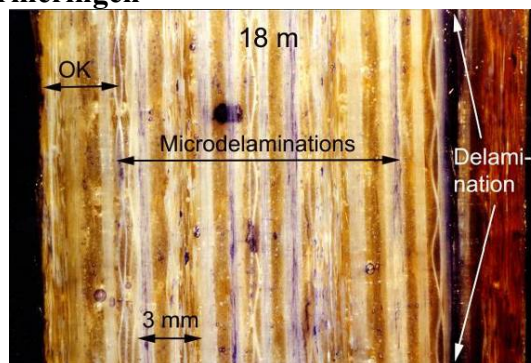
Figur 39. Polerat och infärgat tvärsnitt av Korsnäs skorstenslaminatet efter 30 år i drift. 1 spärrskikt, 2 styrkelaminat, 3 reparation på utsidan.

Figure 39. Polished and dye-stained cross-section of the Korsnäs flue gas stack laminate.

Betydelsen av hartsmatrisen och glasfiberarmeringen

Förutom korrosiva substanser i rökgaserna kan även diffunderande vatten orsaka skador i skorstenslaminat beroende på typen av harts och glasfiberarmering som har använts vid tillverkning. Används ett olämpligt harts kan hydrolysskador uppstå, som kan leda till en kritisk nedgång av de mekaniska egenskaperna och delamineringsskador. 1970 byggdes en skorsten i Frövi placerad på en skrubber för fuktiga rökgaser från en sodapanna. Höjden på skorstenen var 60 m och diametern 3 m. Först senare byggdes en stålkonstruktion till efter att skorstenen hade skadats genom vindlast. Skorstenen tillverkades med ett bisfenol A polyester harts av typ Leguval W45. Den fungerade bra i 25 år, men därefter bildades storskaliga delamineringsskador på olika höjder i skorstenen till följd av kraftiga hydrolysskador i hartsmatrisen, Figur 40. De mekaniska egenskaperna var kraftigt försämrade och skorsten fick bytas.

Blåsbildning



Figur 40. Polerat och infärgat tvärsnitt av skorstenslaminatet efter 25 år i drift. Delamineringen skedde mellan styrkelaminat och spärrskiktet. Blåinfärgningen av styrkelaminatet indikerar hydrolysskadorna.

Figure 40. Polished and dye-stained cross-section showing delamination damage and damage in the structural laminate after 25 years in service.

Blåsbildning är vanligt förekommande i skorstenar. Oftast uppträder blåsbildning där GAP-strukturen utsätts för stora temperaturgradienter över laminatet. Skorstenen i Mörrum tillverkades av ett antal 5 m långa GAP segment med en diameter av 4,8 m 1988. Ett bisfenol A epoxibaserat harts (Derakane XZ86747.01) och E-glas armering användes vid tillverkningen. Skorstenen används för fuktiga rökgaser från en sodapanna (72°C). Efter 3 år i drift upptäcktes blåsbildning i toppdelen av skorstenen (ca 2 m), som är placerad utomhus. Delen placerad inomhus var inte skadad av blåsbildning. Även den allra översta delen utomhus uppvisade heller ingen blåsbildning. Här är en yttre förstärkning på 20 mm applicerad som minskar temperaturgradienten. Skorstenen inspekterades även 1994 och då var blåsbildningen oförändrad. Skorsten har sedan dess använts utan problem.

Även skorstenen till panna P4 av Högdalenverket (sopförbränningsanläggning) har drabbats av blåsbildning efter ca 6 år i drift. Blåsorna uppstod i böjen som ansluter skorstenen till rökgaskanalen. Böjen är isolerad, men är i motsats till de andra delarna placerad utomhus. Denna skorsten tillverkades med ett novolackharts av typ Derakane 470 och E-glas-armering. Även i skorstenen till Norrsundets skrubber hade osmosblåsor bildats i en del som var placerad utomhus (ingen isolering). Skorsten användes utan problem.

Delamineringsskador

Förutom skador orsakade genom kemisk påverkan kan även extrema temperaturvariationer, som kan förekomma vid tex bypass-körning, leda till kritiska skador i GAP-laminat. Spänningar till följd av temperaturväxlingar och temperaturgradienter över laminatväggen kan leda till storskaliga delamineringar.



Figur 41. Inner surface of the stack. In the insulated part cracked and liquid-filled delaminations formed. Delaminations occurred at different depth in the barrier layer, but also in the structural laminate.

Figure 41. Delamination damage in flue gas stack exposed to high temperature. Delaminations occurred at different depth in the laminate.

Skorstenen i Nyköping, där returflis förbränns och rökgaserna under normala fuktiga förhållanden håller en temperatur av 60°C, fick bytas efter endast 10 år i drift p.g.a. storskaliga delamineringar i den isolerade delen av skorstenen. Delamineringarna förekom såväl i styrkelaminatet som i spärrskiktet, Figur 41. Skorstenen hade tillverkats med ett novolackharts och var fiberlindad. Kanalen som ledde till skorstenen tillverkades med samma material, men med handuppläggning. Inga delamineringsskador uppkom här. Termisk analys visade att skorstenen och kanalen hade utsatts för betydligt högre temperaturer än de specificerade 60°C. Temperaturen kan ha varit så hög som 140°C. Skillnaden mellan skadorna i den lindade och den handupplagda delen antas vara relaterade till glashalten i laminaten. Skillnaden i glashalt mellan spärrskikt och styrkelaminat är mindre för handupplagda GAP-komponenter.

Andra faktorer som kan påverka livslängden

I vissa fall kan skorstenar behöva bytas eller repareras p.g.a. mekanisk överbelastning. Ett exempel som nämnts tidigare är skorstenen i Frövi. Den övre, oskyddade delen av den fristående GAP-skorstenen utsattes för extrema vindlaster varvid den bröts i takhöjd. Skorstenen kunde dock repareras. Andra orsaker till mekanisk överbelastning kan vara felaktigt monterade glidstöd eller om skorstenssegmenten har placerats ovanpå varandra med en lätt förskjutning så att övergångarna kan fastna i glidstöden. 1985 gick en skorsten sönder p.g.a. buckling. I detta fall var den mest sannolika orsaken att skorstenen fastnade i det översta glidstödet och att skorstenen därmed utsattes för en axiell last.

Även solljusets effekt måste beaktas vid konstruktion av en skorsten. Utan skydd kan solljuset orsaka en försprödning av laminatet och flagning som frilägger glasfiberarmeringen (s.k. chalking). Exempel på detta är skorstenarna i Korsnäs och Frövi. Målning eller reparation i efterhand kan bli mycket kostsam vilket gör att skydd av materialet bör beaktas redan vid en upphandling.

3.4.2 Flakebelagda skorstenar

Skorstenar kan även byggas av stål och beläggas med en flakebeläggning. Det finns ett fall då en flakebelagd skorsten drabbats av både blåsbildning och delamineringar av flakebeläggningen redan efter relativt kort tid i drift, Figurer 42 och 43. Skorstenen tillhör en anläggning för rening av rökgaser på ett värmekraftverk som använder torv

som bränsle. Skorstenen, som är byggd med vanligt kolstål av typ 1312, är belagd med CEILCOTE 232. Den hade använts i ca 15 000 till 20 000 timmar. Skorstenen har ca 1 till 2 dm isolering. I vanliga fall används skorstenen för kondensering då fukthalten är 100 % och temperaturen ca 58-60°C. I vissa fall körs den även i bypass-läge då rökgaserna har en temperatur av max 165-170°C och är torra. Delamineringsskadorna var troligen orsakade av att skiktet på beläggningen var för tjockt i anslutning till hörn och kanter. Blåsskadorna kan ha orsakats av osmoseffekter relaterade till ytrenheten hos stålet och även av temperaturväxlingar vid by-passkörningar.



Figur 42. Blåsbildningsskada i den flake-belagda skorstenen.



Figur 43. Delamineringsskada i den flake-belagda skorstenen.

Figure 42. Blistering damage in the flakelined flue gas stack.

Figure 43. Delamination damage in the flakelined stack.

I en annan rökgasreningsanläggning, som togs i drift 1990/91, valde man att flakebelägga stålskorstenarna. Hartset i flakebeläggningen var en vinylester. P.g.a. delamineringsskador installerades GAP-pipor i skorstenen efter endast två år i drift.

3.4.3 GAP beläggning på stål

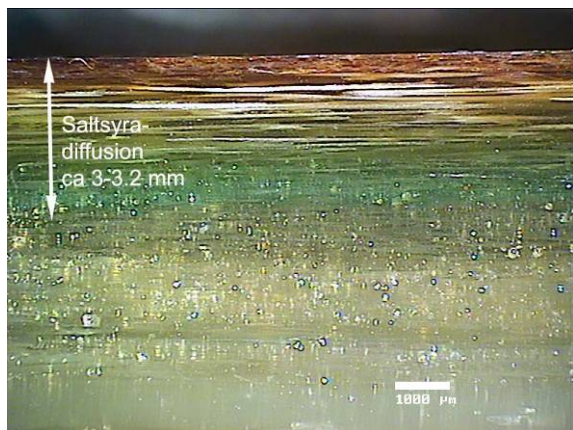
Tekniska verken i Linköping har en skorsten bestående av en stålpipa med rökrör i GAP (novolack harts). Den nedre delen av skorstenen inspekterades efter ca 2 till 3 år i drift och inga skador har upptäckts. (Se även avsnitt 3.2.1) Inga andra erfarenheter finns.

3.5 Kringutrustning

3.5.1 Lagringstankar för saltsyra

Saltsyran har förmågan att diffundera in i termoplaster och GAP och därför kan livslängden hos en komponent vara begränsad av saltsyradiffusionen. Figur 44 visar ett polerat tvärsnitt där saltsyradiffusionsfronten är synlig i GAPen genom den gröna missfärgningen i spärrskiktet. Laminatet härstammar från en lagringstank för koncentrerad saltsyra placerad inomhus. Saltsyran har diffunderat ca 3 till 3,2 mm under 12 år och ca 1 mm återstår tills saltsyran når styrkelaminatet. Eftersom saltsyran inte bör nå styrkelaminatet p.g.a. risk för spänningskorrosion bör ett utbyte eller en reparation planeras. I vanliga fall har spärrskiktet en tjocklek på ca 2,5 – 3 mm och

uppskattningsvis en ungefärlig livslängd på 8 – 10 år. Diffusionshastigheten beror dock på typ av laminat och uthärtningsgrad och bör verifieras.



Figur 44. Saltsyradiffusionsfront (grön missfärgning) i ett GAP laminat.

Figure 44. Hydrochloric acid diffusion front in an FRP laminate.



Figur 45. Blåsbildning under ytmattaskiktet i en tank för koncentrerad saltsyra.

Figure 45. Blistering below the surface veil layer in a storage tank for concentrated HCl.

Saltsyra kan även orsaka en typ av blåsbildning i GAP. Den diffunderande saltsyran angriper glaset och startar en osmosprocess. I motsatt till osmosblåsor relaterade till vattendiffusion ligger dessa dock oftast nära ytan under ytmattaskiktet. Figur 45 visar insidan av en 10-år gammal lagringstank för koncentrerad saltsyra. Den har drabbats av blåsbildning under ytmattaskiktet p.g.a. av att en kvalitativt mindre bra glasfiberarmering har använts i spärrskiktet. Skadan reparerades genom att det skadade laminatet blåstrades bort och ett nytt spärrskikt byggdes upp då styrkelaminatet fortfarande var i bra skick.

3.5.2 Lagringstankar för lut

Lagringstankar för lut finns t.ex. i PP- och i GAP-material. Bland annat har Sundsvall Energi en lagringstank för natronlut i PP-material. Inga skador är kända. Beroende på koncentration och temperatur har lut förmåga att ”krypa”/lätt tränga in i GAP material (5 wt% natronlut) eller orsaka ytangrepp (30 wt% natronlut). Luten kan angripa glaset och även vissa hartser. Det finns några skadefall rapporterade från förbränningsanläggningar. För att illustrera en skada ges ett exempel från den kemiska industrin. I en kemisk fabrik tillverkades en lagringstank för lut med olika hartser i spärrskikt och styrkelaminat¹⁸. För spärrskiktet valde man ett ”bra” vinylesterharts, i styrkelaminatet dock ett orto-polyesterharts, som lätt angrips av lut. Tanken var isolerad med polyuretanskum på utsidan. Tanken fick tas ur bruk efter 6 år i drift p.g.a. omfattande skador och läckage. Det visade sig att tanken hade varit utsatt för betydligt högre

¹⁸ Bergman, G., Investigation of the cause of failure in FRP storage tanks for concentrated solutions of sodium hydroxide and potassium hydroxide, Project report C 2007:6, KIMAB, 2007

temperaturer än de som specificerats av anläggningsägaren, vilket möjligen berodde på exoterm reaktion mellan vatten och lut vid spädning. Innerytan var på vissa ställen kraftigt angripen, men även styrkelaminatet var kraftigt påverkat. Lut måste ha kunnat tränga ut mellan tank och isolering där den lätt kunnat angripa orto-polyesterhartset. Läckaget upptäcktes därför först efter längre tid när skadorna var omfattande.

3.5.3 Spädvatten, nödvattentank, neutralisationstank, etc

Spädvattentankar och nödtankar, etc. tillverkas ofta i GAP och utsätts för vatteninnehållande lösningar vid lägre temperaturer. Vid inspektioner har dessa tankar oftast visat sig vara i bra kondition. Exempelvis inspekterades en spädvattentank i GAP efter tre år i drift i Gärdstadsverket. Tanken föreföll i bra kondition och visade normala fuktvärden och ingen blåsbildning. Tanken utsätts för vibrationer. Inga visuella skador upptäcktes.

Neutralisationstanken vid Högdalenverket och vid Sundsvall Energi är tillverkad i PP. Den var i bra kondition vid Sundsvall Energi efter några år i drift. Även vid Högdalenverket föreföll tanken vara i bra kondition efter ca 7 år i drift, dock hade en mindre skada tidigare uppkommit i tankens nedre del, troligen till följd av omrörningen i tanken. Skadan lagrades genom svetsning och tanken har fungerat bra sedan dess.



Sundsvall Energi har en tank för avjoniserat vatten som är tillverkad i betong med GAP-beläggning. Efter ett fåtal år i drift uppkom storskaliga delamineringsskador mellan GAPen och betongen, Figur 46. Osmoseffekter och dålig vidhäftning kan ha varit en anledning. En ytbehandling av betongen med en primer krävs för att uppnå bra och långvarig vidhäftning.

Figur 46. Tanken för avjoniserat vatten tillverkat i betong med GAP-beläggning. Beläggningen har släppt i taket.

Figure 46. Tank for deionised water build in concrete with FRP lining. The lining came off the concrete at the ceiling.

3.5.4 Rörledningar, anslutningar, etc

Ett stort antal rörledningar förekommer i rökgasreningssystem som främst är tillverkade i GAP, PP och eventuellt PVC/CPVC eller fluorplaster. Inga akuta skadefall finns rapporterade. Problem kan vara läckande svetsar, muffskarvar eller skarvar i GAP-rör. Även anslutningar till tankar och liknande kan vara drabbade. Ett exempel visas i Figur 47.



Figur 47. Anslutning av rörledning till GAP-skrubber.

Figure 47. Pipe connection to FRP scrubber.

3.5.5 PP detaljer och fyllkroppar

PP är ett material som har dålig förmåga att klara oxidativa förhållanden och som därför måste stabiliseras med tillsatser mot oxidation. En kvalitetsparameter är således mängden stabilisator som finns i PP-material. På Värö bruk används avvattningsgaller i PP i ett kyltorn. Temperaturen är ca 60 – 70°C och oxidativa föreningar förekommer vid pH 9. Avvattningsgallren sprack efter endast några få år i drift. Inga tydliga ytangrepp observerades på materialet som kunde kopplas till den oxidativa miljön. Materialet var dock dåligt stabiliserat redan från början och sannolikt fanns ingen stabilisator kvar efter tiden i drift.



Figur 48. PP-detaljer i en skrubber. Svetsar har spruckit och plasten har ändrat form.

Figure 48. PP structure in scrubber. It has lost its shape and welds have cracked.

I Högdalenverket förekommer en stor del PP-detaljer i olika skrubbar. Dessa verkar ha förmåga att klara driftförhållanden bra. Några problem som formförändringar och sprickbildning i svetsar, t.ex. i avvattningsgaller förekommer har påvisats, Figur 48. Formförändringar kan delvis bero på att PP utsätts för hög temperatur och/eller på att den utsätts för en last (t.ex. p.g.a. tjocka lager av avlagringar).

4 Genomgång av olika provningsmetoder

Kapitlet beskriver olika oförstörande provningsmetoder för polymera material i processutrustning med för- och nackdelar samt begränsningar. Metoderna har valts med hänsyn till att de främst ska vara enkla och eventuellt även kunna användas av driftpersonal. Följande områden identifierades av referensgruppen som prioriterade: verifiering av tjocklek, tjocklek på spärrskikt och styrkelaminat, verifiering av hartstyp, detektering av delamineringar och sprickor, detektering av vattenpåverkan hos laminatet. En del av dessa tekniker är fortfarande under utveckling.

4.1 Värmekamera (Infrared Thermography)

Vid en temperatur över -273°C utstrålar alla föremål infraröd (IR) strålning och strålmängden ökar med temperaturen. Denna strålning ($0,9\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$) är inte synlig för ögat men kan registreras av en värmekamera. En värmekamera kan mäta mängden IR-strålning som ett föremål utstrålar och omvandla informationen till bilder som visar föremålets ytemperatur (infrared thermography/infraröd termografi). Den kan således identifiera områden där temperaturen avviker från genomsnittstemperaturen, d.v.s. extremt kalla eller varma områden som kan uppstå t.ex. vid defekter där värmeledningsförmågan ändras. IR-termografi är en relativt ny teknik och applikationer undersöks på många olika områden; den har t.ex. använts för att studera tjockleksminskning och fogning av metalliska material. Den har även använts för att upptäcka defekter i flygplansdelar och värmeläckor i byggnader. Fördelen med IR-termografi är att tekniken inte kräver kontakt med föremålet som ska undersökas och att relativt stora områden kan undersökas på kort tid.

Det finns två olika typer av värmekameror, kameror som kyls och kameror som fungerar utan kylning, som använder sig av en mikrobolometer som detektor (IR-absorberande metall eller halvledande material som reagerar på den infallande IR-strålningen med att ändra motstånd, spänning eller ström). De sistnämnda värmekamerorna har blivit betydligt bättre och billigare samt lättare och mindre i storlek under den senaste tiden och är därför av intresse för användning i frågeställningar som rör underhåll.

Man skiljer mellan aktiva och passiva mätningar med IR-kamera. I de passiva mätningarna utstrålar objektet själv värmen, som registreras med kameran, t.ex. vid termografi av en byggnad. I den aktiva metoden stimuleras föremålet, som ska undersökas, externt med t.ex. varm luft, ultraljud eller ljusblixt för att uppnå temperaturskillnad. Här skiljer man mellan "pulsed thermography", "lock-in thermography" och "vibro-thermography". Vid pulsed thermography skickas en enstaka värmepuls till objektet och den reflekterade värmen mäts med IR-kameran. Vid defekter är värmeledningsförmågan försämrad och dessa kan då registreras som områden med högre temperatur. Vid "lock-in thermography" skickas en periodiskt återkommande värmepuls till materialet och den reflekterade värmevägen registreras. En bild beräknas från de ingående och de reflekterade värdena. Denna teknik används ofta för material med lägre värmeledningsförmåga som polymerer eller kompositer. I "vibro-thermography" tillförs energi till objektet med hjälp av t.ex. ultraljud. Ultraljudsvågorna

studsar tillbaka vid defekter och den mekaniska energin omvandlas till värme som sedan kan registreras av kameran.

4.1.1 Passiv mätning med värmekamera

Utgångspunkt för undersökningen av möjligheten att använda en värmekamera för att detektera defekter i en processkomponent i plastmaterial har varit att tekniken ska vara så enkel som möjligt och att en inspektion ska kunna utföras även under drift, d.v.s. man utnyttjar då värmen från ett processmedium för att skapa temperaturgradienter. Delamineringar, blåsor, godsfortunningar och läckor i skarvar skulle då kunna bli synliga genom att ytemperaturen avviker från genomsnittstemperaturen. För studien har därför en kamera av typ FLIR ThermoCAM SC640 valts. Den har en mikrobolometer-detektor, behöver inte kylas och är lämplig för passiva mätningar, Tabell 5. Kameran får anses ha en hög noggrannhet och är enligt tillverkaren avsedd att användas i vetenskapliga undersökningar.

Tabell 5. Teknisk specifikation för den använda kameran samt tekniska krav på värmekamera för inspektion av GAP enligt PSK 6316.

Table 5. Technical specification of the camera used for the studies and technical requirements according to PSK 6316.

	Teknisk specifikation för FLIR ThermoCAM SC640	Tekniska krav på kameran enligt PSK 6316
Termisk upplösning (Thermal resolution)	60 mK at 30°C	0.1°C
Bildupplösning (Spatial resolution)	0,65 mrad, 640 x 480 pixels	120 x 120 pixels (14400 different temperatur values per image)
Bildfrekvens (Image frequency)	30 Hz	
Spectral range	7,5 – 13 µm	
Temperature difference object - surrounding		Minst 10°C
Emission factor	0,96	~0,95 för GAP och polymera material

Användning av värmekamera med passiv mätning för inspektion av processutrustning av GAP beskrivs även i en finsk standard (PSK 6316 "Industrial Fibre-reinforced Plastic Products. Condition Monitoring. Thermographic Camera Inspection"¹⁹). Standarden avser inspektion av ny utrustning samt återkommande inspektion ("monitoring") av process utrustning i GAP under drift. Genom upprepade undersökningar av processutrustning med samma kamerainställning och vinkel ska förändringar eller avvikelser kunna upptäckas. Användning av värmekameran beskrivs som en del i inspektionen, där upptäckta förändringar sedan behöver undersökas även med andra metoder för att fastställa deras ursprung. De tekniska kraven i standarden beskrivs i Tabell 5, och kameran som användes i denna undersökning uppfyller således kraven i standarden. Följande avsnitt sammanfattar resultat från laboratorie- och

¹⁹ PSK 6316 "Industrial Fibre-reinforced Plastic Products. Condition monitoring. Thermographic Camera Inspection", PSK Standards Association, 2009-11-19

fältstudier, och kontakter med olika företag som tillverkar värmekameror och med en högskola i Finland vars undersökningar delvis låg till grund för PKS-standarden. (För mer detaljerad information se Bilaga C.)

GAP-laminat (tjocklek ca 15 mm) med defekter i form av delamineringar/inneslutningar av ett annat material av olika storlekar (max 2 x 2 cm) och vid olika djup i godset tillverkades och undersöktes med värmekamera, både under uppvärmningsfasen och när det hade nått jämn temperaturfördelning ("steady state"). Vid "steady state" var det inte möjligt att detektera defekterna med värmekamera. Endast under långsam uppvärmning kunde den största defekten (2 x 2 cm) närmast den undersökta ytan (laminatets utsida, d.v.s. styrkelaminatet) synliggöras. Vid snabb uppvärmning var temperaturskillnaderna för små för att ge utslag med värmekameran.

Blåsbildningsskador mellan spärrskikt och styrkelaminat (storlek på blåsorna ca 10 cm i diameter, laminatets totala tjocklek ca 15 – 20 mm varav spärrskikt ca 3 – 4 mm) i en skrubber i drift kunde inte synliggöras med värmekamera från skrubberns utsida. Tjockleksvariationer härstammande från lindningsprocessen verkade kunna observeras med värmekameran. Man bör dock vara medveten om att reflektion kan leda till fel i temperaturmätningen. Även skarvar i GAP och svetsar i termoplaströr undersöktes, men inga defekter upptäcktes. Här var defekter inte tidigare kända.

Studier med värmekamera vid Tampere högskola²⁰ utfördes på tunnare GAP-laminat, som rör med mindre diameter med mer storskaliga delamineringar mellan spärrskikt och styrkelaminat. Dessa defekter kunde påvisas med värmekamera. Vid kontakter med olika tillverkare och försäljare av värmekameror var den allmänna bedömningen att mätningar på tjockare plast eller GAP-material är svåra, men att det finns lyckade mätningar på tunnare material. Även i andra referenser nämns termografi med värmekamera som en bra metod för att inspektera processutrustning i plast som dock förutsätter mycket erfarenhet av inspektören^{21 22}, vilket i ref 15 uttrycks på följande sätt: "Thermography is more an art than an inspection technique."

Sammanfattningsvis tycks en värmekamera kunna ha förutsättning att användas för mätningar på tunnare gods, som GAP-rör med mindre diameter (6 – 8 mm i tjocklek), med större skador, som t.ex. delamineringar mellan spärrskikt och styrkelaminat. För tjockare gods, som i skrubbar, verkar tekniken dock inte fungera på ett enkelt sätt. Erfarenhet krävs vad som gäller tolkning av resultat. Angående för- och nackdelar samt begränsningar se även Tabell 6. Anskaffningskostnaderna för den studerade kameran ligger på ca 500 000 SEK (2010).

²⁰ E-post och telefonsamtal med Dr. Jyrki Vuorinen, Professor i polymerteknik, Tampere Tekniska Universitet, Institution för materialvetenskap, våren 2010

²¹ Reichhold, FRP Inspection Guide, Reichhold Inc, 2009

²² TIP 0402-28, Best practice for inspecting used fibre-reinforced plastic (FRP) equipment, Issued – 1999, Revised – 2007, TAPPI 2007

Tabell 6. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för skadedetektering med värmekamera (passiv mätning).

Table 6. Advantages, disadvantages, limitations and possibilities of inspections with infrared camera (passive measurement).

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar	Möjligheter
– Värmekamera är lätt att använda – Kan användas under drift för att identifiera områden som möjligen är skadade och som sedan kan inspekteras närmare vid driftstopp – Inspektion av stora områden möjlig	– Erfarenhet krävs för mätning och tolkning av resultat – För att kunna följa förändringar krävs att bilderna tas med samma avstånd, inställning, etc vid flera driftsstopp i följd	– Användning tycks vara begränsad till tunnare gods (typ GAP-rör) med större skador – Defekter i tjockare gods som i skrubbrar kunde inte synliggöras – Defektstorleken – Reflektioner kan störa mätningen	– Kunde möjligen användas för att upptäcka läckor i skarvar av tunnare gods samt vid svetsar eller muffar i termoplaströr med GAP-ommantling – Lokala godsförtunningar

4.1.2 Aktiv mätning med värmekamera

Termisk Systemteknik i Linköping²³ har utvecklat ett mätsystem för aktiv mätning med värmekamera med speciell mjukvara för utvärdering. Principen bygger på att mätobjektet stimuleras termiskt med t.ex. värmelampa, högenergiblixt, ultraljud eller mikrovågor. Den termiska stimuleringen samt typ av puls kan väljas efter applikation och material. Den termiska responsen från mätobjektets yta registreras med värmekameran som en funktion av tiden. Med hjälp av mjukvaran analyseras responsen och förändringar i temperatur. Vid t.ex. en defekt är responsen eller värmeledningen förändrad jämfört med ett material utan defekter. Mätmetoden anses vara känsligare för mindre temperaturförändringar än en passiv mätning.

Provmaterial (olika typer av GAP) skickades till Termisk Systemteknik från Inspekta Sweden AB och Swerea KIMAB för inledande undersökningar. Stimulans med högenergivärmelampa (1000 – 2000 W) valdes. Det bedömdes att materialen har förutsättningar att kunna undersökas med denna teknik. Tekniken behöver dock anpassas och mer detaljerade studier av möjligheter och begränsningar i att hitta defekter är nödvändiga. Utrustningen används i dagsläget dessutom sällan i fält och behöver anpassas för mätningar på processutrustning i fält. En anpassning är dock

²³ E-post och telefonsamtal med Stefan Sjökvist, Termisk Systemteknik, Linköping, våren och sommaren 2010.

möjlig. En aktiv mätning med värmekamera är mer krävande i fråga om utrustning och mätning än passiv mätning. Tekniken har således möjligheter, men kan inte användas i dag för inspektion av processutrustning i fält. Fördelar skulle främst vara kontaktfri mätning över större ytor.

4.2 Ultraljudsteknik för tjockleksmätning och detektering av defekter

Ultraljudsinspektion utnyttjar mekaniska vibrationspulser och deras reflektioner i ett material. Den reflekterade vågen kan undersökas och tolkas som t.ex. tjocklek eller defekter. Typiska frekvenser för ultraljudsmätningar är 500 kHz till 100 MHz. Högre frekvenser används för tunna och homogena material, och lägre frekvenser för tjocka material eller material som dämpar eller sprider ultraljudsvågorna. Således kan tjockleken mätas lättare i homogena metalliska och termoplastiska material än i GAP, som normalt är uppbyggd i flera lager av hartsmatris och glasfiber med olika egenskaper. Glasfiberhalt, tillsatser etc. kan ändra ultraljudsvågens hastighet och därmed påverka mätningen. De lägre frekvenserna gör ultraljudsvågen mindre känslig för störningar, men även mindre känslig för defekter.

Den enklaste mätmetoden baseras på direkt kontakt mellan mät huvud/givare och provföremålet med ett kontaktmedel mellan dem. En puls skickas in i materialet och den återkastade vågen analyseras ("pulse-echo" metoden, A-scan). Denna metod har valts som utgångspunkt för enkel tjockleksmätning i processutrustning i fält. Mer avancerade tekniker, som "Phased Array", där multi-elementgivare används för att skapa detaljerade bilder av interna strukturer, finns också, men har inte studerats närmare. Målsättningen i denna studie var att hitta pålitliga metoder att mäta total tjocklek, framförallt i GAP, samt att undersöka möjligheten att mäta tjocklek av spärrskikt, av termoplastliner på GAP eller av t.ex. en GAP-beläggning på betong eller stål. Även möjligheten att upptäcka defekter i form av delamineringar eller skiktningar i material har undersökts.

Ett mätinstrument av typ Panametrics NDT 35HP Olympus med fyra olika sensorer (M109 5 Mhz/.5", M106 2.25 MHz/.5", M1036 2.25 MHz/.5" delayed response och M2008 0.5 MHz/1") användes för studien. Instrumentet fungerar enligt "pulse echo" metoden. En skärm visar ekot från materialet under mätningen (live A-scan). Det är speciellt framtaget för ett ultraljudsfrekvensområde på 0.5 till 5.0 MHz, d.v.s. för de låga frekvenser som krävs för tjocka eller absorberande material. Instrumentet kalibreras med minst en 1-punkts mätning; för noggrannare mätningar kan en kalibrering med flera punkter genomföras. Olika laminattyper undersöktes och användes för att kalibrera instrumentet. Laminat av olika tjocklek och uppbyggnad som hade tagits från GAP-processutrustning ingick också i studien. För mer information se Bilaga D.

Resultaten kan sammanfattas på följande sätt. Ett instrument framtaget för mätning av tjocklek på tjocka eller absorberande material, i kombination med "live A-scan display" som Panametrics NDT 35HP och lämpliga givare, kan ha förutsättning att användas för tjockleksmätningar på GAP av olika typer eller linad GAP, samt även påvisa skador som blåsbildning och delamineringar. Det förefaller emellertid inte vara lika enkelt att

uppnå samma noggrannhet eller pålitlighet som för metalliska material. Rätt kalibrering av instrumentet är en förutsättning för att erhålla bra mätvärden, men är inte lätt i GAP eftersom GAP består såväl av olika material (harts och glasfiber) som olika skikt med olika glashalter och typer av armering (spärnskikt och styrkelaminat). Mätfelets storlek beror på val av kalibreringsmaterial och låg vid val av endast CSM eller endast WR laminat som kalibreringsmaterial vid ca 5 %. Mätfelet kan dock vara lägre vid kalibrering med ett mer liknande material, men kan också vara betydligt högre om kalibreringsmaterialets sammansättning avviker mycket från materialet som ska mätas. För termoplastmaterial var kalibreringen mycket enklare och noggrannheten bättre. Tillverkaren Panametrics anger en noggrannhet av 0,04 mm för 1 – 20 mm tjocka termoplaströr och 0,2 mm för 1 – 20 mm tjock GAP²⁴. En slutsats för mätningar i fält är därför att kalibrering helst ska utföras på samma struktur som ska mätas, t.ex. vid manluckor eller liknande där tjockleken även kan mätas på andra sätt. Man bör dock vara medveten om att laminatet vid sådana ställen kan avvika i sin uppbyggnad från övriga laminat p.g.a. skarvlaminat eller extra förstärkning. Fastän den uppnådda noggrannheten är lägre för GAP än för andra material, bedöms tjockleksmätning med ultraljud kunna vara lämplig vid mätning av totaltjocklek vid kontroller och uppskattning av tjocklek på en liner eller ett spärnskikt. Tekniken, som den har utvärderats i dagsläget, medger dock inte mätning av mindre tjockleksavvikelser. ”Life A-scan” anses som en förutsättning för att kunna bedöma tillförlitligheten och för att tolka resultat.

För att uppnå bra resultat i fält verkar tillgång till olika givare vara en förutsättning. Givaren M106 verkar vara lämplig för mätning av spärnskiktets tjocklek, av tjocklek hos en termoplastliner förstärkt med GAP, samt eventuellt för mätning av tjocklek av GAP applicerad på betong. Givare M1036 kan vara lämplig för mätning av laminat bestående av spärnskikt och styrkelaminat med en tjocklek upp till ca 10 mm. Givaren M2008 verkar vara lämplig för mätning av laminat med spärnskikt och styrkelaminat med en tjocklek upp till 20 till 25 mm. Den kan även detektera blåsor i laminatet samt delamineringar (ca 10 till 20 mm i diameter). Den verkar även kunna mäta totaltjockleken hos termoplastlinat GAP-material. Detta måste dock undersökas vidare.

Det finns ett antal andra begränsningar med tekniken för närvarande. Mätningar på laminat med omfattande ytsprickor är svårt. Givarens storlek medför vissa begränsningar med hänsyn till processutrustningens diameter. Utan hjälpmedel kan givarna endast användas på utrustning med stor diameter och inte på t.ex. rör med mindre diameter. Oregelbunden yta, som man ofta har i GAP-processutrustning, kan medföra svårigheter vid mätningen om givaren inte kan täcka hela ytan. Det finns dock speciellt framtagna kontaktmedel med högre viskositet som kunde lösa detta problem. Mycket erfarenhet behövs också för att tolka resultaten.

I samarbete med provare från Inspecta utfördes även mätningar på olika provföremål i GAP- och termoplastmaterial. Mätningarna gjordes med avancerad A-scan utrustning med en 2,25 MHz 0,5” givare. Givaren kunde lätt användas för termoplastmaterial. Det

²⁴ Fowler KA, Elfbaum GM, Smith KA, Nelligan TJ, Theory and application precision ultrasonic thickness gaging, NDTnet October 1997, Vol 2, No 10, <http://www.ndt.net/article/wt1097/panam/panam.htm>

var svårt att använda denna givare på tjockare laminat, men man kunde mäta totaltjocklek på tunnare, enklare laminat (CSM laminat, WR laminat, laminat med spärrskikt och styrkelaminat < 10 mm), tjockleken på spärrskikt samt tjocklek på termoplastliner. Det krävs dock mycket mer erfarenhet av att tolka ekon och hitta rätt inställning med detta instrument. Slutsatsen var att det för tjockare laminat antagligen behövs en 0,5 MHz bredbandsgivare. Denna är då antagligen för okänslig för att detektera mindre defekter. Tekniken behöver även optimeras med hänsyn till glasfiberarmering och glashalt samt kalibrering. 2,25 MHz 0,5" givare kunde detektera delamineringar i laminatet och kan eventuellt användas för att undersöka vissa svetstyper i termoplastmaterial. Utvärdering av "phase array" teknik samt ultraljudsundersökningar med vinkelsökare bedömdes inte vara aktuella i dagsläge p.g.a. av GAPen komplicerade struktur. I standarden NORSOK M-622²⁵ omnämns ultraljud som en oförstörande provningsmetod för offshore (och möjligen onshore) rörledningar i glasfiberarmerad plast eller epoxi. Som detekterbara skador anges områden utan vidhäftning i skarvar (minst 10 mm i diameter), delamineringar, luftinneslutningar och avvikelser i godstjockleken (minst 5 – 10 %). Noggrannheten beror på mätinstrument, frekvens och inställningar. Teknikens för- och nackdelar och begränsningar sammanfattas i Tabell 7. Anskaffningskostnader ligger på ca 70 000 SEK för instrumentet med två givare (2010).

Tabell 7. För- och nackdelar samt begränsningar med ultraljudsmätningar.

Table 7. Advantages, disadvantages and limitations for ultrasonic measurements.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Enkel hantering av mätinstrument – Mätning lätt att utföra på plats – Mätning av totaltjocklek, mätning av spärrskiktets tjocklek, GAP-beläggningar eller tjocklek av termoplastliner kan vara möjlig – Kan användas för att detektera delamineringar – Med B-mapping funktion kan storleken på delamineringsskadan uppskattas – Överkomligt pris	– Erfarenhet krävs för tolkning av resultat, instrument med A-life scan anses vara förutsättning för att kunna tolka mätningar – Inte samma mätnoggrannhet som t.ex. för metalliska material – Kalibrering "på plats" krävs för bra noggrannhet.	– Mätnoggrannheten om tillgång till bra kalibreringsmaterial saknas, fel på 5 % eller mer möjligt med "liknande" material – Tolkning kan vara svår vilket minskar pålitligheten – Givarens storlek medger inte direkta mätningar på t.ex. rör av mindre diameter (t.ex. DN200) – Kan inte användas på laminat med kraftig ytsprickbildning

4.3 Undersökning av fuktskadat laminat med fuktmätare

En viktig aspekt i fråga om GAP-materials tillstånd i rökgasreningsanläggningar är möjligheten att kunna bedöma hur mycket det har påverkats av diffunderande vatten. Beroende på typ av material kan vattendiffusion leda till t.ex. släppning mellan glasfiber

²⁵ NORSOK Standard M-622 "Fabrication and Installation of GRP piping systems", Standards Norway, 2005

och hartsmatris (mikrodelamineringar), till blåsbildning eller i vissa fall till nedbrytning av hartsmatrisen. De mekaniska egenskaperna av GAP-laminatet kan försämrats och materialet kan bli sprödare eller mjukas upp. Delamineringar som minskar hållfastheten kan då möjligen uppstå.

Ett instrument som kan användas för oförstörande provning är en så kallad fuktmätare, d.v.s. ett instrument som är känsligt för mängden absorberat vatten i ett material. Dessa instrument används vanligtvis för mätning av fukt i trä eller betong. Det finns två olika typer av fuktmätare, en kapacitans- och en resistensbaserad. Vid den resistensbaserade tekniken sticks två elektroder ner i materialet och resistansen mellan dessa elektroder mäts. Resistansen minskar beroende på mängden vatten som förekommer i materialet. Vid kapacitansbaserad mätning läggs en mätsond på materialets yta. Ett elektriskt fält byggs upp beroende på materialtyp och fukttinnehåll. Mätinstrumentet visar ett relativt värde för fukthalten i materialet som med hjälp av en kalibreringskurva kan räknas om till fukthalt. Mätresultatet beror delvis även på materialets tjocklek. Därför bör en referensmätning göras på liknande, torrt material. Fukthalten anges som differensen mellan värdena för fuktigt och torrt material. Mät djupet beror på densiteten hos materialet som ska studeras. För lätta material som GAP är mät djupet ca 10 cm medan tyngre material som betong endast har ett mät djup på 2-3 cm. Därför är det viktigt att inga andra material, såsom metall, finns i närheten om en mätning görs på GAP material eftersom de stör mätningen.

En kapacitansbaserad fuktmätare av typ GANN Hydromette UNI 1 valdes för studier. Instrumentet rekommenderas vanligtvis för mätning av fukt i trä eller betong och kalibreringskurvor finns för dessa material. Mätningar visade att fuktmätaren inte är känslig för mängden vatten absorberat i hartsmatrisen, men endast för vatten som föreligger fritt i hålrum i laminat (för mer information se Bilaga E). Hålrummen kan vara mikrodelamineringar, d.v.s. lokala skiktningar, mellan glasfiberarmering och hartsmatris, men även sprickor i hartsmatrisen som har uppkommit till följd av ”disc cracking” i hartser som undergått hydrolysreaktioner i kontakt med vatten. Fuktmätaren kan således användas för att upptäcka förändringar som mikrodelamineringar eller ”disc cracking”. Fälttester har visat att fuktmätaren är känslig för vätskefyllda blåsor och kan användas för att detektera osmosblåsor i begynnelsestadiet eller när laminatet börjar visa kraftigare vattenpåverkan än förväntat.

Värdena som erhålls från fuktmätare är i viss mån beroende såväl av tjockleken som av laminatets struktur. Fuktmätarvärdet ökar med tjockleken på laminatet. Tabell 8 sammanfattar erfarenheter rörande referensvärden både från laboriemätningar och från fältmätningar. Värdena kan skilja sig åt något beroende på om man mäter från in- eller utsida p.g.a. fuktgradienten och skillnader i laminatuppbyggnad. Vid mätning med fuktmätare bör det även beaktas att mätvärdet påverkas av fukten i provarens kropp om avståndet är för litet. Givaren bör därför hållas lagom långt från kroppen. Det får inte finnas vätska eller vatteninnehållande avlagringar kvar i utrustningen, eller andra material som metall i närheten. Även mycket hög luftfuktighet kan störa mätningen. En bedömning av laminatets status med fuktmätare är oftast enklast när man kan följa fuktvärdena med tiden på utvalda referensytor. Tabell 8 listar några referensvärden.

Tabell 8. Referensvärden för fuktvärde mätt med GANN UNI 1 fuktmätare på olika typer av material.

Table 8. Reference values for moisturemeter values measured with GANN UNI 1 for different materials.

Laminattyp	Referensvärde enligt erfarenhet från laboratorium och fält, värdena varierar något med laminatets tjocklek
Handupplagt laminat, oexponerat	Ca 20-25
Handupplagt laminat efter några år i drift, icke kraftigt vattenpåverkat	Ca 30-45
Handupplagt laminat, kraftigt vattenpåverkat	>50-60
Lindat laminat, oexponerat	Ca 20
Lindat laminat, efter några år i drift, icke vattenskadat	Ca 30-45
Lindat laminat, vattenskadat	>50



Andra möjliga användningsområden för fuktmätare är att detektera läckande skarvar eller svetsar i en termoplastlining under en GAP-förstärkning, Figur 49. Läckage av svetsar i en GAP-klädd PP-ledning för lut kunde påvisas med fuktmätaren när ledningen var tömd. Fuktmätaren kunde dock i detta fall inte visa var läckaget hade uppstått eftersom lut kan krypa i gränsskiktet mellan PP och GAP.

Figur 49. Detektering av läckande svetsar under en GAP-förstärkning med fuktmätare.

Figure 49. Detection of leaking welds below an FRP reinforcement using a moisturemeter.

Tabell 9 sammanfattar för- och nackdelar samt begränsningarna för mätningar med en kapacitansbaserad fuktmätare. Anskaffningskostnaderna ligger på ca 7000 SEK (2010).

Tabell 9. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för mätningar med kapacitansbaserad fuktmätare.

Table 9. Advantages, disadvantages and limitations of measurements with a capacity-based moisturemeter.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
- Kan användas för kvalitativa mätningar av vattenpåverkan på GAP eller för att detektera läckage i svetsar som omsluts av en GAP-förstärkning - Enkel hantering av mätinstrument, mätning lätt att utföra på plats	- Referensvärde krävs för tolkning av resultat. Detta kan lösas med erfarenhetsbaserade värden eller upprepade mätningar på referens- eller kontrolltyta över längre tid - Ger kvalitativa resultat. Orsaken till och följer av mycket höga	- Kan inte användas under drift, på fuktiga ytor eller ytor med beläggningar - Kan inte användas för laminat med kolfiber - Tillsatser kan förändra referensvärden - Givaren får hållas lagom långt från provarens kropp för att förhindra att denna påverkar

	fuktvärden bör möjligen undersökas på annat sätt, t.ex. genom uttag av rondell.	mätningen.
--	---	------------

4.4 Identifiering av hartsmatrisen med spektroskopiska metoder

Det skulle vara önskvärt att kunna kontrollera på plats vid t.ex. tillverkningskontroll om rätt hartsmatris eller termoplastmaterial har använts i tillverkningen av en processkomponent. Idag kan typen av harts eller termoplastmaterial kontrolleras genom provtagning och DSC eller/och FTIR-analys. En möjlighet till mätning på plats kunde vara spektroskopiska mätmetoder som FTIR (Fourier Transformed Infrared Spectroscopy) eller Raman-spektroskopi. Under senare tid har mindre handhållna instrument baserade på FTIR- eller Raman-teknik utvecklats för identifiering av kemiska ämnen eller organiska material som plaster. Applikationsområden som beskrivs är t.ex. kvalitetskontroll av inkommande råmaterial vid tillverkning av plastdetaljer eller kontroll av läkemedel. Utrustningen fungerar på sättet att ett spektrum tas och jämförs med ett referensspektrum. Handhållna RAMAN-instrument verkar för närvarande användas något oftare än FTIR-instrument. Förutsättningen för att utföra sådana mätningar är att spektra för materialen av intresse för processutrustning skiljer sig tillräckligt mycket så att ett material säkert kan identifieras. Eftersom identifiering av olika termoplaster är lättare p.g.a. större skillnader i spektra och tekniken delvis redan används idag inriktades studien på hårdplaster och laminat. Kontakter med tillverkare av sådan utrustning visade att inga eller endast mycket begränsade erfarenheter finns för mätning och kvalitetskontroll på GAP för processutrustning.

4.4.1 Identifikation med handhållet Raman-instrument

Provmaterial bestående av plattor av rent harts (olika, vanligt förekommande hartstyper för processutrustning) och CSM-laminat tillverkades. Olika uthärdningsgrader av laminatet erhöles genom olika efterhärdningsprocedurer. Ett laminat uttaget från processutrustning inkluderades i studien. Företaget DeltaNu (svensk representant Azpect) utförde provmätningar på dessa material med ett handhållet RapidID Raman instrument. Resultaten kan sammanfattas på följande sätt (för mer information se Bilaga F). Tydliga spektra erhålls för rena hartsplattor. Finns glasfiberarmering i materialet behövs baslinjekorrektur för att få tydliga spektra. Spektra för de olika hartstyperna uppvisar likheter. Det finns dock även skillnader i kurvorna som kan användas för att identifiera hartstyperna bisfenol A fumaratpolyester, vinylester och novolack vid topparna kring 710 och 800 cm^{-1} . Skillnaderna mellan en vanlig vinylester och en uretanmodifierad vinylester är dock små vilket gör en identifiering svårare.

Det finns Raman-spektroskopi-baserade metoder²⁶ för att följa härdreaktionen i styrenlösta hårdplaster genom att följa minskningen av styrendubbelbindningen som representeras av toppen vid 1630 cm^{-1} med 1600 cm^{-1} toppen som referens. Detta kan möjligen användas för att studera uthärdningsgrad och reststyrenhalt i GAP. Det

²⁶ Skrivars M, Niemelä P, Koskinen R, Hormi O, J. Appl. Polym. Sci., 93, 1285-1292 (2004)

använda handhållna Raman-instrumentet kunde identifiera skillnader relaterade till halten dubbelbindningar som berodde på uthärtningsgrad och reststyrenhalt. Både toppen vid 1425 och vid 1630 cm^{-1} visar minskningen av dubbelbindningar med uthärtningsgrad. Tekniken kan således teoretiskt användas för att bestämma uthärtningsgraden och reststyrenhalten. Tidigare undersökningar²⁷ har dock indikerat att Raman-spektroskopi inte är tillräckligt känslig för att detektera skillnader i harts med reststyrenhalter lägre än 1 %. Detta motsvarar dock bra uthärkning (i vissa standarder krävs ett maximum på 2 % reststyren) så det behöver därför inte vara en begränsning.

4.4.2 Identifikation med handhållet FTIR-instrument

Liknande material som i studien med Raman-spektroskopi undersöktes även med ett handhållet FTIR-instrument. Försöken utfördes av A2 Technologies med ett instrument av typ Exoscan som lämpar sig för mätning både utan och med kontakt (se även Bilaga F). Bland instrumenten på marknaden får det anses tillhöra de mer avancerade. Tillverkare av enklare och billigare instrument utan t.ex. större skärm ansåg att sådana instrument inte har förutsättningar att skilja mellan olika hårdplaster med glasfiberarmering. Däremot skulle enklare FTIR-instrument kunna identifiera olika termoplastmaterial.

På material med opåverkade ytor kunde ett spektrum tas genom mätning både med och utan kontakt. För material som varit exponerade i fält under flera år och som visade kraftig vattenpåverkan och därmed var matta i ytan var endast kontaktfri mätning möjlig. Förekomsten av glasfibrer i laminaten störde inte mätningarna nämnvärt. Materialen visade stora likheter i spektra, men det fanns påtagliga skillnader som kunde användas för att identifiera ett material. Skillnaden mellan bisphenol A polyestern och de andra hartserna var störst. Att däremot skilja mellan vinylesterhartser med olika styrenhalter förefaller svårt. Mätningar på exponerat material visade att det är möjligt att få tydliga spektra, men nedbrytning samt avlagringar kan störa ett spektrum så att en identifikation inte längre är möjlig. Inga försök gjordes att mäta reststyrenhalt och uthärtningsgrad. Liksom för Raman finns det FTIR-baserad teknik för att uppskatta styrenhalten. Raman-tekniken anses dock ofta vara mer lämpad för en sådan applikation.

Handhållna instrument som baseras på tekniker som Raman och FTIR verkar ha förutsättningar att identifiera olika vanliga hartser i GAP-material. De används även för identifikation av termoplastmaterial. Det bedöms dock att ytterligare erfarenhetsinsamling behövs för att lätt kunna använda sådana instrument i praktiken för GAP-material och verifiera t.ex. samband mellan reststyrenhalt och halten av dubbelbindningar. De studerade instrumenten är något dyrare och därmed mest lämpade för företag som utför inspektioner ofta eller hanterar stora mängder material. För- och nackdelar för handhållna spektroskopiinstrument är sammanfattande i Tabell 10. Anskaffningskostnaderna ligger på ca 70 000 – 100 000 SEK (2010).

²⁷ Römhild S, Bergman G, Hedenqvist MS, "Short-Term and Long-Term Performance of Thermosets Exposed to Water at Elevated Temperature", Journal of Applied Polymer Science, 116, 1057-1067 (2010)

Tabell 10. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för mätningar med handhållna Raman och FTIR-instrument.

Table 10. Advantages, disadvantages and limitations of measurements with handheld Raman and FTIR instruments.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Identifikation av termoplast och hårdplastmaterial möjlig – Snabb och oförstörande analys på plats – Raman-tekniken har förutsättning att kunna användas för reststyrenmätningar	– Instrumenten har högre anskaffningskostnad än t.ex. fuktmätare eller ultraljudtjockleksmätare – Kan vara svåra att använda på kraftigt påverkade ytor vilket dock kan avhjälpas genom slipning	– Antagligen svårt att skilja mellan olika typer av vinylesterhartser med olika styrenhalter – Skillnaden mellan vanligt och uretanmodifierat harts är liten och borde studeras närmare – Viss kännedom om laminatuppbyggnad förutsättning så att mätning inte utförs på icke-representativ yta (t.ex. vaxslutstrykning)

4.5 Identifiering av sprickor med penetrant

Penetranttekniken kan användas för detektering av sprickor som når ytan i material som metall, plast, glas etc. Den kan användas i samband med kvalitetskontroll eller för att detektera sprickor som bildats efter en tid i drift. Penetranttekniken omfattar olika steg som innefattar rengöring av ytan som ska inspekteras, påstrykning av penetranten och inverkan under en definierad tid, avlägsning av all överskott av penetrant från ytan och applikation av en s.k. framkallare för framkallning av penetranten som samlats i sprickor. Därefter följer visuell undersökning av ytan och slutligen rengöring. Provning med flytande penetrant finns t.ex. beskriven i ASTM E-1417²⁸.

Penetrantsystem kan indelas efter typ av färgämne som synliggör sprickan, borttagningsteknik och känslighet. Även lösningsmedlet kan skiljas. Man skiljer mellan fluorescerande vätskebaserade penetranter och synliga vätskebaserade penetranter. Fluorescerande penetranter innehåller ett fluorescerande färgämne som blir synligt under ultraviolett ljus. Synliga penetranter kan ses i naturligt eller vitt ljus. De kan förstärkas genom att en vit framkallare appliceras. Ibland finns det penetrantsystem som är en blandning av fluorescerande och synliga penetranter. Det finns system där penetranten är löst och tas bort med vatten eller lösningsmedel. Känsligheten hos penetrantsystemen klassas enligt standarden SAE AMS 2644²⁹ enligt följande. Det finns även andra standarder med andra klassningsindelning.

Level ½ - Ultra Low Sensitivity
 Level 1 - Low Sensitivity
 Level 2 - Medium Sensitivity

²⁸ ASTM E-1417 "Standard Practice for Liquid Penetrant Examination"

²⁹ SAE AMS 2644 "Inspection Material, Penetrant"

Level 3 - High Sensitivity

Level 4 - Ultra-High Sensitivity

De flesta penetrantsystem som finns på marknaden har tagits fram för undersökning av metalliska material och innehåller oftast organiska lösningsmedel. Dessa lösningsmedel har fördelen att de är lättflyktiga. Vattenhaltiga lösningar kan i vissa fall även orsaka korrosionsskador på metaller. Lösningsmedlen som används i penetrantsystem för metalliska material kan dock påverka plastmaterial negativt t.ex. genom svällning. Även vissa tensider, som behövs i ett penetrantsystem som ytaktiva ämnen så att ytan och sprickor lätt kan vätas med önskad känslighet, kan orsaka skador i plast p.g.a. spänningskorrosion/"environmental stress cracking" (ESC). För undersökning av polymera material med penetranttekniken bör därför val av lösningsmedel och tensid beaktas. Generellt verkar ett vattenbaserat system vara mer lämpligt än lösningsmedelsbaserade system.

"Magnaflux AL-4B Water-soluble Fluorescent Penetrant" tillverkat av Magnaflux testades. AL-4B är enligt beskrivning³⁰ och säkerhetsdatablad³¹ en nedbrytbar, fluorescerande, vattenbaserad penetrant som kan spädas ut med vatten. Den fluorescerar under bestrålning med UV-ljus (365 nm) och klassificeras som "low sensitive penetrant". Den kan enkelt avlägsnas med vatten. AL-4B innehåller vatten, fluorescerande färgämne, emulgeringsmedel och lösningsmedel. Enligt säkerhetsdatabladet innehåller produkten 2-(2-butoxi)etanol (10-50 vikts-%) som lösningsmedel och alkoholetoxylat (5-15 vikts-%) som tensid.

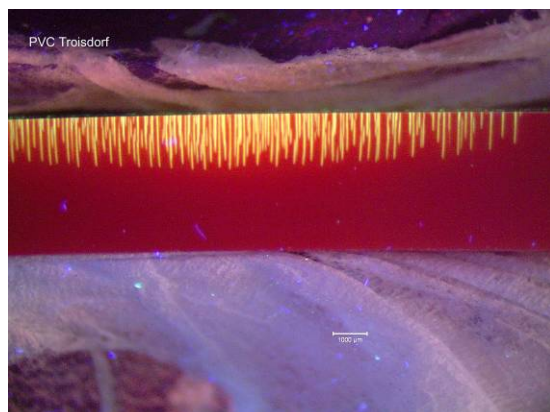
Av intresse är att testa både om penetranten kan synliggöra kritiska sprickor i ett material och om olika plastmaterial av intresse för processutrustning kan skadas av de ämnen som finns i penetranten. Mikroskopundersökningen visade att "crazes" (lokala områden där en kemisk substans mjukgör materialet vilket sedan möjliggör spricktillväxt) kunde bildas i vissa material när material utsattes för 3-punktsböjning och exponering i penetranten, Figur 50. "Crazes" anses vara tecken på spänningskorrosions-processer. Effekten var störst i CPVC- och PVC-material som är känsliga både för vissa alkoholer och tensider³². För CPVC har fall av spänningskorrosionsskador rapporterats i samband med små mängder tensider och tensidlösningar som använts i t.ex. läcksökningstester³³. Även i hårdplasterna förekom liknande sprickbildning, men initieringstiden var mycket längre. Effekten var störst i vinylesterhartset Derakane 441 och minst i bifenol A fumaratpolyestern Atlac 382. Inga tecken på spänningskorrosion observerades i PE, PP, PVDF och ECTFE inom loppet av 8 veckor. Ingen kritisk svällning eller viktupptag observerades.

³⁰ Magnaflux AL-4B Water Soluble Fluorescent Penetrant, Product Data Sheet, Magnaflux, Issue Date: 31/10/05, TDS No: AL-4B Rev No 00

³¹ Magnaflux AL-4B Safety Data Sheet, Magnaflux, Revision Date: 30/06/2006, Rev: 01

³² Corzan Piping Systems - Chemical Resistance Data, Lubrizol, January 2009

³³ Knight, Michelle, Chemical Resistance and Chemical Applications for CPVC pipe and fittings, Corzan Industrial Systems



Figur 50. Polerat tvärsnitt av röd PVC testat i 3-punktsböjning och utsatt för penetranten och studerat under UV-ljus.

Figure 50. Polished cross-section of red PVC tested in 3-point bending and exposed to penetrant solution when studied under UV-light.

Penetranten testades på olika provföremål med och utan torrframkallare och generellt sett fungerade den för att detektera sprickor i plastmaterial. Försvårande faktorer är ytangrepp på plastmaterialet, ytsprickbildning och absorption av penetranten i det yttersta materialskiktet. I vissa fall kan ytan efter några år i drift vara angripen vilket kan leda till kraftig bakgrundsfluorescens eftersom det är svårt att helt tvätta bort penetranten. Vissa angrepp på plasten kan även leda till att penetranten absorberas i det yttersta materialskiktet eller kring armeringen vilket också leder till en sorts bakgrundsfluorescens. Som nämnts tidigare är ytsprickor vanligt förekommande i GAP och även i andra material. Detta kräver att inspektören kan skilja mellan ytsprickor

och djupare, mer kritiska sprickor. Användning av torrframkallare kan underlätta bedömningen av sprickbildning med hänsyn till bakgrundsfluorescens och absorption av penetrant i materialets yttersta skikt. Den kan även hjälpa vid en bedömning av om det är ytliga sprickor eller djupare sprickor genom blödningseffektens storlek. För GAP-material verkade dock skillnaden i blödning från ytsprickor och från djupgående sprickor vara mindre vilket kan bero på att sprickorna är mer förgrenade i de olika laminatskikten. Av samma anledning kan det därför även vara svårt att upptäcka genomgående sprickor i GAP.

Eftersom känsligheten hos PVC och CPVC för vissa lösningsmedel och tensider är känd avråds från användning av den testade penetranten. Även några hårdplaster har visat en viss påverkan, dock i mindre utsträckning. Använder man penetranten för sådana material måste ytan efter provningen noggrant tvättas för att avlägsna penetranten. En förbättring av sprickdetekteringen kunde eventuellt även uppnås genom att välja en penetrant med högre känslighet, som röd penetrant synlig i vanligt ljus, i kombination med en torrframkallare. Risken för bakgrundseffekter och kontrasten som kan uppnås bör dock avvägas. För- och nackdelar med penetranttekniken sammanfattas i Tabell 11.

Tabell 11. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för penetranttester på polymera material.

Table 11. Advantages, disadvantages and limitations of crack identification with penetrant.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Metoden är känslig för små ytdefekter. – Stora delar och delar med komplex geometri kan inspekteras till relativt	– Endast defekter som når ytan kan detekteras. – Rengöringen är mycket kritisk för att uppnå rätt resultat	– Porös yta, t.ex. genom ytangrepp, kan ge kraftig bakgrundsfluorescens – Förekomsten av ytsprickor, som är

låga kostnader. – Sprickor eller defekter indikeras direkt på ytan. – Relativt lätt att använda.	– Ytegenskaper kan påverka resultatet – Många olika arbetsmoment ska genomföras – Ytan måste eventuellt rengöras noggrant efter penetrantprovningen	vanliga i GAP, kräver erfarenhet för att kunna skilja mellan ytsprickorna och djupare sprickor – Bör inte användas för PVC och CPVC.
--	---	---

4.6 Barcolmätare

En Barcolmätare är ett instrument som har använts under lång tid för att bestämma uthärdningsgraden eller hårdheten hos laminat och som ofta refereras till i kvalitetskontroller och kemikalieresistenstester. Detta avsnitt ger en kort sammanfattning av tekniken, dess användning och begränsningar. Inga tester har dock utförts i detta projekt.

Metoden bygger på att ett hårdhetsvärde erhålls genom att mäta motståndet eller kraften som behövs för att trycka en vass stålnål under fjäderbelastning in i ett material, Figur 51. Instrumentet kallas för Barcolmätare eller Barcol impressor på engelska och ger värden mellan 0 och 100. Det sätts mot en yta, nålen pressas in i materialet och ett värde för Barcol-hårdheten visas på displayen. Instrumentet används för olika material vilket avgörs av kalibrering mot material av intresse. ASTM D2583³⁴ beskriver metoder att mäta Barcol-hårdhet på både armerad och icke-armerad plast.



Figur 51. Barcolmätare.

Figure 51. Barcol impressor.

För armerad plast (GAP) används instrumentet för att bestämma uthärdningsgraden. Standarden specificerar att Barcol-värdet ska baseras på minst 10 värden: minst 12 mätningar ska göras och det högsta och lägsta värdet uteslutas. Ett harts anses vara uthärdat om hårdheten är lika eller större än 90 % av ytans maximala hårdhet. Barcol-värdet är specifikt för ett harts och mäts normalt vid normal rumstemperatur. Vissa ytmattatyper eller glasfiberarmering kan påverka Barcol-värdet. Mätningen utförs lämpligen på flera punkter över en större provyta. Även hög temperatur eller förekomst av vaxtillsatser kan

leda till ett lägre Barcol-värde. Typiska värden för väl uthärdat laminat ligger på ca 35 till 45 beroende på hartstyp och databladen för olika hartser brukar innehålla Barcol-värdet för uthärdat material. Minimum för Barcol-hårdheten varierar således med harts- och laminattyp, men ett riktvärde är minst 30 vid 25°C.

³⁴ ASTM D2583 - 07 Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor

Instrumentet används även i samband med provning av kemikalieresistensen hos GAP (ASTM C581)³⁵ där Barcol-värdet utgör ett mått på hur mycket ytan har angripits. Vissa miljöer leder dock till ett ytangrepp med kraftig sänkning av Barcol-värdet till följd. Detta betyder dock inte att ett visst laminat är olämpligt för en sådan miljö utan värdena bör även tolkas med hänsyn till andra parametrar.

För och nackdelar med testmetoden listas i Tabell 12. Kostnaden för instrumentet ligger på ca 8000 SEK (2010).

Tabell 12. För- och nackdelar samt begränsningar och mätningar av hårdhet med Barcolmätare.

Table 12. Advantages, disadvantages and limitations of Barcol impressor measurements.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Enkel och billig mätning som snabbt kan utföras på plats – Ger information om uthärdningsgrad i nytillverkat laminat	– Mestadels kvalitativ mätning – Vissa ytmattor liksom mätning på glas-fiberarmering kan ge missvisande värden.	– Värme och fukt kan ändra mätvärdet – Ytangrepp resulterar i minskning av Barcol-värdet. Det är dock inte i alltid ett lämpligt mått på om ett laminat kan användas i en viss miljö

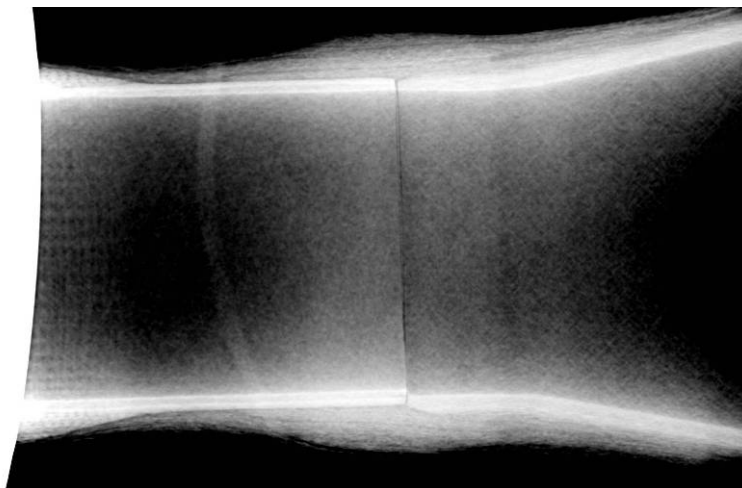
4.7 Digital röntgen

Vid digital röntgen samlas information från genomstrålning av ett objekt med röntgenstrålar av olika detektorpaneler och omvandlas till en digital bild som kan behandlas elektroniskt och tolkas. Tekniken används främst för undersökning av rör- och tryckkärllssvetsar i metalliska material, men är även av intresse för inspektion av polymera material. I litteraturen nämns att t.ex. fiberorientering, föroreningar eller inneslutningar, felaktig laminatuppbyggnad samt sprickor orienterade parallellt med röntgenstrålen, kan detekteras medan interlaminära defekter och fiberhalt inte kan kontrolleras¹⁹. Inledande tester på radiografimätningar på olika polymera material med olika typer av defekter utfördes av Inspecta.

Tjocklek på GAP och termoplaströr mättes med profilradiografering (icke under drift, endast tomma). Vid de här inledande försöken var det dock inte möjligt att skilja mellan spärrskikt och styrkelaminat i GAP-röret. Termoplaströret hade använts för transport av blandsyra (salpetersyra och fluorvätesyra) och ett korroderat skikt med delvis djupa ytsprickor hade bildats. Det var inte heller möjligt att skilja mellan opåverkat eller påverkat laminat eller upptäcka sprickor. Hur profilen i ett GAP-rör med korroderat skikt (t.ex. från klordioxidangrepp) visas med digital röntgen behöver undersökas närmare för att se om opåverkat och korroderat material kan särskiljas.

³⁵ ASTM C581 - 03(2008)e1 Standard Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service

Digitalröntgen kunde även användas för att undersöka kvalitén hos skarvar med hänsyn till kantförskjutningar och spalt mellan de två rören som sammanfogas, Figur 52. Vid en sådan analys bör det dock finnas riktlinjer för hur kantförskjutning och spalter ska bedömas eller vilka krav som har ställts i specifikationen. Det är av intresse att studera detta vidare för t.ex. skarvar och svetsar med lokala korrosionsangrepp i skarven eller svetsen. Defekter som djupa sprickor orienterade vinkelrätt mot ytan eller skador till följd av kraftig slag kunde inte detekteras med digitalröntgen. Undersökning av större prov, som t.ex. delar av svetsfogar från termoplastbehållare, som inte kunde röntgas i profil, gav inte heller tillfredställande resultat. Tabell 13 sammanfattar teknikens för- och nackdelar samt begränsningar i dagsläget. Det är troligt att användningen av tekniken kan förbättras. Det nämns t.ex. i litteraturen att det är möjligt att skilja mellan spärrskikt och styrkelaminat i GAP rör där mätningen utförs under drift, d.v.s. där rören är vattenfyllda²¹. Detta kunde möjliggöra såväl kvalitetskontroll med avseende på laminatuppbyggnad som mätning av kvarvarande tjocklek på spärrskikt i miljöer där en bortfrätning av material sker. Även standarden NORSOK M-622²⁵ kan nämnas. Standarden specificerar fordringar för rörledningssystem av GAP utöver sådana som finns beskrivna i ISO 14692 (Petroleum and natural gas industries - Glass-reinforced plastics (GRP) piping) och är avsedd både för offshore och onshore rörledningar. Den anger ultraljud och röntgen som oförstörande provningsmetoder för att kontrollera om ledningen uppfyller kraven. Röntgen anges kunna detektera godstjocklekar, vissa hålrum och delamineringar, avvikelser från rak anordning av rörsegment, avlagringar i rör och felaktiga skarvar. Områden med dålig vidhäftning i skarvar eller oregelbundenheter i ytan anges inte kunna detekteras. I vattenfyllda rör anges även lindningsvinkel, d.v.s. orienteringen på glasfiberarmeringen, kunna bestämmas. Det verkar därför finnas förutsättningar att förbättra metoden samt att anpassa den för industrins behov samt fältmässigt bruk.



Figur 52. Digital röntgenbild av en GAP-skarv i profil.

Figure 52. Digital X-ray image of an FRP joint laminate (in profile).

Tabell 13. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för mätningar med digital röntgen.

Table 13. Advantages, disadvantages and limitations of measurements with digital X-ray.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Termoplast- och GAP-rörs totaltjocklek kan mätas i profil – Skarvars profil kan synliggöras, visar eventuella kantförskjutningar och spalter	– Mer krävande och dyrare undersökningsmetod än t.ex. ultraljud	– Skiljer inte mellan angripet och oangripet material i termoplaster

4.8 Oförstörande provning med terahertzvågor

Terahertzvågor är elektromagnetiska vågor som ligger i frekvensområdet mellan mm- och mikrometervågor (radio, mikrovågsugnar etc) på ena sidan och infrarödsvågor (värmekameror) på andra sidan. Frekvensområdet omfattar 100 GHz till 10 THz. Många icke-elektriskt ledande material som papper, plast och kompositer är genomsläppliga för THz-vågor, vilket gör att 3D bilder kan skapas. Materialen kan således genomlysas och analyseras med avseende på defekter. Mätningen är kontaktfri och materialegenskaper vid gränssytor kan analyseras. Fördelen med THz-strålning är att den är ofarlig i jämförelse med t.ex. röntgenstrålning. Ingen kemisk påverkan eller uppvärmning av det undersökta materialet sker. THz-tekniken har hittills framgångsrikt använts för att detektera osynliga och inbyggda defekter i plast och kompositer, karakterisering av dolda ytor samt tjockleksmätning (tunna beläggningar), d.v.s. vid kvalitetskontroll av färdiga produkter och i produktionsprocessen. Teoretiskt är det även möjligt att använda tekniken för undersökning av processutrustning tillverkad av polymera material. I dagsläget är dock erfarenheten än så länge begränsad. Olika provföremål (GAP och termoplast) skickades till Synview, Tyskland, för undersökning och resultaten från mätningar och efterföljande diskussion sammanfattas nedan.

Utrustningen består av ett mät huvud och tillhörande konstruktion för att kontrollerat förflytta mät huvudet över provföremålet i x- och y-riktning^{36 37}. Terahertzvågen skickas in i materialet och reflekteras där brytningsindexet ändras, d.v.s. när strålen går in i provet och när den når provets undersida om materialet är homogent. Även vid inhomogeniteter som defekter eller gränssytor reflekteras strålen. Den reflekterade strålen analyseras och en bild i sid- och djupled skapas när mät huvudet flyttas över provet. Fördelen med THz-vågor jämfört med ultraljud är enligt Synview att THz-strålen är mer riktad än ultraljud och att därför färre flerfaldiga reflektioner (ekon) förekommer. Upplösningen i djupled är bättre och man kan särskilja flera defekter som ligger på olika djup. Analyserna utfördes med 100 GHz strålning vilket ger en upplösning på minst 3 mm, med 1 mm som bäst för defekter. Våglängden innebär även att provföremålet måste vara minst 5 – 6 mm tjockt för en mätning. Den maximala tjockleken är ca 20 mm. De analyserade provföremålen omfattade en stuts i GAP med invändig erosionskorrosionsskada, en handupplagd platta med kolfiberytmatta och definierade defekter (se värmekamera), ett termoplaströr med angripet innerskikt och

³⁶ Synviews hemsida <http://www.synview.de/>

³⁷ Presentation och telefonkonversation med Dr. Holger Quast, Synview, Bad Homburg, Tyskland, 2010-08-11

sprickbildning på insidan samt laminat med en reparation och djupgående sprickbildning. Alla provföremål kunde genomlysas med THz-vågor förutom laminatplattan med kolfiberytmattan vänd mot THz-strålen. Kolfiber kan inte genomlysas med THz-vågor. En analys av stuts och rör visade inte defekterna av typ erosionskorrosion och sprickbildning. Detta kan bero på att mätutrustningen inte var anpassad för runda föremål. Strålen träffade inte provföremålen vinkelrätt i de flesta positionerna vilket gav en något förvriden bild. För analys av krökta ytor behöver mätutrustningen anpassas. I den handupplagda laminatplattan med definierade defekter var endast en defekt synlig (1 x 1 cm). Det är möjligt att detta berodde på typen av defekt som hade åstadkommit genom att införa en PET film med någorlunda bra vätning till hartset i laminatet. Erfarenheten har visat att en delaminering ska vara ca ¼ mm tjock för att ge tydliga signaler. Vidare var det möjligt att detektera gränsskiktet mellan ett ursprungligt och ett reparationslaminat där vidhäftningen var begränsad. Det var inte möjligt att detektera sprickor. Dessa var mestadels orienterade vinkelrätt mot provföremålets yta och därmed parallellt till THz-strålen. Tekniken verkar ha potential för undersökning av processutrustning. Den måste dock anpassas för att kunna användas i fält och för de konstruktioner som förekommer i processutrustning. Även noggrannare studier behöver genomföras. I jämförelse med aktiv mätning med värmekamera bedöms instrumenteringen vara något mer omfattande. För- och nackdelar samt begränsningar sammanfattas i Tabell 14.

Tabell 14. För- och nackdelar samt begränsningar och möjligheter för mätningar med THz-vågor.

Table 14. Advantages, disadvantages and limitations of measurements with THz-waves.

Fördelar	Nackdelar	Begränsningar
– Kontaktfri mätning – Kan synliggöra defekter (ca 3 mm) på flera olika djup – Mindre känslig för flerfaldiga reflektioner än ultraljud – THz vågor är ofarliga jämfört med röntgenstrålning	– THz vågor kan inte genomlysas kolfiberlaminat – Antagligen mycket mer krävande och dyrare undersökningsmetod än t.ex. ultraljud.	– Kan mäta på 5 – 20 mm tjockt material – Bör anpassas till krökta ytor – Bör utvecklas vidare för användning för processutrustning

4.9 Andra hjälpmedel

4.9.1 *Tjockleksmätning med Polygauge (Digital magnetisk tjockleksmätare)*

Mätinstrumentet kan användas för att mäta tjockleken på icke-magnetiska material som termoplaster och GAP med en tjocklek upp till 30 mm. En variant av instrumentet mäter tjockleken hos en lining på ett metalliskt material (upp till 12 mm). Mätningen nämns som en tillförlitlig metod att mäta tjocklek på laminat, t.ex. vid kvalitetskontroll i ref 21 och 22. Mätprincipen bygger förenklat på att registrera förändringarna i ett magnetfält mellan en givare och ett magnetiskt motstycke som beror på tjockleken av det mellanliggande materialet. Mätinstrumentets funktion följer standarden ASTM D4166³⁸ (Standard Test Method for Measurement of Thickness of Nonmagnetic Materials by Means of a Digital Magnetic Intensity Instrument). Denna standard upphörde dock att gälla 2008 ("The instrument on which this test method is based is no longer sold or serviced."). Sambandet mellan försäljningen av Polygauge-instrumentet och tillbakadragandet av standarden är oklar. Fördelen med metoden, i motsats till ultraljudsmätning, är att den är oberoende av variationer i densitet och laminatuppbyggnad, luftinneslutningar eller inneslutningar av andra material. Nackdelen är att både in- och utsidan av strukturen som ska mätas måste vara tillgänglig. Mätnoggrannheten anges ligga på 4 % och den maximala tjockleken som kan mätas är ca 23 mm. Ett liknade mätprincip används vid mätning med Leptoskop. Goda erfarenheter föreligger hos Swerea KIMAB för mätning av tjocklek hos GAP (metallplatta placerad på andra sidan behövs) och hos beläggningar på metall.

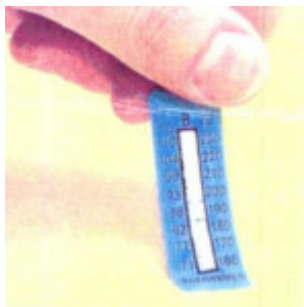
4.9.2 *Temperaturindikatorer*

Detta räknas inte som en oförstörande provningsmetod men kan ge information om lokala temperaturer eller eventuellt temperaturgradienter i processutrustning där annan temperaturmätning saknas. Information om temperatur kan användas för att bedöma om kritiska skador kan ha uppstått eller för att förklara varför en skada, oftast delamineringsskada, har uppträtt.

De undersökta temperaturindikatorerna var av märke Thermax[®] och levererades av Berlinger feel safe. Temperaturindikatorerna är fyllda med kemiska ämnen som byter färg vid en viss temperatur, och således anger den maximala temperaturen som utrustningen har utsatts för. Temperaturindikatorerna finns för olika temperaturintervaller, sammanlagt mellan 29 – 299°C, Figur 38. Två olika varianter testades: Thermax[®] 116 – 154°C, 8 steg och Termax[®] 160-199°C, 8 steg. De installerades i rökgaskanalen i Gärdstadsverket efter påvärmaren där man tidigare haft problem med delamineringar och antagligen hög värme, Figurer 53 och 54. Exponeringstiden var 4 och 16 månader. Temperaturindikatorerna utsattes inte för temperaturer högre än 110°C under drift. Funktionen efter exponering för de renade rökgaserna testades genom att utsätta indikatorerna för olika temperaturer. Indikatorerna kunde fortfarande efter 4 månader reagera på hög temperatur. Efter 16

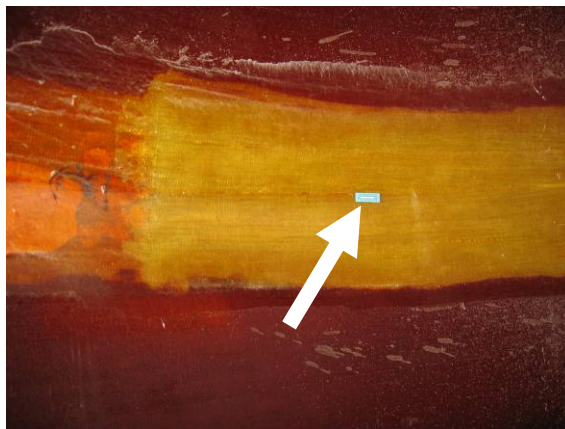
³⁸ ASTM D4166-99 Standard Test Method for Measurement of Thickness of Nonmagnetic Materials by Means of a Digital Magnetic Intensity Instrument

månader gav de dock utslag fastän temperaturen inte ska ha varit över 70°C. En förklaring är att andra reaktioner skett. Men indikatorerna verkar ha förutsättningar att kunna användas i rökgaser under kortvarig drift.



Figur 53. Temperaturindikator.

Figure 53. Temperature indicator.



Figur 54. Installation av temperaturindikator i rökgaskanal genom att laminera in indikatorn.

Figure 54. Temperature indicator laminated onto the surface of a flue gas duct laminate.

4.9.3 Gnistprovning

Gnistprovning kan användas för att inspektera flake-, gummi eller GAP-beläggningar på metallytor t.ex. vid kvalitetskontroll av nya beläggningar. Den används delvis också som inspektionsmetod för utrustning som varit i drift. En nackdel för utrustning, som varit i drift, är att en diffunderande, absorberad vätska kan öka konduktiviteten så mycket att liningen kan skadas vid mycket höga spänningar. I GAP-utrustning med termoplastlining kan svetsarnas kvalitet kontrolleras om ett elektriskt ledande skikt har applicerats på svetsens baksida. Metoden används för att detektera porer eller otätheter i lining eller svetsar som annars kunde leda till korrosionsskador på metallen eller bakomliggande laminat. För tjockare beläggningar används högspänningsinstrument. Ett riktvärde är att spänningen ökas med 1000 V per 100 µm skiktjocklek. Instrumentet jordas i mätobjektet och en sond förs över ytan som ska inspekteras. Sonden är tillverkad som en skrapa av ledande gummi eller en stålvisp. Eventuella porer markeras genom gnistor eller akustisk signal. Material som är elektriskt ledande kan inte inspekteras med denna teknik.

5 Inspektion och statusbedömning av processutrustning i polymera material

Inspektion eller besiktning av processutrustning omfattar både inspektion av ny utrustning inom ramen för kvalitetskontroll, och underhållsinspektioner eller inspektion efter revision. Kapitlet inleds med en kortare sammanfattning av krav som gäller vid besiktning av processutrustning och tryckkärl enligt olika regelverk. Sedan beskrivs olika inspektionsmetoder närmare. I slutet av kapitlet ges en sammanfattning av olika defekters betydelse för driftsäkerheten och livslängd.

5.1 Regelverk kring besiktning, kvalitetskontroll och inspektion

För konstruktion av plaströrledningar gäller plaströrledningsnormen PRN 1988 och för plastkärl plastkärlsnormer PLN 1983. I inledningen till PLN 1983, som fortfarande är en norm, som många plastkonstruktioner dimensioneras efter i Sverige, hänvisas till en kungörelse om behållare av armerad plast från 1982³⁹ angående regler för besiktning och egenkontroll vid tillverkning och användning av tryckkärl i armerad plast. Denna kungörelse upphävdes dock 1987 och har sedan ersatts av AFS 1999:4 (Tryckbärande anordningar) och AFS 2005:2⁴⁰ (Tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar). Senare tillkom AFS 2002:1⁴¹ (Användning av tryckbärande anordningar) och AFS 2005:3⁴² (Besiktning av trycksatta anordningar) i samband med harmonisering med EU-lagstiftning. Trycksatta anordningar av plast och GAP inkluderas i dessa föreskrifter. Som trycksatt anordning klassas behållare och rörledningar med högre tryck än 0,5 bar samt behållare som utsätts för ett undertryck. I AFS 2005:3 skiljer man mellan besiktningsklass A, B och C och olika kemiska miljöer med hänsyn till hälso-, miljö och brandfarlighet. Vakuumpkärl och cisterner av en storlek på upp till 50 000 l för mindre farliga substanser (klassat 2a) med en temperatur över 65°C tillhör besiktningsklass C, d.v.s. det föreligger inga besiktningskrav. Objekt som innehåller media klassat i 2a och som har en temperatur under 65°C är befriade från besiktning oavsett volym. Många kärl i en rökgasreningsanläggning är således inte besiktningspliktiga. Besiktning är definierad som föreskriven kontroll i form av installationsbesiktning, återkommande besiktning, eller revisionsbesiktning utförd av ackrediterat organ. Besiktningen utgörs av driftprov och/eller in- och utvändig undersökning. Revisionsbesiktning avser besiktning som ska utföras av särskild anledning, t.ex. därför att en trycksatt anordning har skadats, ändrats eller har bytt innehåll. Egenbesiktning, d.v.s. ett besiktningsmoment i återkommande besiktning, som efter bedömning av ett ackrediterat organ får utföras av en kontrollenhet hos brukaren, kan tillåtas. Driftprov för kärl av tryckklass A och B ska utföras med intervallet ett till fyra år. För in- och utvändig undersökning anges intervallet 6 månader till 10 år beroende bland annat av resultat från tidigare besiktningar och processmiljön. För

³⁹ AFS 1983:3, Arbetarstyrelsens kungörelse om behållare av armerad esterplast, utfärdad den 25 mars 1983

⁴⁰ AFS 2005:2 Arbetsmiljöverkets föreskrifter om tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna

⁴¹ AFS 1999:4 Arbetarstyrelsens föreskrifter om tryckbärande anordningar samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna, 17 e juni 1999

⁴² AFS 2005:3 Arbetarstyrelsens föreskrifter om besiktning av trycksatta anordningar, 27e januari 2005

trycksatta anordningar i klass A, B och C enligt AFS 2005:3 gäller även att de ska undergå fortlöpande tillsyn, d.v.s. regelbunden tillsyn av anordning med tillhörande säkerhetsutrustning i syfte att förvissa sig om att säkerheten är betryggande samt att riskbedömning ska vara utförd innan de tas i drift. För icke-besiktningspliktiga anordningar nämns inga krav på inspektionsintervall.

Behållare, d.v.s. cisterner, lågtrycksbehållare och vissa vakuumkärl och rörledningar faller under AFS 2005:2 (Tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar). De indelas efter storlek och innehållets miljöfarlighet. Behållare större än 5000 l med miljöfarligt innehåll (grupp 1a) eller behållare större än 500 000 l med innehåll klassat som 2a (mindre farligt) och en temperatur högre än 65°C klassas enligt krav K & G och konstruktions- och tillverkningskontroll ska utföras av ackrediterat organ. För tryckbärande anordningar gäller kraven i AFS 1999:4. AFS 2005:2 och 1999:4 innehåller även regler kring driftinstruktioner. En bruksanvisning för användaren ska tillhandahållas som innehåller uppgifter om säkerheten i fråga om montering inklusive sammansättning av olika tryckbärande anordningar, idrifttagande, användning och underhåll inklusive kontroller som behöver utföras av användaren.

Standarder för dimensionering och konstruktion av processutrustning i plast, som BS4994:1987, AD Merkblatt 2000 N1 och SS-EN 13121 hänvisar främst till nationella förordningar beträffande besiktningsplikt och konstruktionskontroll i olika steg av tillverkning och installation. De är dock tydligare än PLN och PRN vad gäller vilka moment som ska innefattas i en kvalitetskontroll efter tillverkningen (se även 5.2). Standarderna BS 4994:1987 och SS-EN 13121-4⁴³ ger även en lista över tillåtna defekter, på engelska kallade både "defects" och "imperfections", som ska beaktas vid besiktning av den nyinstallerade komponenten eller vid slutkontroll. I Sverige tas detta upp av nationella standarder som SSG (Standard Solution Group, standardisering inom processindustrin) som rör GAP samt standarder för tryckledningar i termoplastmaterial (t.ex. SSG 7670⁴⁴ och SSG 7800⁴⁵). Standarderna beskriver allmänna fordringar för behållare, rör och rördelar i GAP (se även 7.1).

Generellt innehåller dessa standarder inga regler som gäller underhållsinspektion eller reparation. Standarden SS-EN 13121 är den enda standarden som tar upp frågan om underhåll, men är i detta fall mycket allmän i sin formulering: "Maintenance is a set of preventive and other measures applied to enable availability and safety of tanks or vessels and to avoid danger to health and to the environments under the service conditions of the tanks or vessels within their working lives." I en informativ – alltså icke-bindande – bilaga (Annex E) hänvisas t.ex. till reparationer och inspektioner där man föreslår att tillverkaren ska ge lämpliga rekommendationer kring rengöring, drift, reparation eller utbyte av felaktiga delar, visuell inspektion och tester. Tillfälliga reparationer tillåts, men deras status bör följas noggrant.

⁴³ SS-EN 13121-4 Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord - Del 4: Leverans, installation och underhåll

⁴⁴ SSG 7670 "Allmänna tekniska bestämmelser för tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003

⁴⁵ SSG 7800 "Kemikaliebeständiga glasfiberarmerade rör och rördelar av omättad esterplast för processledningar. GAP-rör och rördelar. Allmänna Fordringar", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003

5.2 Kvalitetskontroll och inspektion av ny utrustning

Kvalitetskontroll av ny utrustning kan omfatta tillverkningskontroll på plats hos tillverkaren, kontroll vid montage, kontroll av material samt slutkontroll efter montage med verifiering av att dimensioner, tjocklekar, skarvar, etc har utförts enligt ritningar och överenskommelse. Tillverkningskontroll på plats eller vid montage kan t.ex. göras för arbetets utförande, om förhållandena (fukt, damm) är lämpliga vid tillverkningen och om rutiner används för att säkerställa att rätt material används. Även proceduren för skarvning och montage av stutsar och dimensioner och tjocklekar hos konstruktionen kan kontrolleras.

5.2.1 Slutkontroll

Slutkontrollen omfattar en visuell inspektion för att bedöma totalintrycket, korrekt utförande av skarvar och förstärkningar och förekomsten av visuella defekter. Enligt olika standarder omfattar visuella defekter blåsor, utbrutna flisor, sprickor, torra fläckar, luftinneslutningar, exponerade glasfibrer, exponerade ändtytor från kapning (ej kantförslutna), främmande material, gropar, repor, ytporositet, rynkor och veck och oregelbundenheter. Vissa oregelbundenheter i innerytan kan dock härstamma från tillverkningsprocessen och formen som använts. Komponenten ska även inspekteras med avseende på färgskiftningar. Genom knackning med metallstav eller kniv kan delamineringar upptäckas. Tjocklekar bör verifieras och dimensioner som diameter, omkrets, orundhet och rakhet kontrolleras. Planhet på flänsar och tankbottnar bör kontrolleras. Uthärtningsgraden kan kontrolleras på plats med Barcolmätare. Kontrollerna bör noggrant dokumenteras genom anteckningar och bilder. Är inspektioner med t.ex. fuktmätare, värmekamera eller andra oförstörande metoder planerad, bör referensvärden efter installation tas fram. Standarder som SS-EN 13121, BS4994 och SSG 7800 innehåller checklistor för slutkontrollen. Resultaten ska noggrant dokumenteras, arkiveras och tillhandahållas slutanvändaren.

5.2.2 Materialkontroll

En kvalitetskontroll/slutkontroll innefattar även en kontroll av att rätt material har använts och att ett laminat har byggts upp enligt specifikation. En sådan kvalitetskontroll kan lämpligen utföras på material taget från strukturen där t.ex. manluckor, stutsar eller dylikt ska sitta, och innehåller en verifiering av att rätt plastmaterial/harts och glasfiberarmering har använts, samt studier av uthärtningsgrad, glashalt, laminatuppbyggnad och förekomsten av defekter. Om nödvändigt kan även mekaniska egenskaper verifieras. Mätmetoderna beskrivs i ett antal olika standarder.

Typ av hårdplast eller termoplastmaterial kan analyseras på laboratorium med spektroskopiska metoder som FTIR eller karakteriseras via T_g eller smältpunkt med termisk analys (DSC). Även identifiering av materialtyp med handhållna spektroskopi-instrument på plats är möjlig.

Uthärtningsgraden och reststyrenhalten hos GAP kan bestämmas med termisk DSC genom mätning av T_g . Metoden är också lämplig för att studera om ett material har förutsättning att uppnå önskad uthärtningsgrad ifall efterhärdning sker under drift och

om harts och hårdkomponenter har blandats i rätt förhållande. T_g -mätningar kan även användas för att uppskatta vilken temperatur en GAP-struktur har utsatts för. Uthärtningsgraden kan även bestämmas med hjälp av Barcol-mätare på plats. En mycket förenklad variant är tester av skarvlaminat och liknande (d.v.s. laminat som tillverkats på plats med vaxtillsats mot luftinhibering och inte mot en förmyta) med aceton. Ytan torkas med aceton. Efter 30 min ska ytan inte vara klibbig om laminatet har bra uthärtningsgrad.

Typen av glas kan bestämmas på laboratorium med hjälp av EDS (Energy X-ray Dispersive Spectroscopy). Det finns inga enkla metoder för bestämning av glastyp på plats.

Glashalten och laminatuppbbyggnad kan bestämmas genom förbränningsanalys. Hartsmatrisen bränns bort vid hög temperatur och viktsandelen glas bestäms. Genom att separera glasfiberarmeringen kan laminatuppbbyggnaden ("stacking sequence") bestämmas. Ytvikten hos armeringen bestäms genom vägning av material med definierad yta.

Halten av defekter som luftinneslutningar och områden med dålig vätning kan bestämmas med hjälp av mikroskopiska undersökningar och bildanalys av polerade tvärsnitt. Uthärtningsdefekter, sprickor och liknande kan synliggöras med speciella infärgningsmetoder utvecklade på Swerea KIMAB.

Halten av aktiv stabilisator i PP kan bestämmas med en OIT-mätning (Oxidation Induction Time) vid termisk analys på laboratorium.

Mekaniska egenskaper bestäms i enlighet med standarder genom t.ex. dragprovning och 3-punktsböjning.

5.3 Underhållsinspektioner

Om inte reglerna för besiktning ska tillämpas kan en inspektion utföras av tex ev driftpersonal eller annan inhyrd kompetens. Den bör dock utföras av en erfaren person. Inspektionen bör grundas på ritningar över anläggningen, processkunskaper och dokumentation från tidigare inspektioner. Kunskaper om processen och konstruktionen kan ge information var skador kan väntas. De följande avsnitten ger förslag på utförandet av en inspektion. Det kan även hänvisas till TIP 0402-28^{22, 46} och FRP Inspection Guide²¹. In- och utvändigt inspektion borde ingå. Inspektionen av GAP ska säkerställa att spärrskiktet fortfarande har förutsättning att skydda styrkelaminatet och att styrkelaminatet inte är skadat.

Inspektion av processutrustning i polymera material omfattar i första hand visuell inspektion. I den visuella inspektionen observeras totalintrycket, förändringar i färg och defekter. Defekter kan omfatta sprickor till följd av temperaturväxlingar, slag eller överbelastning, läckage, missfärgningar och nötning med frilagda fibrer. En första

⁴⁶ Bennet, DC, TIP 0402-28, Best practice for Inspecting FRP Equipment – Understanding the Damage Mechanism and Specifying Damage Criteria Improves Inspection Value, TAPPI EPE 2007 – Jacksonville, FL

inspektion eller tillsyn från utsidan kan utföras när anläggningen fortfarande är i drift och ger tex information om eventuell läckage, slagskador, angrepp från utsidan pga UV-ljus, lokala missfärgningar och vibrationer. Även uppläggning, stativ och rörupphängning bör inkluderas. Utvändig inspektion medan anläggningen är i drift kan även utföras med värmekamera och röntgen som kan indikera godsfortunning och möjligen andra defekter. Även den avställda anläggningen bör inspekteras utifrån. Resultaten från den utvändiga inspektionen kan vara underlag för den invändiga inspektionen och indikerar vilka ställen som bör kontrolleras noggrannare.

Vid visuell invändig inspektion borde innerytans eller spärrskiktets status kontrolleras för defekter som ytsprickbildning, slagskador, nötning, blåsbildning, delaminering, missfärgning, mjukning, etc. Ytsprickor kännetecknas av ett finmaskigt mönster utan speciell orientering och slagskador av stjärnformade sprickor. Sprickor till följd av mekanisk belastning har sannolikt en viss orientering. I inspektionen kontrolleras om förändringar har skett under driftperioden lämpligen på en kontrollyta, dvs en yta som regelbundet kontrolleras och dokumenteras vid varje inspektion vad som gäller antal, storlek och djup av defekter. Vid blåsbildning bör kontrolleras om blåsorna har spruckit, vuxit eller blivit fler i antal. En kraftig förändring kan föranleda en annan inspektionsmetod eller provtagning för att studera omfattning och orsak närmare. Vissa avvikelser i utseende som härstammar från tillverkningsprocessen och på så sätt inte är defekter (t.ex. märken efter formen) kan framträda starkare efter en viss tid i drift pga av avlagringar. Det är av fördel om sådana avvikelser har dokumenterats när kvalitetskontrollen utförs. Vid tunnare gods kan genomlysning med stark lampa hjälpa att upptäcka defekter.

Färgförändringar är vanliga både i termoplastmaterial och i GAP som används i processutrustningen och måste i första hand inte innebära kritiska förändringar. Man borde dock veta vad dessa färgförändringar beror på för att bedöma dem, t.ex. från erfarenheten. Det kan vara bra att dokumentera dessa ifall ytterligare förändringar sker under långvarig drift. GAP som utsätts för fuktiga miljöer uppvisar t.ex. oftast en vitningseffekt eftersom mikrodelamineringar bildas mellan hartsmatrisen och glasfiberarmeringen. Det kan även verka så att glasfiberarmeringen blir tydligare och träder fram. Detta kan generellt betraktas som normala förändringar, men förändringar bör följas. Större lokala vitningar av laminatet eller områden där laminatet verkar vara mindre transparent kan tyda på delamineringar.

Det är viktigt att även inspektera bärande konstruktioner, infästningar, skarvar och svetsar för sprickbildning eller andra defekter. Det övergripande intrycket av balkar eller annan lastbärande utrustning borde lämpligen också kontrolleras. Balkar ska inte bågna eller vara förvridna. Vid invändig laminering av tex balkar, rännor eller reparationer kan det yttersta laminatet, som har applicerats utöver det som krävs för skarvar eller reparationer, ha tillverkats med överskottsharts. Här kan lätt sprickbildning eller flagning av detta skikt ske vilket dock inte måste vara en kritisk defekt.

Som komplement för visuell inspektion kan knackning på GAP med tyngre kniv eller speciella verktyg av metall tillämpas. Metallstaven kan även dras över ytan. Från klangen kan laminatstatusen eller vidhäftning av olika skikt bedömas. Ett friskt laminat har en skarp klang medan ett laminat med delamineringar eller ett som är kraftigt

påverkat kan låta dov. Upptäcks sådana områden kan andra tekniker användas för att hitta orsaken till klangförändringen. Kniv kan även användas för att närmare undersöka det som verkar vara sprickor, vidhäftning vid reparationer eller liknande eller för att kontrollera hårdheten hos ett material, dvs om en mjukning av materialet har skett.

Av de testade oförstörande provningsmetoderna har mätning med fuktmätare, ultraljudsmätning, penetrantprovning och undersökning med värmekamera de bästa förutsättningar för enklare inspektioner i fält. Digitalröntgen eller spektroskopiska undersökningar kan ge information men kräver dyrare instrumentering. För alla tekniker gäller att de måste utföras av en erfaren person.

Förändringar i laminat orsakade genom diffunderande fukt kan följas med fuktmätare. Lämpligen utförs sådana mätningar också på en kontrollyta över en längre tid. Mycket höga fuktvärden eller plötsliga kraftiga förändringar kan föranleda provtagning eller ytterligare undersökningar. Mätningen utförs under driftstopp på torra ytor främst på insidan, dvs spärrskiktet, och på rör av mindre diametrar på utsidan. Mätningar på skrubberlaminat kunde kompletteras på några ställen med mätningar på utsidan för att upptäcka förändringar på styrkelaminatet. En fuktmätare kan även vara ett lämpligt instrument att detektera läckage i svetsar av termoplastmaterial med yttre GAP-förstärkning eller möjligen i skarvar.

En annan teknik som löpande kunde användas är inspektion med värmekamera av processutrustning under drift. Tekniken har dock begränsningar för tjockare gods och mindre defekter som man bör vara medveten om. Den borde därför kunna användas för att detektera kraftiga förändringar i godstjocklek, eventuellt läckande skarvar under drift, samt stora defekter nära ytan främst på tunnare gods. En förutsättning är emellertid att kontinuerliga mätningar utförs och dokumenteras så att förändringar mot en referensmätning kan göras. Det krävs även erfarenhet och kunskap kring användandet av en värmekamera.

Ultraljudsmätningar kan användas för att uppskatta djupet på defekter som delamineringar som upptäckts genom visuell inspektion eller knackning samt att få en bild av storleken av delamineringen. De kan i vissa fall även användas för att uppskatta godstjocklekar i processutrustning. Vid uppskattning av resterande tjocklek av spärrskiktet (både GAP och termoplast) behövs en mätning från insidan. Är ytan skadad genom ytangrepp bör det skadade materialet avlägsnas genom slipning.

Penetrantprovning kan användas för att upptäcka sprickor som är svåra att upptäcka vid vanlig visuell inspektion. Ibland är en visuell inspektion svår pga missfärgning av innersidan. Det kunde vara en lämplig teknik för att undersöka områden i processutrustning som anses vara kritiska eller där sprickbildning har skett i liknande utrustning. Penetranten bör dock väljas så att den är kompatibel med plastmaterialet som ska undersökas. GAP och andra plaster kan svälla om lösningsmedelbaserade penetrantsystem används. PVC och CPVC verkar vara känsliga även för det vattenbaserade penetrantsystem som undersöktes i denna studie. Det studerade penetrantsystemet kunde skilja mellan ytsprickor och djupare sprickor, men det verkar inte vara möjligt att uppskatta sprickdjupet från blödningen av penetranten om en framkallare används.

Digitalröntgen kan användas för att bestämma totaltjocklek om andra tekniker inte har gett tillförlitliga resultat. Resterande tjocklek på spärrskiktet kan uppskattas om totaltjockleken är känd. Enligt vissa referenser finns det möjlighet att även skilja mellan spärrskikt och styrkelaminat pga olika laminatuppbyggnader, men har då använts för utrustning som varit i drift och varit vattenfylld. Tekniken har även förutsättning att undersöka GAP-skarvar och eventuellt svetsar. Mer avancerade tekniker som aktiv mätning med värmekamera eller nya tekniker baserade på THz-vågor behöver ytterligare utvecklas innan en användning för processutrustning kan vara möjlig.

Ingen av de ovannämnda teknikerna kan i dagsläget dock avgöra vilket djup tex en sprickskada har. Sprickdjupet är dock mycket viktigt för att kunna bedöma om spärrskiktet kan uppfylla sin funktion. Det kan möjligen uppskattas genom att på plats försiktigt ta bort skadat material till friskt material träder fram, tex genom slipning. Området bör repareras i efterhand.

Upptäcks en kritisk skada och dess orsak eller omfattning inte kan bestämmas närmare med oförstörande provning kan provtagning ske genom uttag av en rondell, Figur 55. Rondellen tas enkelt ut med bormaskin. Innan rondellen tas bör provas om god vidhäftning kan uppnås mellan reparationslaminatet och den gamla GAP-strukturen. Är vidhäftningen låg till obefintlig kan detta tyda på att konditionen hos GAP-strukturen är dålig och att den behöver bytas ut. Storleken hos rondellen väljs lämpligen till ca 10 cm. Är mekanisk provning relevant borde provstorleken ökas. Reparation efter rondelltagning kan enkelt ske genom att tex ett laminat av liknande uppbyggnad tillverkas. En rondell sågas ut, förs sedan in i tank- eller rörväggen och lamineras över.



Figur 55. Provtagning i GAP genom rondell-uttag.

Förutom sprickdjup kan en analys av materialet även ge information om allmän status, materialtyp, uthärdningsgrad, glashalt, andra defekter och mekaniska egenskaper. Rondellprovning är därför ett kraftfullt verktyg.

Inspektionen bör dokumenteras noggrant och innehålla alla observationer och mätningar. Skadorna bör även dokumenteras med kamera. Det bör framgå vilka åtgärder som vidtagits i samband med stoppet och vilka som rekommenderas för efterföljande stopp.

Figure 55. Cut-out from FRP tank.

5.4 Betydelse av olika defekter för fortsatt drift och livslängd

De följande avsnitten redovisar kort vilken betydelse olika typer av defekter eller förändringar kan ha för driftsäkerhet och livslängd. Det måste dock betonas att denna

redovisning ska ses som en rekommendation eller erfarenheter av allmän karaktär och att typ av defekt och dess betydelse alltid får ses i samband med konstruktion, driftförhållanden och ålder på utrustningen. Beroende på omfattning och djup av skadorna är inte alltid omedelbara åtgärder nödvändiga utan skadorna kan övervakas, vilket förhindrar onödiga reparationer.

5.4.1 Ytsprickor

Ytsprickor är vanligt förekommande i miljöer där både fuktiga och torra perioder växelvis förekommer eller där laminatet utsätts för termisk chock. De kännetecknas av ett finmaskigt mönster där sprickorna inte följer någon speciell orientering. Oftast är sprickorna begränsade till ytmattaskiktet och således inte kritiska. Det förekommer dock fall där sprickornas djup vuxit med tiden och på detta sätt lett till en försvagning av materialet eller till lokala angrepp i styrkelaminatet. Om sprickbildningens djup följs kan en reparation utföras i tid och livslängden ökas. Men i vissa fall, där sprickorna har vuxit in till styrkelaminatet, kan ett utbyte vara nödvändigt. Ytsprickbildningen bör följas genom jämförande inspektioner med en referensyta. Teknikerna som studerats här kan inte på ett enkelt sätt avgöra sprickdjupet och därför är en närmare analys med provtagning nödvändig. Eventuellt kan sprickdjupet vid lokala angrepp studeras genom lokal slipning. Men då sprickorna kan vara mycket fina finns viss risk att missa djupare sprickor.

Djup sprickbildning kan medföra angrepp på styrkelaminatet och en kraftig nedgång av de mekaniska egenskaperna. Mätning av mekaniska egenskaper måste normalt göras på laboratorium efter provtagning där det är möjligt att bestämma de mekaniska egenskaperna för hela godset och endast styrkelaminatet. Observeras ingen kritisk nedgång av de mekaniska egenskaperna för styrkelaminatet kan laminatet ha förutsättning att repareras invändigt. Från uttaget material kan även en bedömning göras om det finns skador i styrkelaminat som tyder på att strukturen har utsatts för kritiska belastningar. Sådana skador kan ge anledning till ett utbyte.

Undersökning av de mekaniska egenskaperna hos skrubber- och skorstenslaminat i GAP har visat att GAP har förutsättningar att fungera i många år utan reparation eller andra åtgärder. Det finns exempel där livslängden har varit 30 år och längre. Det finns dock även exempel där livslängden på spärrskiktet har varit betydligt kortare, endast ca 7 till 10 år, i förbränningsanläggningar med mycket korrosiva rökgaser. Med invändig reparation eller utbyte av innermaterial kan livslängden hos hela komponenten förlängas. Quenchen med den våt-torra zonen anses ofta som en anläggningsdel med kortare livslängd och bör byggas på ett sådant sätt att den lätt går att inspekteras, underhållas eller bytas ut. Är styrkelaminatet inte angripet kan även här en reparation vara en möjlighet. Beroende på typ av ytmatta och tjocklek på spärrskikt har livslängder på ca 5 till 10 år rapporterats.

5.4.2 Osmosblåsor

Som diskuterats i kapitel 3 är förekomsten av osmosblåsor i GAP-skrubbar och skorstenar i rökgasrengöringsanläggningar rätt vanlig. Blåsorna uppträder efter ett fåtal till några år, växer i antal och eventuellt storlek under en viss tid, men stabiliserar därefter. Förekomsten av blåsor motiverar inga direkta åtgärder om förekomsten är stabil och det

finns exempel där blåsdrabbade GAP-komponenter har fungerat i många år. Antal, utseende och storlek ska dock noggrant dokumenteras. Skulle antal och storlek öka igen efter en viss tid bör laminatstatus och orsak undersökas närmare, t.ex. genom provtagning. Om blåsorna växer och bildar stora områden med delamineringar eller om de spricker bör även då statusen närmare undersökas. Spricker blåsorna så när processmediet styrkelaminatet och kan då skada det. En reparation kan möjligen även vara av intresse om blåsbildning uppträder inom utrustningens garantitid.

Blåsbildning i flakebeläggningar leder ofta till sprickbildning. Uppträder osmosblåsor är det oftast motiverat med en reparation.

5.4.3 Delaminering

När och hur en delaminering behöver åtgärdas beror på dess storlek, sprickbildning och djup. Upptäcks en delaminering vid visuell undersökning eller genom knackning bör man undersöka hur djupt i laminatet den befinner sig. Detta kan göras med t.ex. ultraljudsundersökning eller alternativt provtagning. Vid mindre delamineringar ganska nära ytan i spärrskiktet behövs inga omedelbara åtgärder. Erfarenheter från praktiken har dock visat att större delamineringar i spärrskiktet till följd av temperaturväxling eller hög temperatur kan spricka upp och bilda stora sprickor. Ligger delamineringarna nära styrkelaminatet kan processmediet då nå styrkelaminatet. Det kan finnas möjlighet att invändigt reparera strukturen. Ligger delamineringar i styrkelaminatet bör strukturen sannolikt bytas ut.

5.4.4 Nötning

Nötningsskador kan förekomma t.ex. under dyslansar eller i skrubbrar där vattnet har hög partikelhalt. Eftersom laminatet är uppbyggt med ett spärrskikt kan viss nötning tillåtas. Nötningdjupet eller laminatets eller spärrskiktets tjocklek bör följas upp. Är spärrskiktet förbrukat kan en invändig reparation utföras. Tillsatser som kiselkarbid eller aluminiumoxid används för att öka hårdigheten mot nötning. I svåra fall har man även valt att fästa PP-plattor på de mest drabbade områden.

I korrosiva miljöer som klordioxid kan nötning eller erosion uppträda tillsammans med korrosion. Eftersom det angripna eller korroderade materialet ofta är sprött påskyndas erosionsförloppet. Även korrosionsförloppet kan påskyndas eftersom en färsk yta alltid är exponerad. I dessa fall kan godsfortunningen ske mycket fort och bör noga övervakas så att reparation eller utbyte kan ske i tid.

5.4.5 Sprickor i infästningar till och i bärande anordningar

Sprickor i infästningar av balkar och liknande kan leda till att processmediet tränger in i materialet och på längre sikt leda till lokala angrepp. De bör därför åtgärdas genom reparation inom ett rimligt tidsintervall. Sprickor i balkar eller oväntad nedböjning av balkar efter viss drift kan vara tecken på överbelastning och balkarna kan då behöva bytas. Balkar i form av T- eller U-profiler kan visa visst angrepp på ändytorna. Dessa

bör vara väl förslutna för att hindra att processmediet tränger in i den bärande anordningen. Vid ytangrepp eller delaminering kan detta åtgärdas genom reparation.

5.4.6 Djupare sprickor

Orsaken till sprickor med speciell orientering (i motsats till ytsprickor/ytkrackerlering) bör utredas eftersom de kan tyda på mekanisk överbelastning. Även skador i svetsar och skarvar bör åtgärdas.

6 Åtgärder för ökad livslängd

6.1 Invändig reparation av GAP

Fördelen med GAP är att den är relativt lätt att reparera vilket ger en möjlighet att förlänga materialets livslängd. Detta gäller både lokala skador och inre renovering av hela strukturen. Uppbyggnaden av laminat med spärrskikt och styrkelaminat tillåter att spärrskiktet i viss mån förbrukas innan angrepp och skador når styrkelaminatet. Spärrskiktet kan förbrukas genom t.ex. diffusion av en syra som saltsyra. För att förhindra spänningskorrosionshaverier får syran inte nå in till styrkelaminatet, d.v.s. livslängden har uppnåtts när syran har penetrerat spärrskiktet. Spärrskiktet kan även förbrukas i miljöer som klordioxid eller salpetersyra, som då leder till godsförtunning eller bildande av ett korroderat skikt. Även omfattande och djup ytsprickbildning kan ge anledning till en reparation. Innan val av åtgärd rekommenderas en jämförelse av kostnaden för en invändig renovering och inköp av ny utrustning.

Det är ett krav att man då en tryckbärande anordning som omfattas av kraven i AFS 2005:3 har utsatts för en skada och reparerats eller modifierats, låter ett ackrediterat organ utföra en revisionsbesiktning. Dessutom ska riskbedömningen enligt AFS 2002:1 revideras.

På stora ytor kan det skadade laminatet avlägsnas genom blästring. Materialet måste då blästras bort tills friskt laminat framträder. Angreppsdjupet och därmed blästringsdjupet borde i förväg uppskattas genom t.ex. tjockleksmätningar eller rondellprovtagning. Erfarenheten är att ett skadat GAP-laminat lätt kan avlägsnas genom blästring. Det finns dock enstaka fall där det uppstått problem, t.ex. vid blästring av laminat utsatt för koncentrerad saltsyra vid hög temperatur. Därför rekommenderas först att man utför en provblästring för att kontrollera om materialet kan avverkas på ett ekonomiskt sätt. Denna yta kan sedan användas för vidhäftningsprovningar (se nedan). En erfaren blästrare ska anlitas. Efter blästringen ska allt damm och fukt avlägsnas. På mindre ytor vid t.ex. lokala reparationer kan skadat laminat avlägsnas genom slipning. Det finns även verktyg som utnyttjar skjuvning (rotary surface planer) för att avverka material.

Det nya laminatet ska appliceras på det blästrade laminatet så fort som möjligt. En tumregel är att laminering ska utföras inom 24 h efter blästring. Eventuellt kan en primer användas för att uppnå bra vidhäftning. Innan fullständig reparationen utförs är det dock ytterst viktigt att utföra ett vidhäftningsprov. Bra vidhäftning mellan det ursprungliga och reparationslaminatet är en förutsättning för en lyckad reparation.

Vid vidhäftningsprov utförs en provlaminering med en storlek av ca 20 x 20 cm på den provblästrade ytan, där provlaminatet sedan dras bort (peel test) efter uthärdning. Vidhäftningstester kan lämpligen utföras på olika ställen i strukturen som ska repareras. Vid mycket bra vidhäftning skadas såväl det ursprungliga som det nya laminatet. Vid dålig vidhäftning sker brott lätt vid den laminerade ytan. Dålig vidhäftning kan indikera att ytterligare material måste avlägsnas. Kan ingen vidhäftning uppnås vid ytterligare blästring kan det vara tecken på att kan strukturen inte repareras utan måste bytas ut.

Reparationslaminatet ska byggas upp till en tjocklek motsvarande det borttagna laminatet eller motsvarande ett spärrskikt av ca 2,5 – 3 mm med matta av huggen fiber (CSM). I vissa fall kan man välja ett tjockare spärrskikt för att öka livslängden, t.ex. vid snabb diffusion av en syra eller allmän korrosion i t.ex. klordioxid. Det finns dock andra fall där man har applicerat reparationslaminat med ett onödigt tjockt skikt. Det nya spärrskiktet ska avslutas med ett lager av ytmatta och en slutstrykning med harts med vaxtillsats för att uppnå god uthärdning i reparationslaminatet. Vid totalrenovering kan även stutsar behöva ses över. Stutsar som inte kan repareras bör bytas ut.

Utförs mindre och enklare lamineringar själv bör man ta hänsyn till att speciella föreskrifter gäller för arbetsmiljön när hårdplaster hanteras (AFS 2005:18 Hårdplaster⁴⁷).

6.2 Beläggningar på stålytor

Vid t.ex. ändrade driftförhållanden eller störningar under driften kan oväntade korrosionsskador uppkomma på metalliska material. Reparation genom att svetsa ytterligare plåt på det drabbade område kan vara möjlig. Stålytan kan även i efterhand beläggas med en plastbeläggning som av GAP-beläggning eller en glasflakebeläggning. Ibland nämns även mineralfyllda plastbeläggningar som Chesterton.

Valet av beläggning styrs av driftförhållanden, geometrin och möjlighet att förbehandla stålet. Generellt kan fördelar och nackdelar med GAP och flake/mineralfyllda beläggningar sammanfattas på följande sätt, Tabell 15. Mineralfyllda plastbeläggningar förefaller mestadels användas för skydd av pumpar och liknande. Inga erfarenheter tycks finnas för användning i t.ex. rökgaskanaler eller skrubbrar i dagsläget.

Tabell 15. För- och nackdelar med GAP- och flakebeläggningar på stål.

Table 15. Advantages and disadvantages for FRP and flake linings on steel.

GAP-beläggning		Flake-beläggning	
Fördelar	Nackdelar	Fördelar	Nackdelar
– Självbärande, kan hålla (i viss mån) även efter delaminering – Lättare att få en jämn tjocklek än med flake – Lättare att reparera, om reparationen utförs i tid behöver inte stålytan behandlas igen	– Dyrare – Tar längre tid att applicera – Ordentliga skikt bör byggas upp vid hörn och kanter	– Lätt och snabbt att applicera – Billigare än GAP	– Känslig för tjockleksvariationer – Inte självbärande, spricker lättare – Kan vara svårt att få jämn tjocklek – Kräver noggrann ytbehandling

⁴⁷ Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 2005:18 Hårdplaster, Arbetsmiljöverket

6.2.1 GAP-beläggning

Efter förbehandling av stålet genom rengörning och blästring byggs ett laminat upp av exempelvis ett vinylesterharts och matta av huggen glasfiber (CSM). Tjockleken är ca 3 till 4 mm vilket beror på antal lager CSM. Först appliceras en så kallad primer på stålytan för att få bra vidhäftning, t.ex. ett harts med bra vidhäftning och flexibilitet. Sedan byggs 3 till 4 lager med CSM genom handuppläggning och rollning. Man avslutar med en ytmatta som ger ett hartsrikt skikt och en toppstrykning med harts innehållande vaxtillsatser för att förhindra luftinhibering av hartset. Alternativt kan även mekanisk förankring väljas med ”clips” som svetsas på ytan med jämna mellanrum. Detta kan vara en fördel om liningen ska sträcka sig över stora områden, t.ex. för tak.

6.2.2 Flakebeläggning

Flakebeläggning appliceras genom sprutning eller målning. Stålytans förbehandling är mycket viktig både med hänsyn till blåsbildning och till delamineringsskador. Även en flakebeläggning appliceras ofta i flera skikt med en primer som första skikt. En tumregel är att den totala tjockleken ska ligga vid 1,5 mm. Riktlinjer för ytbehandling av stål före en flakelining kan likna motsvarande för rostskyddsmålning som regleras i ISO 8501 del 1 till 4 och även 8502, 8503. Ytrenhet och ytråhet är de två viktigaste parametrarna för att klassificera en yta före och efter ytbehandling. Generellt ska ytan först tvättas för att avlägsna klorider, olja, fett etc och därefter blästras. Efter blästringen måste damm tas bort med t.ex. ytterligare en tvättning. Liningen ska appliceras så fort som möjligt efter ytbehandlingen. Före ytbehandlingen ska stålets yta och rostgrad karakteriseras. Rostgraden samt material anges lämpligen i en upphandling så att rätt blästrings- eller ytbehandlingsmetod kan väljas.

Kvalitetskontroll av en GAP- eller flakebeläggningar innefattar tjockleksmätning (med t.ex. ultraljud) och eventuellt gnistprovning för att kontrollera håligheter och porer.

7 Allmänna rekommendationer

7.1 Upphandling

I många fall ingår processutrustning i plast i större anläggningsdelar där upphandlingen sköts övergripande eller av ett annat företag. I sådana fall kan det vara svårt att ha bra kontroll över konstruktion, typen av material och dess kvalitet. En allmän rekommendation vid köp av utrustning i plast är dock att den så långt som möjligt ska specificeras. Viktigt att tänka på är t.ex. att beteckningen "GAP" omfattar många olika material. Även för termoplastmaterial kan en specifikation som t.ex. "PVC" innebära stora skillnader i kvalitet och egenskaper eftersom plastmaterial i motsats till metalliska material inte är standardiserade.

Upphandlingsunderlag inför ett inköp ska därför alltid innehålla noggranna materialspecifikationer eller utarbetas tillsammans med leverantören. För GAP-strukturer innebär detta att hartstyp, glasfibertyp, härdsystem och möjliga tillsatser av bra kvalitet ska specificeras.

Materialval (inklusive märke), laminatuppbyggnad, härdsystem, mellanhärdningar, tjocklekar (spärrskikt, styrkelaminat, skarvlaminat), efterhärtningsproceduren och beräkningsunderlag (t.ex. EN 13121) ska framgå ur ritningarna och tillhandahållas slutanvändaren. Ritningarna är ett viktigt underlag för kvalitetskontroll och senare inspektioner och bör sparas tillsammans med dokumentation från inspektioner.

Lämpligen specificeras även vilka defekter som kan tillåtas i laminatet, som halten luftinneslutningar, andel områden med dålig vätning och uthärtningsdefekter. Acceptabla nivåer av halten luftinneslutningar eller områden med dålig vätning är 0,5 vol% i spärrskiktet och 1 vol% i styrkelaminatet.

Även efterhärtningsproceduren ska specificeras under upphandlingen. Standarder som PLN kräver att reststyrenhalten är mindre än 2 % för att garantera bra uthärtning. För stora GAP strukturer kan man dock även tillåta en efterhärtning under drift om den kan uppnås under tämligen kort tid efter i driftsättning. I vissa fall kan det vara en fördel att verifiera att en tillfredsställande uthärtningsgrad har uppnåtts under drift eftersom mekaniska egenskaper som styvhet och mjukningstemperatur (HDT) beror på uthärtningsgraden.

Vid tillverkning av tankar, skrubbrar, etc tas hål upp där manlucka, stutsar eller genomföringar ska sitta. Detta material sparas lämpligen som referensmaterial av slutanvändaren under garantitiden eller längre. Det kan även användas för att kontrollera om laminatet har tillverkats enligt specifikation. Eftersom detta inte är en standardprocedur får slutanvändaren vid upphandling specificera att sådant material ska tas tillvara och skickas till slutanvändaren.

Som hjälpmedel vid upphandling och inköp av ny utrustning finns det olika standarder att hänvisas till. Det finns ett flertal SSG standarder (Standard Solution Group, standardisering inom processindustrin) som rör glasfiberarmerad plast, samt standarder

för tryckledningar i termoplastmaterial. Bland dessa kan främst SSG 7670⁴⁸ ”Allmänna tekniska bestämmelser för tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast”, som redovisar minimikraven vid tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast, nämnas. I SSG 7800⁴⁹ ”Kemikaliebeständiga glasfiberarmerade rör och rördelar av omättad esterplast för processledningar. GAP-rör och rördelar. Allmänna fordringar” beskrivs allmänna fordringar för rör och rördelar för friliggande processledningar avsedda för transport av kemiskt aggressiva ämnen. SSG 7801, 7806, 7807, 7808, 7809 och 7810 avser T-stycken, stutsar, etc i GAP-rörledningar. Standarderna hänvisar främst till att cistern, rör och rördelar skall uppfylla krav fastställda i Plastkärlnormen (PLN) och i Plaströrledningsnormen (PRN 88). SSG 7800 hänvisar till ASTM 2563 nivå II för att klassificera tillåtna ytdefekter. ASTM D2563⁵⁰ (”Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts”) beskriver acceptansnivåer för visuell inspektion av utrustning gjord i glasfiberarmerad plast. Olika typer av synliga defekter beskrivs som riktlinje för avtal, vid produktspecifikation och vid inspektion och klassificeras på nivå I till III. SSG 7800 rekommenderar nivå II. Detta gäller dock ny utrustning och inte utrustning som varit i drift. SSG 7670 är mer detaljerad och innehåller bl.a. en lista med tillåtna ytdefekter (som liknar BS 4994), med form- och måttoleranser och checklista för kontroll och leverans av GAP-cisterner. Arbete pågår på att förbättra SSG-standarderna för glasfiberarmerad plast. Även EN 13121-4 innehåller en checklista för installation och kvalitetskontroll av ny utrustning.

I en finsk standard framtagen av PSK, den finska motsvarigheten till SSG, beskrivs upphandlingsvillkoren för både köpare och leverantör av utrustning tillverkad av glasfiberarmerad plast (PSK 6301: 1995⁵¹ ”Industrial fibre-reinforced plastic products - Purchase specification”). Standarden specificerar såväl uppgifterna som köparen ska lämna till leverantören vid upphandlingens början som vilken information leverantören ska tillhandahålla köparen tillsammans med anbudet. Vad som gäller tillverkning och installation nämns bland annat tillverknings- och installationsmetoder, typ av material, rutiner kring kvalitetskontroll, beskrivning av fogningsmetoder, tänkta inspektioner och information kring materialegenskaper, som använts för dimensioneringen. Även kvalitetskontrollmetoder för laminat listas.

7.2 Materialval för ökad driftsäkerhet och livslängd

Genom val av rätt material och god kvalitet kan både livslängd och underhåll styras i förväg. Vid val av termoplast- eller hårdplastmaterial bör detta baseras på processbetingelserna vid varje enskild användning, vilket gör att allmänna rekommendationer inte är lämpliga. Det finns även information att hämta direkt från plast- eller processutrustningstillverkarna, plasttillverkarnas kemikalieresistenstabeller, eller konsultverksamhet inom området. Några korrosionsresistenstabeller (eller

⁴⁸ SSG 7670 ”Allmänna tekniska bestämmelser för tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast”, Skogsindustriernas Teknik AB, 2003

⁴⁹ SSG 7800 ”Kemikaliebeständiga glasfiberarmerade rör och rördelar av omättad esterplast för processledningar. GAP-rör och rördelar. Allmänna Fordringar”, Skogsindustriernas Teknik AB, 2003

⁵⁰ ASTM D2563 - 08 Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts

⁵¹ PSK 6301: 1995 ”Industrial fibre-reinforced plastic products - Purchase specification”, PSK Standards Association, 2004

corrosion guides) anges i ref^{8 52 53 54 55} som exempel. I vissa fall finns även mer allmän information om materialen, deras användning och bearbetning i dessa referenser. Det finns dock några mer allmänna rekommendationer kring materialval som kan beaktas

Olika glastyper har olika kemikalieresistens i sura och alkaliska miljöer och är således olika känsliga för spänningsskorrosionsprocesser som kan medföra allvarliga och oväntade haverier. Ett borfritt glas (tex av märke Advantex) har bättre resistens mot spänningsskorrosion än vanligt E-glas. I sura miljöer eller i miljöer där en syra kan bildas genom reaktion i materialet (tex klordioxid) rekommenderas därför att välja ett borfritt glas i laminatet. Ett sådant glas ska väljas såväl i spärrskiktet som i styrkelaminatet.

I applikationer där kraftig ytsprickbildning kan väntas kan den minskas genom att en kolfibermatta väljs, t.ex. i en quench. Det är ibland något svårare att jobba med kolfibermatta jämfört med glasfiberarmering. Man bör därför kontrollera att ytmattan har bra och lagom vätning. Förväntas nötning kan tillsatser av kiselkarbid eller aluminiumoxid till hartset förbättra egenskaperna.

Även termoplastmaterial kan skilja i kvalitet beroende på typ av tillsatser, fyllmedel eller bearbetning. För PP är t.ex. stabiliseringen av materialet avgörande när det gäller skydd mot oxidation. Stabilisatorn sätts till granulatet där en del förbrukas redan vid tillverkningen av rör eller plattor. Man kan därför specificera att PP-materialet ska vara väl stabiliserat i processkomponenten. En tumregel är att OIT (Oxidation Induction Time) ska vara ca 20 min vid 200°C. Ett annat exempel är PVC. PVC kan innehålla fyllmedel som kalciumkarbonat och i flera kemiska miljöer kan en hög fyllmedelhalt vara en nackdel. Vid inköp av termoplastmaterial kan det därför vara fördelaktigt att även specificera tillverkaren av materialet.

⁵² Derakane Epoxy Vinyl Ester Resins – Chemical Resistance Guide, Ashland, Bulletin #2899, 2005

⁵³ DSM Chemical Resistance Guide, http://www.dsm.com/nl_NL/html/drs/chemicalresistanceguide.htm

⁵⁴ Simona SIMCHEM CD-ROM - Chemical Resistance of SIMONA products

⁵⁵ Georg Fischer DEKA, Chemical Resistance Guide, <http://www.us.piping.georgefischer.com/go/>

8 Utblick

De redovisade resultaten kan vara till nytta för anläggningsägare och underhållspersonal för att upptäcka skador och bedöma åtgärder som egenarbete eller om inspektions- eller underhållsföretag måste kopplas in. Oförstörande provning med ultraljud, fuktmätare, passiv mätning med värmekamera och röntgen är de tekniker som i dagsläget kan vara en del av inspektionerna av processutrustning av plastmaterial. Men även om enklare instrument för ultraljud och termografi tagits fram under senaste tiden krävs det erfarenhet och kunskap av både tekniken och hur polymera material är uppbyggda och skadas. Alla tekniker har sina begränsningar, vilket man måste vara medveten om vid provning. Exempel är att defekter, som blåsor i processutrustning med mycket tjockt gods, inte kunde detekteras med värmekamera och att tjockleksmätningar med ultraljud innebär större mätfel och osäkerhet i GAP än i andra homogena material. Det finns dock möjlighet att genom utökad kunskap och erfarenhet förbättra metoderna och uppnå bättre resultat och fortsatta studier är nödvändiga för detta. Passiv mätning med värmekamera på blektorn eller massaledningar i GAP i drift anges som en lämplig metod för att kontrollera lokala godsförtunningar²². Utförs mätningar med digitalröntgen på vattenfyllda rör i stället för på tomma rör kan detta öka kontrasten så att man t.ex. kan skilja mellan spärrskikt och styrkelaminat^{21,22}.

Nyare metoder som aktiv mätning med värmekamera och tekniker baserade på THz-vågor har förutsättningar att kunna användas som oförstörande provningsmetoder för processutrustning i plast. Utmaningen består i att anpassa teknikerna till dessa material och att lära sig möjligheter och begränsningar. Eftersom metoderna i dagsläget främst har använts stationärt, t.ex. vid kvalitetskontroll vid produktion, måste de även anpassas för att lätt kunna användas vid mätningar i fält. Värt att nämna är att en fördjupad utvärdering av aktiv mätning med värmekamera just nu pågår hos Inspecta.

Inom projektet har även enklare metoder för materialidentifiering tagits upp och det har visats att dessa kan fungera för GAP och termoplastmaterial i samband med kvalitetskontroll. Anskaffningskostnaderna är dock sådana att instrumenten antagligen endast är intressanta för större företag som utför ett stort antal inspektioner över året.

En teknik som har använts under flera år med bra resultat, men som inte har granskats i detta projekt, är tester av GAP-material baserade på akustisk emission (AE). Sprickor eller svaga punkter kan detekteras genom att lyssna på den akustiska emissionen som utsänds av GAP-materialet när det utsätts för kontrollerad belastning. AE-tester kan utföras på ny utrustning eller utrustning som varit i drift, och spricktillväxt kan följas. Tekniken kräver specialistkunskap.

9 Referenser

1. PLN Plastkärlsnormer, Tryckkärlskommissionen, 1983
2. PRN Plaströrledningsnormer, 1988
3. British standard 4994:1987; "Design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics".
4. AD-Merkblätter N1 "Druckbehälter aus textilglasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK)", AD 2000-Merblatt, Ausgabe Oktober 2000
5. EN 13121-3:2008; "GRP vessels and tanks for use above ground – Part 3: Design and Workmanship"
6. Ashland, Fabricating Tips – Composite Polymers, Bulletin #2898, 2005
7. DSM Composite Resins, Anti-Corrosion Guide, DRS-MBACGEEN0106-2, 2006
8. Reichhold, Chemical Resistance Guide
9. Bergman G; Chemical Engineering Progress, 97, 12 (2001), 55–59
10. Bergman, G., Plaster och gummi i olika kemiska miljöer, Bulletin 98, Korrosionsinstitutet, 1985
11. Bergman, G., Korrosion på plaster och gummi i processutrustningar, Bulletin 99, Korrosionsinstitutet, 1987
12. Römhild, S, Bergman, G, Eriksson P, Blistering in Constructions of Fibreglass Reinforced Ester Plastics (FRP) – Causes and Countermeasures, Värmeforsk projektrapport M5-501, 2006
13. Bergman, G., Investigation of the causes of blistering in three FRP flue gas scrubbers in Denmark, Report C 2005:1, Swedish Corrosion Institute, 2005
14. Nordling M, Römhild S, Bergman G, "Korrosion i våttorr zon i rökgaskondensor", Forskningsrapport KIMAB 2008-123, Swerea KIMAB, Juli 2008.
15. Nonhoff, G., Lux, R., "20 Jahre Erfahrung mit GFK-Bauteilen mit wasserdampfgesättigten Medien", information material from Christen & Laudon
16. "WDD Test an 10 Laminatproben – Beurteilung und Fotodokumentation", RWE Energie, Zentralinstitut für Chemie, Materialprüfung und Qualitätssicherung, Umweltschutz, Technologie, Investigation report, 1993
17. Lux, R., „Bericht über Blasenbildung in GFK-Bauteilen und deren Vermeidung“, internal document, Christen & Laudon, 2006
18. Bergman, G., Investigation of the cause of failure in FRP storage tanks for concentrated solutions of sodium hydroxide and potassium hydroxide, Project report C 2007:6, KIMAB, 2007
19. PSK 6316 "Industrial Fibre-reinforced Plastic Products. Condition monitoring. Thermographic Camera Inspection", PSK Standards Association, 2009-11-19
20. E-post och telefonsamtal med Dr. Jyrki Vuorinen, Professor i polymerteknik, Tampere Tekniska Universitet, Institution för materialvetenskap, våren 2010
21. Reichhold, FRP Inspection Guide, Reichhold Inc, 2009
22. TIP 0402-28, Best practice for inspecting used fibre-reinforced plastic (FRP) equipment, Issued – 1999, Revised – 2007, TAPPI 2007
23. E-post och telefonsamtal med Stefan Sjökvist, Termisk Systemteknik, Linköping, våren och sommaren 2010.

24. Fowler KA, Elfbaum GM, Smith KA, Nelligan TJ, Theory and application precision ultrasonic thickness gaging, NDTnet October 1997, Vol 2, No 10, <http://www.ndt.net/article/wt1097/panam/panam.htm>
25. NORSOK Standard M-622 "Fabrication and Installation of GRP piping systems", Standards Norway, 2005
26. Skrivars M, Niemelä P, Koskinen R, Hormi O, J. Appl. Polym. Sci., 93, 1285-1292 (2004)
27. Römhild S, Bergman G, Hedenqvist MS, "Short-Term and Long-Term Performance of Thermosets Exposed to Water at Elevated Temperature", Journal of Applied Polymer Science, 116, 1057-1067 (2010)
28. ASTM E-1417 "Standard Practice for Liquid Penetrant Examination"
29. SAE AMS 2644 "Inspection Material, Penetrant"
30. Magnaflux AL-4B Water Soluble Fluorescent Penetrant, Product Data Sheet, Magnaflux, Issue Date: 31/10/05, TDS No: AL-4B Rev No 00
31. Magnaflux AL-4B Safety Data Sheet, Magnaflux, Revision Date: 30/06/2006, Rev: 01
32. Corzan Piping Systems - Chemical Resistance Data, Lubrizol, January 2009
33. Knight, Michelle, Chemical Resistance and Chemical Applications for CPVC pipe and fittings, Corzan Industrial Systems
34. ASTM D2583 - 07 Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor
35. ASTM C581 - 03(2008)e1 Standard Practice for Determining Chemical Resistance of Thermosetting Resins Used in Glass-Fiber-Reinforced Structures Intended for Liquid Service
36. Synviews hemsida <http://www.synview.de/>
37. Presentation och telefonkonversation med Dr. Holger Quast, Synview, Bad Homburg, Tyskland, 2010-08-11
38. ASTM D4166-99 Standard Test Method for Measurement of Thickness of Nonmagnetic Materials by Means of a Digital Magnetic Intensity Instrument
39. AFS 1983:3, Arbetarstyrelsens kungörelse om behållare av armerad esterplast, utfärdad den 25 mars 1983
40. AFS 2005:2 Arbetsmiljöverkets föreskrifter om tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna
41. AFS 1999:4 Arbetarstyrelsens föreskrifter om tryckbärande anordningar samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna, 17 e juni 1999
42. AFS 2005:3 Arbetarstyrelsens föreskrifter om besiktning av trycksatta anordningar, 27e januari 2005
43. SS-EN 13121-4 Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord - Del 4: Leverans, installation och underhåll
44. SSG 7670 "Allmänna tekniska bestämmelser för tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003
45. SSG 7800 "Kemikaliebeständiga glasfiberarmerade rör och rördelar av omättad esterplast för processledningar. GAP-rör och rördelar. Allmänna Fordringar", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003
46. Bennet, DC, TIP 0402-28, Best practice for Inspecting FRP Equipment – Understanding the Damage Mechanism and Specifying Damage Criteria Improves Inspection Value, TAPPI EPE 2007 – Jacksonville, FL

47. Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 2005:18 Hårdplaster, Arbetsmiljöverket
48. SSG 7670 "Allmänna tekniska bestämmelser för tillverkning och leverans av torn/cisterner i armerad plast", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003
49. SSG 7800 "Kemikaliebeständiga glasfiberarmerade rör och rördelar av omättad esterplast för processledningar. GAP-rör och rördelar. Allmänna Fordringar", Skogsindustriernas Teknik AB, 2003
50. ASTM D2563 - 08 Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts
51. PSK 6301: 1995 "Industrial fibre-reinforced plastic products - Purchase specification", PSK Standards Association, 2004
52. Derakane Epoxy Vinyl Ester Resins – Chemical Resistance Guide, Ashland, Bulletin #2899, 2005
53. DSM Chemical Resistance Guide, http://www.dsm.com/nl_NL/html/drs/chemicalresistanceguide.htm
54. Simona SIMCHEM CD-ROM - Chemical Resistance of SIMONA products
55. Georg Fischer DEKA, Chemical Resistance Guide, <http://www.us.piping.georgefischer.com/go/>
56. Ulibarrena E, Bergman G, A study of the action of hydrochloric acid on non-stressed glass-fibre-reinforced and non-reinforced vinyl ester resin, Project report 66 175:2, Swedish Corrosion Institute, 1990
57. Corzan Piping Systems - Chemical Resistance Data, Lubrizol, January 2009

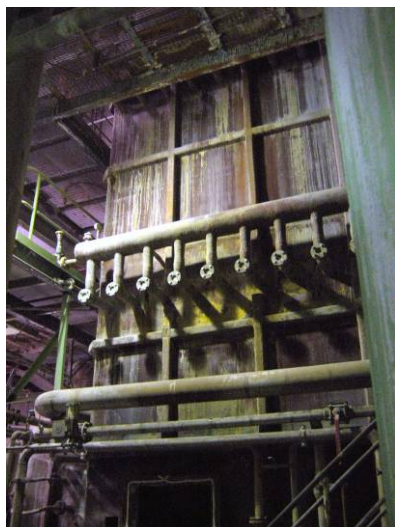
Bilaga A

Statusbedömning Norrsundets skrubberanläggning

Skrubbern vid Norrsundet bruk användes för återvinnig av värme och kemikalier ur rökgaser från sodapannan i 30 år, Figur 56. Den första skrubbern byggdes 1965 i stål SS 2343. Ständiga reparationer under åren 1973 till 1977 medförde dock att man inköpte en skrubber helt i glasfiberarmerad plast (GAP). Valet av GAP betingades av att man tidigare (1975) med mycket gott resultat hade ersatt toppdelen av stålskrubbern med en GAP-konstruktion. Skrubbern, som var 20 m hög, tillverkades med hartstypen Atlac 382-05. Den är byggd i tre plan och består av ett kloridsteg, ett sulfatsteg och värmeåtervinning, Figur 57. Laminatet är handupplagt. Rökgaserna, som innehöll SO_3 , SO_2 och låga halter HCl och hade en temperatur av 120 – 140°C, gick in till skrubbern i quenchen vid kloridsteget. Efter värmeåtervinningssteget hade de renade rökgaserna en temperatur av ca 65°C.

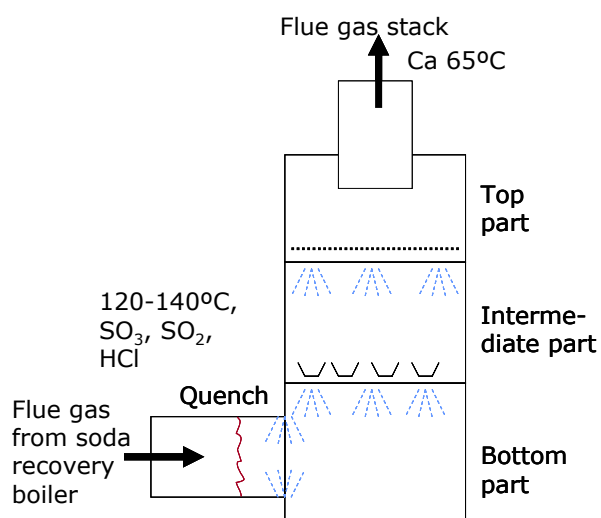
Underhållet i plastskrubbern under de första 8 till 10 åren i drift rapporterades vara förhållandevis ringa. Huvudsakligen gällde reparationerna detaljer inne i skrubbern som rännor och stag. I oktober 2000 utfördes en invändig reparation av skrubberns bottendel och rökgaskanalen pga delamineringsskador och kraftig ytsprickbildning. Reparationen utfördes med ett novolack harts av typ Derakane 470. 2009 verkade skrubbern vara i någorlunda bra skick. Det förekom endast lokala reparationer och mindre lokala delamineringar främst i skrubberns toppdel.

Efter nedläggningen togs provbitar från rökgaskanalen (våta och torra zonen), från kloridsteget (med och utan reparation), från toppdelen samt från skorstenen. Laminatet undersöktes med mikroskop, termisk analys, FTIR och mekanisk provning.



Figur 56. Den 30-åriga skrubbern efter nedläggningen hösten 2008.

Figure 56. 30-year-old scrubber after shut-down of the plant in 2008.



Figur 57. Schematisk ritning av skrubbern.

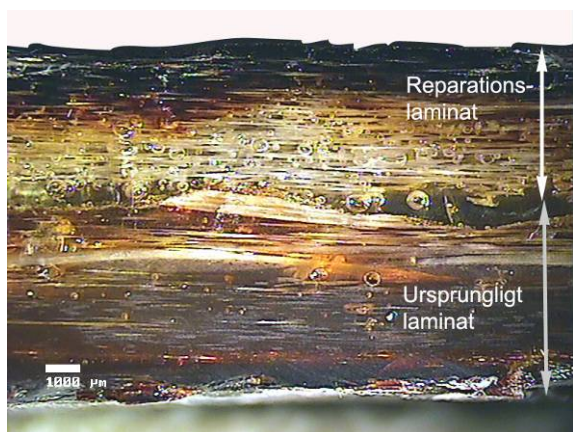
Figure 57. Schematic drawing of the scrubber.

Laminatet uppvisar de kraftigaste angreppen i rökgaskanalen vid den våt-torra övergångszonen nära quenchen, Figur 58. Ytsprickor med djupa lokala angrepp till följd har bildats i reparationslaminatet. Även det ursprungliga laminatet är mycket kraftigt påverkat vilket indikeras av den bruna missfärgningen. Delar av styrkelaminatet har avlägsnats vid reparationen och matrissprickor förekommer.

Det ursprungliga laminatet från bottendelen av skrubbern uppvisar kraftig ytsprickbildning, mikrodela-mineringar samt missfärgning och delamineringsskador vid ett djup av ca 3 – 4 mm, Figur 59. Det består endast av CSM-laminat. Antagligen motsvarar skadorna åtminstone delvis dem som föranledde reparationen efter ca 20 år i drift. Reparationslaminatet är dock i bra kondition, Figur 60. Nästan inga ytsprickor har bildats och endast ytmattaskiktet visar ett visst angrepp i form av missfärgning. Överlag är vidhäftningen till det ursprungliga laminatet bra.

Laminatet från skrubberns mellandel (sulfatsteget) har inte reparerats. Spärrskiktet uppvisar en kraftig brun missfärgning, visst angrepp på fibrerna samt ytsprickbildningar (1 mm djupa), Figur 61. Inga andra skador observerades.

Skrubbers toppdel har reparerats lokalt och delamineringar kan ha varit anledningen. I delar utan reparation uppvisar spärrskiktet främst brun missfärgning, mikrodela-mineringar, ytsprickbildning (0,7 – 1,2 mm) samt känslighet för sprickbildning i hartsmatrisen, Figur 62.



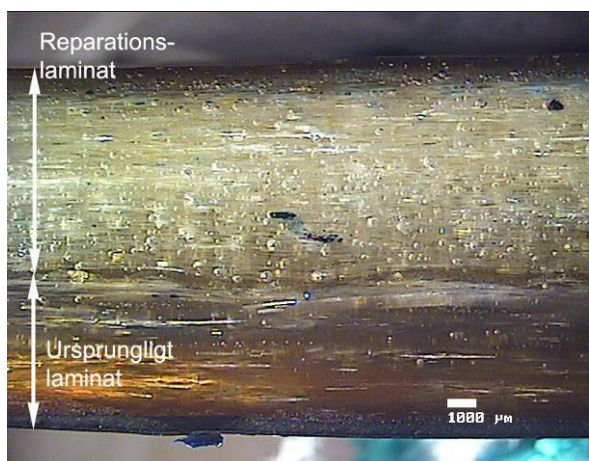
Figur 58. Polerat tvärsnitt av laminat från rökgaskanalen vid den våt-torra övergångszonen. Både reparations- och ursprungligt laminat är kraftigt påverkade.

Figure 58. Polished cross-section of laminate from the wet-dry section of the flue gas duct. Both the repair and the original laminate are heavily affected.



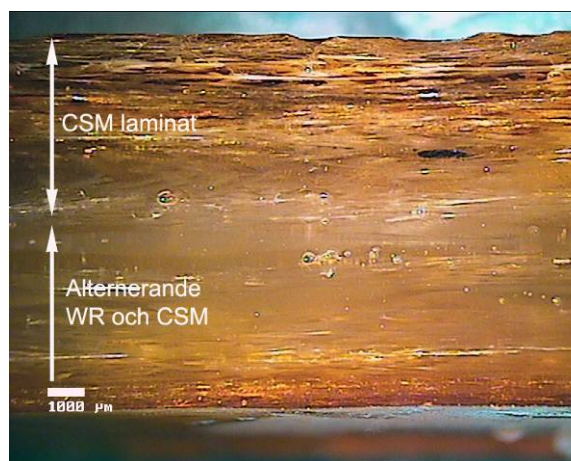
Figur 59. Ytsprickbildning i icke-reparerat laminat (vid manlucka), d.v.s. 30-år-gammalt laminat, från skrubbers bottendel.

Figure 59. Surface cracking in non-repaired laminate (at a manhole), i.e. 30-year-old laminate, from the bottom part of the scrubber.



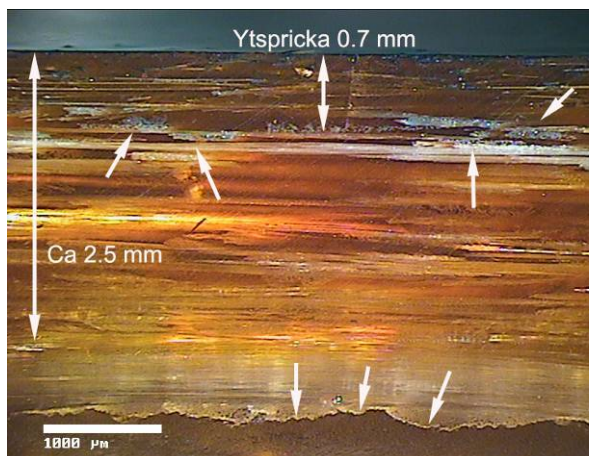
Figur 60. Polerat och infärgat tvärsnitt av det reparerade laminatet från skrubbers botten.

Figure 60. Polished and dye-stained cross-section of repaired laminate from the bottom part of the scrubber.



Figur 61. Polerat och infärgat tvärsnitt av laminat från skrubbers mellandel.

Figure 61. Polished and dye-stained cross-section of laminate from the intermediate part of the scrubber.



Figur 62. Polerat och infärgat tvärsnitt av laminat från skrubbers toppdel.

Figure 62. Polished and dye-stained cross-section of laminate from the top part of the scrubber.

Termisk och FTIR analys bekräftade att laminatet hade tillverkats med Atlac 382 i det ursprungliga laminatet och med ett novolackharts i reparationen. Från T_{gl} -värdena kan även temperaturen som laminatet har utsatts för uppskattas, Tabell 16. Resultaten visar att rökgasernas temperatur antagligen har varit högre än den specificerade. Skrubbern kan ha körts varmt när t.ex. indysningen av vatten som kyler ner gasen inte fungerat. Delamineringsskadorna kan således härstamma från exponering för temperaturväxlingar och hög temperatur.

Tabell 16. Uppskattade exponeringstemperatur under drift utifrån den termiska analysen.

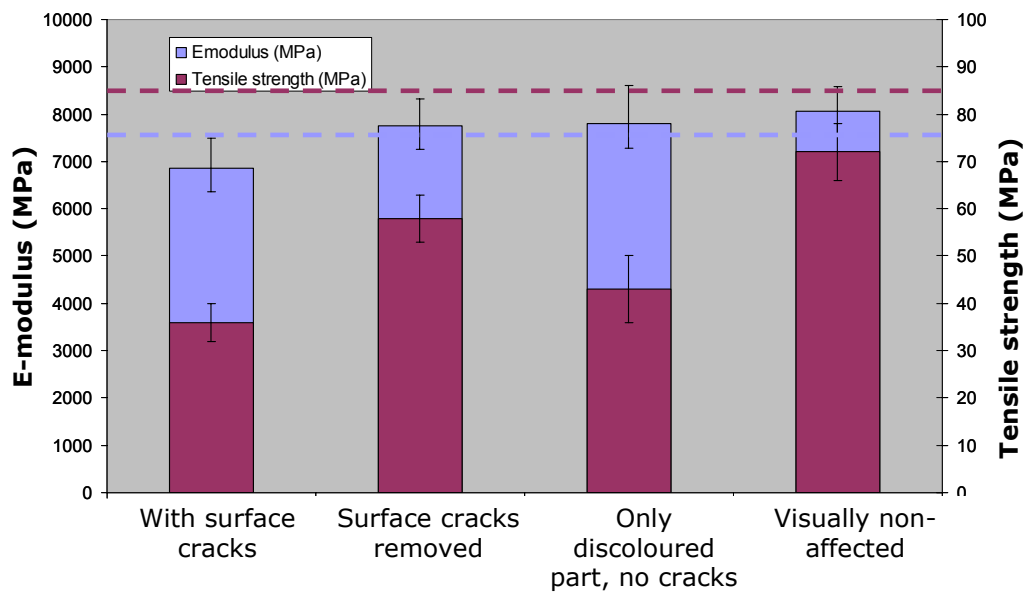
Table 16. Estimated exposure temperature based on thermal analysis.

	Uppskattad exponeringstemperatur under kort exponeringstid (°C)	Uppskattad exponeringstemperatur under längre exponeringstid (°C)
Rökgaskanal – torra delen	Max 150	135
Rökgaskanal – våta delen	Upp till 170	150
Bottendel	130	90
Mellandel	110	80
Toppdel	110	80

Undersökningar av laminatet tillverkat med Atlac 382 (bottendelen av skrubbern, icke-reparerat laminat, ålder 30 år) med FTIR visade inga påtagliga förändringar i koncentrationen av estergruppen med avstånd från laminatets inneryta. Detta indikerar annars hydrolysreaktioner.

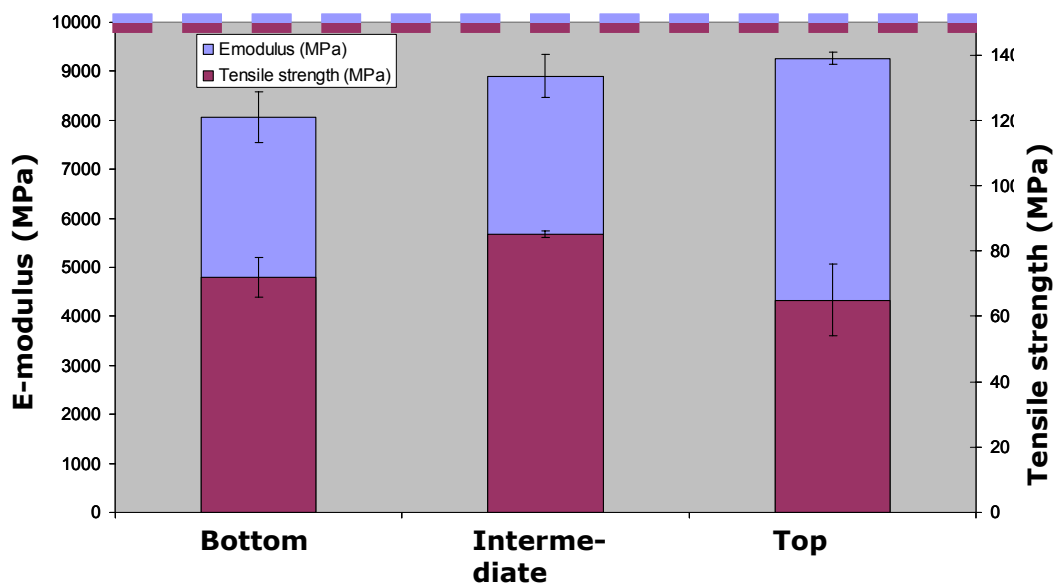
De mekaniska egenskaperna mättes med dragprovning (rumstemperatur, hastighet 1 mm/min, raka provstavar och hundbensformade provstavar). Hela laminatet samt laminat där delen som skadats av sprickbildning eller där hela spärrskiktet hade avlägsnats genom slipning testades. Figur 63 visar en jämförelse av E-modulen och brotthållfastheten hos enbart CSM-laminat taget från skrubberns bottendel (laminat utan reparation, från manlucka). Brotthållfastheten hos laminat med sprickor eller missfärgning är kraftigt nedsatt jämfört med icke-missfärgat eller oexponerat laminat. Minskningen uppgår upp till 60 %. E-modulen däremot har inte påverkats lika kraftigt. I laminat bestående av spärrskikt och styrkelaminat var nedgången i brotthållfasthet upp till 50 %, Figur 64. Men även brotthållfastheten hos enbart styrkelaminatet hade minskat till 50 – 60 %. Brottytorna indikerar mycket sprött brott och påverkan av glasfibern. E-modulen har generellt sett inte påverkats påtagligt.

I detta fall utgörs lasterna på skrubbern mestadels av egenvikt och termiska spänningar (inget vakuum). Undersökningen visade inga kritiska skador och styvheten hos materialet har inte förändrats så drastiskt att det skulle föranleda ett omedelbart utbyte av skrubbern. Minskningen av brotthållfasthet och sprödheten även i styrkelaminatet pekar dock på att skrubbern borde ha bytts på längre sikt eller att en invändig reparation borde ha genomförts för att minska risken för sprickbildning från insidan om anläggningen hade varit i fortsatt drift.



Figur 63. E-modul och brotthållfasthet för olika delar av det ursprungliga laminat från skrubbers botten (CSM laminat utan reparation). De streckade linjerna indikerar uppskattade värdena för opåverkat laminat.

Figure 63. E-modulus and tensile strength of different parts of the original laminate from the bottom part of the scrubber (only CSM laminate without repair). The dashed lines indicate values for unexposed laminate.



Figur 64. Jämförelse av E-modul och brotthållfasthet för styrkelaminat där spärrskiktet har avlägsnats genom slipning från olika delar av skrubbern. De streckade linjerna indikerar värdena för opåverkat laminat.

Figure 64. Comparison of E-modulus and tensile strength of the structural part of the laminate from different parts of the scrubber. The dashed lines indicate values for unexposed laminate.

Bilaga B - Fälttest vid Mälarenergi

Bakgrund

Swerea KIMAB har tidigare utfört en exponering av GAP material i den våt-torra zonen av rökgaskondensorn vid Brista-verket⁸. Utifrån analyserna av dessa prov i Bristaverkens kylare drogs slutsatsen att det kan ha förekommit saltsyra i rökgaserna vid mycket hög temperatur. Brista-verket hade under denna säsong använt den så kallade Chlorout[®]-processen där man tillsätter ammoniumsulfat för att minska korrosiviteten hos rökgaserna och mängden beläggningar. Möjligen hade saltsyran bildats till följd av detta. Det diskuterades även om bränsle med hög kloridhalt hade använts under säsongen. För att få mer klarhet i vilka effekter en process som Chlorout[®] kan ha på GAP-laminat exponerades därför ytterligare prov i Mälarenergi ABs inloppsdel till kondensorn (torra delen) där man under säsongen 2009/2010 skulle testa en process där man doserar svavel.

Provmaterial

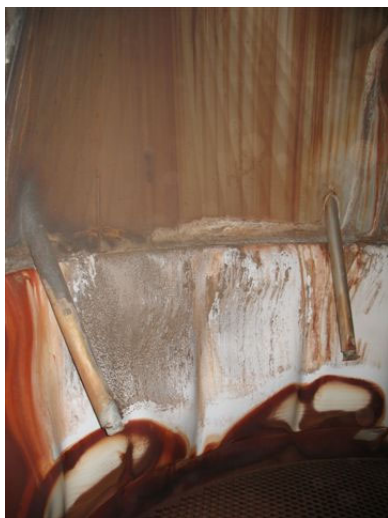
GAP-laminatet tillverkades med ett novolack-harts av typ Derakane 470-300. Ett härdsystem baserat på 0,7 % coboltlösning (1 %) och 1 % Katalysator 11 (MEK peroxid, Norpol) användes. Ytmattan var av typ Advantex (OCV) eller kolfiberväv (Svenska Tanso). Matta av huggen fiber av typ Advantex CSM M723, 450 g/m² och rovingväv av typ Advantex WR 600 g/m² användes. Laminatstorleken var 30 x 50 cm varav två provbitar av storleken 10 x 30 för exponering samt referensmaterial framställdes. Först tillverkades styrkelaminatet med 1100 ml harts, en ytmatta samt fyra CSM alternerande med WR. Mellanhärdningen var 2 h varefter en slipning med sandpapper av typ P80 för hand utfördes. Sedan tillverkades spärrskiktet med tre lager av CSM och ytmatta. Laminatet täcktes i alla steg med plastfilm för att förhindra yttinhärdning av härdningsprocessen. Provkupongernas kanter förseglades med ett harts innehållande förtjockningsmedel (Aerosil). Laminaten efterhärdades inte eftersom snabb efterhärdning förväntades under drift pga av de höga temperaturerna i processen. Två olika material med följande laminatupbyggnad tillverkades.

Prov 1: Advantex ytmatta + 3x(CSM+WR)+ CSM + 3x CSM + Advantex ytmatta

Prov 2: Advantex ytmatta + 3x(CSM+WR)+ CSM + 3x CSM + kolfiberytmatta

Provkupongerna exponerades i rökgaskondensor vid Mälarenergi AB med god marginal över indysningen, Figurer 65 och 66. Rökgaserna är torra med en temperatur av ca 150°C. Ingen mätning av rökgasernas sammansättning utfördes före rökgaskondenseringen. Som alternativ till Chlorout-metoden doserades elementärt svavel i form av granuler på bränslebandet på väg in i anläggningen. Bränslet går via timsilo innan det går in till pannan. Doseringen av svavel styrdes av S/Cl-halten i bränslet samt vikten bränsle på bandet.

Proverna installerades vecka 24 2009 och togs ut vecka 20 2010. Under denna period var drifttiden 43 veckor (7346 h).



Figur 65. Insidan av rökgaskondensorn med indysningen.

Figure 65. Flue gas condensor with spray nozzles.



Figur 66. Provbitarna installerades ovanför indysningen.

Figure 66. The samples were installed above the spray nozzles.

Analysförfarandet

Provkupongerna utvärderades före och efter exponering genom visuell och mikroskopisk undersökning, termisk analys samt mekanisk provning. Ett tvärsnitt av laminatet polerades under vatten till en ytfinhet av 2400 mesh och studerades sedan under ljusmikroskop. Därefter infärgades det polerade tvärsnittet med ett dispersionsfärgämne som kan synliggöra uthärtningsdefekter och olika korrosionsskador såsom mikrodellamineringar och sprickor. Även det infärgade tvärsnittet studerades i ljusmikroskop.

Provstavar med en bredd av 10 mm, och än längd av 200 mm framställdes. De mekaniska egenskaperna bestämdes sedan genom 3-punkts böjning enligt ASTM D790M. Den akustiska emissionen från laminatet registrerades under belastningen med en speciell utrustning. Inspänningslängden var 160 mm och nedböjningshastigheten 1 mm/min. Tre provstavar testades. E-modulen i dragning mättes på raka provstavar (10 mm x 100 mm) med extensometer (draghastighet 1 mm/min). Draghållfastheten mättes på hundbensformade provstavar (10 mm x 100 mm, midja 5 mm) med en draghastighet av 1 mm/min.

Termisk analys utfördes med Differential Scanning Calorimetry (DSC). Ett litet prov (ca 6-8 mg) togs från laminatets spärrskikt bakom ytmattaskiktet. Provet upphettades sedan från 25 till 230°C med en hastighet av 10 K/min. Efter kylning från 230 till 25°C med en hastighet av 80 K/min upphettades provet igen från 25 till 230°C med en hastighet av 10 K/min. Glastransitionerna T_{g1} och T_{g2} bestämdes vid första respektive andra upphettningsfasen.

Resultat

Båda laminaten uppvisade en kraftig svart missfärgning, men uppvisade fortfarande en viss glans, Figurer 67 och 68. Inga sprickor eller andra defekter observerades. Ingen nämnvärd mängd beläggning fanns på ytan.



Figur 67. Provkupongerna före exponering. Övre kupong Advantex ytmatta, nedre kupong kolfiberytmatta.

Figure 67. Samples before exposure.



Figur 68. Provkupongerna efter exponering. Övre kupong Advantex ytmatta, nedre kupong kolfiber-ytmatta.

Figure 68. Samples after exposure.

Mest påfallande vid den mikroskopiska undersökningen av polerade tvärsnitt var den kraftiga gröna missfärgningen av hela godset i båda laminattyperna som exponerats. En grön missfärgning indikerar att saltsyra kan ha diffunderat in i laminatet, Figurer 69 och 70. Saltsyra kan bilda ett grönt komplex med koboltföreningen från härdsystemet, och normalt observeras en sådan missfärgning för GAP exponerat för saltsyra (koncentration > ca 10 vikts%, max temperatur studerat 80°C).



Figur 69. Polerat tvärsnitt av laminat med Advantex-ytmatta före exponering.

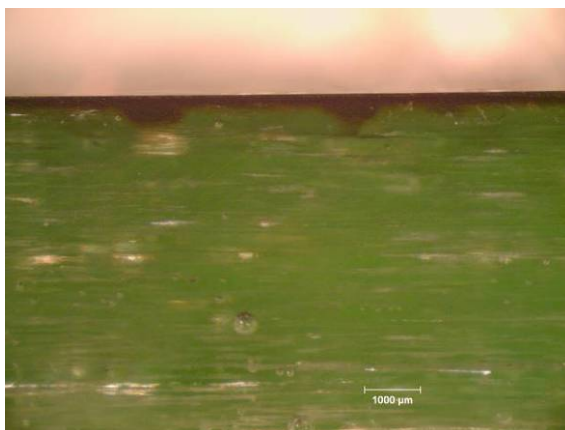
Figure 69. Polished cross-section of laminate with Advantex surface veil before exposure.



Figur 70. Polerat tvärsnitt av laminat med Advantex-ytmatta efter exponering.

Figure 70. Polished cross-section of Advantex surface veil laminate after exposure.

Ytmattaskiktet i laminatet tillverkat med Advantex-ytmatta uppvisade lokala angrepp med ett djup av ca 500-600 μm , Figur 71, dock utan ytsprickbildning. I laminatet med kolfiberytmatta observerades inga liknande angrepp. En viss lokal brun missfärgning var relaterad till rovingvävarmeringen, Figur 72. Den förekom endast på ett fåtal ställen och inga delamineringar observerades. Infärgning av laminatet med ett dispersionsfärgämne som kan synliggöra defekter i laminat gav ingen ytterligare information.



Figur 71. Polerat tvärsnitt av laminat med Advantex ytmatta efter exponering. En förstoring av ytmattaskiktet med lokala angrepp visas.

Figure 71. Polished cross-section of laminate with Advantex surface veil. Local attack on the surface veil layer is shown.



Figur 72. Polerat tvärsnitt av laminat efter exponering. En förstoring av skadan i styrkelaminatet vid rovingväven visas.

Figure 72. Polished cross-section of laminate after exposure. Local attack on the woven roving layer in the structural part is shown.

Tabell 17 sammanfattar resultaten från de termiska analyserna. Värdena för de icke-efterhårdade laminaten visar att de hade en reststyrenhalt av ca 3 vikts% och att harts och härdsystem hade blandats i rätta proportioner. Vid efterhårdning på laboratorium (100°C och 150°C) uppnåddes fullständig uthärdning, dvs T_{g1} och T_{g2} va ca 162°C. För provkuponerna exponerade i kondensatorn kunde inget T_{g1} värde bestämmas eftersom den överlagrades av en topp i DSC kurvan vid 195°C. En sådan topp förekommer vanligtvis inte i efterhärdat laminat. Det är möjligt att det rör sig om ett ämne som absorberats i materialet och som desorberas vid denna temperatur. En jämförelse av T_{g2} värdet hos de exponerade och de i laboratoriet efterhårdade proven visar att det är högre för proverna exponerade i fält. Detta indikerar att rökgasernas temperaturer kan periodvis ha varit högre än 150°C, dvs kring 170°C. Efter efterhårdning vid 170°C under en vecka uppgick T_{g1} och T_{g2} till ca 175°C.

Tabell 17. Resultat från den termiska analysen.

Table 17. Results from thermal analysis.

	Icke efterhärdat			Exponerat i kondensorn		
	T_{g1} (°C)	T_{g2} (°C)	Exoterm efterhårdning (kJ/g)	T_{peak} (°C)	T_{g2} (°C)	Exoterm peak (kJ/g)
Laminat Advantex ytmatta	94,2	164,1	21,8	195,2	180,9	2,9
Laminat kolfiber- ytmatta	95,1	162,3	22,8	195,3	180,6	3,2

Tabell 18 sammanfattar resultaten från den mekaniska analysen i 3-punkts böjning. Exponerat laminat jämförs med oexponerat, icke-efterhärdat laminat på samma sätt som i tidigare undersökningar⁸.

Tabell 18. Mekaniska egenskaper erhållna från 3-punkts böjning.

Table 18. Mechanical properties obtained from 3-point bending.

	E-modul (MPa)		Böjhållfasthet (MPa)		Töjning där första sprickan i CSM laminat bildas (%)		Töjning där ytmattan spricker (%)	
	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat
Advantex ytmatta	6895	6420	114	89	1,32	0,46	1,32	1,32
Kolfiber ytmatta	8550	8560	134	147	1,32	0,65	1,72	1,92

E-modulen och böjhållfastheten hos laminatet med Advantex ytmatta har minskat till 93 % respektive 86 % jämfört med oexponerat och icke-efterhärdat laminat. Ingen minskning av E-modul och böjhållfasthet hos laminatet med kolfiberytmattan har skett. Fastän den totala brotthållfastheten inte har minskat särskilt kraftigt visar mätningar

med akustisk emission samt visuell undersökning att brottprocesser börjar långt tidigare. För de exponerade materialen kan konstateras att laminatet är mycket känsligt för sprickbildning i matrisen mellan fiberknippen. Matrisprickor bildas redan vid 0,46 till 0,65 %. Därefter växer storlek och antal av dessa sprickor kontinuerligt och mycket kraftigt till totalbrott i området där provet utsätts för dragspänningar av olika storlekar. För de icke-exponerade proven bildas matrisprickor mycket senare och endast i området med högst spänning. Det kan även konstateras att i exponerat laminat med Advantex ytmatta spricker ytmattaskiktet när de första sprickorna i hartsmatrisen i CSM laminatet bildas. För alla övriga laminat sker matrisprickbildning först i CSM skiktet och sedan spricker ytmattan. Tabell 19 visar resultaten från mekanisk provning i drag. Liknande förändringar som i undersökningen med 3-punkts böjning erhöles.

Tabell 19. Mekaniska egenskaper erhållna från dragprovning.

Table 19. Mechanical properties obtained from tensile testing.

	E-modul (MPa)		Draghållfasthet (MPa)		Spänning där första hörbara akustiska emission registreras (MPa)		Spänning där utbildning av matrisprickor i CSM laminat börjar (MPa)	
	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat	Oexpo- nerat	Expo- nerat
Advantex ytmatta	6685	5955	86	71	31	17	59	17
Kolfiber ytmatta	7007	7465	98	94	31	23	59	33

Diskussion och slutsatser

Proverna uppvisar en liknande grön missfärgning i hela godset som det som observerats i prover exponerade i Bristaverket, som använde sig av Chlorout®-processen. Det är därför troligt att den gröna missfärgningen i första hand härstammar från saltsyra som bildas i Chlorout®-processen och att även en process med liknande princip (dosering av svavel) kan ge sådana effekter i laminat utsatt för heta och torra rökgaser. Förutom den gröna missfärgningen efter en driftsäsong är förändringarna i de mekaniska egenskaperna mest påtagliga. För laminat i Bristaverket var detta mestadels relaterat till angrepp på rovingväven i styrkelaminatet (brun missfärgning, antagligen minskad vidhäftning) vilket resulterade i delamineringsskador vid 3-punkts böjning. Liknande angrepp observerades endast mycket lokalt på ett fåtal ställen i laminatet som undersöktes i denna studie fastän samma typ av rovingväv hade använts. I detta fall användes dock ett novolackharts av typ Derakane 470 istället för ett novolackharts av typ Atlac 590 för provtillverkning. En möjlig förklaring kan vara skillnader i kompatibilitet mellan glasfiberarmering och hartset. Men även för laminaten exponerade i denna studie skedde en förändring i de mekaniska egenskaperna. Medan E-modulen och den totala hållfastheten inte var kraftigt påverkade, medförde exponeringen en försprödning av hartsmatrisen med sprickbildning vid mekanisk belastning vid relativt låga spänningar. Vid böjbelastning av laminat med Advantex ytmatta medförde detta även sprickbildning i innerytan eller ytmattaskiktet. En viss

försprödning av hartsmatrisen kan även väntas vid exponering för hög temperatur. Ulibarrena et al⁵⁶ har dock tidigare rapporterat att en försprödning av CSM laminat kan uppträda när det långvarigt exponerats för saltsyra vid temperaturer högre än 50°C. Det föreligger i dagsläget inga jämförande mätningar för material exponerat med och utan närvaro av saltsyra vid hög temperatur. Förekomsten av – antagligen mindre halter av – saltsyra i rökgaserna vid hög temperatur verkar således kunna leda till mycket snabb saltsyradiffusion i den torra zonen i rökgaskondensorn eller kylare vid användning av Chlorout[®]-processen och dosering av svavel. De mekaniska egenskaperna hos GAP-laminat kan påverkas i form av en nedgång av brotthållfastheten med eventuell ytsprickbildning till följd om inte en kolfibermatta används i ytmattaskiktet. Även rovingväven i styrkelaminatet verkar kunna påverkas negativt av den diffunderande saltsyran med ökad känslighet för delamineringsskador vid böjbelastning. Det måste dock poängteras att GAP kan användas för applikationer där saltsyra föreligger i rökgaserna. Om höga koncentrationer av saltsyra och temperaturer (>150°C) förekommer eller om Chlorout[®]-processen eller dosering av svavel används rekommenderas dock att laminatets status kontrolleras regelbundet. Ytterligare material exponeras nu för att studera långtidseffekterna.

Därmed kan följande slutsatser dras:

- Chlorout[®]-processen och dosering av svavel, där saltsyra kan bildas, kan påverka GAP-laminat. Förekomsten av – antagligen mindre halter av – saltsyra i rökgaserna vid hög temperatur verkar kunna leda till mycket snabb saltsyradiffusion i den torra zonen i rökgaskondensor eller kylare. De mekaniska egenskaperna hos GAP-laminat kan påverkas i form av en nedgång av brotthållfastheten med eventuell ytsprickbildning till följd om inte en kolfibermatta används i ytmattaskiktet. Lokala angrepp på den testade rovingväven i styrkelaminatet kunde förekomma, med ökad känslighet för delamineringsskador vid böjbelastning som följd.
- Försprödning av hartsmatrisen och ytmattaskiktet får mindre effekt för laminat som tillverkats med kolfiberytmatta istället för t.ex. Advantex ytmatta.
- GAP kan dock användas för applikationer där saltsyra föreligger i rökgaserna. Om höga koncentrationer och temperaturer (>150°C) förekommer eller om Chlorout[®]-processen eller dosering av svavel ska användas rekommenderas dock att laminatets status kontrolleras regelbundet.

⁵⁶ Ulibarrena E, Bergman G, A study of the action of hydrochloric acid on non-stressed glass-fibre-reinforced and non-reinforced vinyl ester resin, Project report 66 175:2, Swedish Corrosion Institute, 1990

Bilaga C – Värmekamera

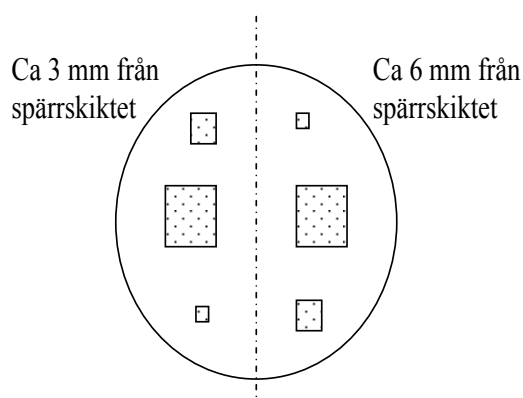
Passiv mätning

Såväl laboratorie- som fältstudier genomfördes. För studierna på laboratorium tillverkades GAP laminat med defekter av olika storlekar och vid olika djup, Tabell 20 och Figur 73. För att åstadkomma defekter i laminatet laminerades tunn PET-film, som inte har vidhäftning till hartsmatrisen, in i laminatet.

Tabell 20. Tillverkning av laminatprover med delamineringar/innelsutningar av olika storlekar och vid olika djup i laminatet.

Table 20. Fabrication of laminate having delaminations/inclusions of different sizes and depths into the laminate.

Harts	Atlac E-Nova 2045
Härdsystem	3 % Co (1% lösning), 1,25 % MEKP (Katalysator 11)
Mellanhärdning, efterhärdning	Mellanhärdning efter uppbyggnad av spärrskikt, slipning, ingen efterhärdning
Laminatuppbyggnad spärrskikt	Ytmatta av typ kolfiberväv eller syntetisk ytmatta + 3 x 450 g/m ² CSM, Advantex M723
Laminatuppbyggnad styrkelaminat	1 x CSM + 3 x (WR + CSM)
Defekter	PET-folie, som inte har vidhäftning till hartset, laminerades in i laminatet med olika storlekar (0.5 x 0.5 cm, 1 x 1 cm och 2 x 2 cm) och på olika djup i laminatet (ca 3 och 6 mm räknat från spärrskiktet).



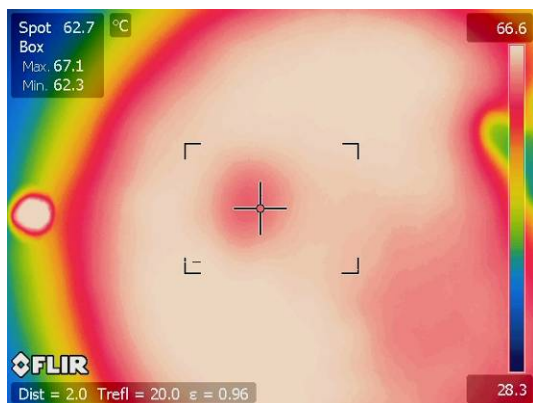
Figur 73. Anordning av defekter/innelslutningar i laminatet.

Figure 73. Location of defects/inclusions in the laminate.

Värmekameran används sedan för att studera värmefördelningen över laminatet under uppvärmningsproceduren och när laminatplattan var genomvarm ("steady state" tillstånd). Laminatplattorna exponerades enkelsidigt med spärrskiktet nedåt för vatten som uppvärmdes till kokpunkten (långsam uppvärmning, ca 10 min) eller som redan hade nått kokpunkten (snabb uppvärmning, ca 5 min).

GAP-laminat (tjocklek ca 15 mm) med defekter i form av delamineringar av olika storlekar (max 2 x 2 cm) och vid olika djup i godset tillverkades och undersöktes med värmekamera, både under uppvärmningsfasen och när det hade nått jämn temperaturfördelning ("steady state"). Vid "steady state" var det inte möjligt att detektera defekterna med värmekamera. Endast under långsam uppvärmning kunde den största defekten (2 x 2 cm) närmast den undersökta ytan (laminatets utsida, d.v.s. styrkelaminatet) synliggöras, Figur 74. Vid snabb uppvärmning var temperaturskillnaderna för små för att ge utslag med värmekameran.

Kameran testades även i fältförsök. En skrubber i drift som skadats genom storskalig blåsbildning mellan spärrskikt och styrkelaminatet (storlek på blåsorna ca 10 cm i diameter) fotograferades under drift från utsidan med värmekameran. Det uppskattades att tjockleken hos laminatet var ca 20 mm varav spärrskiktet utgjorde ca 3 – 4 mm, dvs blåsorna låg ca 16 mm från ytan där temperaturen mättes. Ledningsförmågan i området med blåsorna borde vara påverkat vilket eventuellt kan reflekteras som skillnader i yttemperaturen. Inga defekter var dock synliga med värmekameran. Tjockleksvariationer härstammande från lindningsprocessen verkade kunna observeras med värmekameran. Man bör dock vara medveten om att reflektion kan leda till fel i temperaturmätningen.



Figur 74. Bild tagen med värmekamera vid uppvärmning. Endast den stora defekten närmast ytan syns.

Figure 74. Picture taken during the heating phase. Only the largest defect closet to the surface was visible.

Bilaga D – Ultraljud

Ett mätinstrument av typ Panametrics NDT 35HP Olympus med fyra olika sensorer (M109 5 MHz/.5", M106 2,25 MHz/.5", M1036 2,25 MHz/.5" delayed response och M2008 0,5 MHz/1") användes i studien. Instrumentet fungerar enligt "pulse echo" metoden. En skärm visar ekot från materialet under mätningen (live A-scan). Instrumentet är speciellt framtaget för ett ultraljudsfrekvensområde på 0,5 till 5,0 MHz, d.v.s. för de låga frekvenser som krävs för tjocka eller absorberande material. Det kalibreras med minst en 1-punkts mätning; för noggrannare mätningar kan en kalibrering med flera punkter genomföras. Olika laminattyper studerades, bland annat CSM-laminat av olika tjocklekar som representerar spärrskiktet samt roving-laminat (WR-laminat) av olika tjocklekar och uniaxialt lindat laminat som båda representerar styrkelaminat, Tabell 21. Laminat av olika tjocklek och uppbyggnad som hade tagits från GAP-processutrustning ingick också i studien. Kalibrering utfördes med olika typer av laminat (CSM- och WR-laminat, laminat från processutrustning) och noggrannheten på mätningarna jämfördes för olika kalibreringar och material.

Tabell 21. Tekniska specifikationer för instrumentet använt för mätningar.

Table 21. Technical specification of the instrument used in the study.

Instrument	Olympus Panametrics NDT 35HP
Mätområde	0.5 till 5.0 MHz
Transducer/givare	M109 5 MHz/.5" M106 2.25 MHz/.5" M1036 2.25 MHz/.5" High penetration transducer M2008 0.5 MHz/1"
Kontaktmedel	Olympus couplant B (glycerin)
Analyserat material	CSM-laminat olika tjocklekar
	WR-laminat olika tjocklekar
	Uniaxialt lindat laminat
	Laminat bestående av spärrskikt och styrkelaminat med olika uppbyggnad; från processutrustning
	Termoplastlaminat laminat
	GAP på betong

Givare M109 5 MHz/.5"

Givaren arbetar vid en frekvens av 5 MHz, den högsta som studerats här. Givaren visade sig vara olämplig för användning på GAP-material.

Givare M106 2.25 MHz/.5"

Denna sensor har en frekvens av 2.25 MHz och var lämplig att mäta tjocklek på endast CSM laminat och i vissa fall av laminat uppbyggt med endast rovingväv (WR laminat). För tjockare WR laminat var dock mätvärdet inte entydigt, flera mätvärden på olika tjocklekar kunde erhållas där vågen studsade tillbaka vid de olika lagren av rovingväv. Ifall av laminat bestående av CSM laminat i spärrskiktet och handupplagt styrkelaminat observerades samma problem, dvs vågen studsade tillbaka vid första rovingväv vid mätning från spärrskiktets sida. Givaren verkar således inte lätt kunna användas för mätning av totaltjocklek hos tjockare laminat bestående av spärrskikt och styrkelaminat. Man kan möjligen utnyttja att vågen studsar tillbaka vid armering med högre glashalt som rovingväv eller lindat laminat för att uppskatta spärrskiktets tjocklek med en

mätning från insidan. Detta har gjorts för ett flertal laminat där ultraljuds- och mikroskopmätningar på tvärsnitt har jämförts, Tabell 22. I de flesta fall kunde tjockleken på spärrskiktet uppskattas på ett tillfredställande sätt. Svårigheter uppkom när det fanns djupa ytsprickor i spärrskiktet och mätnoggrannheten minskade där laminatet var tunnare.

Tabell 22. Mätning av spärrskiktets tjocklek (CSM-laminat) med givare M106. Kalibrering utfördes med ett 4,85 mm tjockt CSM-laminat.

Table 22. Measurement of the barrier layer thickness using transducer M106. Calibration was performed using a 4,85 mm thick CSM laminate.

Laminattyp	Tjocklek av CSM-laminat mätt med mikroskop (mm)	Tjocklek mätt med ultraljud (mm)	Fel (%)
Reaktorbotten av en HCl reaktor	9,2	9,1	1
Toppdel skrubber, taket	2,9	3,2 (Svårare mätning, ibland identifieras andra lagret med WR)	10
Rökgaskanal 1	5,2-5,3	5,1-5,2	2
Rökgaskanal 2	4,6-4,7	4,8-4,9	4
Inloppsdel skrubber	9,8-9,9	Fungerar ej pga djupa ytsprickor	
Toppdel av skrubber 2	8,3-8,4	Ca 8,0	4

Givaren kalibrerades sedan med ett termoplastmaterial (CPVC) och användes för tjockleksmätningar på termoplastlinade GAP-strukturer. Givaren verkar fungera även i denna tillämpning.

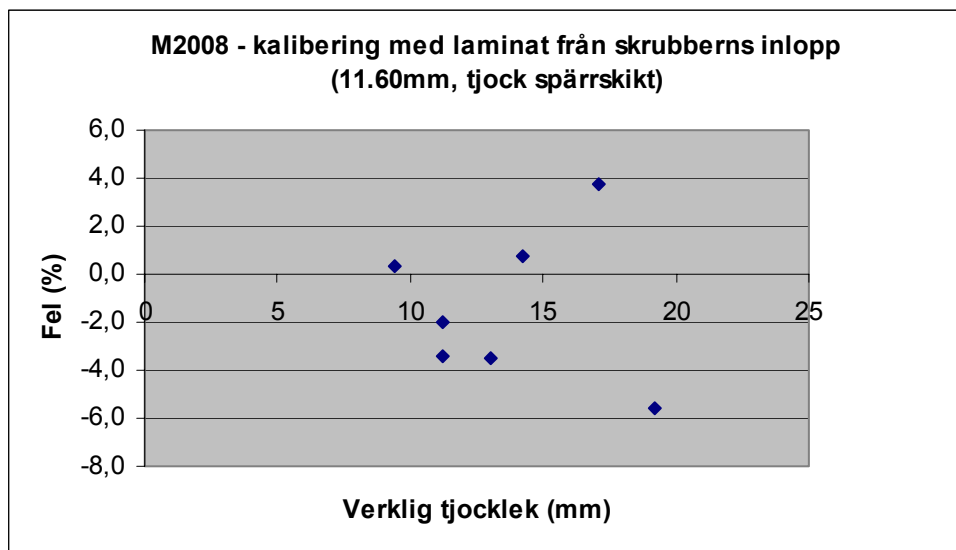
Även enstaka mätningar på GAP-linade betongstrukturer gjordes. Eventuellt kan sensor M106 även användas för att mäta tjocklek hos GAP applicerad på betong.

Givare M1036 2.25 MHz/,5" High penetration

Denna givare kunde användas för att mäta tjockleken på enbart CSM- eller WR-laminat samt på laminat bestående av spärrskikt och styrkelaminat med en tjocklek upp till 10 - 12 mm. För tjockare laminat föreföll denna givare inte vara lämplig eftersom ekon erhöles vid flera olika WR-lager eller från lindningen. Life A-scan displayen som visade ekot eller ekona var en förutsättning för att kunna avgöra tillförlitligheten hos en mätning. Beroende på kalibreringen, d.v.s. på kalibreringsmaterialet, var mätfelet ca 5 %, men kunde vara betydligt större vid olämplig kalibrering.

Givare M2008 0.5 MHz/,5" Delay line transducer

Bland de testade givarna är denna givare den som är minst känslig för inhomogeniteter i materialet. Störande ekon filtreras delvis bort. Därför var denna sensor lämplig för att mäta tjockleken även på laminat upp till ca 20 – 25 mm gods. För 40 mm tjockt laminat kunde inga pålitliga resultat uppnås. Beroende på kalibreringen, d.v.s. på kalibreringsmaterialet, var mätfelet i genomsnitt 5 %, men kunde ligga högre vid olämplig kalibrering, Figur 75.



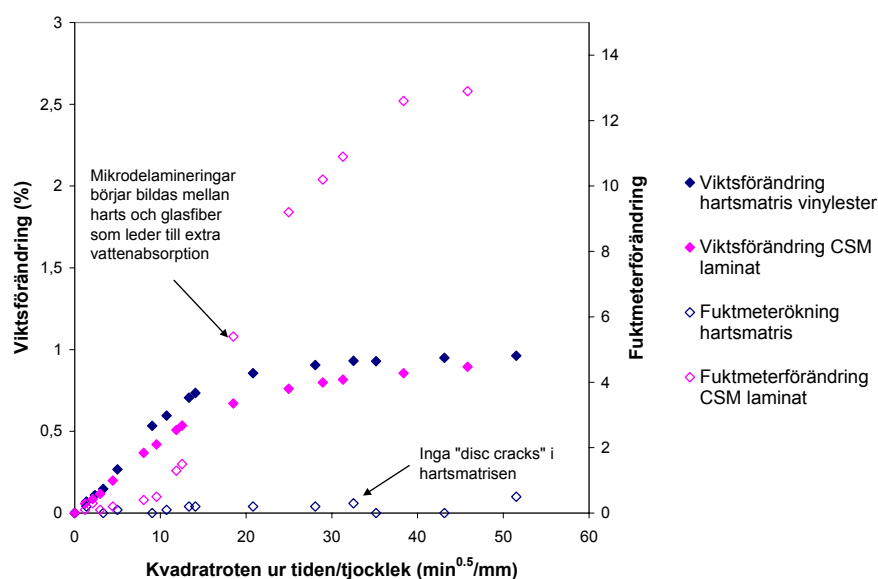
Figur 75. Mätfel i procent (avvikelse från den verkliga tjockleken) för olika typer av GAP-laminat vid tjockleksmätning med givare M2008.

Figure 75. Deviation in % from real thickness for different types of laminate where the thickness was measured using the transducer M2008.

Denna sensor var även känslig för blåsbildning och mindre delamineringar i materialet och kunde således användas för att upptäcka sådana skador i ett laminat. Olympus 35HD instrumentet har även en B-scan mapping funktion, d.v.s. det kan generera tjockleksdata längs en linje, och således ge information om storleksordning på skadan. Den mätte totaltjockleken på termoplastlinat GAP-material. Det krävs dock ytterligare undersökningar för att kunna dra fler slutsatser.

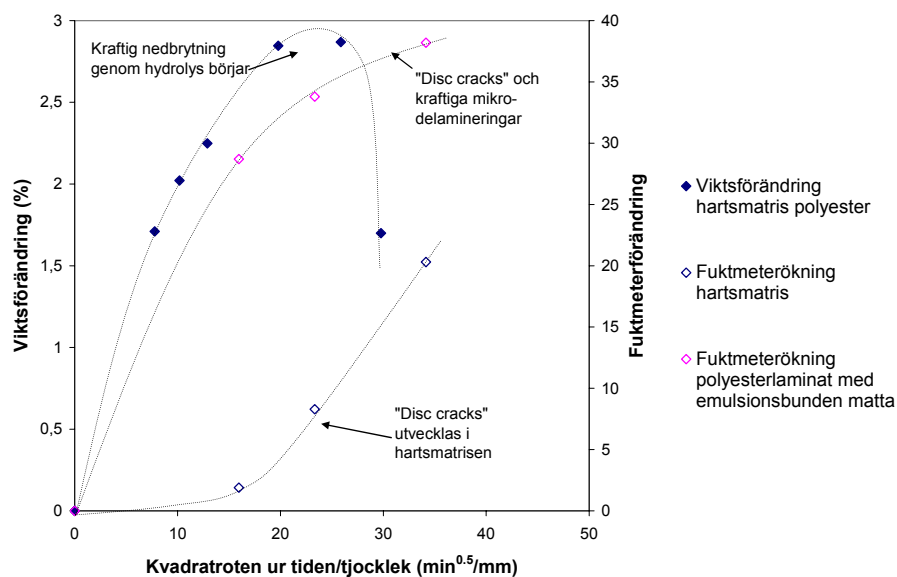
Bilaga E - Fuktmätare

En kapacitansbaserad fuktmätare av typ GANN Hydromette UNI 1 valdes för studierna. Den rekommenderas vanligtvis för mätning av fukt i träd eller betong. Figur 76 visar en jämförelse mellan fuktupptaget mätt med sorptionsförsök och med fuktmätare för rent hart och ett CSM laminat tillverkat med samma harts. Ökning av fukthinnehållet definierades som differens mellan fuktmätarevärdet för fuktigt och torrt material. Fuktmätaren visade sig vara mycket känsligare för vattenansamlingar kring glasfiber, d.v.s. fritt vatten, än för vatten absorberat i hartsmatrisen. Däremot är ökningen av fukthinnehållet mätt med fuktmätare i hartsmatrisen försumbar i jämförelse med mängden fritt vatten som samlas kring glasfibrerna när mikrodelamineringar börjar bildas i ett CSM laminat. I detta fall är hartsmatrisen inte känslig för hydrolys eller ”disc cracking”, d.v.s. utformning av små runda sprickor i hartsmatrisen. Figur 77 visar en jämförelse mellan vattenupptag i ett hydrolyskänsligt polyesterharts mätt med sorptionsexperiment och med fuktmätare. Det relativa fuktmetervärdet ökar kraftigt i samband med att ”disc cracks” bildas och det indikerar att fritt vatten förekommer i materialet. Kombinerar ett hydrolyskänsligt harts med hydrolyskänslig glasfiberarmering som emulsionsbunden matta resulterar skadorna från sprickor och mikrodelamineringar i mycket kraftig ökning av det relativa fuktvärdet.



Figur 76. Jämförelse av viktsförändringen mätt med sorptionsförsök och fukthalten mätt med fuktmätare hos rent vinylesterharts och CSM-laminat exponerat för vatten vid 80°C. Ökningen av fuktmetervärdet definierades som skillnaden mellan värdet för exponerat och oexponerat material.

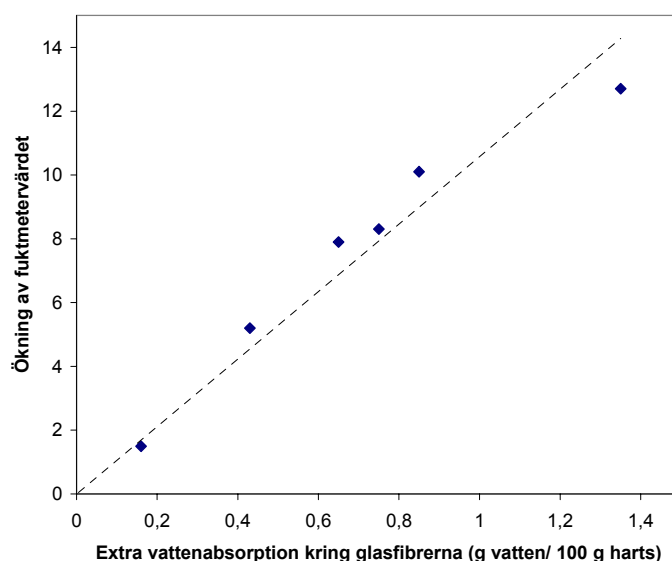
Figure 76. Comparison of the weight change measured by sorption studies and the moisture content measured using a moisturemeter for a vinyl ester clear casting and CSM laminate exposed to water at 80°C. The moisturemeter increase is defined as the difference between the moisturemeter readings of the exposed and the unexposed material.



Figur 77. Jämförelse av viktsförändringen mätt med sorptionsförsök och fukthalten mätt med en fuktmätare hos ett polyesterharts känsligt för hydrolys och disc cracking samt för ett CSM-laminat därav med emulsionsbunden matta exponerat för vatten vid 95°C.

Figure 77. Comparison of the weight change measured by sorption studies and the moisture content measured using a moisturemeter for a polyester resin clear casting and a CSM laminate thereof with emulsion-bound mat exposed to water at 95°C.

Ett samband mellan vattenabsorptionen kring glasfibrerna och fuktmetervärden hittades. Fuktmätaren kan således vara ett lämpligt instrument att detektera skador i laminat som har samband med ökade mängder fritt vatten. Figur 78 visar ökningen i fuktmätarvärdet mot det som kallas för extra vattenabsorption kring fibrerna. Den upptagna vattenmängden har korrigerats för vattenabsorptionen i hartset med hänsyn till glashalten i laminatet och värdet på extra vattenabsorption avser således g fritt vatten per 100 g hartsmatris. Som exempel skulle en ökning i fuktmetervärde på ca 10 motsvara en extra vattenabsorption på ca 1 g vatten per 100 g harts eller 0,75 g vatten per 100 g laminat med en glashalt på 25 vikts%.

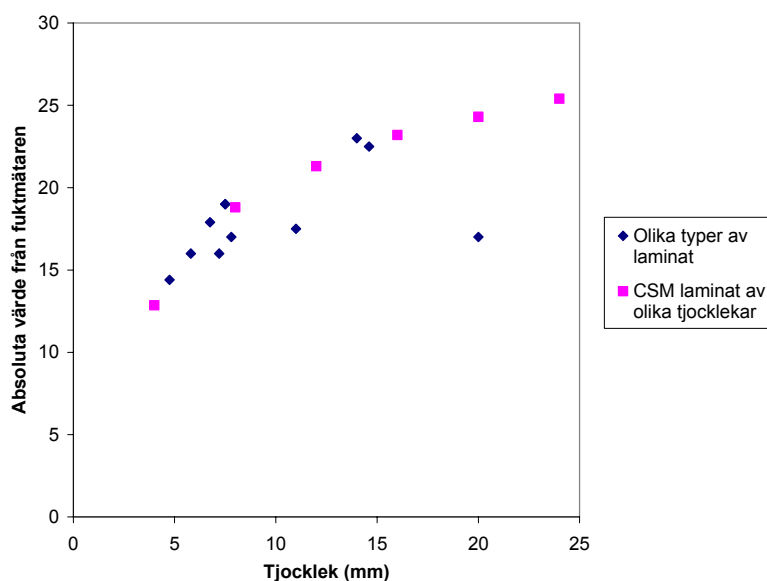


Figur 78. Ökningen av fuktmätvärdet mot extra-vattenabsorption hos CSM laminat tillverkade med ett vinylesterharts och olika glasfiberarmeringar.

Figure 78. Moisturemeter increase versus the additional absorption of CSM laminates made with vinyl ester resin and different glass fibres.

Fuktmätningar har utförts både i laboratorium och i fält för att sammanställa referensvärden samt för att studera inverkan av tjockleken på mätvärdet. Figur 79 visar de absoluta fuktmätvärdena mot tjockleken där de blå punkterna representerar olika typer av laminat (CSM-laminat, WR-laminat, handupplagd laminat, laminat med spärrskikt och styrkelaminat) och de röda punkterna värden för CSM-laminat med olika tjocklekar. Tjockleken har i detta fall ökats genom att lägga flera lager av samma CSM-laminat över varandra. Alla laminat var oexponerade och innehöll endast en mindre mängd fukt, motsvarande luftfuktigheten. Generellt visar kurvorna överensstämmelse fastän större avvikelser kan förekomma för olika laminattyper. Det absoluta värdet ökar med tjockleken. Detta kan tolkas som att instrumentet i första hand registrerar skikten som ligger närmast medan inflytandet av de bakomliggande skikten avtar med djupet. Som ett referensvärde i samband med rökgasreningsutrustning kan nämnas att exponerat laminat från en skrubber (handupplagt laminat, spärrskikt 3 mm, totaltjocklek 15 mm) visade ett värde på 22 till 23.

Även en del studier på åldrat laminat samt på laminat med vissa tillsatser och kolfibermatta genomfördes och resultaten redovisas i Tabell 23. Vattnets effekt på laminat med CSM och WR-armering är större än på lindat laminat enligt mätningar med fuktmätare. Detta stämmer bra överens med erfarenheter från praktiken och undersökningar i mikroskop. Kolfiber i ytmattan stör mätningen med fuktmätare och kiselkarbid som tillsats i spärrskiktet ökar referensvärdet något.



Figur 79. Det absoluta fuktmetervärdet mot tjockleken hos CSM-laminat med olika tjocklekar (olika tjocklekar uppnåddes genom att lägga flera 4 mm tjocka, lika laminat över varandra) och hos olika typer av laminat som t.ex. rör- och skrubberlaminat.

Figure 79. Absolute moisturemeter value versus the thickness of CSM laminates (different thicknesses obtained by arranging several 4 mm thick and similar CSM laminates on top of each other) and of different types of laminate including e.g. piping and scrubber laminate.

Tabell 23. Fuktmetervärden för olika typer av exponerat och oexponerat laminat.

Table 23. Moisturemeter values for different types of unexposed and exposed laminate.

Laminattyp	Exponeringsförhållanden	Tjocklek (mm)	Fuktvärde
Fiberlindat rör utan spärrskikt	Oexponerat	3	15
	Exponerat för 80°C vatten i 3 år	3	23-25
Laminat bestående av endast WR	Oexponerat	7,5	18
	Exponerat för 80°C vatten i 3 år	7,5	36
Handupplagt styrkelaminat med alternerande CSM och WR	Oexponerat	10	17-18
	Exponerat för 80°C vatten i 3 år	10	35-40
Laminat med kolfiberytmatta	Oexponerat	4-10	75-100
Laminat med kiselkarbid som tillsats i spärrskikt	Oexponerat	7-16	25-30
Sandfyllda avloppsrör typ Hobas	Oexponerat	11	20-21

Bilaga F - Spektroskopiska metoder

Raman-spektroskopi

Följande material studerades med ett RapidID instrument från DeltaNu/Aztec, Tabell 24. Materialen bestod av rena hartsplattor tillverkade med olika hartstyper (vinylesterharts, novolackharts, bisfenol A polyester harts, polyuretanmodifierat vinylesterharts) och motsvarande CSM laminat (E-glass M123). För novolackhartset tillverkades plattor med olika uthärtningsgrader, d.v.s. hartsplattorna uthärdades vid olika temperaturer. Även ett prov uttaget från en 30-årig skrubber ingick (bisfenol A polyesterharts i originallaminatet, novolackharts i reparationslaminatet).

Tabell 24. Material som ingick i studien med Raman-spektroskopi. T_g mättes med DSC och reststyrenhalten uppskattades från DSC exotermen.

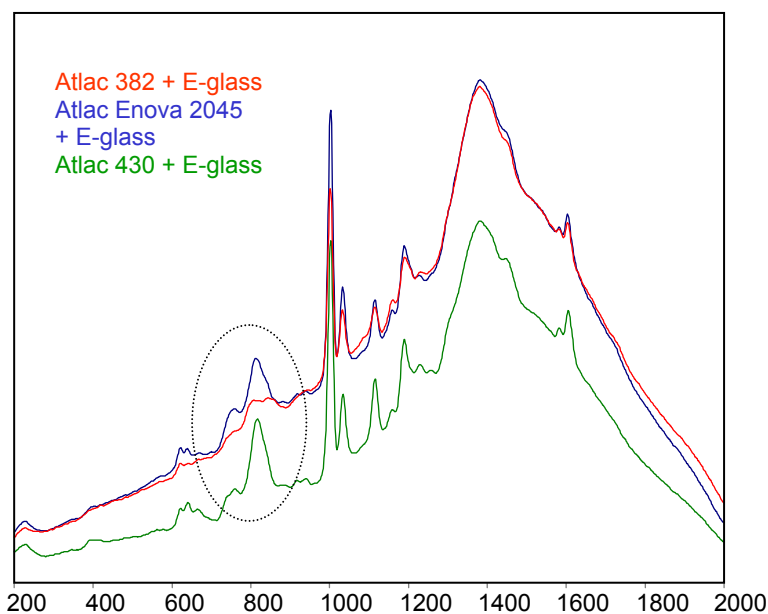
Table 24. Materials studied with Raman spectroscopy. T_g was determined from DSC measurement. The residual styrene content was estimated from the DSC exotherm.

Produkt	Hartstyp	Materialtyp	Efterhärdning	T_g (°C)	Uppskattad reststyrenhalt (Vikts%)
Atlac 382	Bisfenol A fumaratpolyester	Clear cast och CSM laminat	100°C, 10 h	-	-
Atlac 430	Bisfenol A epoxi-baserad vinylester	Clear cast och CSM laminat	100°C, 10 h	-	-
Atlac E-Nova 2045	Uretan-modifierad bisfenol A epoxi-baserad vinylester	Clear cast och CSM laminat	100°C, 10 h	-	-
Dion 9800	Novolack epoxi-baserad vinylester	Clear cast	Ingen	47	7
		Clear cast	40°C 6 h	59	5,7
		Clear cast	60°C 6 h	85	2,6
		Clear cast	80°C 6 h	102	0,8
		Clear cast	90 + 150°C	153	<0,01
		CSM laminat	100°C, 10 h	-	-

Figur 80 visar en jämförelse av Ramanspektra för tre olika hartser med glasfiberarmering. Glasfiberarmeringen i laminatet leder till en kraftig ökning av baslinjen jämfört med kurvorna för rent harts och baslinjustering är nödvändig för att förtydliga skillnaderna mellan kurvorna. Den korregerade kurvan för novolack CSM-laminatet kan ses i Figur 81. Det finns skillnader i kurvorna som kan användas för att identifiera hartstyperna bisfenol A polyester, vinylester och novolack vid topparna kring 710 och 800 cm^{-1} . Skillnaderna mellan en vanlig vinylester och en uretanmodifierad vinylester är dock små, vilket även gör en identifiering svårare.

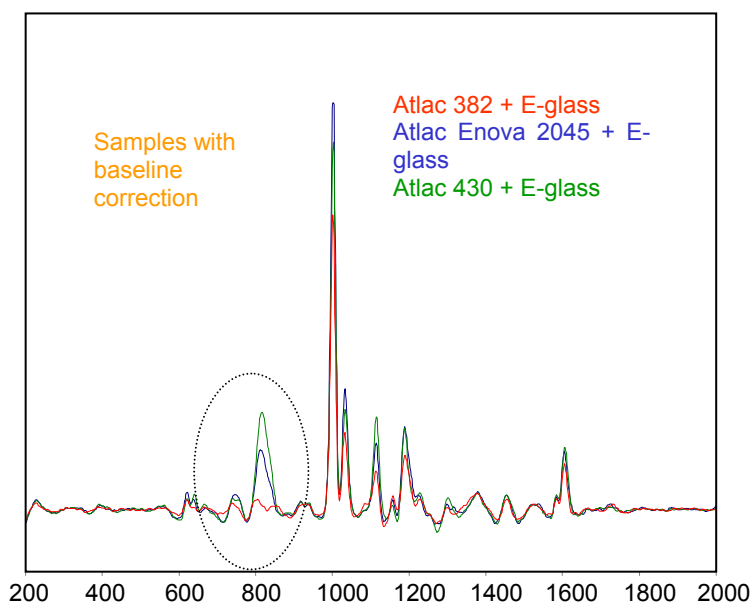
Figur 82 visar en jämförelse av laminat (novolack) med olika uthärtningsgrader. Skrivars et al²⁰ har utvecklat en metod att följa härdreaktionen i styrenlösta härdplaster genom att följa minskningen av styrendubbelbindningen som representeras av toppen vid 1630 cm^{-1} med 1600 cm^{-1} toppen som referens. I detta fall har både toppen vid 1425 och vid 1630 cm^{-1} valts för att följa reststyrenhalten, Figur 83. Dubbelbindningshalten

av styrenet minskar tydligt med efterhärldningstemperaturen. Tekniken har således förutsättning att användas för att bestämma uthärdningsgraden och reststyrenhalten.



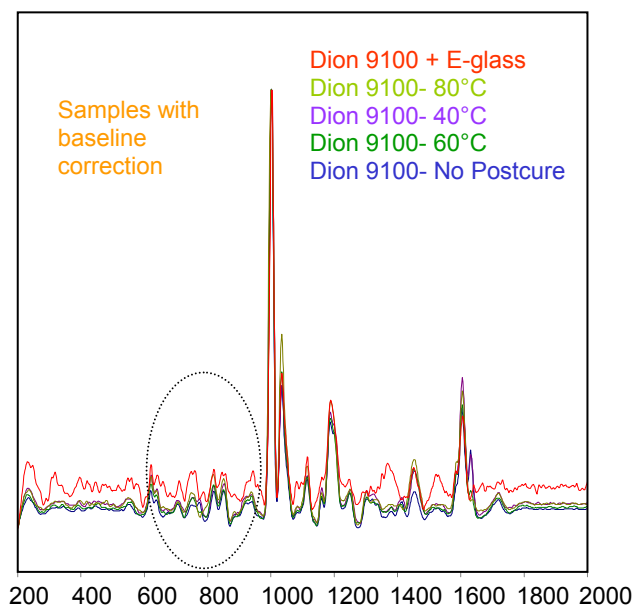
Figur 80. Spektra för CSM-laminat av bisfenol A polyester, vinylester och uretanmodifierad vinylester utan baslinjejustering. Närbild av området 200-2000 cm^{-1} .

Figure 80. Spectra of CSM laminate made with bisphenol A polyester, vinyl ester and urethane-modified vinyl ester without baseline correction. Close-up of the area 200 to 2000 cm^{-1} .



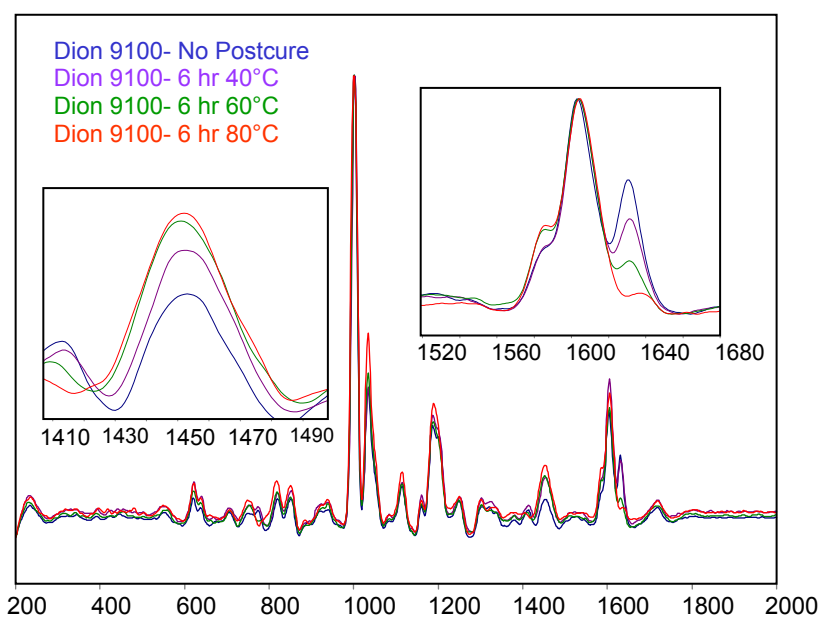
Figur 81. Spektra för CSM-laminat av bisfenol A polyester, vinylester och uretanmodifierad vinylester med baslinjejustering.

Figure 81. Spectra of CSM laminate made with bisphenol A polyester, vinyl ester and urethane-modified vinyl ester with baseline correction.



Figur 82. Spektra för hartsplattor och CSM-laminat gjorda med ett novolackharts med olika uthärdningsgrader. Med baslinjejustering.

Figure 82. Spectra of clear castings and CSM laminate made with bisphenol novolac epoxy-based vinyl ester having different degrees of cure. Baseline corrected.

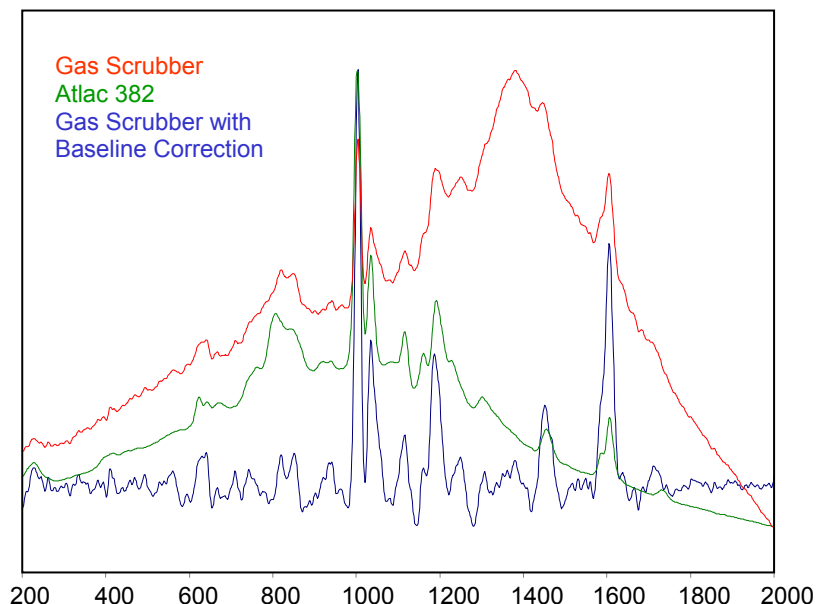


Figur 83. Spektra för CSM laminat av bisfenol A polyester, vinylester och uretanmodifierad vinylester utan baslinjekorrektur.

Figure 83. Spectra of CSM laminate made with bisphenol A polyester, vinyl ester and urethane-modified vinyl ester.

Ett prov från en 30-årig skrubber som ursprungligen var gjord med ett bisfenol A polyester harts men som reparerades med ett novolackharts, analyserades med RapidID och spektra jämförs här med bisfenol A polyesterhartsets spektrum, Figur 84. Innerytan var något skadat efter åren i drift vilket leder till ett hackigt spektrum som försvårar

untvärderingen. Överensstämmelsen mellan provets spektrum och referensspektrumet är dålig. Det kan dock vara att analysen utfördes på material från reparationsstället, dvs på novolackhartset. En jämförelse med referensspektrumet för novolackhartset ger betydligt bättre överensstämmelse.



Figur 84. Jämförelse av spektrum med och utan baslinjejustering för det 30-åriga skrubberlaminatet och spektrum för ett bisfenol A polyesterharts.

Figure 84. Comparison of the spectra of the 30-year-old scrubber laminate with and without baseline correction and of a bisphenol A based polyester resin.

FTIR-spektroskopi

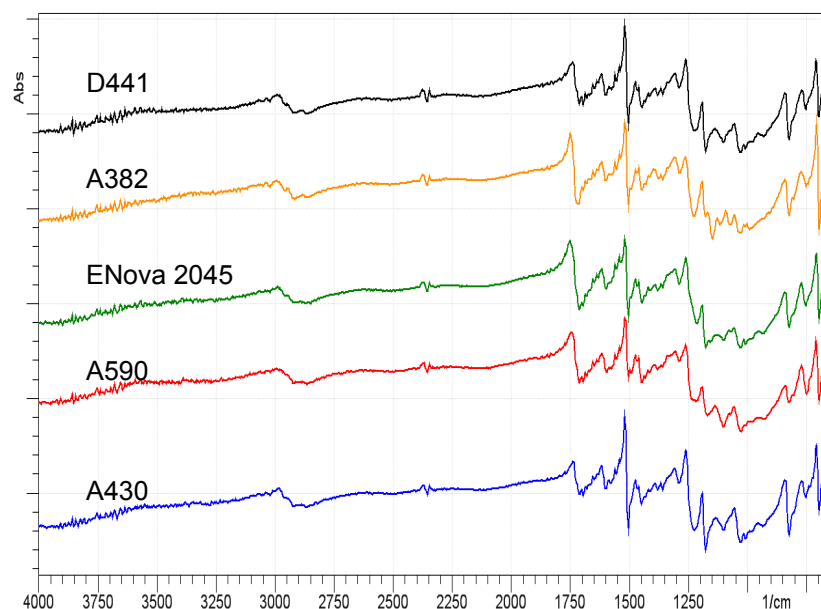
Rena hartsplattor och motsvarande CSM-laminat samt fältprov skickades till A2 Technologies för analys med ett handhållet FTIR-instrument av typ Exoscan, Tabell 25. Materialen var efterhårdade. Exoscaninstrumentet som kan användas både i kontaktfri mätning (diffuse mode, avstånd upp till 6 mm från provet) och mätning med kontakt (reflectance mode), har en upplösning på 4 cm⁻¹. Det mäter inom intervallet 4000 – 650 cm⁻¹.

Tabell 25. Material som ingick i studien med FTIR-spektroskopi (Exoscan, A2 Technology).

Table 25. Materials studied with FTIR spectroscopy (Exoscan, A2 Technology).

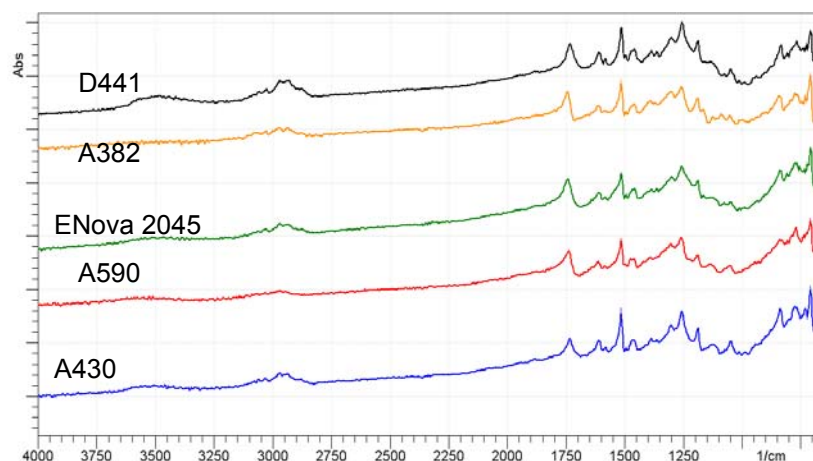
Prov	Hartstyp	Kommentar
Atlac 382	Bisfenol A fumaratpolyester	
Atlac 430	Bisfenol A epoxi-baserad vinylester	
Derakane 441	Bisfenol A epoxi-baserad vinylester	Skiljer sig från Atlac 430 i styrenhalt (ca 6 % lägre)
Atlac E-Nova 2045	Uretan-modifierad bisfenol A epoxi-baserad vinylester	
Atlac 590	Novolack epoxi-baserad vinylester	

Skrubberlaminat	Insida novolack, utsida bisfenol A polyester	Insida angripen, utsida topcoat
Rör för ClO ₂	Bisfenol A epoxi-baserad vinylester	Klordioxidangrepp insida



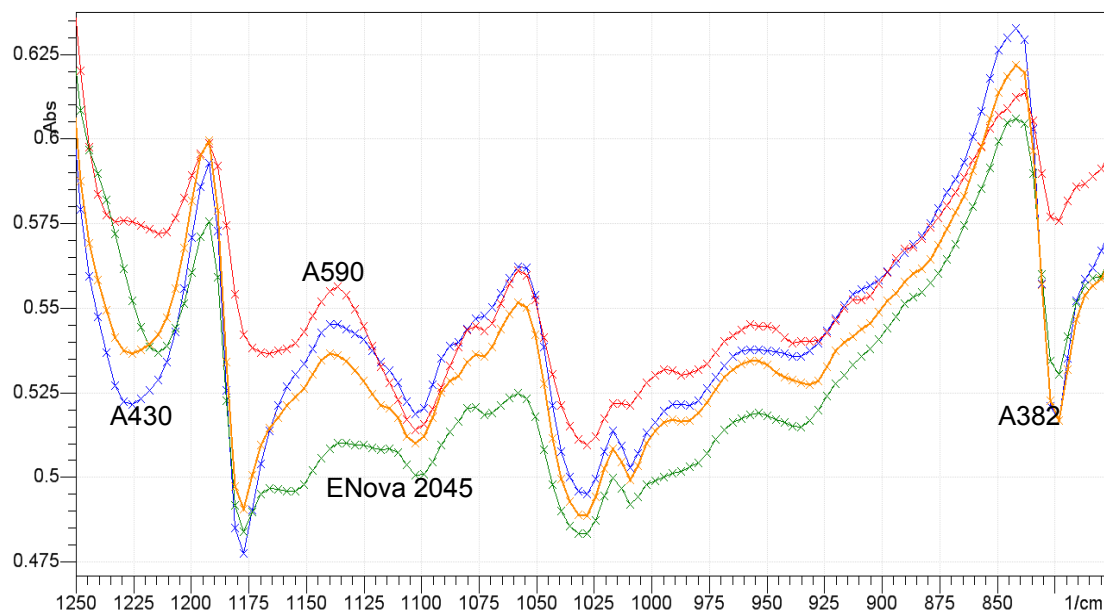
Figur 85. Jämförelse av spektra för laminat tillverkade med olika hartstyper. Reflectance mode.

Figure 85. Comparison of spectra for CSM laminates made with different resin types. Reflectance mode.



Figur 86. Jämförelse av spektra för laminat tillverkade med olika hartstyper. Diffuse mode.

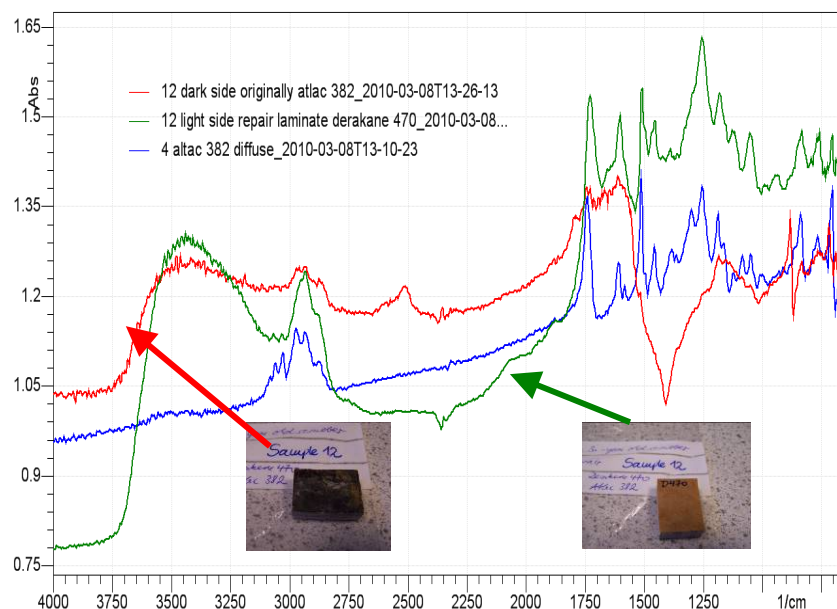
Figure 86. Comparison of spectra for CSM laminates made with different resin types. Diffuse mode.



Figur 87. Jämförelse av spektra för laminat tillverkade med olika hartstyper inom området 1250 till 800 cm^{-1} . Reflectance mode.

Figure 87. Comparison of spectra for CSM laminates made with different resin types within the interval 1250 till 800 cm^{-1} . Reflectance mode.

Fältproven kunde endast undersökas med diffus mätning (kontaktfri) eftersom ytan var för matt. Mätningen kunde störas kraftigt när ytan var mycket skadad, Figur 88.



Figur 88. Jämförelse av spektra för skrubberlaminat och olika hartstyper inom området 1250 till 800 cm^{-1} . Reflectance mode.

Figure 88. Comparison of spectra scrubber laminate and different resin types within the interval 1250 till 800 cm^{-1} . Reflectance mode.

Bilaga G - Identifiering av sprickor med penetrant

”Magnaflux AL-4B Water-Soluble Fluorescent Penetrant” tillverkat av Magnaflux, en nedbrytbar, fluorescerande, vattenbaserad penetrant, testades med avseende på sprickdetektering och kompatibilitet med olika plaster. Penetranten fluorescerar under bestrålning med UV ljus (365 nm) och är en ”low sensitive penetrant” (level 1). AL-4B innehåller vatten, fluorescerande färgämne, emulgeringsmedel och lösningsmedel. Enligt säkerhetsdatabladet innehåller produkten 2-(2-butoxi-etoxy)etanol (10-50 vikts%) som lösningsmedel och alkoholetoxylat (5-15 vikts%) som tensid.

Kompatibilitet med olika plaster

Vissa lösningsmedel kan t.ex. orsaka kritisk svällning i polymera material. Lösningsmedel och även tensider kan utlösa spänningsskorrosionsprocesser (”environmental stress cracking”). Uppgifter om kompatibilitet erhöles i viss mån från kemikalieresistans-tabeller⁴⁵ ⁴⁶ ⁴⁷, men även från sorptions- och spänningsskorrosionsexperiment. Tabell 26 anger den maximala temperaturen som vanliga hårdplaster (GAP) kan utsättas för i kontakt med ren 2-(2-butoxi-etoxy)etanol och ren tensid (alkoholetoxylat C12-C14). Den lägsta temperaturen är 25°C, i genomsnitt dock ca 40°C. Inga uppgifter var tillgängliga för olika termoplastmaterial.

Tabell 26. Data ur kemikalieresistanstabellerna för olika Derakane och Atlac-hårdplaster.

Table 26. Data on chemical resistance for different Derakane and Atlac thermosets.

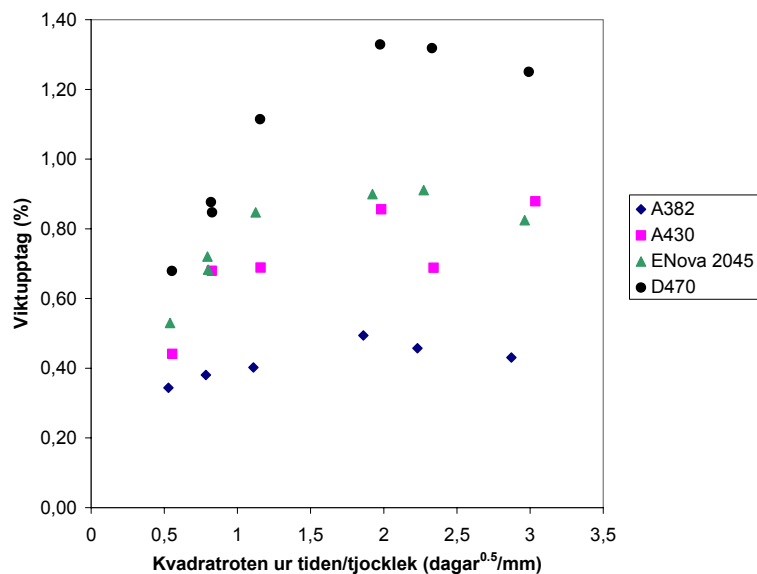
Maximal användnings-temperatur, °C	D411 ¹	D441	D470	A430 ²	A590	A ENova 2045	A382
2-(2-butoxi-etoxy)etanol (100%)	40	40	40	35	50	50	40
Alkoholetoxylat C12-C14 (100%)	25	40	50	- ³	-	-	-

¹ D = Derakane

² A = Atlac

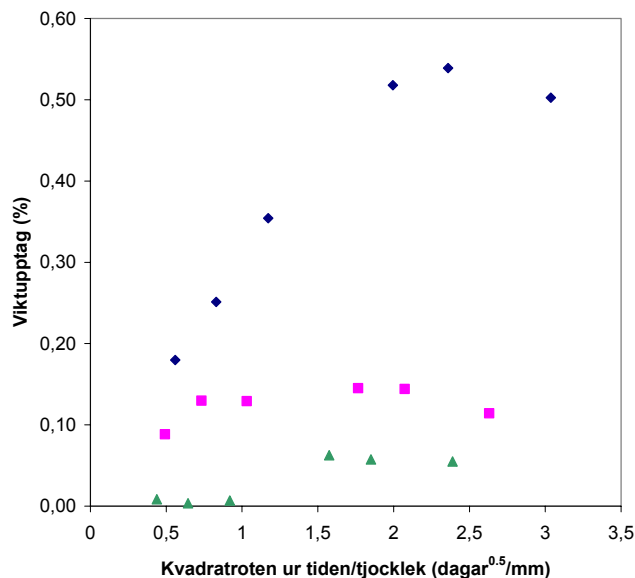
³ - = inga uppgifter tillgängliga

Penetrantens kompatibilitet med olika plaster (polypropen PPH Agru Daplen BE60, PVC-U grå Georg Fischer, CPVC typ 88708 Georg Fischer, vinylester, novolack, bisfenol A polyester och polyuretanmodifierad vinylester) testades även i sorptionsförsök. Provbitar exponerades i penetrantlösningen vid 40°C för att accelerera provningen, och viktupptag och tjockleksändring registrerades. Figurerna 89 och 90 visar viktupptag mot kvadratroten ur tiden för de olika polymera materialen. Tjockleken ändrades inte nämnvärt. Inga kritiska sorptionsvärden eller avvikande sorptionskurvor observerades för de studerade materialen i korttidsförsök.



Figur 89. Viktupptag mot kvadratroten ur tiden normerad med tjockleken för olika hårdplaster (utan glasfiberarmering) exponerade för penetranten vid 40°C.

Figure 89. Weight increase versus the square root of time normalised to the thickness for different thermoset materials exposed to penetrant solution at 40°C.

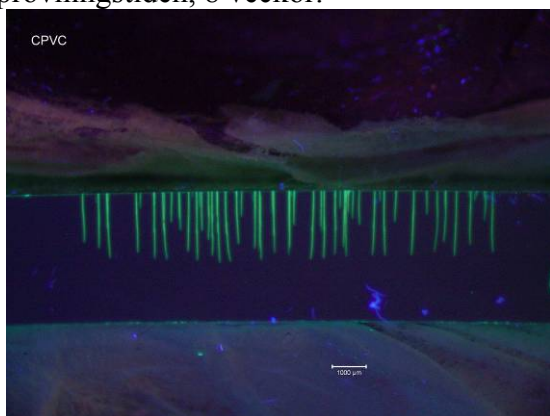


Figur 90. Viktupptag mot kvadratroten ur tiden normerad med tjockleken för olika termoplaster exponerade för penetranten vid 40°C.

Figure 90. Weight increase versus the square root of time normalised to the thickness for different thermoplastic materials exposed to penetrant solution at 40°C.

Spänningskorrosionsprovning med konstant töjning (strain corrosion testing) utfördes på termoplast- och hårdplastmaterialen. Raka provstavar belastades i 3-punkts böjning och exponerades för penetrantlösningen vid rumstemperatur. Den initiala spänningen motsvarade en töjning på 1,2 %, men en relaxation av spänningen är väntad. Efter fyra veckors exponering verkade fina sprickor ha bildats i CPVC- och PVC-materialen

medan de andra materialen (PP, PE, PVDF, ECTFE, hårdplaster) inte visade tecken på sprickbildning. Efter 12 veckors exponering hade i olika utsträckning liknande sprickor bildats i de provade hårdplasterna. Polerade tvärsnitt undersöktes under mikroskop med UV-ljus och ett exempel visas i Figurer 91 till 94. Mikroskopundersökningen visade att sprickorna var av typ "crazes". Crazes är lokala områden med orienterat material som uppkommit genom förekomsten av dragspänningar och ett kemiskt ämne som mjukgör materialet, dvs spänningsskorrosionsprocesser. Effekten var störst i CPVC- och PVC-material som båda är känsliga för vissa alkoholer och tensider⁵⁷. För CPVC har fall av spänningsskorrosionsskador rapporterats i samband med små mängder tensider och tensidlösningar som använts i läcksökningstester. Även i hårdplasterna förekom liknande sprickbildning, men initieringstiden var mycket längre. Effekten var störst i vinylesterhartset Derakane 441 och minst i bifenol A fumaratpolyestern Atlac 382. Inga tecken på spänningsskorrosion observerades i PE, PP, PVDF och ECTFE under provningstiden, 8 veckor.

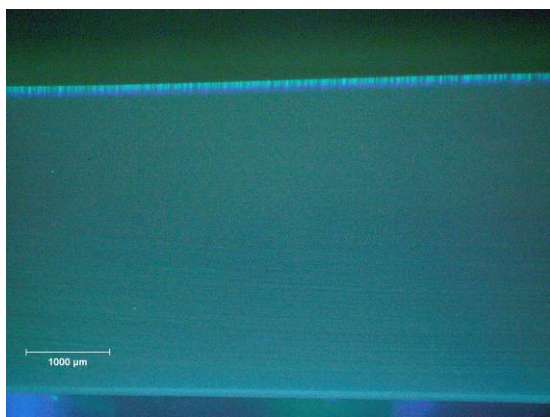


Figur 91. Polerat tvärsnitt av CPVC efter exponering för penetranten i 3-punktsböjning i 8 veckor (25°C).



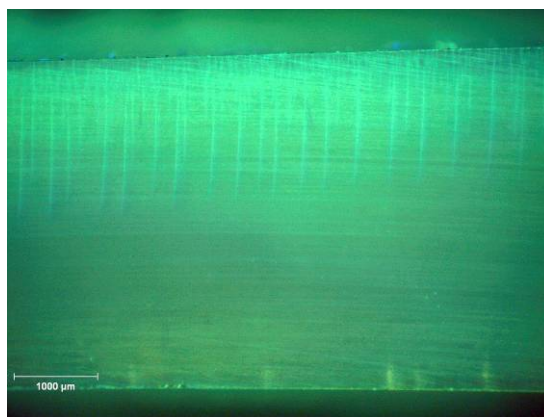
Figur 92. Polerat tvärsnitt av PP efter exponering för penetranten i 3-punktsböjning i 8 veckor (25°C).

Figure 91. Polished cross-section of CPVC exposed to penetrant solution in 3-point bending for 8 weeks (25°C).



Figur 93. Polerat tvärsnitt av Atlac 382 efter exponering för penetranten i 3-

Figure 92. Polished cross-section of PP exposed to penetrant solution in 3-point bending for 8 weeks (25°C).



Figur 94. Polerat tvärsnitt av Derakane 441 efter exponering för penetranten i

⁵⁷ Corzan Piping Systems - Chemical Resistance Data, Lubrizol, January 2009

punktsböjning i 12 veckor (25°C).

3-punktsböjning i 12 veckor (25°C).

Figure 93. Polished cross-section of Atlac 382 exposed to penetrant solution in 3-point bending for 12 weeks (25°C).

Figure 94. Polished cross-section of Derakane 441 exposed to penetrant solution in 3-point bending for 12 weeks (25°C).

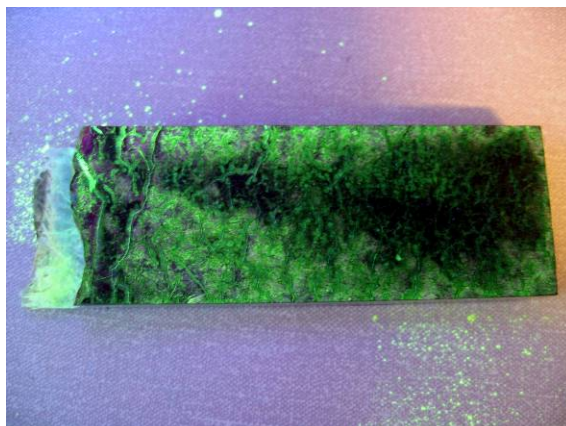
Penetrantens funktionalitet

Penetrantens funktionalitet testades på olika provföremål, som inkluderade både material insamlat från drift och tillverkat på laboratorium. I ett första steg användes penetranten utan framkallare. Figur 95 visar ett exempel på laminat med sprickbildning i innerytan. Ytan är angripet efter flera års kontakt med koncentrerad saltsyra vid hög temperatur. Mindre ytsprickor har bildats liksom djupare sprickor varav en ledde till ett haveri av tanken. Bakgrundsfluorescensen var mycket kraftig efter rengöring med vatten fastän ett penetrantsystem med låg känslighet har använts, Figur 96. Man kan inte särskilja bakgrundsfluorescensen och sprickorna. Vid noggrannare rengöring framträder ytsprickor samt djupare sprickor. Utan användning av framkallare är det svårt att skilja mellan de djupa sprickorna och ytsprickor. Framkallaren drar upp penetranten ur sprickan. Sprickans storlek kan bedömas från blödningen ur sprickan efter en viss referenstid. Ofta rekommenderas en slutbedömning efter 20 min. Figurerna 97 och 98 visar en annan del av samma tanklaminat som först har behandlats med penetranten (20 min), därefter har ytan rengjorts mycket noggrant och en torrframkallare (Magnaflux ZP-4B) har applicerats i ett tunt lager. Provet granskades med UV-ljus efter 5, 10, 15 och 20 min verkningstid. Penetranten bidrar till att minska bakgrundsfluorescensen och gör skillnaden mellan ytsprickor och djupare sprickor tydligare. Verkningstiden har dock mindre betydelse för blödning av penetranten från sprickorna. Blödningen förefaller liten med tanke på att sprickdjupet i vissa fall uppgår till 4 till 5 mm. En möjlig förklaring är att sprickorna är förgrenade i GAP-materialet och att inträngning och blödning med torrframkallare därför är mindre än för andra material. Liknande erfarenheter erhöles med genomgående sprickor i GAP-material. För att observera penetration av penetranten genom sprickor i GAP måste skadan vara mycket kraftig. I GAP-rör som testats till weeping, dvs där trycket i röret har ökats så att sprickor bildats i hartsmatrisen och vatten läckt ut, var det inte möjligt att påvisa dessa sprickor med penetrant på utsidan av röret.



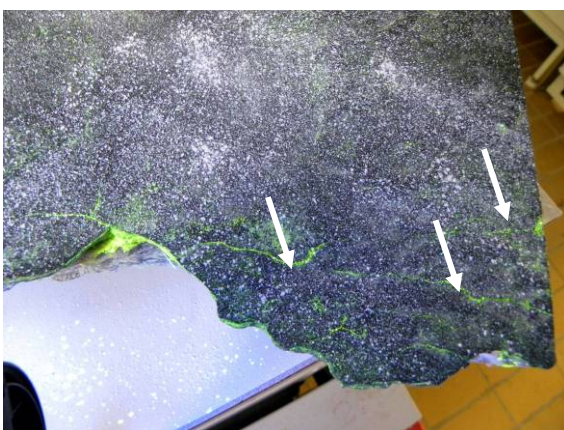
Figur 95. Laminat med sprickskador, exponerat för saltsyra vid hög temperatur under många år.

Figure 95. Laminate with crack damage, exposed to hydrochloric acid at elevated temperature for several years.



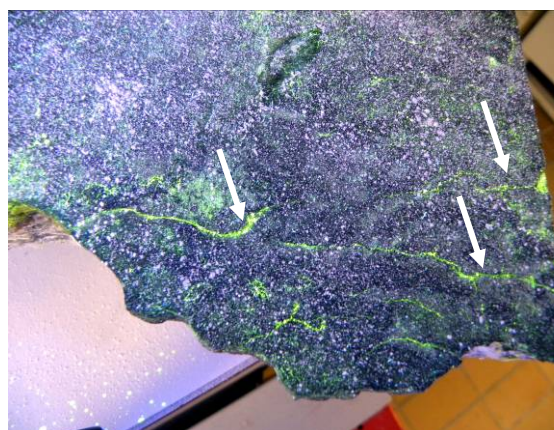
Figur 96. Laminat efter behandling med penetrant (inverkningsstid 2 min) och efterföljande enkel rengöring med vatten.

Figure 96. Laminate after treatment with penetrant (exposure time 2 min), and basic cleaning with water.



Figur 97. Laminatet efter behandling med penetrant (20 min), efterföljande rengöring och behandling med torrframkallare (5 min).

Figure 97. The laminate after treatment with penetrant (20 min), cleaning and treatment with dry developer (5 min).

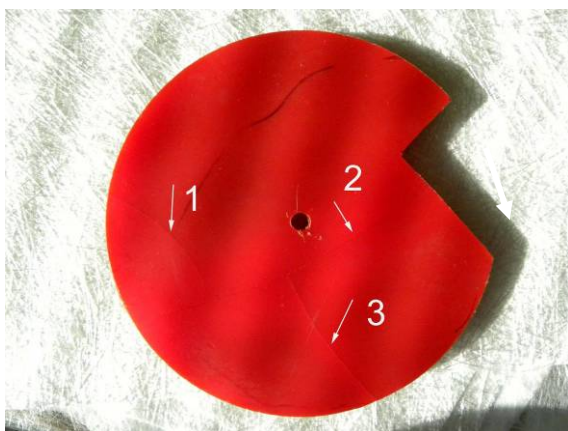


Figur 98. Laminatet efter behandling med penetrant (20 min), efterföljande rengöring och behandling med torrframkallare (20 min).

Figure 98. The laminate after treatment with penetrant (20 min), cleaning and treatment with dry developer (20 min).

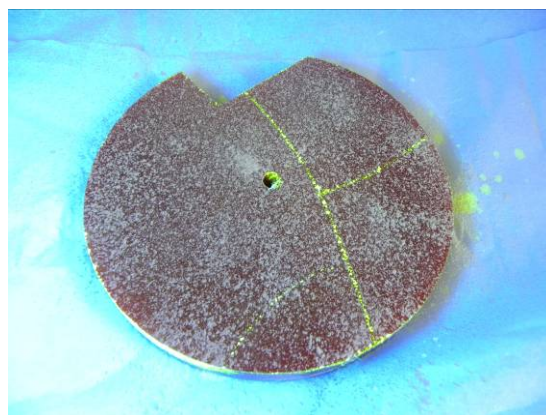
De följande bilderna ger ytterligare exempel på hur penetranten och framkallaren fungerar vid olika typer av skador och material. Figurer 99 och 100 visar termoplastlinad GAP (röd PVC som lining) som skadats genom sprickbildning i linern. Sprickorna är markerade med 1 till 3. 1 avser en ytspricka med ett djup av ca 1-2 mm, medan sprickorna 2 och 3 är genomgående (4 mm). Verkningsstiden efter att torrframkallaren hade applicerats hade en obetydlig effekt på penetrantens blödning.

Det är dock möjligt att skilja mellan mindre djupa respektive genomgående sprickor från blödningens omfattning.



Figur 99. PVC-linad GAP med sprickbildning i liningen. Spricka 1 ca 1 – 2 mm djup, sprickor 2 och 3 ca 4 mm djupa.

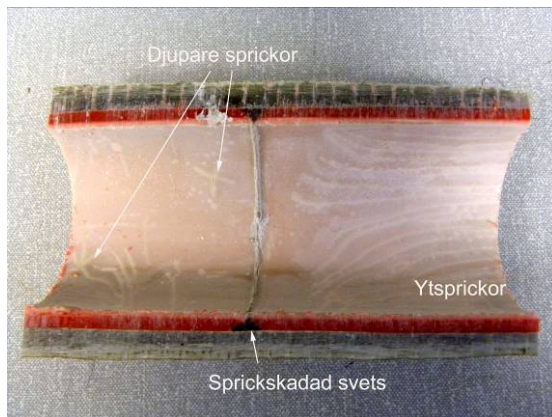
Figure 99. PVC-lined FRP with crack formation. Crack 1 1 – 2 mm deep, cracks 2 and 3 ca 4 mm deep.



Figur 100. Provet efter behandling med penetrant (20 min) och framkallare (20 min).

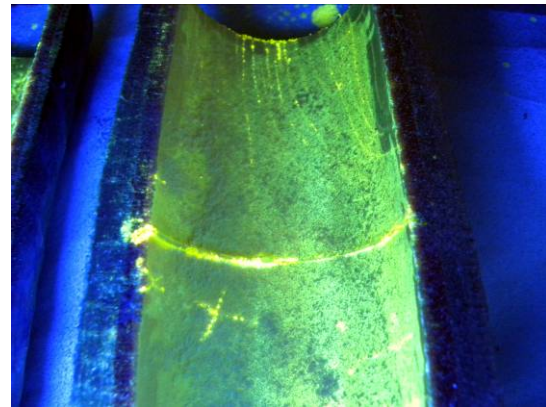
Figure 100. Sample after treatment with penetrant (20 min) and dry developer (20 min).

Figurerna 101 och 102 visar ett PVC-linad GAP-rör från insidan (röd PVC). Röret har använts för transport av restsyra och ett korroderat, vitmissfärgat skikt har bildats. Det finns ytsprickor (ca 500 µm), djupare sprickor (1 – 2 mm) och en sprickskada i svetsen. Efter behandling med penetrant fluorescerar hela innerytan, dvs det korroderade skiktet. Med hjälp av torrframkallare framhävs de djupare sprickorna och sprickan i svetsen, men även de ytliga sprickorna är synliga till viss del. Ökad exponeringstid för torrframkallaren förbättrade kontrasten något.



Figur 101. PVC-linat GAP-rör efter exponering för restsyra. Ett korroderat skikt har bildats, samt ytsprickor, djupare sprickor och skada i svets.

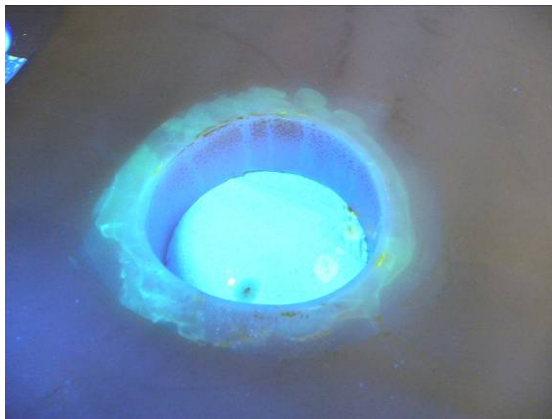
Figure 101. PVC-lined FRP pipe after exposure to spent acid. A corroded layer has formed as well as surface cracks, deeper cracks and damage in the weld.



Figur 102. Provet efter behandling med penetrant (20 min) och torrframkallare (20 min).

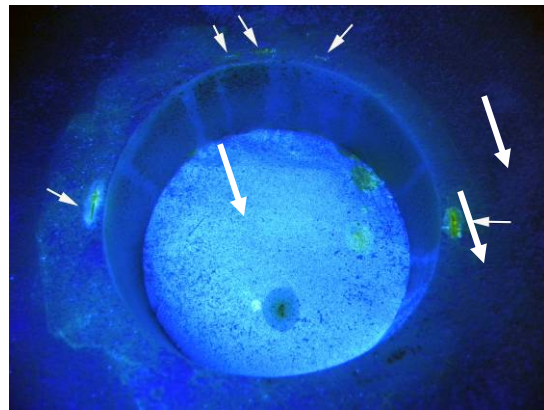
Figure 102. Sample after treatment with penetrant (20 min) and dry developer (20 min).

Figurer 103 och 104 visar en fluorplastlining till en GAP-rörledning med stuts som har behandlats med penetranten och torrframkallaren. Kraftig bakgrundfluorescens förekom även efter noggrant rengöring av ytan efter att penetranten hade verkat ca 20 min. Framkallaren framhävde håligheter i svetsen mellan rörledning och stuts. Blödningen var kraftigast för den största håligheten, och skillnaderna trädde fram tydligare med ökad inverkningsstid av torrframkallaren. Om håligheterna eller sprickorna var genomgående kontrollerades också. Ingen penetration av penetranten observerades dock på utsidan.



Figur 103. Fluoroplastliner med studs i ett GAP rör som har behandlats med penetrant i 20 min. Efter noggrann rengörning.

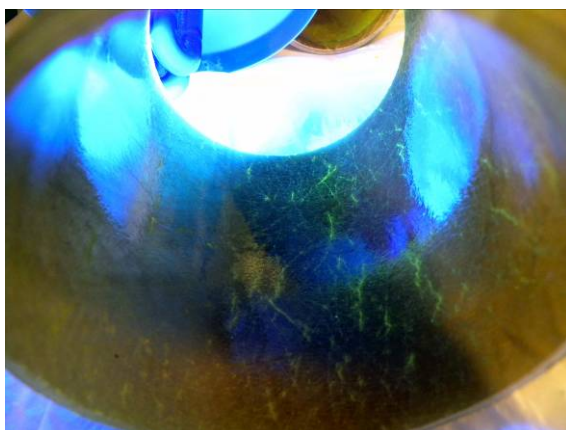
Figure 103. Fluoroplastic liner with nozzle in FRP pipe treated with penetrant for 20 min. After careful cleaning.



Figur 104. Provet efter behandling med penetrant (20 min) och torrframkallare (20 min).

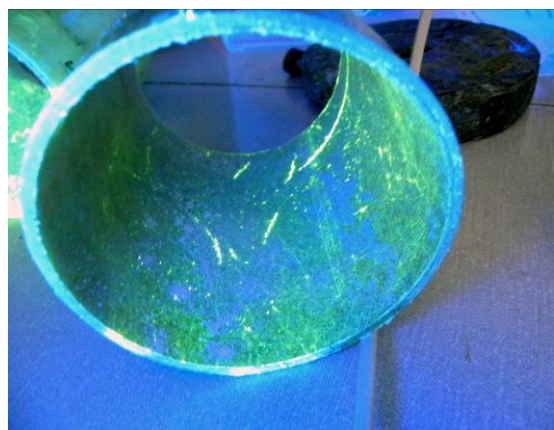
Figure 104. Sample after treatment with penetrant (20 min) and dry developer (20 min).

Figurerna 105 till 108 visar insidorna hos två olika GAP-rör som har testats i tryckprov till weeping. Genomgående sprickor kunde inte påvisas med penetranten. Däremot kunde vissa sprickor i spärrskiktet synliggöras i enlighet med resultat från fraktografiundersökningar. Användning av torrframkallare förstärkte effekten något för Rör 1. För Rör 2 kunde penetranten dock tränga in i det lätt påverkade ytmattaskiktet (syntetisk ytmatta i stället för C-glas ytmatta som i Rör 1) vilket ledde till kraftig bakgrundsfluorescens och försvårade upptäckt av sprickor. Användning av torrframkallare förbättrade inte kontrasten nämnvärt. Generellt ledde ökad verkningstid för torrframkallaren inte till ökad blödning från sprickorna.



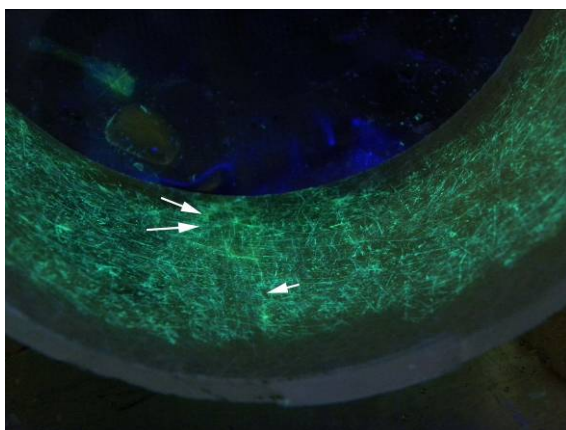
Figur 105. Rör 1: GAP rör, testat till weeping, som har behandlats med penetrant i 20 min. Efter noggrann rengörning.

Figure 105. Pipe 1: FRP pipe, tested to weeping, and treated with penetrant for 20 min. After careful cleaning.



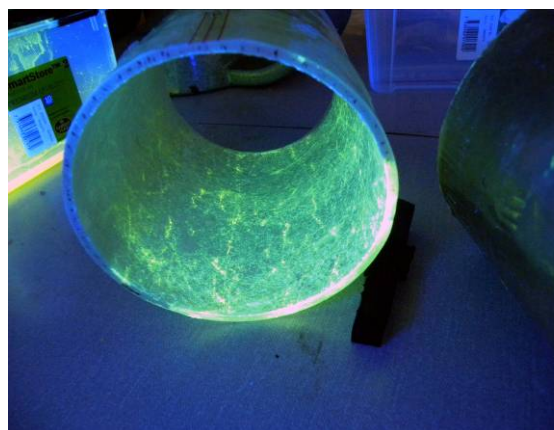
Figur 106. Provet efter behandling med penetrant (20 min) och torrframkallare (20 min).

Figure 106. Sample after treatment with penetrant (20 min) and dry developer (20 min).



Figur 107. Rör 2: GAP rör, testat till weeping, som har behandlats med penetrant i 20 min. Efter noggrann rengörning.

Figure 107. Pipe 2: FRP pipe, tested to weeping, and treated with penetrant for 20 min. After careful cleaning.



Figur 108. Provet efter behandling med penetrant (20 min) och torrframkallare (20 min).

Figure 108. Sample after treatment with penetrant (20 min) and dry developer (20 min).

Användning av torrframkallare kan således underlätta bedömningen av sprickbildning med hänsyn till bakgrundsfluorescens och absorption av penetrant i materialets yttersta skikt. Den kan i viss mån även hjälpa vid en bedömning av ifall sprickorna är ytliga eller djupare genom storleken på blödningseffekten. För GAP-material verkade dock skillnaden i blödning från ytsprickor och djupgående sprickor vara mindre, vilket kan

bero på att sprickorna är mer förgrenade i de olika laminatskikten. En förbättring av sprickdetekteringen kunde eventuellt uppnås genom att välja en penetrant med högre känslighet, möjligen en röd penetrant synlig i vanligt ljus, i kombination med en torrframkallare. Risken för bakgrundseffekter och kontrasten som ska uppnås måste dock avvägs mot varandra. Eftersom känsligheten hos PVC och CPVC för vissa lösningsmedel och tensider är känd avråds från användning av den testade penetranten. Även vissa hårdplaster har visat en viss påverkan, dock i mindre utsträckning. Använder man penetranten för sådana material måste ytan efter provningen noggrant tvättas för att avlägsna penetranten.

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeteknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig Industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35