

HANDBOK FÖR INSPEKTION AV GLASFIBERARMERAD PLAST

RAPPORT 2015:180



Handbok för inspektion av glasfiberarmerad plast

**JOHAN SAMUELSSON
CAROLINE ANKERFORS
PERNILLA UTTERSTRÖM**

ISBN 978-91-7673-180-2 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport har tagits fram i projekt M 37775 Inspektion och OFP av processutrustning i glasfiberarmerad plast (GAP) (Energimyndighetens projektnummer P 37775) som faller under teknikområde material- och kemiteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Rapporten är en handbok till den skadeatlas som tagits fram i projektet. Skadeatlasen har ISBN-nummer 978-91-7673-181-9 och kan hämtas från Energiforsks webbplats.

Inom ramen för projektet har workshops och andra aktiviteter genomförts och tonvikt har lagts på att få en samsyn i branschen kring skadebedömningar.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Pamela Henderson, Vattenfall; Roger Lundberg, Mälarenergi; Anders Hjörnhede, SP och Lena Loren, General Electric (Alstom).

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm januari 2016

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Sammanfattning

GAP är ett samlingsnamn för en stor grupp material som har den gemensamma nämnaren att de är hårdplaster armerade med glasfiber – glasfiberarmerad plast.

Denna handbok består av fem huvudsakliga delar: en introduktion till de grundläggande begreppen inom GAP-området med ett sammanfattande avsnitt om gällande standarder och normer, metoder för oförstörande provning som inspektionsmetod för statusbedömning, ett avsnitt om olika typer av skador i GAP samt ett avsnitt om reparationer och åtgärder. Handboken avslutas med ett kapitel som beskriver beräkning och datormodellering av defekter.

Kapitlet om GAP sammanfattar begreppet glasfiberarmerad plast och ger en översikt om vad materialet består av och hur det tillverkas. Typiska hårdplastsystem, glasfiber- och armeringstyper beskrivs inledningsvis och kapitlet avslutas med en översiktlig beskrivning av gällande standarder och normer. Aktuella föreskrifters tillämpningsområde och omfattning sammanfattas i en tabell.

Avsnittet om metoder för oförstörande provning (OFP) syftar till att kort beskriva de metoder som finns idag, bl.a. ultraljudsprovning, digitalröntgen och visuell inspektion. Metodernas för-, nackdelar och tillgänglighet diskuteras.

Olika skadetyper beskrivs sedan i det följande kapitlet med bilder och diskuteras med avseende på uppkomst, tillväxt och hur de bör bedömas vid en inspektion.

Avslutningsvis ingår ett kapitel som beskriver modellering av defekter och ger ett exempel på hur beräkning av en defekts påverkan på ett laminat kan gå till.

Handboken är tänkt att vara ett stöd och ge vägledning i hur processutrustning i GAP kan inspekteras och hur skador bör bedömas. Denna handbok är tänkt som ett stöd till den skadeatlas som skrivits i projektet. Atlasen är en mer kortfattad version av denna handbok med ett större fokus på att tydligt beskriva bedömningskriterier och tillämpbara OFP-metoder.

Alla bilder i denna rapport är tagna av Swerea KIMAB, Inspecta Sweden eller Termap om inget annat anges.

Projektet är finansierat av Energiforsk och Energimyndigheten med medfinansiering från Swerea KIMAB samt Inspecta Sweden.

Summary

FRP is a generic name for a large group of reinforced thermoset materials – fibre-reinforced plastic.

This handbook consists of five main parts: an introduction to the basic concepts in the FRP field with a summary of applicable standards and norms, methods for non-destructive testing for status assessment, a section on different types of damages that can be found in FRP and a section on repairs. Finally, the handbook includes a chapter describing computer modelling and calculation of defects.

The chapter on FRP summarises the concept of glass-fibre reinforced plastics and provides an overview of the material in general and how it is manufactured. Typical thermoset systems, glass fibre and reinforcement types are described and the chapter ends with a summary of applicable standards and norms. The scope and extent of current regulations are summarised in a table.

The section on methods for non-destructive testing (NDT) aims to briefly describe the different methods available today, and includes ultrasound, digital radiography and visual inspection. The advantages, disadvantages and availability of the methods are discussed.

In the following chapter, different types of damages are described with pictures and discussed with respect to the origin, growth, and how they should be assessed during inspections.

The final chapter describes computer modelling and provides an example of how calculations and modelling of a defect in a laminate can be done.

The aim of the handbook is to provide support and guidance during inspection and damage assessment of FRP equipment.

This document is intended as an aid to the damage atlas that has been written simultaneously in the project. The damage atlas is a more concise version of this document with greater focus on describing damage types and acceptance criteria more clearly, as well as applicable NDT methods.

All pictures and images in this report were taken by KIMAB, Inspecta Sweden or Termap unless otherwise stated.

The project is financed by Energiforsk and Energimyndigheten with co-financing from Swerea KIMAB and Inspecta Sweden.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	GAP – glasfiberarmerad plast	8
1.1.1	Harts	8
1.1.2	Härdsystem	8
1.1.3	Glasfiber	8
1.2	Uppbyggnad av laminat	10
1.3	Föreskrifter och Standarder	11
1.3.1	Europeiska Direktiv	12
1.3.2	Nationella Föreskrifter	13
1.3.3	Standarder	13
1.3.4	Oförstörande provning och bedömning av defekter	15
1.3.5	Permanenta förband	15
2	Inspektion	17
2.1	Förstörande provning	17
2.1.1	Rondell-/provuttag	17
2.2	Metoder för oförstörande provning (OFP)	20
2.2.1	Visuell inspektion	20
2.2.2	Penetrantprovning	21
2.2.3	Barcolhårdhet	22
2.2.4	Ultraljudsprovning	22
2.2.5	Röntgen	26
2.2.6	Termografi	30
2.2.7	Mikrovågteknik	32
2.2.8	Spektroskopiska metoder	33
2.2.9	Akustisk emission	33
3	Skadetyper	34
3.1	Diffusion	34
3.2	Blåsor	34
3.3	Delaminering	36
3.4	Missfärgning/överhettning	38
3.5	Slagskador	39
3.6	Korrosion	40
3.6.1	Allmätkorrosion	40
3.6.2	Lokal korrosion	40
3.6.3	Erosion/nötning	41
3.7	Spänningskorrosion	42
3.8	Weeping/svettning	43
3.9	Sprickor	43
3.9.1	Struktursprickor	43

3.9.2	Ytsprickor	44
3.9.3	Termiska krympsprickor	44
3.9.4	Utmattningssprickor	44
3.9.5	Uttorkningssprickor	45
3.9.6	Repor	45
3.10	Defekter relaterade till tillverkningen	45
3.10.1	Märken från släppfilmen	46
3.10.2	Torra partier, dry spots	46
3.10.3	Gropar, pits, pinholes	47
3.10.4	Veckad matta	47
3.10.5	Kantförskjutningar och variationer i laminattjocklek	47
3.10.6	Ytligt synliga fibrer	48
4	Om reparationer	49
4.1	Vad gäller vid reparationer och ändringar	49
4.2	Reparationer	49
5	Beräkningar som verktyg	50
5.1	Allmänt	50
5.2	Exempel: Utvärdering av kvarstående hållfasthet av GAP-rör med invändig lokal korrosion	50
5.2.1	Komponent för analys och GAP material	51
5.2.2	Defektgeometri och -storlek	51
5.2.3	Modell och analys	52
5.3	Resultat för utvärdering	54
5.3.1	Defektfritt rör	54
5.3.2	Inverkan av defektdjup	54
5.3.3	Känslighetsanalys	56
5.4	Slutsatser	57
6	Litteraturförteckning	58
7	Svensk-engelsk ordlista	59
8	Tack	60

1 Inledning

1.1 GAP – GLASFIBERARMERAD PLAST

GAP (eng. FRP, fibre-reinforced plastic, eller ibland GRP, glass fibre-reinforced plastic) är ett samlingsnamn för en stor grupp material som har den gemensamma nämnaren att de är hårdplaster armerade med glasfiber – *glasfiberarmerad plast*. GAP är ett kompositmaterial bestående av en hartsmatris som ger kemikaliebeständighet och en armering som står för den mekaniska styrkan. GAP kan tillverkas på många olika sätt och därigenom anpassas för att passa många olika applikationer och miljöer.

Glasfiberarmerade plaster har fått stor användning för hantering av processlösningar eftersom de ofta är mer motståndskraftiga mot korrosiva kemikalier än metalliska material.

1.1.1 Harts

Typiska hårdplastsystem som används vid tillverkning av utrustning i GAP för process- och kemisk industri omfattar bl.a. bisfenol A-epoxibaserade vinylestrar, novolac-epoxybaserade vinylestrar, bisfenol A-fumaratbaserade polyestrar och uretan-modifierade vinylesterhartser. De klart vanligaste hartserna vid konstruktion av processutrustning är dock vinylestrar.

Hartstyperna skiljer sig i både temperatur- och kemikaliebeständighet, där novolac-hartserna generellt är den typ som är mest tålig mot hög temperatur. Det finns sedan ett stort antal varianter på dessa olika hartstyper. De tre största hartsleverantörerna är Ashland, DSM och Reichhold, med Derakane, Atlac och Dion som handelsnamn på sina respektive produktgrupper.

1.1.2 Härdsystem

Hartset är löst i ett lösningsmedel (vanligtvis styren) som förutom att sänka viskositeten även deltar i tvärbindnings- och härdreaktionen. Vanligtvis används någon typ av peroxid (t.ex. MEKP, metyletylketonperoxid) tillsammans med en initiator (vanligtvis koboltbaserad, t.ex. koboltnaftat) som tillsätts för att starta härdningsreaktionen.

I vissa fall används även acceleratorer i härdsystemet (t.ex. DMA, dimetylanilin) för att öka reaktionshastigheten, exempelvis för snabbare härdning vid låga temperaturer. Det finns även koboltfria härdsystem som är baserade på bensylperoxid (BPO) och dimetylanilin.

Härdningsreaktionen är exoterm, d.v.s. det är en reaktion som avger värme vilket utgör en begränsning för hur tjockt laminat som kan tillverkas i ett steg. Ett tjockare laminat måste tillverkas i flera steg med mellanhärdningar, där man låter hartset härda innan man fortsätter att bygga vidare på laminatet. Tiden för en mellanhärdning får dock inte vara för lång då härdningsreaktionen avtar vid kontakt med luftens syre, och ett ytskikt med lägre uthärdningsgrad bildas p.g.a. luftinhibering.

1.1.3 Glasfiber

Armeringen i GAP består främst av glasfiber och man skiljer både mellan olika armerings- och glastyper. De vanligaste glastyperna är E-glas, C-glas och borfritt glas

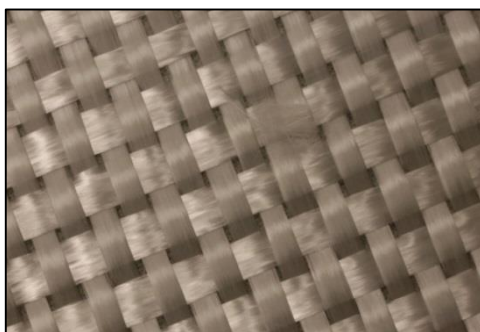
(ECR-glas). Glastyperna skiljer sig i sin kemiska sammansättning och därmed även i korrosionsbeständighet i olika miljöer.



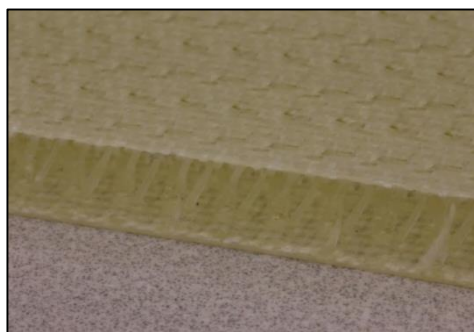
Figur 1 Ytmatta



Figur 2 Chopped Strand Mat, CSM



Figur 3 Rovingväv



Figur 4 3D-väv



Figur 5 Exempel på syntetisk väv, polyester



Figur 6 Roving

De olika armeringstyperna omfattar ytmatta, matta av huggen fiber (*eng. chopped strand mat, CSM*), rovingväv (*eng. woven roving*) eller kontinuerlig armering (*eng. roving*). Även användning av 3D-väv som skapar en luftspalt i laminatet förekommer, Figurer 1-6.

Ytmattan är en tunn glasfibermatta som läggs innerst i laminatet närmast mediet, och vars uppgift är att binda harts till ett tjockare barriärlager snarare än att bidra med någon mekanisk styrka.

Huggen matta, eller chopped strand mat (CSM), tillverkas av ca 50 mm långa avklippta trådar av kontinuerlig glasfibertråd slumpvis fördelade till att bilda en matta, sammanbunden av ett bindemedel. Detta bindemedel ska vid tillverkning av processutrustning

vara pulverbundet [1]. Denna typ av armering innehåller klart mindre glas per ytenhet än rovingväven, och vanliga ytvikter är 300 och 450 g/m².

Rovingväv (woven roving) är en matta vävd av knippen av kontinuerlig glasfiber (roving). Denna typ av fiber innehåller mycket glasfiber per yta (med ytvikter såsom t.ex. 600, 800 eller 1200 g/m²) och används främst i handupplagda styrkelaminat.

3D-väv är en kombinationsväv där den mellanliggande glasfibermattan reser sig då den impregneras med harts och en luftspalt bildas. Armeringstypen används som ett isolerande skikt där temperatur eller temperaturgradient är så pass hög att det finns risk för delamineringar, men väven kan även användas som läckagekontroll. Genom att utnyttja det faktum att det finns ett kontinuerligt hålrum inne i laminatet kan läckage genom spärrskiktet upptäckas om 3D-skiktet är dränerat.

Armeringen kan även bestå av kolfiberväv av olika slag eller syntetisk fiber, t.ex. polyamid- eller aramidfiber (t.ex. PAN, Diolen).

Marknaden domineras av E-glas, som står för elektriskt isolerande glas. E-glas används främst i styrkelaminat men förekommer även i spärrskiktet. C-glas är ett kemiskt beständigt glas som har ett högre pris men samtidigt även en överlägsen kemikalieresistens jämfört med de andra glastyperna, och används främst i ytmattan i det innersta barriärskiktet i ett spärrskikt. C-glas har även mycket bra resistens mot spänningskorrosion.

Den tredje stora typen av glasfiber som används i processutrustning är ECR-glas (t.ex. Advantex) som är ett borfritt E-glas. ECR-glas är ett mellanting av de två andra varianterna vad det gäller kemikaliebeständighet och resistens mot spänningskorrosion. För att undvika spänningskorrosion i en glasfiberarmerad konstruktion är ECR-glas generellt att föredra i spärrskiktet, men kan och bör med fördel även användas i styrkelaminatet då en eventuell genomgående skada i spärrskiktet då inte omedelbart äventyrar den strukturella integriteten hos konstruktionen.

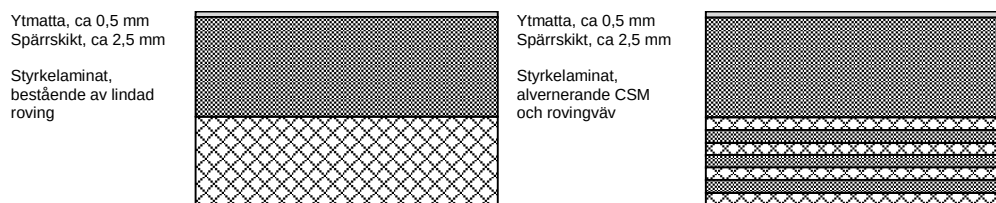
Det finns även andra typer av glasfiber som inte används i någon större utsträckning vid tillverkning av processutrustning, såsom A, D och R-glas. A-glas är ett enklare glas med låg tålighet mot kemikalier. D-glas är en glasfibertyp med bra elektriska egenskaper, och S-glas är ett glas med mycket hög styrka och hållfasthet.

Vid processen för tillverkning av glasfiber appliceras en beläggning på glasfiberytan, en s.k. *sizing*. Sizingen syftar bland annat till att skydda glasfibrerna och dess yta samt att ge god vidhäftning och vätning mot hartset vid lamineringen (vanligen olika typer av silaner) eller att verka antistatiskt (t.ex. litiumklorid). När glasfibern binds samman i buntar eller till en matta (t.ex. CSM eller roving) hålls denna samman av en binder, vanligen baserad på polyester, polyvinylacetat eller polyuretan.

1.2 UPPBYGGNAD AV LAMINAT

Vid uppbyggnaden av ett laminat läggs glasfiberarmeringen i flera skikt och i olika riktningar efter önskad styrka och kemikalieresistens, Figur 7. Hartsmatrisen är den del av laminatet som står för kemikaliebeständigheten och glasfibern står för mekanisk styrka.

Närmast konstruktionens inneryta (ytan mot mediet) läggs en ytmatta för att bygga upp ett hartsrikt skikt, ett så kallat barriär- eller skyddsskikt, som skydd mot angrepp från kemikalier i mediet.



Figur 7 Schematisk ritning av lindat och handupplagt laminat med spärrskikt och styrkelaminat

Vanligtvis är ytmattan tillverkad av C-glas, men även kolfibermattor kan användas i applikationer där det finns risk för ytsprickbildning. Armeringshalten i skiktet med ytmatta är mycket låg, som mest 20 viktsprocent, och ytmattans enda egentliga funktion är att göra det hartsinnehållande skiktet tjockare.

Utanför ytmattan och barriärskiktet byggs sedan spärrskiktet upp med flera lager CSM tills önskad tjocklek uppnått. I normer och standard finns angivet att totalvikten på armeringen i spärrskiktet minst ska vara 900 g/m² [1] [2] [3]. Glashalten i spärrskiktet ligger normalt mellan 20 och 30 viktsprocent. Utanför spärrskiktet följer sedan styrkelaminatet som är den del av laminatet som står för den mekaniska styrkan.

Man skiljer sedan på handupplagt och lindat styrkelaminat. Ett handupplagt laminat är som namnet antyder uppbyggt för hand, oftast med alternerade CSM- och rovingväv. Ett lindat laminat är tillverkat på en roterande form, och är uppbyggt med en kontinuerlig fiber som lindas på konstruktionsformen, Figur 8. Huggen glasfiber blandad med harts kan även sprutas på en form för tillverkning av mer komplicerade geometrier, Figur 9. Glasfiberhalten i ett styrkelaminat ligger på 50-60 viktsprocent, och något högre glashalt fås i ett lindat laminat.



Figur 8 Lindning av en cistern



Figur 9 För tillverkning av mer komplicerade geometrier kan huggen glasfiber blandad med harts sprutas på en form

1.3 FÖRESKRIFTER OCH STANDARDER

Det finns flera föreskrifter och standarder som gäller för komposit- och plastmaterial. Flera av de gällande föreskrifterna gäller oavsett material och därför såväl stål och rostfria stål som plast och kompositmaterial. Exempel viktiga sådana föreskrifter är Tryckkärlsdirektivet (eng. pressure equipment directive, PED), vår motsvarande svenska föreskrift AFS 1999:4 (AFS - Arbetsmiljöverkets författningssamling) samt MSBs (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap) föreskrift för cisterner och rörledningar (MSB 2014:5).

Att klassa in ett objekt enligt gällande standarder för bedömning av kontrollåtgärder är ofta komplicerat. Ett antal parametrar såsom media, volym och tryck, avgör omfattningen av kontrollen samt vem som har mandat att utföra denna. Var och ett av objekten på en anläggning måste klassas enligt respektive föreskrift. Detta gäller vid tillverkning, användning och efter ändringar och reparationer. För vidare guidning inom detta område hänvisas till något av våra anmälda kontrollorgan. Det är anläggningsägarens ansvar att se till att gällande föreskrift följs.

I de följande avsnitten ges en kort introduktion till ämnet samt en översikt över de viktigaste föreskrifterna och de mest använda standarderna inom området cisterner, rörledningar och andra industriella komponenter som kan tänkas vara konstruerade av glasfiberarmerad plast.

Detta kapitel kan inte ge svar på alla frågor som uppstår och vid eventuell osäkerhet rekommenderas att kontakta ett anmält organ mot PED.

1.3.1 Europeiska Direktiv

Ett direktiv sätter upp vilka specifika mål medlemsländerna i EU ska uppnå inom olika områden. Direktiven är bindande med avseende på det resultat som ska uppnås, men lämnar åt medlemsstaterna att själva bestämma form och tillvägagångssätt.

European Pressure Equipment Directive (PED), (97/23/EC)

Ett exempel på ett EU-direktiv är det europeiska tryckkärlsdirektivet European Pressure Equipment Directive (PED), (97/23/EC). PED gäller för tryckkärl, rörledningar, tryckbärande tillbehör och säkerhetsanordningar över 0,5 bar.

Vid tillverkning enligt kraven i PED kan tillverkaren själv utföra vissa aktiviteter medan andra utförs av kontrollföretag. I Sverige finns två typer av kontrollföretag med olika mandat att utföra dessa kontroller: anmälda organ, AO (eng. Notified Body, NB) och tredjepartsorgan (eng. Third Party). I Sverige är det Swedac som utser och anmäler företag som anmälda organ och tredjepartsorgan till EUs kommission och till de andra medlemsstaterna inom EU. De företag som är anmält organ mot respektive direktiv presenteras på EU-kommissionens hemsida <http://ec.europa.eu>. Idag är DEKRA Industrial AB, FORCE Certification A/S, Inspecta Sweden AB och TÜV NORD Sweden AB anmälda organ mot PED.

Det som styr omfattningen av kontrollen och vem som utföra den är ett system av kategorier och moduler. Inklassningen är beroende av vilken typ av media objektet innehåller samt tryck, volym eller nominell diameter hos objektet. Varje modul beskriver vilka typer av kontroller som måste göras och vem som ska göra dessa, dvs. till exempel intern tillverkningskontroll eller kontroll av ett anmält organ. Media delas in i två kategorier beroende på hur farliga de anses vara: Kategori 1 "farliga", till exempel explosiva, lättantändliga eller giftiga, och Kategori 2 "mindre farliga". Det som en tillverkare själv får utföra är samtliga kontroller som ska utföras på objekt i kategori 1.

För att införa PED i Sverige finns föreskriften Tryckbärande anordningar (AFS 1999:4) som är den svenska implementeringen av tryckkärlsdirektivet.

Objekt som klassas i § 8 i AFS 1999:4 (artikel 3.3 i 97/23/EC) får tillverkas enligt god teknisk praxis i ett medlemsland. De anmälda organen kan hjälpa till med kontrollerna så att kraven mot föreskrifterna uppfylls.

1.3.2 Nationella Föreskrifter

Föreskrifter är lagar eller förordningar som utarbetats och fastslagits av en myndighet, till exempel Arbetsmiljöverket (AV) och Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB). Med lagen som stöd har dessa myndigheter har fått i uppdrag av regeringen att mer i detalj bestämma vad som gäller inom olika områden och utarbeta föreskrifter.

AFS 1999:4, AFS 2005:2 och MSB 2014:5 är exempel på viktiga svenska föreskrifter för tillverkningskontroll av kärl och rörledningar. De gäller oavsett material och därmed också för plast och komposit. För att få utföra kontroller enligt dessa krävs en ackreditering, d.v.s. en kompetensprövning som görs av Swedac enligt europeiska och internationella standarder. För information om vilka företag som är ackrediterade kontrollorgan mot AFS 2005:2 samt MSB och MSB 2014:5 hänvisas till Swedacs hemsida <http://www.swedac.se/>.

Tabell 1 ger en översikt av dessa och ytterligare några av de aktuella föreskrifternas tillämpningsområde och omfattning. När man använder en föreskrift är det viktigt att man även beaktar det som står i ändringsföreskrifterna som har egna beteckningar.

1.3.3 Standarder

Enkelt uttryckt är en standard är något som beskriver hur en föreskrift skall uppfyllas rent praktiskt. I en standard finns till exempel beräkningsmodeller och modeller för riskanalyser. En norm är en standard som är ännu mer specifik och som mer i detalj beskriver vad som gäller specifika objekt. Standarder och normer utarbetas av kommittéer i olika länder. Ett exempel på en standard inom plastområdet är EN 13121 *"Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord"* samt våra svenska normer "PRN, Plaströrledningsnormer" och "PLN, Plastkärlsnormer" som getts ut av SIS, Swedish Standards Institute. Tillverkaren väljer själv vilken standard som man vill använda. I vissa fall kommer kraven i direktivet eller föreskriften att uppfyllas genom att följa standarden, i vissa fall måste arbetet enligt standarden kompletteras för att uppfylla kraven. Ett exempel på detta är den nationella plastkärlsnormen som inte helt uppfyller kraven i PED för alla anordningar, utan måste kompletteras med bland annat en riskbedömning.

Harmoniserande standarder är standarder som har speciell status jämfört med ett direktiv. Standarden EN 13121 är ett exempel på en harmoniserad standard. De harmoniserade standarderna relaterar direkt till direktivet, och EN 13121 är harmoniserad mot PED. Om man som tillverkare följer en harmoniserad standard är man säker på att man uppfyller säkerhetskraven i direktivet. Det är valfritt att tillämpa standarder. Det är inte förbjudet att avvika från dem. Dock är det tillverkaren själv som måste kunna visa att säkerhetskraven är uppfyllda om en harmoniserad standard inte används. I avsaknad av harmoniserande standarder kan man välja en annan lämplig standard.

Tabell 1 Översikt av några aktuella föreskrifters tillämpningsområde och omfattning

Föreskrift	Giltighet	Att tänka på	Krav på kvalificering av personal och procedurer	Kommentar
PED/AFS 1999:4 Tryckbärande anordningar	Nyttillverkning av tryckbärande anordningar med högsta tryck > 0,5bar	Gäller i första hand vid tillverkning	Kat II, III och IV	Se bilaga 1 i föreskriften
AFS 2005:2 Tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar	Tillverkning av vissa behållare, rörledningar och anläggningar	Hanterar objekt som inte omfattas av PED	Krav K enligt § 4 och § 6	Se bilaga 1 i föreskriften
MSB 2014:5 MSBs föreskrifter om cisterner och rörledningar för brandfarliga vätskor	Öppna cisterner, rörledningar och slangledningar för brandfarliga vätskor	Gäller för brandfarliga ämnen	Svetsmetoder för svetsning i metall av cisterner >1 m ³ och rörledningar >DN 50 ska vara bedömda, och godtagna av kontrollorgan enligt AFS 2005:2	Det rekommenderas att jämföras att jämställa övriga permanenta förband med svets, se även Guideline 6/5 från EU.
AFS 2005:3 Besiktning av trycksatta anordningar	Besiktning av trycksatta anordningar	Reglerar bl.a. vad som gäller vid skador och ändringar på tryckbärande anordningar som tagits i drift	Se § 30	
AFS 2002:1 Användning av trycksatta anordningar	Gäller vid yrkesmässig användning av tryckbärande anordningar, cisterner, lågtrycksgas-behållare och vakuumkärl	För kärl och rörledningar gäller § 1 till § 11 och § 21 till § 25	AO/NB	
AFS 2006:8 Provning med över- eller undertryck	Tryckprovning vid kontroller			

EN-standarder för armerad hårdplast

Standarden EN 13121 "Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord" gäller för cisterner och rörledningar ovan jord. Del 1 – 3 är harmoniserade mot PED. Del 1 behandlar råvaror, del 2 behandlar kompositmaterial, del 3 behandlar beräkning och utförande. Del 4, som ännu inte är harmoniserad behandlar leverans, installation och underhåll. EN 13121 omfattar olika tillverkningssätt, men hänvisar till andra standarder när det gäller fiberlindade tryckkärl och rör, SS-EN 13923:2005 "Tryckkärl av fiberlindad glasfiberarmerad plast - Material, konstruktion, tillverkning och kontroll" respektive EN ISO 14692-4:2002 "Petroleum- och naturgasindustrier – Glasfiberarmerade plaströr (GRP) – Del 4: Tillverkning, installation och drift".

Vid sidan av de harmoniserade EN-standarderna finns flertalet nationella föreskrifter och standarder inom området, såsom t.ex. våra svenska Plastkärlnormer (PLN 1983) och Plaströrledningsnormer (PRN 1988). Dessa är jämfört med EN 13121 mer översiktliga och på vissa punkter något ottydliga. Dessa är inte heller harmoniserade mot PED. PLN innehåller dock en uppskattad och tydlig beräkningsdel som har fått stor användning.

Exempel på andra nationella standarder är Brittiska BS 4994:1987 "*Design and constructions of vessels and tanks of reinforced plastics*" som behandlar GAP-material med lining av termoplast. Inte heller den brittiska standarden är harmoniserad. Trenden är att de nationella standarderna används i mindre grad och många tillverkare väljer i stället att arbeta utefter harmoniserade standarder.

Övriga riktlinjer

SSG, den svenska massa- och pappersindustrins standardiseringsgrupp, har gett ut riktlinjer som används inom flera industrier, till exempel hos värmeverk och stålindustrin. En finsk motsvarighet är standarden PSK 6310 "*Condition monitoring of fibre-reinforced plastic products*" samt PSK 6311 "*Industrial fibre-reinforced plastic products*". PSK 6310 ger instruktioner för val av åtgärdsmetoder som används i tillståndsovervakning av armerade plastprodukter och presenterar fel som upptäckts av mätning eller testning med OFP-metoder.

1.3.4 Oförstörande provning och bedömning av defekter

När det gäller oförstörande provning finns inga harmoniserade standarder, men i några nationella standarder och riktlinjer har gjorts försök att sammanställa nyttan och möjligheten med olika OFP-metoder för GAP. I norska OLFs (Norwegian Oil Industry Association) "*Recommended Guidelines for NDT of GRP Pipe Systems and Tanks*" ges information kring riktlinjerna för OFP av rörsystem och tankar i GAP.

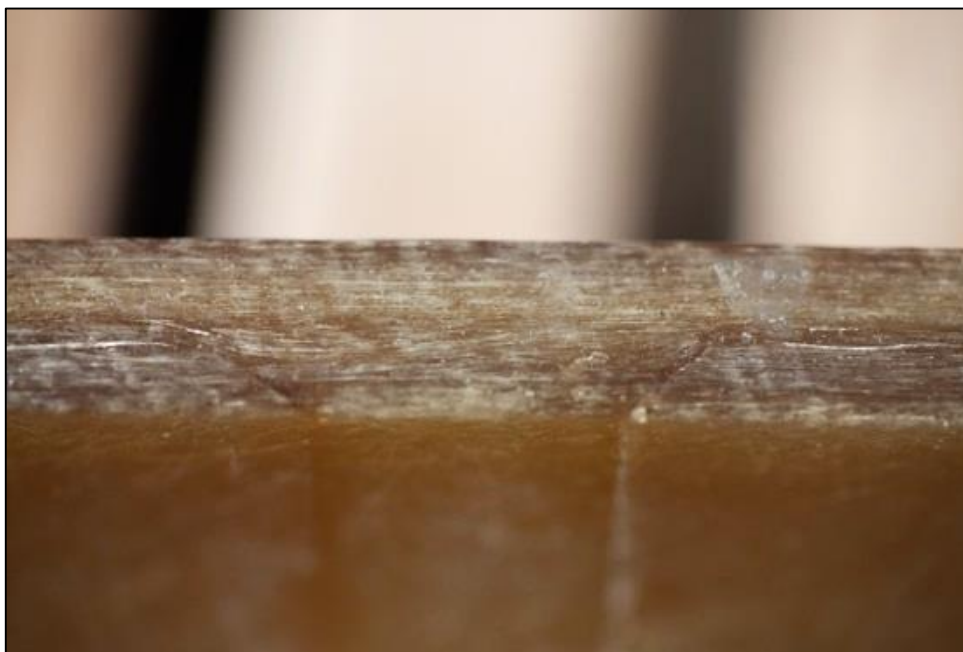
Kriterier för bedömning av defekter i GAP finns till viss del i ASTM D2563 – 08 "*Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts 1*". Kriterier för bedömning ges även i BS 4994:1987 "*Specification for the design and construction of vessels and storage tanks in reinforced plastics*" samt i SSG 7670, men dessa kriterier gäller nytillverkning och är inte applicerbara på defekter som uppkommer under drift.

1.3.5 Permanenta förband

Eftersom hårdplaster inte kan svetsas som termoplaster talar man inte om svetsar utan om skarvar och *permanenta förband* hos rörledningar och andra komponenter av GAP som fogas samman. Generellt kan sägas att samma säkerhetskrav gäller dessa permanenta förband, som de i stål och andra metaller. Exempel på permanenta förband i GAP är laminatskarvar, limmade skarvar och muffskarvar. Skarvningen ska utföras enligt SS EN 13121 "*Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord*" del 3 "*beräkning och utförande*" eller enligt nationella standarder som svenska PLN 1983, eller PRN 1988.

I utförandestandarderna ovan finns ett antal olika skarvutföranden beskrivna. Något som påtalas på flera ställen är vikten av tätning av den inre skarvytan. Kapytorna hos två rör som ska fogas samman är inte skyddade av det hartsrika skikt som annars skyddar de känsliga glasfiberändarna från kontakt med media. Inre tätning betyder att

skarven invändigt förses med ett extra lager harts. Vissa tillverkare använder en ballong som blåses upp inne i röret för att stödja en tätningsremsa under lamineringen. Om inte skarven tätas kan de fria glasfiberändarna verka som kanaler för processmedia in materialet och på sikt medverka till degradering av materialet runt skarven.



Figur 10 Tvärsnitt av ett permanent förband, en skarv, i ett GAP-rör

2 Inspektion

Oavsett vilken eller vilka metoder som finns att tillgå vid en inspektion så gäller att resultatet av en inspektion är mycket beroende av inspektörens erfarenhet och förmåga att bedöma skador på plats. Att vid en första visuell inspektion kunna bedöma en skada genom att titta eller knacka på den kräver att man har sett liknande defekter tidigare och har erfarenhet av hur den skadan betedde sig över tid. Det finns även standarder för inspektion av GAP-utrustning som ger vägledning [4].

Till sin hjälp har inspektören ett antal olika provningsmetoder, både förstörande och icke-förstörande. De icke-förstörande teknikerna involverar i princip alltid att någon typ av utrustning samt en duktig användare av tekniken ska finnas på plats vid inspektionstillfället, vilket kan utgöra en begränsning.

Ett annat, dock förstörande, sätt att få information om exempelvis korrosion i en tankvägg är att såga ut ett prov (ofta kallad rondell) för vidare analys, men denna metod medför att en reparation måste göras, vilket i vissa fall är en stor nackdel. Att ta ut en rondell ur en utrustningsdetalj, exempelvis en tank, kräver också att det finns tillgänglig personal som kan reparera det hål som provuttaget ger upphov till.

De olika metodernas principer, fördelar och begränsningar beskrivs i det kommande avsnittet.

2.1 FÖRSTÖRANDE PROVNING

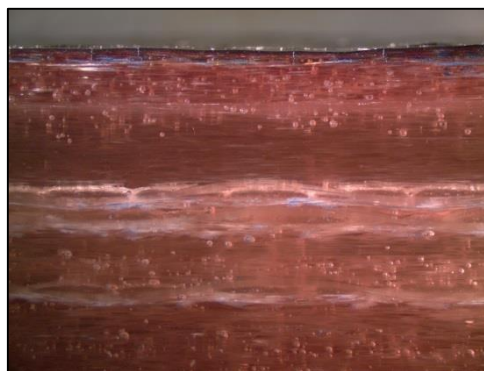
2.1.1 Rondell-/provuttag

Traditionellt har ett av sätten att bestämma korrosionsstatus på ett GAP-laminat varit att ta ut ett prov och studera polerade tvärsnitt av laminatet under mikroskop, Figur 11 och Figur 12. Denna metod ger information om både spärrskiktets och styrkelaminatets tjocklek samtidigt som man kan se laminatuppbyggnaden. Med kamera och dator kopplad till ett mikroskop kan bilder tas och eventuell korrosion, sprickor och andra defekter kan djupbestämmas m.h.a. mjukvara.

Den kvarvarande livslängden kan ofta förutsägas om åldern på laminatet är känd och om tjocklekarna på det korroderade skiktet och spärrskiktet kan bestämmas. En förutsägelse om kvarvarande livslängd kräver dock även kännedom om processbetingelserna. Ändrade betingelser förändrar generellt korrosionshastigheten.



Figur 11 Rondell från en skrubber



Figur 12 Tvärsnitt av rondell

Om ett prov från laminatet värmebehandlas i ugn vid ca 500°C kommer hartsmatrisen att brännas bort och endast glasfiberarmeringen kvarstår. Därefter kan glashalten i de olika delarna i laminatet bestämmas, Figur 13. Ofta kan man på detta sätt även få en ännu tydligare bild av laminatuppbyggnaden än vad som går att se i mikroskop. Dock bör hänsyn tas till att syntetiska armeringsmattor kommer att försvinna under avbränningen i ugn.



Figur 13 Avbränning av hartsmatrisen ger en tydlig bild av laminatuppbyggnaden och glashalten i de olika delarna av laminatet kan bestämmas

Med hjälp av DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) kan laminatets glastransitionstemperatur (T_g) bestämmas, vilket bland annat kan ge en indikation på vilket harts laminatet är tillverkat av. Metoden används också för att bestämma halten av oreagerad styren i laminatet, vilket ger information om uthärtningsgrad. Ofta är den halt resterande styren som får finnas i laminatet efter härdning specificerad i konstruktionsritningarna. Metoden kan även användas för att uppskatta den drifttemperatur som laminatet varit utsatt för. Ett laminat kommer att härda till en viss grad i den temperatur det utsätts för och materialet kommer att få en specifik glastransitionstemperatur. Skulle temperaturen sedan höjas ytterligare kan laminatet härda vidare och T_g kommer att höjas p.g.a. värmebehandlingen. Laminatets förmåga att efterhärda kan utnyttjas för att bilda en uppfattning om vilken drifttemperatur laminatet utsatts för. Provbitar av laminatet tillåts efterhärda i ugn vid olika temperaturer varefter provbitarnas glastransitionstemperatur mäts m.h.a. DSC och jämförs med originallaminatets T_g .

Med hjälp av FTIR (*Infraröd Spektroskopi*) kan man erhålla information om vilken typ av harts som använts till tillverkningen av laminatet.

Rondelluttag

Vid rondelluttag för analys borrar ett hål i tanken med en hålsåg och ett prov tas ut. Man bör i möjligaste mån försöka ta ut ett sådant prov så att det kan anses vara representativt för processutrustningen i sin helhet, alternativt att försöka ta ut provet på det mest utsatta stället där skadorna på utrustningen kan antas vara som störst. Finns det positioner i tanken eller rörledningen där man speciellt misstänker korrosion eller nötning är det på en sådan plats som provrondellen ska tas ut. Är det ett rör som ska analyseras kan man givetvis även kapa ut en bit rör istället för en rondell.

Rondelluttag har nackdelen att det lämnar ett hål som måste repareras i den undersökta strukturen och kan därmed endast utföras då det finns tillgång till personal med lamineringskompetens.

Området närmast runt provutttaget slipas ner så att man är säker på att få god vidhäftning av reparationslaminatet. Hålet efter provutttaget fylls igen med en ny rondell som tas från ett nytt laminat, alternativt byggs ett nytt laminat upp i hålet.



Figur 14 Rondelluttag ur en tankvägg görs exempelvis med en hålsåg



Figur 15 Den uttagna rondellen



Figur 16 En ny rondell med samma storlek som provuttaget borrar ut ur ett nytt laminat



Figur 17 Ytan runt rondelluttaget slipas ner

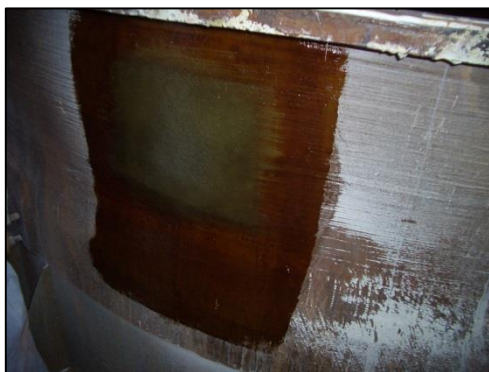


Figur 18 Hålet i manteln fylls igen med de nya rondellerna och fästs med harts



Figur 19 Nytt laminat i form av ett nytt spärrskikt byggs upp på insidan av manteln

Ett nytt laminat byggs sedan upp på in- och utsida på manteln. På insidan av manteln ska detta laminat minst motsvara det spärrskikt som manteln hade vid tillverkningen.



Figur 20 Utsidan av manteln

Värt att notera är också att ett laminat i en utrustning som varit i drift i många fall kan vara påverkat av det medium det utsatts för. Detta kan bidra till att vidhäftningen av reparationslaminatet försvåras. Provlaminering bör då utföras för att på förhand kontrollera att reparationen kommer kunna utföras, helst redan innan rondellen sågas ut.

2.2 METODER FÖR OFÖRSTÖRANDE PROVNING (OFP)

Komponenter av GAP undersöks och inspekteras enligt föreskrifterna på samma sätt som metalliska material, men tillvägagångssättet måste anpassas något.

Konventionella OFP-metoder och tekniker som utvecklats för metalliska material visar ofta vissa begränsningar, minskad kapacitet eller är helt olämpliga för provning av GAP. Den ökade användningen av polymera material och kompositer inom industrin har på senare tid stimulerat utvecklingen av befintliga och nya OFP-metoder. Kunskapen om dessa materials livsängd i olika miljöer och belastningar saknas fortfarande till stor del. Förutom de föreskrivna kraven i våra regelverk är den något bristfälliga kunskapen om degraderingsmekanismer och livslängd en anledning till att det finns ett stort värde i OFP under drift och vid inspektioner av GAP.

Idag finns det ett flertal OFP tekniker tillgängliga för GAP. De flesta har fortfarande begränsningar i praktisk användbarhet, noggrannhet och tillgänglighet. I detta kapitel presenteras en sammanfattning av några intressanta OFP-tekniker som är etablerade och används praktiskt ute i fält. Metodernas för- och nackdelar samt i förekommande fall, hänvisningar till praktiska försök, presenteras.

För val av OFP-metoder i denna översyn har följande kriterier använts: Metoden ska finnas som ett kommersiellt system på marknaden samt vara utvecklad och tillgänglig för fältbruk. Metoden ska också kunna verifiera olika typer av defekter (delaminering, blåsor, sprickor etc.), mäta godstjocklekar samt kunna påvisa vattenupptag och annan strukturpåverkan från exempelvis inträngande processmedia.

Dessa OFP-metoder är främst ultraljud, digital röntgen och visuell inspektion. Efter dessa metoder beskrivs andra metoder och tekniker som har potential att få större tillämpning i framtiden.

2.2.1 Visuell inspektion

Den kanske allra viktigaste inspektions- och provningsmetoden är den visuella bedömning som kan göras på plats. Med hjälp av ficklampa, kamera, kniv, fuktmätare och en

lite hammer kan en erfaren inspektör snabbt skaffa sig en uppfattning om laminatets status. Släpljuset från en ficklampa är t.ex. ett ypperligt hjälpmedel att hitta ojämnheter och blåsor på en mantel. Med kameran kan olika defekter dokumenteras för jämförelse över tid. Med kniven kan man känna på laminatet som ska vara hårt och utan fickor, sprickor eller liknande.

Ficklampa används till att upptäcka blåsbildning och delamineringar, men kan även användas till att genomlysa manteln för att hitta och bedöma utbredningen av sprickor i laminatet. Detta kräver dock att godstjockleken på utrustningen inte är för tjock eller att utsidan är målad.

Ett knacka med en hammer på ett laminat ger ofta en tydlig indikation på laminatets status. Om ett dovt ljud uppkommer vid knackning är sannolikt något fel med laminatet, och en vidare utredning bör göras. Exempelvis kan ett dovt ljud uppstå om fukt trängt in i laminatet. Metoden kan jämföras med att knacka på friskt och murket trä, materialen låter olika. Ett friskt laminat har alltid en hård klang vid knackning.

En fuktmätare kan användas för att följa förändringar i laminatet. Ett glasfiberlaminat har en viss fukthalt efter tillverkningen, och med vetskap om hur fukthalten varierat över tid kan detta ge indikationer på att något hänt. Normala fuktvärden för GAP är ca 30-45, medan ett fuktskadat laminat uppvisar högre värden.



Figur 21 Fuktmätare



Figur 22 Kamera med optisk fiber

En kamera med optisk fiber kan också användas att inspektera rör, och ger information om hur skarvar i rörsystemet ser ut från insidan. Metoden kan vara något svår att använda och det kan vara svårt att veta exakt var i rörsystemet kameran befinner sig. Metoden måste dock anses vara väl lämpad till att inspektera rörledningar från insidan.

2.2.2 Penetrantprovning

Metoden kan användas i samband med kvalitetskontroller och för att detektera sprickor som bildats efter en tid i drift, främst i metalliska material. Penetrantprovning används för att upptäcka sprickor som nått ytan i en struktur, men metoden kan inte detektera sprickor inne i materialet.

Tekniken omfattar flera steg och börjar med rengöring av den yta som ska inspekteras. Sedan stryks eller sprayas penetranten på ytan och tillåts verka under en definierad tid, varefter allt överskott av penetrant avlägsnas från ytan och man applicerar en s.k. framkallare för att tydliggöra den penetrant som samlats i eventuella sprickor och

håligheter, Figur 23. Därefter följer visuell undersökning av ytan och slutligen rengöring. Provnings med flytande penetrant finns t.ex. beskriven i ASTM E-1417 [5].

De olika penetrantsystemen kan generellt indelas efter typ av färgämne som används, borttagningstekniken och systemets känslighet. Även lösningsmedlet kan givetvis skilja mellan olika system. Man skiljer också mellan fluorescerande vätskebaserade penetranter och synliga vätskebaserade penetranter. Fluorescerande penetranter innehåller ett fluorescerande färgämne som blir synligt först under belysning med ultraviolett ljus. Synliga penetranter kan ses i naturligt eller vitt ljus. Dessa kan också förstärkas genom att framkallare appliceras.



Figur 23 Penetrant (röd) på en mantel i en skrubber efter att framkallare (vit) applicerats



Figur 24 Hårdhetsmätare Barcol

2.2.3 Barcolhårdhet

Barcolmätare har använts under lång tid för att bestämma uthärdningsgraden och hårdheten hos glasfiberarmerade laminat. Metoden refereras ofta till i kvalitetskontroller och kemikalieresistentstester. Metoden bygger på ett värde som erhålls genom att mäta den kraft som behövs för att trycka in en vass stålnål under fjäderbelastning i ett material. Instrumentet är handhållet, och då det trycks mot en yta pressas nålen in i materialet och ett värde för Barcolhårdheten visas på displayen. Instrumentet ger värden mellan 0 och 100.

Instrumentet kan användas för olika materialtyper, där instrumentet dock först måste kalibreras mot material av intresse. ASTM D2583 [6] beskriver metoder att mäta Barcolhårdhet på både armerad och icke-armerad plast.

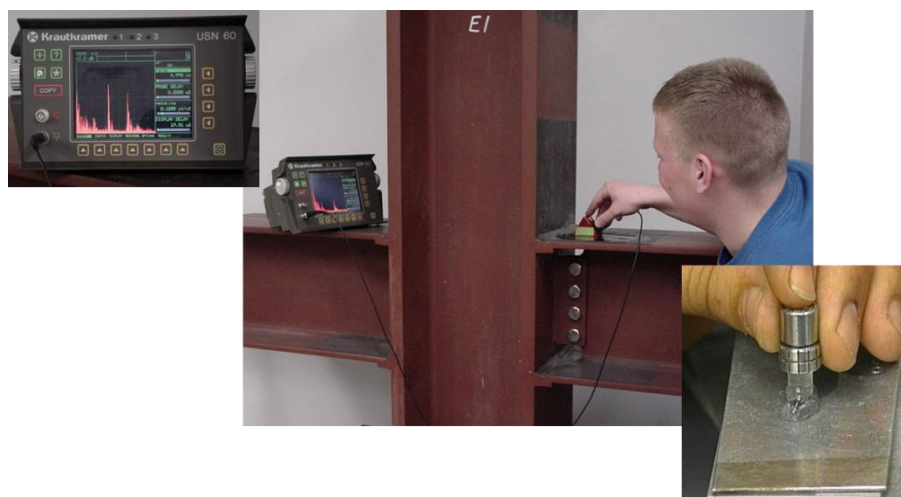
2.2.4 Ultraljudsprovning

Ultraljudsmätning bygger på att skicka pulser av ultraljud in i ett material och att sedan mäta tiden det tar för ljudet att reflekteras eller transmittas i materialet. Om man känner till ljudhastigheten i det undersökta materialet kan den reflekterade eller transmittade vågen omräknas och tolkas som tjocklek. Olika frekvensintervall används för olika typer av mätningar, detta styrs med valet av ultraljudssökare. Högre frekvenser används generellt för tunna och homogena material, lägre frekvenser för mätningar på tjocka material eller material som dämpar eller sprider ultraljudsvågorna, exempelvis GAP [7] [8].

Godstjocklek är lättare att mäta i homogena material som metaller och termoplaster än i GAP, som ju är en komposit uppbyggd i flera lager av en hartsmatris och glasfiber

med olika egenskaper. Varierande glasfiberhalt och tillsatser också kan ändra ultraljudsvågens hastighet och påverka mätningen. Används lägre frekvenser blir mätningen mindre känslig för störningar, men samtidigt även mindre känslig för att upptäcka små defekter.

För att öka kopplingen mellan sökare och provmaterial används ett kopplingsmedel (t.ex. vatten, gel, etc.).



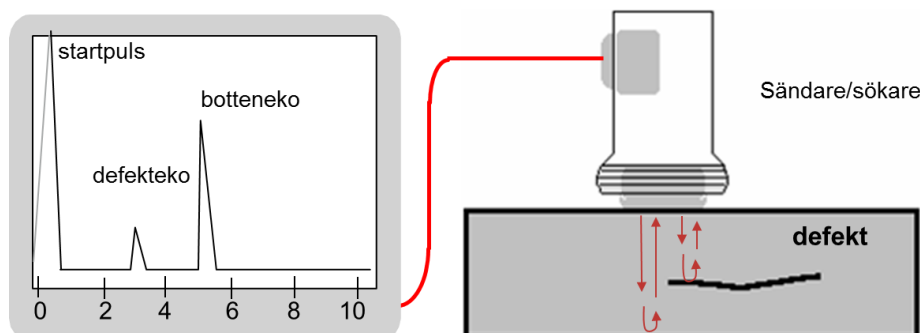
Figur 25 Bilder på ultraljudsteknik

Transmission och pulseko

Det finns två huvudtyper av ultraljudstesttekniker; *transmission* och *pulseko*. Vid transmissionstekniken används en sändarsökare på ena sidan och en mottagarsökare på den andra sidan av materialet som ska provas. Metoden används i huvudsak för att prova platta konstruktioner där man har lätt att komma åt provbitens båda sidor.

Vid mätning med pulseko, som är den mest använda tekniken, är sändare och mottagare på samma sida av mätobjektet. Sökaren fungerar i det här fallet som både sändare och mottagare. Metoden bygger på att den korta ljudpulsen utbreder sig i provmaterialet och reflekteras av förekommande diskontinuiteter, täthetsskillnader eller motstående sida i materialet. En ultraljudspuls skickas in i materialet och den reflekterade vågen registreras, även kallat pulseko eller A-scan. Amplituden på den reflekterade signalen indikerar storleken på den reflekterade energin och har viss korrelation till storleken på defekten. Defektens geometri i förhållande till ljudvågens utbredning påverkar också energin på den reflekterande vågen. Avståndet på tidsaxeln ger information om reflektionens placering i provmaterialet, Figur 26.

Vid pulseko måste ultraljudssignalen färdas två gånger genom provet - först till baksidan av provet och sedan reflekteras tillbaka till sökaren på framsidan. För tjocka laminat (> 40 mm) är det svårt att undersöka hela tvärsnittet på detta sätt eftersom dämpningen i materialet gör att endast en liten del av bottenknot reflekteras.



Figur 26 Pulsekometoden med A-scan

Ett problem med traditionella ultraljudsmätningar på GAP är materialets höga dämpning. I och med den höga dämpningen och det faktum att GAP inte är ett homogent material är svårt att komma igenom materialet med traditionella ultraljuds-sökare.



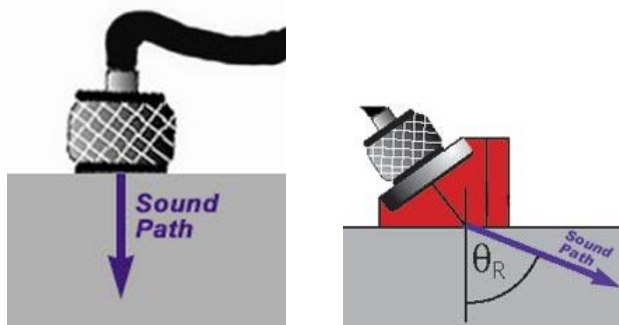
Figur 27 Mätning med ultraljud på en blåsa i en skrubber

Olika typer av sökare

Det finns olika typer av sökare. En normalsökare skickar ljudet vinkelrätt mot objektets yta medan en vinkelsökare skickar ljudet med en annan vinkel in i objektet. Valet av sökare och vinkel beror på eftersökta defekttyper. Man vill träffa eftersökt defekt så vinkelrätt som möjligt för maximal återreflektion. Vinkeln i provobjektet beror på vinkeln i sökaren och ljudhastigheten i provobjektet, dvs., om ljudhastigheten ändras kommer vinkeln att ändras.

En *Phased Array* är en sökare som har delats upp i flera små element som var och ett kan skicka och ta emot signaler. Sökaren är en mätprob med multipla mät huvuden och givare, och används för att skapa mer detaljerade bilder av det undersökta materialet. Snarare än att mäta i en enda punkt, kan ultraljudsstrålen här svepas genom objektet och data från multipla strålar läggs sedan samman m.h.a. avancerad signalbehandling till en bild som visar ett tvärsnitt av det undersökta föremålet. Genom att variera tiden för de pulserande elementen kan ljudpulsens riktning och fokus styras så att sannolikheten att upptäcka defekter ökar. Position och storlek på eventuella defekter presenteras ofta i färgbilder eller i 3D-bilder.

Vid val av sökare görs en avvägning mellan upplösning, som i regel förbättras vid högre frekvenser och djupavkänning, som typiskt är bättre vid lägre frekvenser.



Figur 28 Ultraljudsmätning med rak respektive vinklad sökare

I det här sammanhanget bidrar materialets dämpning till att den våg som sändaren alstrar kommer att spridas och absorberas vilket gör att den reflekterade eller transmitterade energin är betydligt lägre än det som skickas in.

Ljudets hastighet i GAP är betydligt lägre än i till exempel stål. Ljudhastigheten varierar dessutom beroende på mängden armering och glashalt. Detta är viktigt att komma ihåg vid kalibrering.

Zero Inteference probe

ZIP, *Zero Inteference probe*, kallas en typ av sökare speciellt framtagen för GAP. Denna typ av sökare har en förloppssträcka med samma akustiska impedans som objektet man ska prova. När man matchar den akustiska impedansen får man maximal överföring av energi från sökare till provobjekt. Denna typ av sökare har också låg frekvens vilket gör att den har lättare att ta sig igenom GAP och är hårt dämpad vilket gör att den ger skarpa signaler. Då förloppssträckan är mjuk går den ofta att använda utan kopplingsmedel förutsatt att ytan är jämn. Inspecta har gjort studier av ultraljudsmätningar på både termoplast och GAP och sett att metoden i många fall är lämplig och användbar. Metoden fungerar också på vätskefyllda rörledningar.

Praktiska erfarenheter av ultraljudsprovning av kompositer

Den ojämna ytan på GAP-laminatet försvårar vanligtvis ultraljudsprovningen. För förbättrade resultat kan ytan jämnas till genom nedslipning. För bättre resultat rekommenderas mätning med scanner eller flera punkter. Även en inre ojäm yta, till exempel på grund av korrosion, försvårar mätningen i och med den ökade spridningen av bottenekot.

På grund av mycket större dämpning i GAP jämfört med stål måste låga ultraljudsfrekvenser användas. En relativt låg frekvens, typiskt mellan 0,25 MHz och 2,25 MHz, anses vara bäst lämpad. Mätning med lågfrekventa vågor ger lägre känslighet för små fel. Teoretiskt gäller att defekter som är en halv våglängd är det minsta som går att detektera.

Laminat tillverkade med olika metoder påverkar dämpningen olika. Filamentlindade rör uppvisar lägre dämpning än handupplagda komponenter, som tenderar att fånga upp mer luft under tillverkningen. Den här effekten försvårar avsevärt för ultraljudsprovning av handupplagda komponenter, speciellt om de är av tjockare laminat.

Handupplagd GAP har dessutom i regel en ojämnare yta, vilket ytterligare försvårar mätningen.

Inspecta har utfört ett flertal försök att utvärdera användningen av ultraljudsteknik (pulseko) för kompositer både på verkstad med utkapade provbitar och i fält. Även här har det visat sig att det är betydligt svårare att erhålla en god kontakt med en sond mot en grov och ojämn yta, i jämförelse med en blank yta. Vid mätning av rörböjar med raksökare är geometrin ytterligare en begränsning eftersom ut- och insidan av rörväggen ej är parallell.

Ultraljudtekniken lämpar sig för undersökning av delamineringar, blåsor, luftinneslutningar och avvikelser i vägg tjocklek (begränsning på > 40 mm).

UT Comp

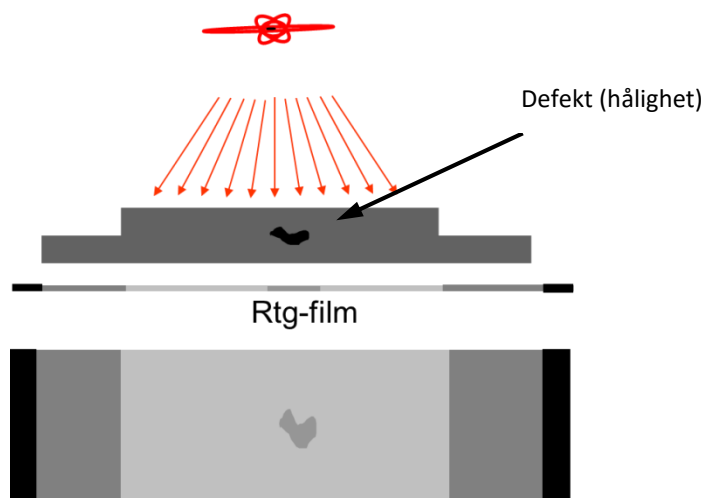
Det finns även företag som utvecklat egna ultraljudsmetoder. Ett sådant företag är det kanadensiska UTComp som utvecklat en ultraljudsteknik som ska kunna fastställa ett laminats strukturella kapacitet samtidigt som den återstående livslängden med avseende på säker drift kan förutsägas.

Tekniken använder den enklaste ultraljudsmetoden, A-scan, men kräver licensierad personal för att utföra mätningarna. Mätdata skickas sedan till UTComp för analys.

UTComp® System har funnits på marknaden sedan 2008 och syftet med denna teknik är att ge en tillförlitlig metod för oförstörande utvärdering av ett laminats nuvarande strukturella kapacitet, spärrskiktets tillstånd samt övervakning av eventuella skademekanismer.

2.2.5 Röntgen

Vid radiografimätningar, s.k. "röntgen", genomstrålas ett objekt med röntgenstrålar från en strålkälla. Röntgenstrålarna registreras sedan av en detektor bakom objektet. Tekniken mäter ett materials förmåga att dämpa röntgenstrålningen. Skillnader i dämpning i ett prov beror på främst på skillnader i tjocklek och densitet och kan på så sätt ge indikationer på inre håligheter eller variationer i tjocklek.



Figur 29 Princip för röntgen av objekt med inre hålighet

Vid röntgenundersökning med digitala detektorer, ofta kallad "digitalröntgen" består detektorn av en panel, som omvandlar den genomsläppta strålningen till en digital bild som sedan kan behandlas elektroniskt och tolkas [7] [8]. Den digitala tekniken medför snabbare och enklare bildbehandling utan framkallning av bilder manuellt samt kräver ofta lägre stråldos för att producera en bild med samma kontrast som vid konventionell radiografi med röntgenfilm.



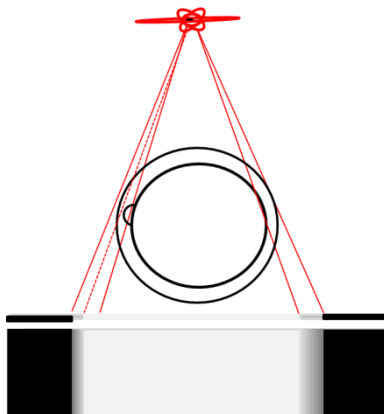
Figur 30 Uppställning för digitalröntgenundersökning av rörledning (detektor för digitalröntgen i bakgrunden)



Figur 31 Provningsingenjör med utrustning för digital röntgen

Profilröntgen

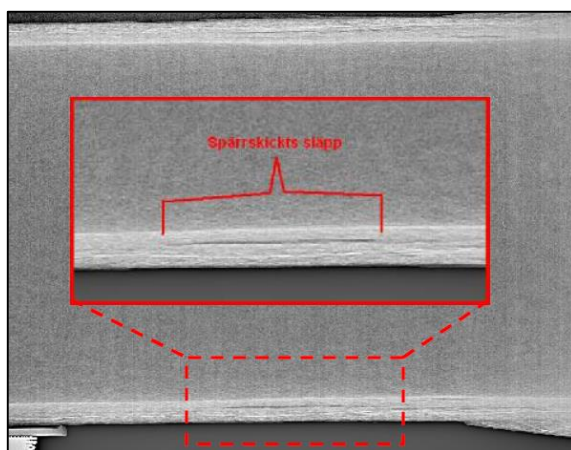
För alla röntgentekniker är mätvinkeln helt avgörande för att en defekt ska kunna upptäckas. Det tillvägagångssätt när man låter strålkällan belysa ett objekt i profil kallas profilröntgen. Med denna metod kan man få en tydlig uppfattning om objektets godstjocklek, om insidans kondition och om eventuella delamineringar eller andra defekter med radiell utbredning. Bilden i Figur 32 visar principen för mätningen. Vid profilröntgen placeras alltså detektorn bakom objektet, vilket kan vara en begränsning vid mätning av stora objekt på grund av att den totala sträckan genom materialets vägg blir för lång. För stora kärl, till exempel cisterner, skulle dessutom mycket större detektorplattor behövas än de som i dag finns på marknaden.



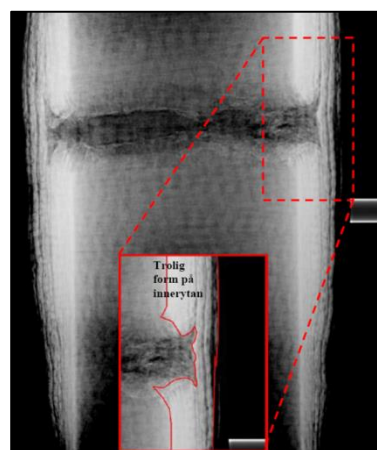
Figur 32 Princip för profilröntgen av objekt med inre hållighet

I exemplet med den avbildade rörledningen i Figur 33 syns en delaminering i rörväggen tydligt där materialet genomlyses i profil, medan man i mitten av bilden, där rörväggen genomlyses vinkelrätt, inte kan påvisa någon defekt. Detta gör att metoden i praktiken lämpar sig bäst för undersökning av rör och rörskarvar, snarare än större strukturer, såsom tankar.

Tekniken har använts främst för undersökning av svetsar i rör- och tryckkärl i metalliska material men är även av intresse för inspektion av polymera material. I litteraturen nämns att bl.a. fiberorientering, föroreningar eller inneslutningar, felaktig laminatuppbyggnad samt sprickor orienterade parallellt med röntgenstrålen kan detekteras medan interlaminära defekter och fiberhalt inte kan kontrolleras. Röntgentekniken mäter inte ytråhet, vilket ibland är en fördel eftersom den samtidigt inte heller är känslig för en skrovlig yta, som t.ex. ultraljud är. Röntgentekniken lämpar sig i många fall även för provning under drift, då det går att röntga vätskefyllda rör. Är mängden vätska hög kan bilden bli något diffus, men vid profilröntgen är detta ett mindre problem. Vibrationer kan dock försvåra mätningen.



Figur 33 Röntgenbild av delaminering mellan korrosionsbarriären och strukturlaminatet



Figur 34 Rörskarv i GAP. Röntgenbilden visar hur skarven är oskyddad och skadad invändigt, sannolikt på grund av korrosionsangrepp

Praktiska erfarenheter av röntgenprovning av kompositer

Eftersom röntgentekniken arbetar med en radioaktiv strålkälla föreligger ett antal krav på säkerhet, dels på personal, kompetens och hanteringen av utrustningen och dels vid själva mättillfället. Plaster och även kompositer är material med lägre densitet än metaller, varför mindre energi, dvs. en lägre stråldos, behövs jämfört med undersökning av metaller. Detta betyder att säkerhetsförfarandet vid mätningen blir enklare, exempelvis genom mindre omfattande avspärningar runt det område där mätningen utförs.

Inspecta och Swerea KIMAB har tidigare tillsammans framgångsrikt röntgat ett stort antal elektromuffsvetsar i vattenledningar av polyeten. Dessa mätningar har oftast gett tydliga bilder på defekter i svetsar och information om hur kopparledningarna är placerade inne i svetsen. Digitalröntgen har även använts för att undersöka kvaliteten hos skarvar med avseende på kantförskjutningar och spalt mellan två sammanfogade rör. Detta är en mycket viktig tillämpning av tekniken eftersom det ofta varit ett stort problem att kunna verifiera att olika fogar är utförda korrekt och enligt gällande standard.

Inledande tester med radiografimätningar på olika polymera material med olika typer av defekter har utförts av Inspecta där bl.a. tjocklek på GAP- och termoplaströr mätts med profilröntgen (ej i drift, endast tomma) [9]. Det visade sig dock vara svårt att skilja mellan opåverkat och påverkat laminat. Defekter som djupa sprickor orienterade vinkelrätt mot ytan eller skador som uppkommit till följd av kraftiga slag kunde inte

heller detekteras med digitalröntgen. Erfarenheter av vilka defekter som kan uppstå i det material man undersöker och dess eventuella utbredning i geometrin är av största vikt för ett gott resultat vid all röntgenmätning.

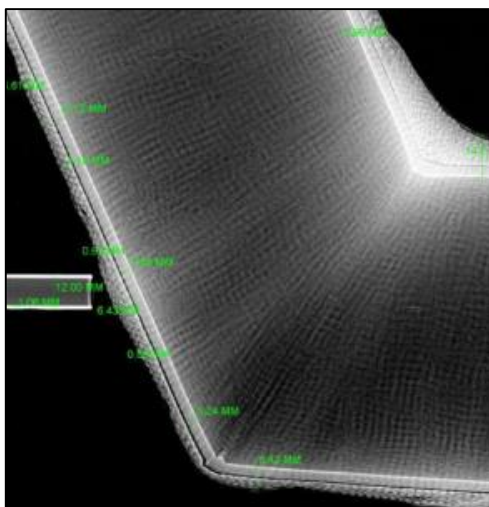
I standarder för att specificera fordringar på rörledningssystem i GAP anges olika metoder av oförstörande provning för att kvalitetssäkra detaljerna. Bl.a. anges ultraljud och röntgen som oförstörande provningsmetoder för att säkerställa att en GAP-ledning uppfyller kravspecifikationer [10]. Röntgen anges också som metod för att detektera godstjocklek, hålrum och delamineringar, avvinkling av rörsegment, avlagringar i röret samt felaktiga skarvar.

Ofta syns skillnaden mellan de olika skikten i laminatet tydligt, beroende på skiktens olika glashalt och därmed också densitet. I vissa fall har det också varit möjligt att bestämma lindningsvinkel på armeringen. Alla typer av hålrum, blåsor och delamineringar syns på röntgenbilden. En svårighet, som gör att de inte alltid i förväg går att säkert veta om mätningen skall ge resultat eller ej, är att det finns väldigt många typer av GAP ute på marknaden. Till synes liknande material kan vara uppbyggda på helt olika sätt, med olika typer av armering, skiktjocklekar, lining och andra korrosionsbarriärer. För bästa resultat är referensbitar av motsvarande material önskvärt.

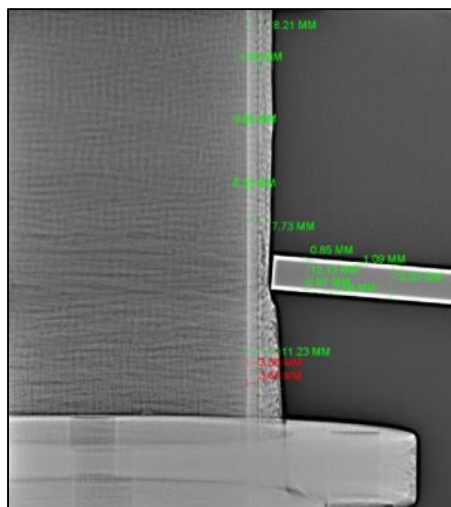
Inspecta har utfört flera försök att utvärdera användningen av digital röntgen för GAP. Några exempel visas i bilderna nedan.



Figur 35 GAP ledning med böj. Invändig lining av PVDF



Figur 36 Exempel på bedömning av väggjockleken hos GAP med PVDF-lining



Figur 37 Exempel på bristfällig vidhäftning som påvisas med digital röntgen

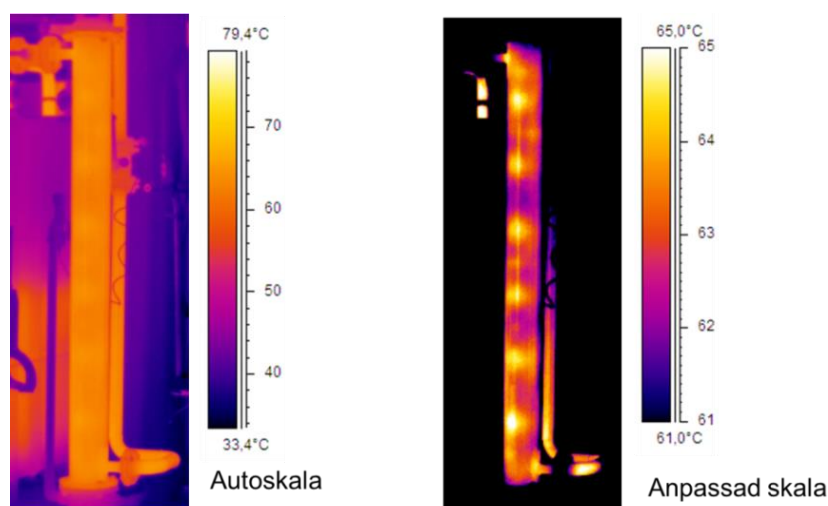
En av metodens stora tillämpningar är att verifiera geometrier, t.ex. i skarvar. Det finns stora möjligheter med att mäta defekters storlekar och utbredning med röntgentekniken. Dock fungerar metoden bäst som ett komplement till andra OFP-metoder, till exempel visuell kontroll, för att detektera defekterna.

Huvudsakliga påvisbara defekter i rörledningar av GAP med profilröntgen är godstjockleksminskning pga. till exempel korrosion eller nötning, samt blåsor och delamineringar.

2.2.6 Termografi

Alla föremål ger ifrån sig värmestrålning i form av infrarött ljus (IR) vid temperaturer över den absoluta nollpunkten, och utstrålningen ökar med stigande temperatur. En värmekamera registrerar IR-strålning och kan användas för att mäta mängden strålning som ett föremål avger. Informationen kan sedan omvandlas till bilder som visar föremålets yttemperatur (infraröd termografi).

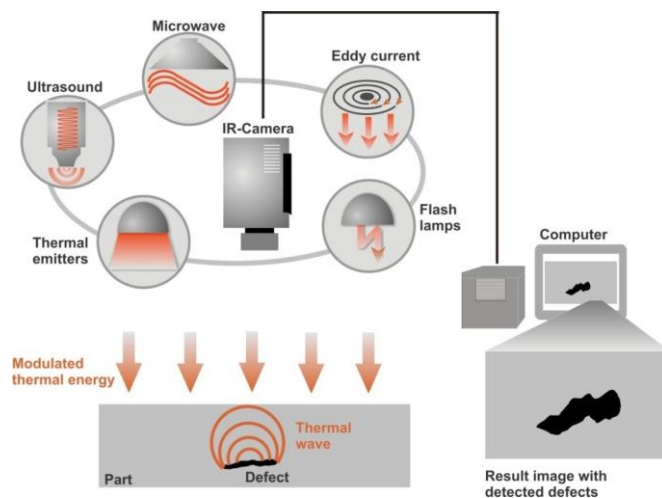
Metoden kan identifiera områden där temperaturen avviker från genomsnittstemperaturen, d.v.s. kalla eller varma områden som kan uppstå t.ex. vid defekter där värmeledningsförmågan ändras [11] [12].



Figur 38 IR-bild på en varm tubvärmväxlare. Till vänster, en bild med auto-anpassning av skalan (dynamiken i bilden) i värmekameran, svårt att dra några slutsatser. Till höger, samma bild fast med en manuellt anpassad skala, här ser man betydligt mer av de effekter som framträder och slutsatser kan dras direkt.

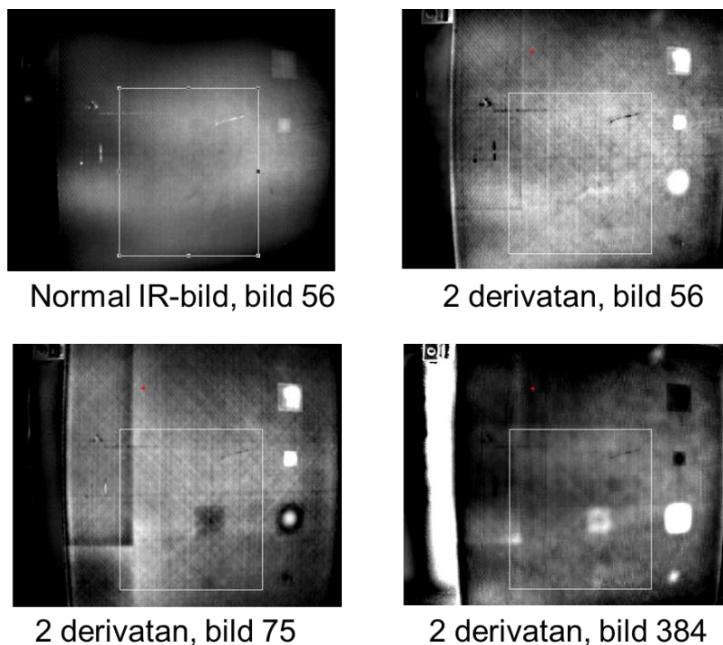
IR-termografi är en relativ ny teknik i dessa sammanhang och applikationer undersöks på många olika områden. Metoden används t.ex. för att studera tjockleksminskning, sprickor, delaminering, densitetsvariation och fogning av såväl kompositer som metalliska material. En av fördelarna med denna teknik är att den är kontaktlös och att relativt stora områden kan undersökas på kort tid. En nackdel kan vara att metoden är känslig för olika ytstrukturer på den undersökta ytan d.v.s. emissivitetsvariationer.

Aktiv termografi 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. Schematisk bild ses i Figur 39.



Figur 39 Schematisk bild på hur olika exciteringskällor överför energi till det undersökta objektet och den termiska responsen från mätobjektets yta registreras med en värmekamera (Bild: Termisk Systemteknik)

Den termiska responsen från mätobjektets yta registreras med en känslig värmekamera som en funktion av tiden. Med hjälp av mjukvara analyseras sedan responsen och förändringarna i temperatur. Vid exempelvis en defekt är responsen och värmeledningen i materialet förändrad jämfört med ett material utan defekter. Mätmetoden anses vara känsligare och kan detektera mindre temperaturförändringar än en passiv mätning. Båda metoderna kräver dock relativt dyr utrustning.



Figur 40 Exempel på ett resultat där ett provobjekt på ca 10 mm tjockt kolfiberlaminat exciteras med en 2000W halogenlampa under ca 10 sekunder. Därefter fångas en bildsekvens om 500 bilder under ca 3minuter (Foto: Termisk Systemteknik)

Figur 40 visar ett exempel på resultat från ett experiment där ett provobjekt av 10 mm tjockt kolfiberlaminat exciteras med en 2000 W halogenlampa under 10 sekunder. Därefter fångas en bildsekvens med en IR-kamera om 500 bilder under ungefär

3 minuter. Under denna tid leds värmepulsen in i materialet och skillnader i objektets värmeledning resulterar i olika yttemperaturer.

Ett sätt att förstärka resultatet från IR-sekvensen är att sedan derivata informationen i bildsekvensen vilket ger en betydligt tydligare bild. Jämför de översta två bilderna som representerar bild 56 i serien utan respektive med derivering. De undre två bilderna är andraderivatan lite längre fram i sekvensen. De två nedre bilderna visar på effekter som uppkommer då defekterna ligger på olika djup i materialet och värmepulsen har fått vandra längre in i materialet.

2.2.7 Mikrovågteknik

Oförstörande provning med mikrovågsteknik är en av de nyare provningsmetoderna som visat sig vara mycket lovande för GAP. Tekniken bygger på mätning och behandling av den reflekterande mikrovågsenergin som ett dielektriskt material utsänder [13]. Även om metoden verkar mycket användbar är den ny och behöver fortfarande utvärderas och utvecklas.

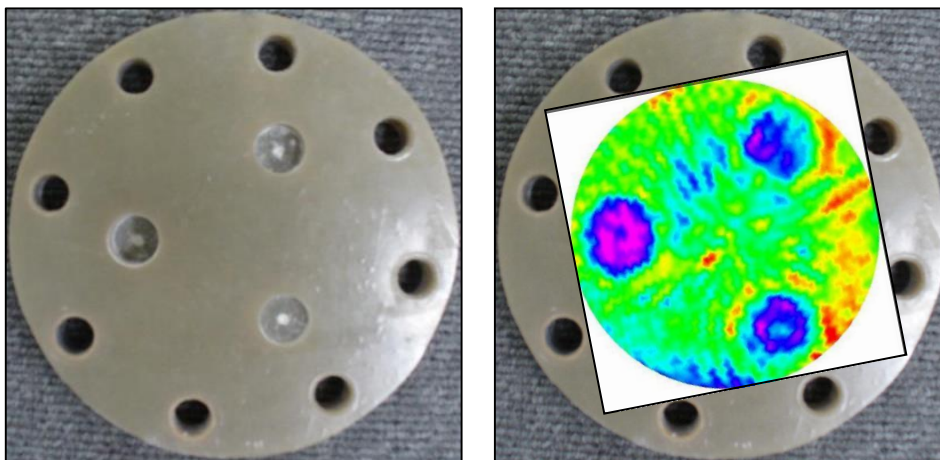
Mikrovågor är elektromagnetiska av viss frekvens, i allmänhet brukar man avse frekvenser från 300–500 MHz och uppåt. Ett dielektriskt material är ett en elektrisk isolator som blir polariserad i elektriska fält. Till skillnad mot i metaller, som är elektriskt ledande, passerar inte elektriska laddningar genom materialet omärkbart. I dielektriska material, till exempel plast och GAP, påverkas de ledande partiklarna så att det ursprungliga jämviktsläget förskjuts, d.v.s. materialet polariseras. Polariseringen skapar ett internt elektriskt fält, vilket kan fångas upp och mätas av utrustningen.



Figur 41 Mikrovågsutrustning (foto: Evesive)



Figur 42 Utrustning för automatisk scanning med mikrovågteknik



Figur 43 Provbit i GAP med ursvarvade defekter. Resultat av MW-mätningen är inlagd i bilden till höger.

Huvudsakliga påvisbara defekter med mikrovågsteknik är delamineringar, blåsor och godsfortunning.

2.2.8 Spektroskopiska metoder

Handhållna varianter av de två spektroskopiska metoderna infraröd spektroskopi (FTIR) och RAMAN kan också användas till att analysera GAP-laminat. FTIR-instrument kan exempelvis användas till att identifiera olika termoplastmaterial och GAP-utrustning på plats.

Metoderna kan snabbt ge svar på hartstyp och om laminatet utsatts för angrepp. Det krävs dock en relativt hög kunskap vid tolkning av det data som registreras under mätningarna. Utrustningen som krävs är också relativt dyr att införskaffa.

2.2.9 Akustisk emission

Då glasfiber bryts av avges ljud. Med känsliga mikrofoner mot laminatet kan detta ljud registreras och även små förändringar av laminatet följas. Exempelvis kan fyllandet av en tank följas med *akustisk emission* då laminatet ger ifrån sig ljud under fyllningsprocessen.

Ljudet då ett ökande antal glasfibrer går av kan således användas för att följa ett korrosionsförlopp [14] och användas som en indikation på att en tank är på väg att haverera.

3 Skadetyper

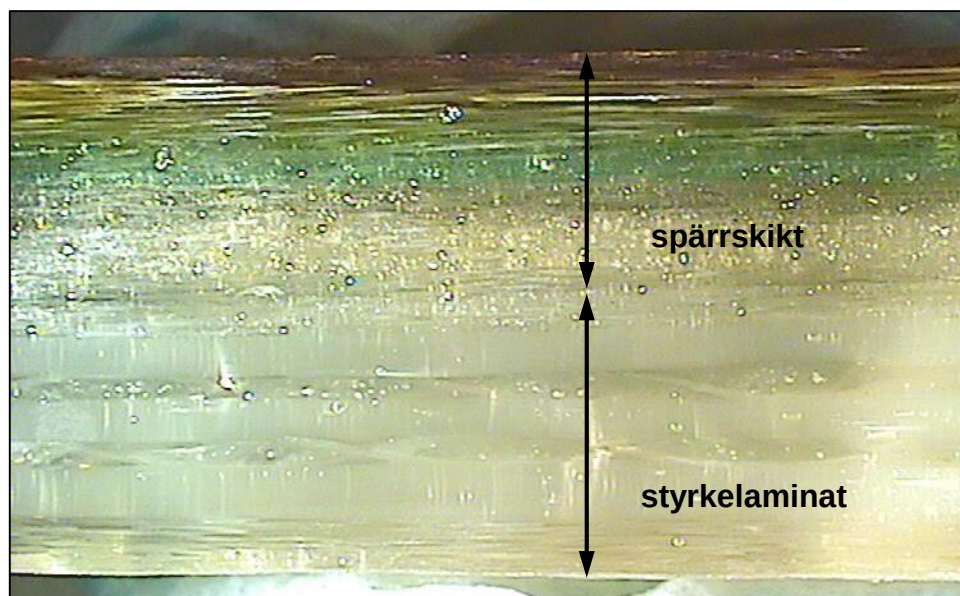
I detta avsnitt går de vanligaste skadetyperna i glasfiberarmerade laminat genom.

3.1 DIFFUSION

Till skillnad från metalliska material är polymera material permeabla i olika utsträckning, vilket innebär att vätskor och gaser kan diffundera genom materialet. Mängden som diffunderar genom polymeren, och med vilken hastighet det sker beror både på det diffunderande ämnet och på polymerens egenskaper. Diffusionen kan medföra förändringar i materialet, nedbrytning, reaktion med olika tillsatser och på sikt även korrosion på bakomliggande material. Den diffunderande substansen absorberas till en viss mängd i plasten, och i vilken utsträckning detta sker är beroende av substansens och polymerens beskaffenhet. Detta kan medföra svällning och eventuellt även sprickbildning vid mycket kraftig absorption.

Diffusion av processamedia in i spärrskiktet tillåts generellt, dock får diffusionen aldrig tillåtas nå styrkelaminatet. Detta är speciellt viktigt om ett spänningskorrosivt media når ett styrkelaminat tillverkat i vanligt E-glas, då risken för ett haveri kan bli överhängande.

Den för närvarande enda riktigt säkra metoden att bestämma inträngningsdjup och korrosion i ett laminat är att ta ut ett prov och studera polerade tvärsnitt under mikroskop.



Figur 44 Saltsyrainträngning i ett laminat. Syrans diffusion ses som en grön front i bildens övre del

3.2 BLÅSOR

Blåsbildning i glasfiberarmerad plast beror på en osmosprocess som orsakas av indiffunderande vatten och lättlösliga ämnen i laminatet. Vätskefyllda blåsor uppstår oftast mellan spärrskikt och styrkelaminat, och blåsorna kan vid ett allt för högt inre tryck spricka.



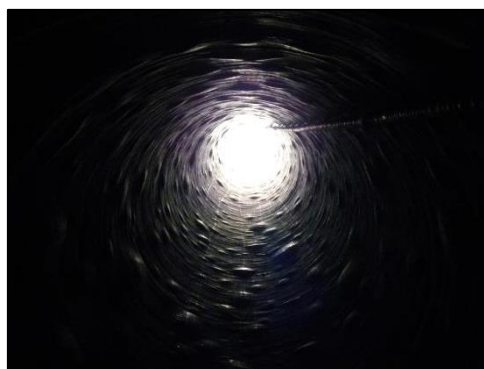
Figur 45 Tvärsnitt av en blåsa i spärrskiktet i en saltsyratank



Figur 46 Blåsor kan ha större diameter och sitta mindre tätt



Figur 47 Blåsbildning i en skorstenspipa



Figur 48 Större blåsor som börjat växa samman till större delamineringar



Figur 49 Blåsa i släpljus från ficklampa



Figur 50 Blåsor på insidan av en skrubbermantel

Blåsor uppkommer då vatten (fukt) tränger in i laminatet för att där späda eventuella lågmolekylära ämnen i en s.k. osmotisk process. Den indiffunderande fukten kondenserar ut till vatten, ansamlas och bildar fickor eller håligheter i laminatet. Förekomsten av kondensat i håligheter i laminatet kan i sin tur leda till att ytterligare vattenlösliga ämnen i eller kring glasfibern löses upp och en blåsa av saltlösning bildas. Ytterligare vatten diffunderar in i laminatet för att späda ut saltlösningen (en s.k. osmotisk cell har bildats). Blåsan växer då det ökade trycket inne i blåsan blir högre än hållfastheten i det omgivande laminatet. När blåsan växer ökar diametern samtidigt som trycket inuti blåsan sjunker. Vanligtvis växer blåsorna till en viss diameter då det uppstår jämvikt mellan hållfastheten i laminatet och storleken på blåsan. Blåsorna är i regel ytnära och

återfinns strax under spärrskiktet, men syns och känns tydligt på ytan. Om blåsorna har liten radie ligger de sannolikt i spärrskiktet snarare än i styrkelaminatet.

Blåsornas tillväxt är i regel snabb i början, men avtar med tiden. Blåsorna är till en början vätskefyllda, men kan med tiden torka ut. Hos torra blåsor väntas ingen fortsatt tillväxt. Faktorer som tros vara viktiga för uppkomst och tillväxt av blåsor är hög temperatur, temperaturväxlingar samt temperaturgradient i laminatets tjockleksriktning [15].

Så länge ytskiktet är intakt och styrkelaminatet är skyddat anses blåsor i regel inte orsaka några andra problem än rent estetiska. Vid kraftig, oväntad tillväxt hos objekt som varit i bruk i mer än ett par år rekommenderas en utredning av orsaken som sannolikt hör samman med processförändringar.

Blåsbildning i GAP-laminat saknar ofta teknisk betydelse, dock kan det ibland i förlängningen leda till större delamineringar vilka kan bli ett större problem än de initiala blåsorna. Blåsor bör således hållas under uppsikt och om de växer ihop till större delaminerade områden bör dessa blåstras bort och repareras, alternativt bör detaljen bytas ut.

Acceptanskriterier för blåsors förekomst vid nytillverkning och leverans finns i SSG 7670 och i SS-EN 13121-3.

3.3 DELAMINERING

Delaminering är relativt vanligt förekommande i rökgaskanaler eller skorstenar av GAP som utsatts för hög temperatur.



Figur 51 Delaminering på en cistern



Figur 52 Tvärsnitt av ett delaminerat laminat

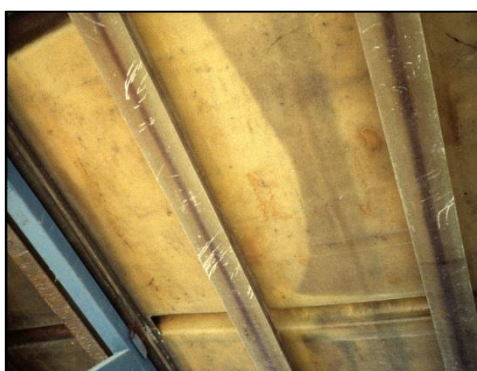
Delamineringar uppstår när olika glasfiberskikt inne i laminatet släpper från varandra. Orsaken kan vara svår att bestämma, men skadorna kan i vissa fall vara en effekt av skillnader i värmeutvidgning i laminatets olika delar. Delamineringarna kan ligga djupare än blåsor och har mer oregelbunden form. De kan ses som en buktning på ytan, och ofta bara genom att ytan på laminatet ser ljusare ut. Delamineringar kan också enkelt hittas genom knockning på laminatet, då de ger ifrån sig ett ihåligt ljud, eller ses med släpljus från en ficklampa.



Figur 53 Delaminering p.g.a. blåsbildning i skorsten (se Figur 48)



Figur 54 Delamineringar kan ske i olika skikt inne i laminatet



Figur 55 Delaminering kan ofta ses som en ljusning i laminatet

Om en delaminering behöver åtgärdas eller inte beror på dess storlek, eventuell sprickbildning och delamineringens djup. Upptäcks en delaminering vid en visuell inspektion eller genom knackning bör man undersöka hur djupt i laminatet delamineringen ligger. Detta kan exempelvis göras med en ultraljudsundersökning eller provuttag.

Ett sätt att på plats få en uppfattning om omfattningen av materialpåverkan är att slipa ur defekten och undersöka den underliggande ytan visuellt. Provuttag för materialanalys ger ofta ett säkrare svar om den väntade kvarvarande livslängden.

Vid mindre delamineringar som ligger 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 och orsaka större skador. Om delamineringarna ligger nära styrkelaminatet kan processmediet lättare nå styrkelaminatet.

Det finns ofta möjlighet att invändigt reparera den skadade strukturen. Ligger delamineringarna i styrkelaminatet bör strukturen dock sannolikt bytas ut. Större delamineringar i spärrskiktet eller i skiktet mellan spärrskikt och styrkelaminatet bör slipas bort och nytt laminat byggas upp. Vid mycket stora delamineringar bör dock hållfastheten i komponentens omgivande laminat tas i beaktande innan laminatet slipas ned för att undvika ett haveri vid reparationsarbetet.

3.4 MISSFÄRGNING/ÖVERHETTNING



Figur 56 Laminat missfärgat av överhettning



Figur 57 Missfärgat laminat



Figur 58 Laminat efter kraftig överhettning

Ett laminat kan missfärgas av många olika orsaker. Vissa svavelrika gaser, exempelvis SO_2 och SO_3 , ger mörka missfärgningar. Exponering för högkoncentrerad svavelsyra tenderar att svartfärga ett laminat mycket snabbt.

En annan orsak är att laminatet utsatts för överhettning eller brand. Dock ger inte alltid överhettning tydliga tecken i form av missfärgning. Om GAP utsätts för mycket höga temperaturer kan nedbrytning av materialet ske. Tecken på denna överhettning är bl.a. missfärgning, ytförsprödning och uttorkningssprickor. Vid tillräckligt hög temperatur bränns dock hartsmatrisen bort och endast glasfiberarmeringen återstår.

Provuttag och termisk analys med DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) kan ge information om vilka temperaturer ett laminat utsatts för. Om ett laminat utsätts för en viss temperatur kommer det att härda till en viss grad, och få en viss glastransitions-temperatur, T_g . Skulle temperaturen sedan höjas kommer laminatet att kunna härda vidare och T_g kommer att höjas p.g.a. värmebehandlingen. Laminatets förmåga att efterhärda kan utnyttjas för att bilda en uppfattning om vilken drifttemperatur laminatet utsatts för. Provbitar av laminatet tillåts efterhärda i ugn vid olika temperaturer varefter provbitarnas glastransitionstemperatur mäts och jämförs med det T_g som originallaminatet har.

Inspektören kan få en uppfattning av skadans djup och omfattning genom att skrapa bort det skadade materialet. Med kännedom om materialets ursprungliga tjocklek och uppbyggnad kan man också få en uppfattning om skadans djup och om även styrkelaminatet är påverkat. Dock bör en reparation ske om material i spärrskiktet avlägsnats i större omfattning.

3.5 SLAGSKADOR



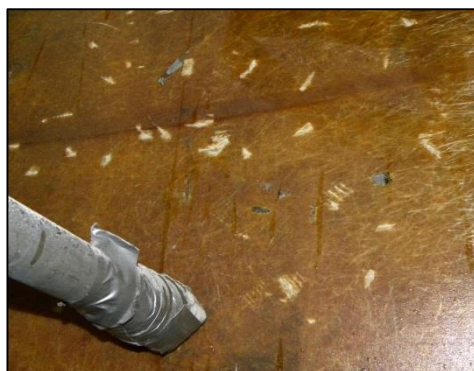
Figur 59 Slagskada



Figur 60 Slagskada



Figur 61 Djup slagskada i spärrskiktet



Figur 62 Ett stort antal slagskador på en skrubbermantel. I bilden ses även det skydd som monterats på ställningsstödet

Slagskador, utbrutna flisor eller som de också kallas, *chips*, är mekaniska skador som exempelvis kan ha uppstått på grund av ett hårt och plötsligt slag mot laminatet. Ofta är slagskadorna relativt grunda, men djupare skador kan givetvis försvaga en konstruktion.

En vanlig orsak till slagskador i GAP-laminat är att rör, rördelar eller verktyg som använts vid ställningsbygge tappats mot botten eller att man kraftigt stött emot manteln i en skrubber eller cistern. Både rör och stöd till resta ställningar inne en GAP-detalj bör kläs med ett skydd som ser till att de vassa kanterna inte riskerar att skada laminatet.

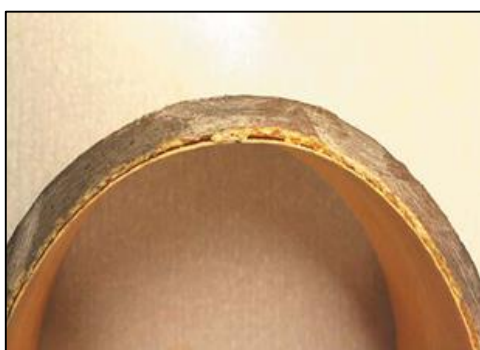
Den här typen av skada syns i regel ganska tydligt som ett ljusare runt eller ovalt märke format av sprickor. Ibland har tunna skärivor av hartslager slagits bort, därav det engelska benämningen *chip* (flisa, skärva). Det man också ska komma ihåg är att undersöka hur materialet ser ut på den motstående sidan. En slagskada på en konvex sida, exempelvis utsidan av en rörledning eller en cistern, ger ofta en större skada på insidan. Skadan på den motstående sidan får dock ett annat utseende, typiskt i form av en stjärna. Skadan på insidan kan lokalt mycket väl vara djupare sprickor än på utsidan. En skada från en konkav insida ger vanligen ingen skada på utsidan. Generellt gäller att rör med slagskador bör bytas ut, medan tankar kan repareras. Risk för spänningsskorrosion bör dock beaktas, beroende på vilket media tanken eller röret innehållit.

Skadan medför i regel en del synliga fibrer och kan verka som en startpunkt för en annan skademekanism, till exempel korrosion eller utmattning, speciellt vid invändiga skador. Slagskador bör generellt repareras då de med tiden kan ge upphov till djupare skador.

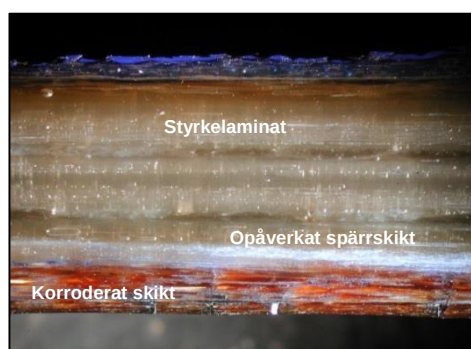
Acceptanskriterier för slagskadors förekomst vid nytillverkning och leverans finns i SSG 7670 och i SS-EN 13121-3.

3.6 KORROSION

3.6.1 Allmätkorrosion



Figur 63 Korroderat skikt på insidan av ett rör



Figur 64 Mikroskopbild på korroderat skikt i ett laminat

Under inverkan av vissa miljöer kan plastmaterialet brytas ner. Allmätkorrosionen ger godsförtunning och ibland beläggningar, korrosionsprodukter, d.v.s. föreningar som uppstår när materialet reagerar med omgivningen. Även om korrosionsprodukterna ibland är hårda och har god vidhäftning vid materialet så har de inte grundmaterialets egenskaper. Allmätkorrosionen påverkar hela ytan med en jämn hastighet och kan medföra nedsatta mekaniska egenskaper i laminatet om lämnas utan åtgärd.

Angreppshastigheten avtar med tiden, förutsatt att den påverkande miljön är konstant. Korrosion uppskattas ofta i mm/år.

3.6.2 Lokal korrosion



Figur 65 Korrosion i en rörskarv där roten inte fyllts



Figur 66 Korrosion vid ett påstick

Korrosionsangrepp kan också uppkomma lokalt, till exempel med en lokal defekt eller annan skada som startpunkt. En skarv kan också verka som startpunkt, speciellt i rörledningar där den inre skarven inte tätats. Även påstick kan ge upphov till lokal erosion. Korrosionsangrepp kan också uppkomma p.g.a. lokala variationer i processmiljön.

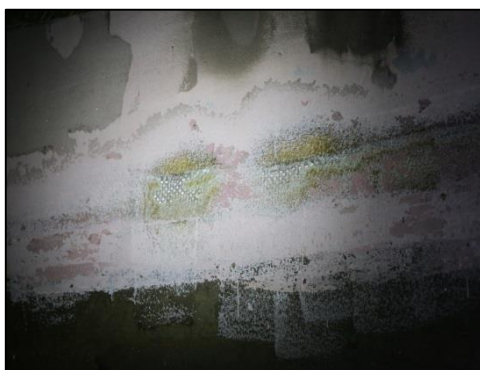
3.6.3 Erosion/nötning



Figur 67 Nötning från en dysa på en skrubbevägg



Figur 68 Närbild på erosion på en skrubbevägg



Figur 69 Nötning på skrubbermantel från dysor



Figur 70 Erosion i ett rör p.g.a. ojämnt flöde

Erosion och erosionskorrosion är två mekanismer som är mycket svåra att särskilja. Erosion är en ren slitning och bortnötning av material, medan erosionskorrosion är när erosionen accelereras av korrosion. Båda skadeformerna uppkommer i miljöer med hög eller störd strömningshastighet, till exempel i rörböjar eller vid dysor. Den skadade ytan ger intrycket av att vara ren och kan vara mycket jämn, nästan som om den med flit slipats ner. Erosion- och erosionskorrosionsskador bedöms i stort sett som korrosionsskador.

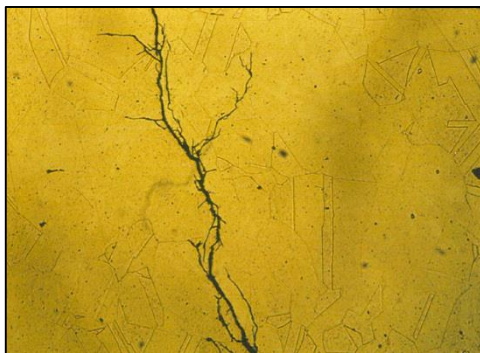
Erosion- och erosionskorrosionsskador uppkommer ofta på samma ställe år efter år, och det finns på marknaden ett antal metoder att lokalt skydda ytan. Vid exempelvis nötning från dysor är det lämpligt att rikta om dysorna eller justera vattentrycket för att minska påfrestningen på laminatet. Den yta som är utsatt för nötning kan också täckas med en *lining* av termoplast. Utsatta delar kan även beläggas med olika hartsbaserade material, t.ex. harts innehållande kiselkarbid eller aluminiumoxid, exempelvis keramiska epoxykompositer som Chesterton.

Generellt kan man tillåta att fibrer i spärrskiktet är blottade, men även här är det fördelaktigt att reparera skadan för att återställa spärrskiktets ursprungliga tjocklek.

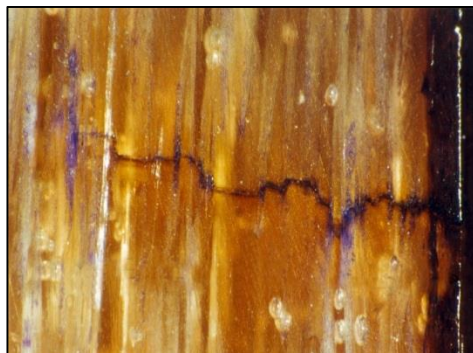
3.7 SPÄNNINGSKORROSION

Spänningskorrosion sker under samtidig inverkan av dragspänningar och en kemikalie, vanligtvis någon syra, t.ex HCl (saltsyra). I laminatet är det glasfibern, d.v.s. själva armeringen som drabbas, och då främst glasfiber tillverkade av E-glas som är känsliga för spänningskorrosion. Det måste även finnas kontakt mellan syran och fibrerna i hartsmatrisen för att korrosionen ska uppstå, varför slagskador genom spärrskiktet kan ge mycket allvarliga konsekvenser.

Spänningskorrosionshaverier kan vara mycket allvarliga eftersom de oftast uppträder plötsligt och till synes utan förvarning.



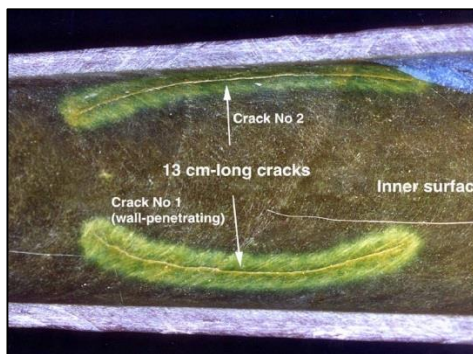
Figur 71 Spänningskorrosionsspricka i metall



Figur 72 Spänningskorrosionsspricka i GAP



Figur 73 Spänningskorrosionshaveri



Figur 74 Spänningskorrosion i en saltsyraledning p.g.a. slagskador på rören

Spänningskorrosionssprickor i GAP är svåra att upptäcka. Säkra är att utgå ifrån att den här typen av sprickbildning kan uppstå i samband med korrosion eller annan skademekanism under samtidig inverkan av dragspänningar. I regel är det tankar och ledningar för koncentrerade syror, som saltsyra eller svavelsyra som riskerar att drabbas av spänningskorrosion, men den förekommer även i miljöer innehållande klor-dioxid. Risken för spänningskorrosion gör slagskador mycket farliga i rörsystem och tankar för exempelvis saltsyra.

Generellt gäller att processmediet aldrig får nå den lastbärande delen av ett laminat. Detta är speciellt viktigt när det handlar om ett spänningskorrosivt media och ett styrkelaminat tillverkat i E-glas. Rör och tankar för spänningskorrosiva media bör således tillverkas i ECR-glas för att minimera risken för ett katastrofalt haveri. Det bör dock poängteras att mediet inte kan tillåtas nå styrkelaminatet även om detta är tillverkat i ECR-glas.

Spänningskorrosion kan även förekomma i termoplaster och benämns där vanligtvis *Environmental Stress Cracking, ESC*.

3.8 WEEPING/SVETTNING

Alla plastmaterial är till viss del permeabla. I extrema fall kan mediet tränga genom hela laminatet. Fenomenet brukar kallas weeping eller svettning. Rekommendationen är att i alla lägen byta ut komponenten. Om mediet tränger ut genom laminatet är detta uppenbart dåligt fabricerat. Läckage kring en skarv eller ett påstick är oftast beroende på andra orsaker än att laminatet i sig är felbyggt. Snarare beror felet här på att skarv-laminatet är felaktigt uppbyggt.



Figur 75 Svettning

3.9 SPRICKOR

Sprickor till följd av deformation av laminatet kan uppstå av en rad anledningar. Sprickbildning kan uppstå till följd av överlast, krympningar eller korrosion. Sprickbildning kan också uppstå om man vid lamineringen lokalt använt för mycket harts. Anledningen till varför sprickan uppstått är naturligtvis intressant för att kunna förhindra att den ökar eller uppkommer igen. Bedömningen av sprickorna är dock generell: sprickor i styrkelaminatet accepteras aldrig. Sprickornas utseende och mönster kan ge viss vägledning om sannolikheten att sprickorna även propagerat in i styrkelaminatet.

3.9.1 Struktursprickor



Figur 76 Spricka på en fläns. Skruvar ses till höger och vänster



Figur 77 Spricka i väggen på en skrubber

Sprickor till följd av överlast uppstår ofta i lastens tvärriktning och vid spänningskoncentrationer vid exempelvis en infästning, ett stöd eller dimensionsövergång. Karaktäristiskt för struktursprickor, eller överlastsprickor, är en enstaka djup spricka. Även om fler mindre sprickor kan synas på ytan är det i regel i en av sprickorna som den huvudsakliga tillväxten sker.

3.9.2 Ytsprickor

Mekanisk last kan ge upphov till en mindre allvarlig sprickform som kallas ytsprickor. Mönstret är många små sprickor geometriskt formerade så att ett spindelnätsliknande mönster bildas. Sprickorna är täta och ofta svåra att djupmäta med en nål eller liknande. Dessa sprickor kan också uppkomma då det yttersta hartsskiktet kan spricka under temperaturförändringar, då småspänningar kan ha uppkommit under härdningsprocessen.



Figur 78 Exempel på små ytsprickor. Även märke från släppfilm syns i bilden som ett diagonalt streck



Figur 79 Exempel på ytsprickor

3.9.3 Termiska krympsprickor

GAP-laminat krymper vid härdning, vilket orsakar spänningar och ibland sprickbildning. Materialet har dessutom en betydligt lägre värmeutvidgningskoefficient än stål, vilket också gör att GAP-komponenter som sammanfogats med stål utsätts för spänningar. Sprickorna syns ofta som flera parallella, raka sprickor som följer tjockleksförändringar i materialet. Sprickorna är ofta grunda. Dessa sprickor uppkommer i regel redan vid tillverkningen eller under den första tiden i drift.

3.9.4 Utmattningssprickor

Cykliska rörelser i en processutrustning kan ge upphov till utmattningssprickor i strukturen. Även termiska variationer i processen kommer att orsaka cyklisk utvidgning och krympning hos materialet, vilket i längden riskerar att leda till sprickbildning. Sprickorna är ofta raka och parallella och uppstår i regel i närheten av värmekällan. Även om sprickorna, precis som krympsprickor, är relativt grunda, finns en väsentlig skillnad: utmattningssprickorna kommer att fortsätta sin tillväxt så länge den cykliska rörelsen eller temperaturvariationerna pågår.

Dessa sprickor bör repareras, och orsaken till utmattningssprickorna bör utredas. Beräkningsingenjör bör konsulteras för att räkna på den förväntade spricktillväxten.

3.9.5 Uttorkningssprickor

Uttorkningssprickor förekommer på många håll i naturen och även hos plast. På engelska kallas fenomenet mud cracking, och uppstår till följd av svällning i samband med vätskeabsorption och krympning vid efterföljande uttorkning. Karaktäristiskt för skadetyper är sammanhängande helt slumpvis orienterade sprickor som är något öppnade mot ytan. Möjligen går djupet att mäta med en nål eller liknande. Sprickorna är normalt begränsade till spärrskiktet och stoppas i regel redan upp i korrosionsskiktet. Själva sprickorna går sällan vidare in i styrkelaminatet, men man måste komma ihåg att fibrerna i de inre skikten kan få kontakt med det korrosiva mediet, varför det finns risk för korrosion.



Figur 80 Uttorkningssprickor



Figur 81 Uttorkningssprickor i en skubbervägg samt en slagskada

Uttorkningssprickor kan också orsakas av kemiska angrepp. Det är med andra ord svårt att på plats, visuellt eller med annan OFP-metod, fastställa skadeorsaken hos en komponent med det här utseendet. Skadeorsaken får utredas genom kontroll av temperaturhistoriken och/eller provuttag för vidare materialanalys.

3.9.6 Repor

Repor och repliknande defekter kan uppstå på många sätt. Märken från släppfilmen vid tillverkningen kan exempelvis ge defekter som på håll kan se ut som repor. Detta är dock ingen defekt som kräver någon åtgärd, utan är bara av kosmetisk karaktär.

Oförsiktighet vid hantering, under drift och vid inspektion kan ge repor som med tiden synliggörs genom missfärgning och av smuts. Repornas djup mäts lämpligen med nål eller skjutmått och med kännedom om yt- och spärrskiktets tjocklek kan en snabb och säker bedömning göras direkt på plats.

3.10 DEFEKTER RELATERADE TILL TILLVERKNINGEN

För tillverkningsrelaterade defekter finns acceptanskriterier i exempelvis SSG 7670, bilaga 2 och i EN 13121-3, bilaga E tabell 24. Om de här standarderna har följts korrekt borde vi inte stöta på dessa defekter i speciellt stor utsträckning vid inspektion och defekterna bör inte öka i antal eller utbredning. Det är dock inte ovanligt att tillverkningsdefekter framträder mer tydligt efter att utrustningen varit i drift ett par år. Detta beror på att smuts och beläggningar gärna fastnar på den ojämna ytan och att mediet i systemet kan erodera bort tunna hartsskikt och liknande som dolt defekterna efter tillverkningen.

3.10.1 Märken från släppfilmen

Märken från släppfilmen vid tillverkningen kan ibland ge repliknande defekter. När en tank eller cistern tillverkas används en form som tanken byggs upp på. Formen täcks med en släppfilm för att laminatet inte ska fastna mot formen när den tas bort, och skarvar i släppfilmen kan efter tillverkning synas som avtryck på insidan av laminatet. Dessa märken är dock ingen defekt som kräver någon åtgärd, utan är bara av kosmetisk karaktär.



Figur 82 Märken från släppfilm



Figur 83 En skrubbermantel med synliga märken från tillverkningsformen

3.10.2 Torra partier, dry spots

Frilagda, icke vätta, fibrer kan vara ett resultat av fel vid tillverkningen. I tillverkningsstandarderna står tydligt att inga torra partier eller frilagda fibrer får förekomma på mediaberörd yta i driftsatt utrustning [3]. Fibrer kan naturligtvis också, på grund av korrosion, erosion eller annan skademekanism, friläggas också under drift och bedöms i så fall enligt dessa kriterier.



Figur 84 Ett större område med dåligt vätta fibrer på utsidan av en cistern

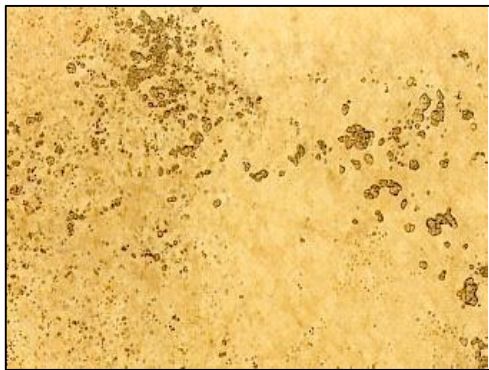


Figur 85 Icke vätta fibrer på utsidan av en skrubbermantel

Om strukturen är placerad utomhus kan plasten till viss del brytas ned p.g.a. UV-strålningen och orsaka den här typen av skada på komponenternas utsidor. Detta repareras ofta med ett extra lager av en topcoat. Ofta används också en s.k. *UV-spärr* för att förhindra att det invändiga mediet påverkas av UV-ljuset. Man bör även vara observant på utvändigt korrosion och andra skador. Det finns fall där utvändigt korrosion har lett till allvarliga haverier.

3.10.3 Gropar, pits, pinholes

En gropig yta kan vara tecken på kemisk nedbrytning, men är oftast något som kommer från tillverkningen då små luftblåsor kan ha blivit instängda vid tillverkning mot form.



Figur 86 Små gropar i ytan



Figur 87 Efter en tids drift nöts det tunna hartsskiktet bort från luftblåsorna och groparna blir synliga

Dessa luftblåsor blir ofta vid tillverkningen täckta med harts vilket gör det svårt att upptäcka dem vid kvalitetskontroll av utrustningen. Efter en tids drift nöts vanligen det tunna hartsskiktet bort och groparna blir synliga.

Den gropiga ytan kan dock något försämra möjligheten för materialet att motstå korrosion och erosion. Skadorna bör upptäckas redan av tillverkaren vid kvalitetskontrollen av den färdiga komponenten och åtgärdas då. Acceptanskriterierna blir desamma som i de standarder som gäller nytillverkning, exempelvis SSG 7670, bilaga 2 och i EN 13121-3, bilaga E tabell 24.

3.10.4 Veckad matta

En veckad ytmatta kan synas tydligt om den ligger väldigt ytligt, men kan också bli mer synlig med tiden och under drift. Den här defekten har ingen effekt på hållfastheten utan är endast rent estetisk. Lämnas utan åtgärd.

3.10.5 Kantförskjutningar och variationer i laminattjocklek

Då större GAP-detaler byggs mot en form kan det uppstå kantförskjutningar i formen. En form för att linda en cistern består av flera delar, och det kan därför uppstå mindre förskjutningar från att de olika delarna inte är perfekt linjerade. Den här defekten är ofta rent estetisk och lämnas utan åtgärd. Kraftiga kantförskjutningar stora nog att påverka hållfastheten och funktionen bör ha hittats av tillverkaren redan under egenkontrollen eller senast vid installationsbesiktning.

I Plastkärlsnormer [1] anges att skillnaden mellan största och minsta diameter på en cistern ej får överskrida 2 % av den nominella inre diametern. I samma norm anges också att avvikelser i godstjocklek kan tolereras så länge dessa är under 10 % av den nominella godstjockleken, dock som mest 3 mm.

3.10.6 Ytligt synliga fibrer

Ytligt liggande fibrer kan bero på att lösa fiberknippen varit närvarande då komponenten tillverkats mot form, och att dessa fastnat i ytmatteskiktet. Detta kräver ingen åtgärd och är endast en defekt av kosmetisk karaktär.



Figur 88 Ytligt liggande fibrer kan bero på lösa fiberknippen vid tillverkningen

4 Om reparationer

4.1 VAD GÄLLER VID REPARATIONER OCH ÄNDRINGAR

Utrustning som omfattas av AFS 2005:3, föreskriften för besiktning av trycksatta anordningar, och som tillhör klass A och B omfattas också av krav på revisionsbesiktning av ett ackrediterat organ efter en reparation eller ändring (se § 29 och § 30 i AFS 2005:3).

En reparation eller ändring kan vara följden av en skada eller en planerad omkonstruktion. I båda fallen gäller krav enligt gällande föreskrift för tillverkning. En reparation eller ändring kan därför mycket väl medföra samma krav på kontroll som vid ny-tillverkning.

4.2 REPARATIONER

Innan en reparation måste skadat material avlägsnas. Ytorna skall vara rena och torra. På stora ytor kan det skadade laminatet avlägsnas genom blästring. På mindre ytor kan det skadade materialet slipas bort. Generellt repareras en mindre skada i ett spärnskikt genom nedslipning av skadan och ett område runt, varefter nytt laminat byggs upp enligt tillverkningsritningen. Det nya laminatet ska appliceras på det slipade eller blästrade laminatet så fort som möjligt. En tumregel är att laminering ska utföras inom 24 h efter blästring. Rengöring och applikation av harts och härdare och armering sker enligt rekommendationer från harts- och glasfibertillverkare.

Om ett större område slipas ned inför en reparation bör beräkningsingenjör konsulteras för att säkerställa att strukturen ovanför reparationen inte havererar under reparationsarbetet. Detta är speciellt viktigt då större reparationer skall göras i styrkelaminatet.

Efter reparationer eller ändringar i styrkelaminatet måste krav på eventuell revisionsbesiktning enligt AFS 2005:3 beaktas. Dessutom ska en riskbedömning enligt AFS 2002:1 revideras.

Mindre reparationer görs på plats genom nedslipning och upplaminering av spärnskikt och/eller korrosionsskikt enligt ursprunglig tillverkningsritning. Finns inte ritningar att tillgå ska spärnskikt byggas upp enligt gällande norm som minimum. Rengöring och blandning av harts och härdare enligt rekommendationer från hartstillverkaren.

Ett laminat som varit i drift kan i vissa fall vara så påverkat av det medium det utsatts för på att vidhäftning av reparationslaminatet försvåras. Provlaminering och ett vidhäftningsprov bör då göras för att kontrollera att reparationen kommer kunna utföras.

5 Beräkningar som verktyg

5.1 ALLMÄNT

Finit elementmodellering (FEM) är en kraftfull beräkningsmetod för att kvantifiera och kartlägga defekters skadliga inverkan på hållfastheten hos glasfiberarmerade rör och komponenter. Kartläggningen innebär beräkningar där geometri och storlek för olika defekttyper varierar. Genom att utvärdera spänningsbeteendet med tillämpliga brottkriterier kan gränsen mellan acceptabel respektive oacceptabel brotthållfasthet för olika defekttyper estimeras. Resultatet från analysen kan användas som underlag för defekters statusbedömning vid inspektion och OFP av glasfiberarmerade produkter. Underlaget kan utgöra ett komplement till det dagliga arbetet vid inspektioner där särskild bedömning behövs.

Exempel på två olika defekttyper är: (i) invändig smal defekt i rör (till exempel en ytbrytande spricka) och (ii) invändig, utbredd skada (till exempel en korrosions- eller erosionsskada) i rör, eventuellt i kombination med delaminering. Vid en skada av korrosionsskiktet kan invändig lokal korrosion av styrkelaminatet inträffa. Denna korrosionsskada kan karakteriseras som godstjockleksminskning och/eller degradering av styrkelaminatet i ett lokalt område så att dess mekaniska egenskaper blir mycket lägre jämfört med det opåverkade materialet. Vid modellering av en defekt i styrkelaminatet tas ingen hänsyn till spärrskiktet, eftersom det inte är tryckbärande.

Det är en komplicerad och tidskrävande uppgift att ta fram ett generellt förhållande mellan storleken på en lokal skada och kvarstående hållfasthet som kan användas för bedömning vid inspektion. Uppgiften blir särskilt svår med tanke på den stora variationen av möjliga GAP-material, konstruktionsgeometrier och laster. GAP-rör tillverkas av ett antal företag runt om i världen, där varje tillverkare använder sin egen tillverkningsprocess för laminatframställningen där mängd och vinklar hos fiberarmeringen, typ av harts och tillverkningsmetoder kan variera, vilket leder till ett material med unika egenskaper. Det är därför svårt att välja det material som är mest representativt för det allmänna fallet. Dessutom är det vanligt att tillverkaren inte redovisar fullständiga mekaniska egenskaper och alla elasticitetsmoduler för de olika riktningar som behövs i en analys.

I det följande avsnittet visas ett exempel på en beräkning för att utvärdera effekterna av en typ av skada.

5.2 EXEMPEL: UTVÄRDERING AV KVARSTÅENDE HÅLLFASTHET AV GAP-RÖR MED INVÄNDIG LOKAL KORROSION

I denna studie utvärderas ett GAP-rör med bestämt material och last. Syftet med den matematiska modelleringen är att uppskatta inverkan av en invändig, lokal korrosionsskada på hållfastheten. Finita elementmodeller (FE-modeller) av GAP-röret simuleras och utvärderas vid olika defektgeometrier och -storlekar och jämförs med vissa uppsatta brottkriterier.

Resultaten av de utvärderingsförsök som presenteras nedan avser att ge en känsla för hur stor påverkan som kan förväntas beroende på skadans djup och storlek.

5.2.1 Komponent för analys och GAP material

Ett GAP-rör med innerdiameter ID = 150 mm och vägg tjocklek $t = 10$ mm används för analys av lokal korrosionsskada. För detta utvärderingsförsök väljs glasfiberarmerad epoxi (även kallad GRE) av typen Wavistrong® från Future Pipe Industries (FPI) eftersom alla dess nödvändiga elasticitetsmoduler och mekaniska egenskaper redovisas i Wavistrong® FPI Engineering Guide [16]. Materialegenskaperna sammanfattas i Tabell 2. Även om detta beräkningsexempel tillämpar mekaniska egenskaper för just GRE-rör, gäller nedan presenterad metodik och slutsatser även vanliga GAP-rör av polyester.

Tabell 2 Mekaniska egenskaper för ett GAP rör från Wavistrong® FPI

Egenskap	Värde	Enhet
Lindningsvinkel	63	[°]
Hydrostatic Design Stress HDS	50	[MPa]
Axiell modul	10000	[MPa]
Omkretsmodul	27500	[MPa]
Skjuvmodul	9500	[MPa]
Poisson axiell/omkrets	0.62	[-]
Poisson omkrets/axiell	0.26	[-]

GAP-rören från FPI tillverkas i olika tryckklasser, upp till att tåla 50 bars tryck. Rören har hög hållfasthet och är därför relativt tunnväggiga, t.ex. har ett DN150-rör klassat för 50 bar en vägg tjocklek på 6,3 mm.

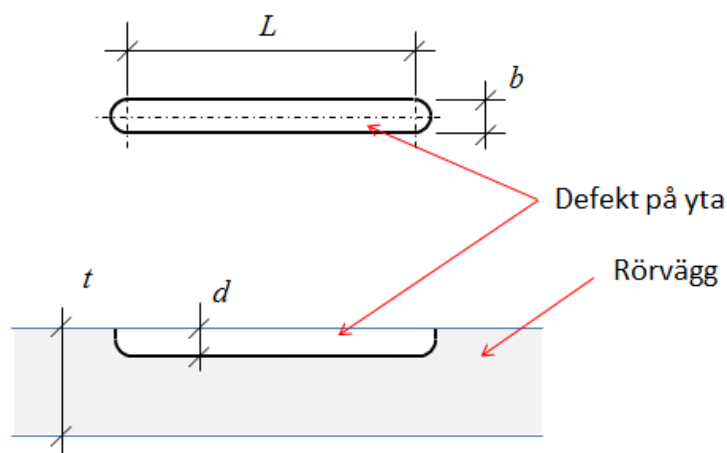
Rör med vägg tjocklek $t = 10$ mm finns inte hos FPI varför den nominella tryckklassen är okänd. Eftersom denna vägg tjocklek väljs för våra analyser gör vi en beräkning av tillåtet tryck (nominell tryckklass) för att veta en referensnivå (hållfasthet) av defektfritt GAP-rör enligt [16]:

$$P_N = \frac{2 \cdot \sigma_{HDS}}{\frac{ID}{t} + 1}$$

För ett defektfritt DN150-rör med vägg tjocklek $t = 10$ mm av GAP-material enligt Tabell 2 erhålls ett tillåtet tryck av $P_N = 62$ bar.

5.2.2 Defektgeometri och -storlek

En långsmal defekt med längden $L = 25,4$ mm (1") och bredden $b = 3,2$ mm (1/8") modelleras i längsriktningen på rörets inneryta, se Figur 89. För defektdjupet d antas tre olika värden; 20, 30 respektive 40 % av rörets vägg tjocklek t (endast styrkelaminatet beaktas i modellen).



Figur 89 Geometri på antagen defekt

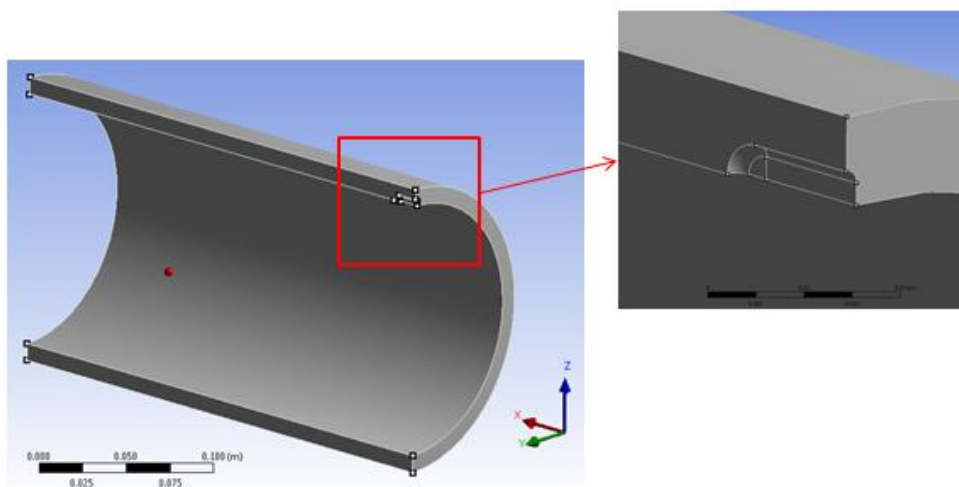
Förutom dessa tre grundfall görs även en känslighetsstudie för att utvärdera inverkan av defektens bredd och längd på kvarstående hållfasthet. För en defekt med djupet 30 % antas bredden vara tio gånger större jämfört med grundfallet. Slutligen ökas längden på defekten till fem gånger den i grundfallet. Sammanställning av alla analyserade defektgeometrier presenteras i Tabell 3.

Tabell 3 Defektgeometrier för analys

Defektdjup (mm)	Längd x bredd (mm)	Bredd defekt	Lång defekt
2 ($0,2 \cdot t$)	$25,4 \times 3,2$	-	-
3 ($0,3 \cdot t$)	$25,4 \times 3,2$	$25,4 \times 32$	127×32
4 ($0,4 \cdot t$)	$25,4 \times 3,2$	-	-

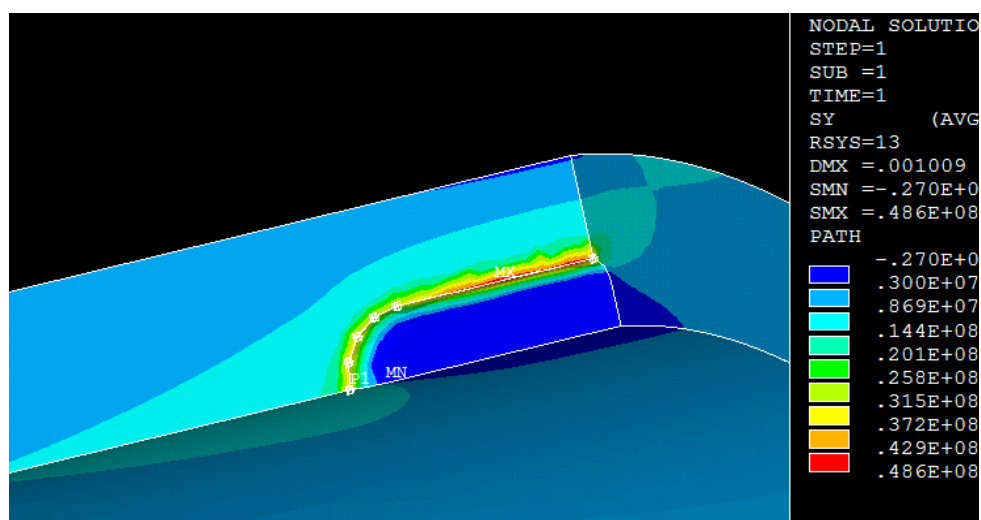
5.2.3 Modell och analys

För analysen modelleras ett 300 mm långt stycke av DN150-röret med hänsyn tagen till dess symmetriska egenskaper (avseende geometri och last). Endast styrkelaminatet modelleras, det spärrskikt som finns i ett verkligt rör antas här vara helt nedbrutet. Figur 90 visar modellen för en defekt med 40 % djup genom vägg tjockleken. Lasten på röret utgörs av ett inre övertryck på 10 bar.

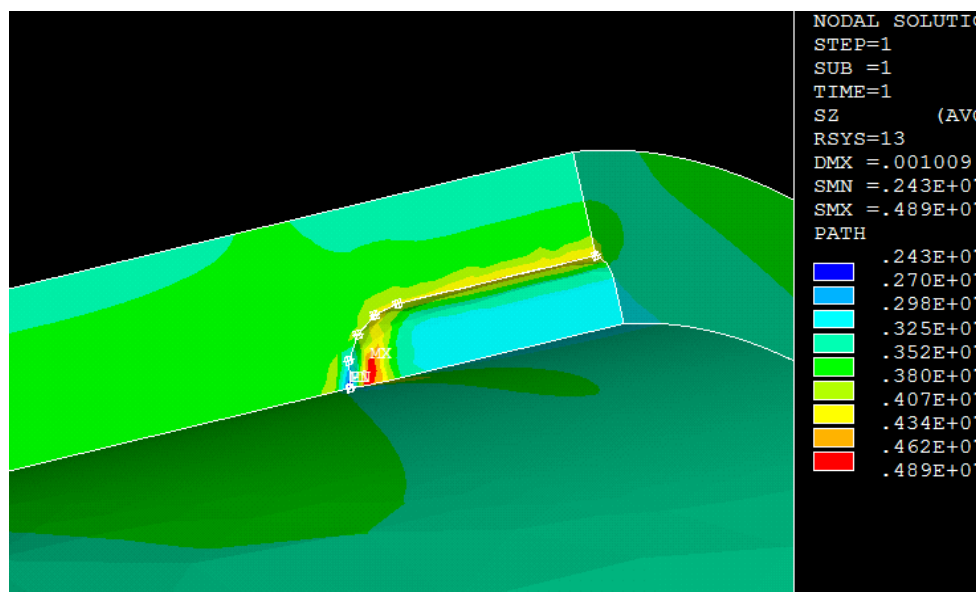


Figur 90 DN150-rör med en modellerad defekt (djup: 40 %). Symmetri utnyttjas vid axiella rörsnitt samt vid tvärgående snitt genom defekten

Den beräknade fördelningen av spänningar i omkrets- och axialled vid 10 bar övertryck för 40 % defektdjup plottas i Figur 91 och Figur 92.



Figur 91 40 % defektdjup: Beräknade omkretsspänningar i defektområdet vid 10 bar inre övertryck. Färgskalan visar spänningar i enheten Pa. Maximal spänning (48,6 MPa) uppträder i botten av defekten.



Figur 92 40 % defektdjup: Beräknade axiella spänningar i defektområdet vid 10 bar inre övertyck. Färgskala i enheten Pa. Maximal spänning (<5 MPa) uppträder i defektens ändrar.

5.3 RESULTAT FÖR UTVÄRDERING

5.3.1 Defektfritt rör

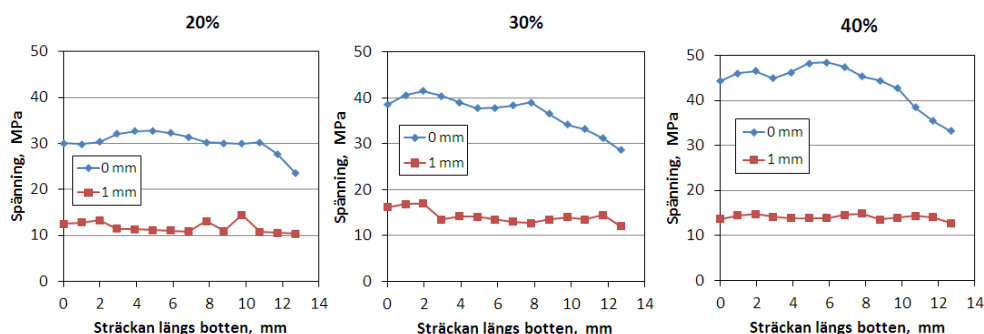
Hållfastheten hos ett rör utan defekter styrs av omkretsspänningar. Under 10 bar inre övertryck ger analysen maximala omkretsspänningar på 8,1 MPa vid innerytan. Eftersom analysen är linjär-elastisk kan spänningar skalas upp till tillåten HDS-spänning (Hydrostatic Design Stress) på 50 MPa (se Tabell 2) för att uppskatta tillåtet tryck. Uppskalningen ger ett maximalt tillåtet inre tryck på 61,7 bar för ett defektfritt DN150-rör, vilket stämmer mycket bra överrens med tidigare uppskattat tryck på 62 bar i 5.2.1.

5.3.2 Inverkan av defektdjup

Vid beräkningarna varierades djupet på defekten från 20 till 40 % av vägg tjockleken (se Tabell 3). Omkretsspänningar från FE-modellen vid och längs med defektens botten vid 10 bar inre tryck plottas i Figur 93. Spänningar tas direkt vid ytan av defektens botten (0 mm) och på cirka 1 mm avstånd in i GAP materialet.

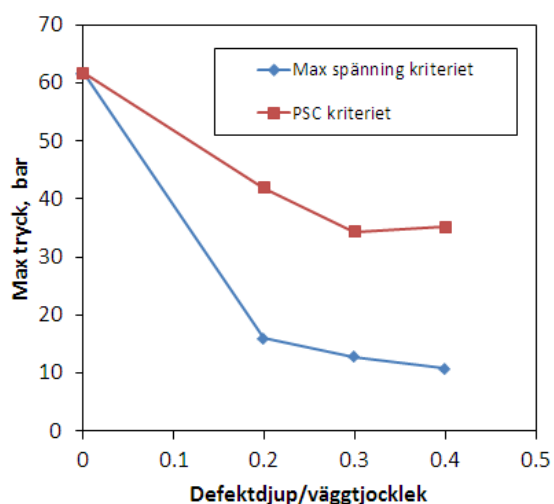
Det kan noteras att spänningarna vid ytan (0 mm) är betydligt högre jämfört med de på 1 mm avstånd från ytan. Spänningsnivåerna i ett rör med defekter ökar kraftigt jämfört med nominell omkretsspänning (8.1 MPa) för ett defektfritt rör. Dock verkar olika defektdjup ha mindre relativ påverkan på spänningsnivåer om alla tre grundfall jämförs med varandra.

Kritiskt tryck (kvarvarande brotthållfasthet) för GAP-röret med defekter utvärderas enligt det maximala spänningskriteriet med beräknade spänningar i defektens yta (0 mm) och enligt det s.k. PSC-kriteriet (Point Stress Criterion) med spänningar vid 1 mm avstånd (se Figur 93).



Figur 93 Beräknad variation hos omkretsspänningen längs defektens botten för 20, 30 respektive 40 % djup. Sträckan 0 mm motsvarar läget mitt på defekten och 12.7 mm dess ände. De övre (blå) kurvorna visar maximala spänningar på ytan vid defektens botten

Figur 94 visar kritiskt tryck utvärderat med hjälp av spännings- respektive PSC-kriterier, där olika defektdjup representeras av kvoten mellan defektdjup och vägg-tjocklek.



Figur 94 Kritiskt tryck (kvarvarande brotthållfasthet) hos GAP-röret för olika defektdjup

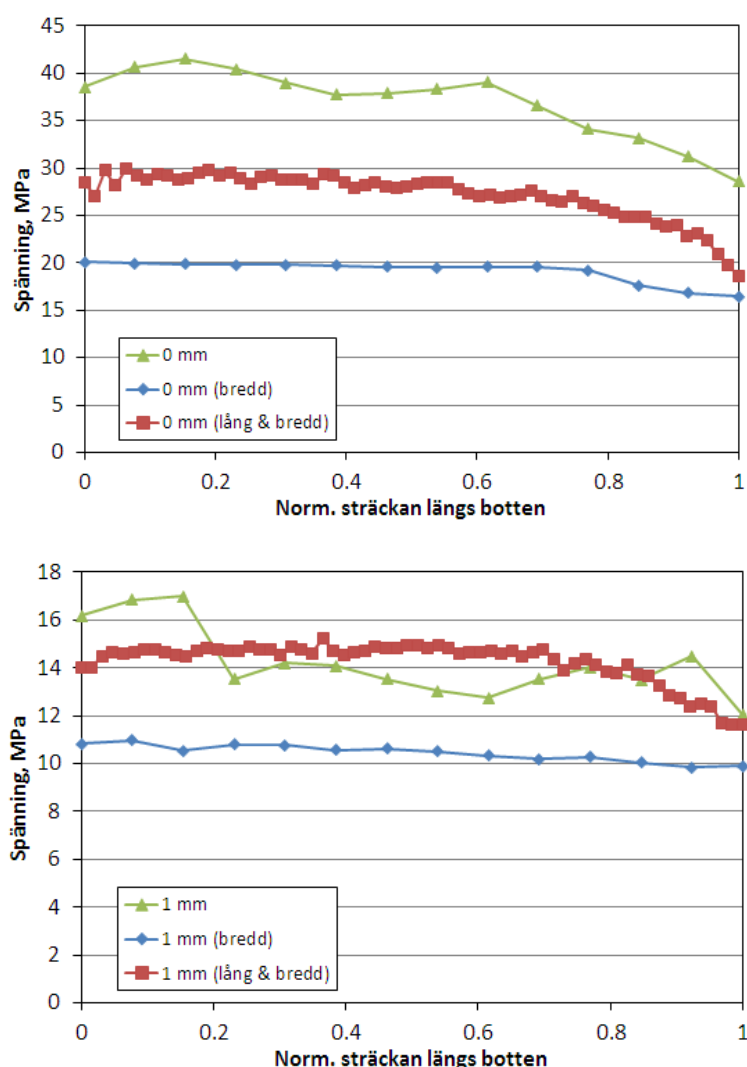
Följande observationer kan noteras från Figur 94.

- Det kritiska trycket för ett GAP-rör med en invändig defekt faller kraftigt vid en inre skada.
- Det kritiska trycket blir lägre med ökat defektdjup, men är inte linjärt beroende av djupet. Det är viktigt att understryka att denna observation endast baseras på tre analyserade defektdjup (se Tabell 3).
- Brottkriteriet baserat på maximala spänningar är mycket konservativt och visar att kritiskt tryck sjunker 4-5 gånger jämfört med nominellt tryck (ursprunglig nivå). PSC-kriteriet ger högre kritiska tryck än maxspänningskriteriet. Kritiskt tryck enligt PSC är 1,5-2 gånger mindre än nominellt tryck.
- Den stora skillnaden i brotthållfasthet som dessa kriterier ger tyder på att det finns stora spänningsgradienter vid defektens botten som behöver upplösas med finare modell (t.ex. mindre elementstorlek). Vilket brottkriterie som lämpar sig bäst för utvärdering av kvarvarande brotthållfasthet kan avgöras genom experimentell provning och kalibrering av FE-modellen.

- Experimentella studier har gjorts där ett GAP-rör med liknande ytdefekter placerade på utsidan har belastats med inre tryck till brott [17]. För ett defektdjup på 40 % av vägg tjockleken blir det kritiska trycket 30 % lägre än vid nominellt tryck. Detta styrker att PSC-brottkriteriet i vårt utvärderingsförsök ger mer realistiska kritiska tryck, cirka 30-40 % lägre än för defektfritt rör (jämfört med maxspänningskriteriet).

5.3.3 Känslighetsanalys

Med syfte att utvärdera effekten av defektens bredd och längd på kvarvarande brott-hållfasthet har en känslighetsanalys utförts genom att variera bredd och längd hos defekten med 30 % djup. Omkretsspänningar från FE-modellen vid och längs med defektens botten vid 10 bar inre tryck plottas i Figur 95. Spänningar tas direkt från ytan vid defektens botten (0 mm) och på cirka 1 mm avstånd in i GAP-materialet.



Figur 95 Omkretsspänningar för 30 % djup defekt samt variation av bredden (10 ggr) och längden (5 ggr) som plottas längs defektens botten (överst) och vid 1 mm avstånd från ytan (underst).

Det kan observeras att spänningarna för en bred defekt är 50 % lägre jämfört med en smalare (grundfall). Detta kan förklaras av mindre spänningskoncentrationer för den

bredare defekten. När längden på den breda defekten ökar med 5 ggr fås större spänningar som dock är mindre jämfört med grundfallet (smal defekt).

5.4 SLUTSATSER

Det kritiska trycket för ett GAP-rör med en grund, invändig defekt på 20 % djup av vägg tjockleken faller kraftigt initialt vid en skada, men tenderar att plana ut med ökande defektdjup jämfört med det maximala trycket för ett defektfritt rör. Med ökat defektdjup minskar det kritiska trycket, men nedgången är så långsam för djup över 20 % att trycket nästan kan anses oberoende av djupet. Det bör dock observeras att denna slutsats är baserad på en begränsad studie.

Beräkningarna visar att defekter med skarpa hörn, exempelvis mekaniskt tillfogade skador, medför betydligt högre känslighet än defekter av samma storlek med rundade kanter, exempelvis skador orsakade av erosion eller korrosion.

Den stora variationen av GAP-material, utförande, konstruktionsgeometrier och laster gör att inget generellt förhållande mellan storleken på en lokal skada och kvarstående hållfasthet kan ges för bedömning vid inspektion. Liknande beräkningsmetodik som använts i detta exempel kan användas för analys av andra tänkbara eller observerade skador i GAP-komponenter.

6 Litteraturförteckning

- [1] "Plastkärlnormer," Tryckkärlskommissionen, 1983.
- [2] "Plaströrledningsnormer," Tryckkärlskommissionen, 1988.
- [3] "SS EN 13121-3:2008 Behållare och kärl i glasfiberarmerad plast för användning ovan jord," SIS, 2008.
- [4] "ASTM D2563 Standard Practice for Classifying Visual Defects in Glass-Reinforced Plastic Laminate Parts," ASTM.
- [5] "ASTM E1417 - Standard Practice for Liquid Penetrant Testing," ASTM.
- [6] "ASTM D2583 - Standard Test Method for Indentation Hardness of Rigid Plastics by Means of a Barcol Impressor," ASTM.
- [7] "Handbook: Inspection and testing of glass-fibre reinforced laminates," Inspecta Sweden AB.
- [8] H. Lähteenmäki, "Detection of Defects in Glass Fibre Reinforced Plastics by NDT techniques," Aalto University, Espoo, 2015.
- [9] S. Römhild och K. Jacobson, "Handbok - Statusbedömning av polymera material i rökgassystem," Värmeforsk, Stockholm, 2010.
- [10] "NORSOK M-622, Fabrication and Installation of GRP piping systems," Standards Norway, 2005.
- [11] P. Meinschidt och J. Aderhold, "Thermographic Inspection of Rotor Blades," i ECNDT 2006, Berlin, 2006.
- [12] D. Bates, G. Smith, D. Lu och J. Hewitt, "Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components," Composites Part B: Engineering, vol. 31, pp. 175-185, 2000.
- [13] H. Lähteenmäki, "Detection of Defects in Dielectrics by Microwave Testing," Aalto University, Espoo, 2015.
- [14] M. André, D. Siguret, A. Foulon, S. Benmedakhene, P. Mékarbané, A. Laksimi, C. Lemaitre och J. Favergeon, "Corrosion Evaluation of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Tanks & Pressure Vessels Using Acoustic Emission Technology," i 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission.
- [15] S. Römhild och G. Bergman, "Blistering in Constructions of Fiberglass Reinforced Ester Plastics," Värmeforsk, Stockholm, 2005.
- [16] Future Pipe Industries, "Wavistrong® Filament Wound Epoxy Pipeline Systems. Engineering Guide," Future Pipe Industries, 2011.
- [17] G. Rawls, "III.5 Fiber Reinforced Composite Pipeline. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program," Savannah River National Laboratory (SRNL), Annual Progress Report, 2012.

7 Svensk-engelsk ordlista

Anmält organ	Notified Body
Armering	Reinforcement
Blåsa	Blister
Borfritt	Boron-free
Delaminering	Delamination
Fiberlindning	Filament winding
Flisa	Chip
Fog/förband	Joint
GAP, glasfiberarmerad plast	FRP, fibre-reinforced plastic
Geltid	Gel time
Glasfiber	Glass fibre
Handuppläggning	Hand-lay up
Harts	Resin
Huggen matta	Chopped strand mat, CSM
Härdare	Curing system
Härdning	Curing
Härdplast	Thermoset
Limförband	Adhesive bond
Luftinneslutning, mindre	Void
Nötning	Erosion
OFP, oförstörande provning	NDT, non-destructive testing
Permanent förband	Permanent joints
Rovingväv	Woven roving
Skärva	Chip
Slagskada	Impact damage
Spänning	Stress
Spänningskorrosion	Stress crack corrosion
Spärrskikt	Corrosion barrier
Styrkelaminat	Structural laminate
Svettning	Weeping
Svetsning	Welding
Svällning	Swelling
Termoplast	Thermoplastic
Tredjepartsorgan	Third party
Tryckkärlsdirektivet	Pressure equipment directive, PED
Töjning	Strain
Utmattning	Fatigue
Uttorkningssprickor	Mud cracks
Ytmatta	Surface veil
Åldring	Ageing

8 Tack

Författarna vill framföra sitt varma tack till ett antal personer för deras betydande insatser för respektive avsnitt i denna handbok:

Beräkningar

Andrey Shipsha, Inspecta Technology AB
Tero Manngård, Inspecta Technology AB

Föreskrifter och standarder

Jörgen Kristiansson, Inspecta Sweden AB

Röntgen

Thomas Henriksson, Inspecta Sweden AB
Rickard Långh, Inspecta Sweden AB

Ultraljud

Rickard Boman, Inspecta Sweden AB

Mikrovågteknik

Henry Lähteenmäki, Inspecta Oy
och Jouni Koivumäki, Inspecta Oy

Termografi

Stefan Sjökvist, Termisk Systemteknik i Linköping

HANDBOK FÖR INSPEKTION AV GLASFIBERARMERAD PLAST

Denna handbok syftar till att vara en grundläggande vägledning vid inspektion och statusbedömning av processutrustning i glasfiberarmerad plast (GAP). Den är även tänkt som ett stöd till den *skadeatlas* som tagits fram parallellt med denna handbok och som är en mer kortfattad version med större fokus på att tydligt beskriva skador, bedömningskriterier och tillämpbara metoder för oförstörande provning.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk