

FOGMASSOR I BETONGKONSTRUKTIONER

RAPPORT 2016:241



Fogmassor i betongkonstruktioner – Typer, åldringpåverkan och inspektion

Litteraturstudie och test av fogmassor

SVANTE NORDÄNGER, SWEREA KIMAB

ISBN 978-91-7673-241-0 | © 2015 ENERGIFORSK

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

Förord

Fogmassor av polyuretan och silikon finns i mycket stor omfattning i svenska kärnkraftverk. Fogarna finns i samtliga miljöer och är viktiga för kraftverkens säkerhet samt driftmiljö. Omfattningen är stor, i vissa fall finns flera kilometer fogar tätade med fogmassor. Det råder oklarhet i när man behöver ersätta fogmassor och vilken livslängd man kan förvänta sig av fogarna. I denna rapport ges riktlinjer för inspektion av fogmassor, och resultat från tester av fogmassor från OKG samt Forsmark redovisas.

Energiforsk driver forskningsprogram om betongkonstruktioner i vatten- och kärnkraftverk, och detta projekt har drivits gemensamt av dessa två program. Projektet har följts av referensgrupp bestående av Henrik Bäckström från Forsmark, Johanna Spåls från Ringhals, Eric Jansson, Ulrik Brandin samt Mari Jansson från OKG, Manouchehr Hassanzadeh från Energiforsk (Vattenfall AB) samt Cristian Andersson från Energiforsk. Energiforsk tackar referensgruppen för värdefulla kommentarer och synpunkter under projektgenomförandet.

Betongtekniskt program kärnkraft finansieras av E.On, Fortum, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM), Teollisuuden Voima Oy (TVO) samt Vattenfall.

Betongtekniskt program vattenkraft finansieras av Vattenfall AB, Fortum Generation AB, E.ON Vattenkraft Sverige AB, Statkraft Sverige AB, Skellefteå Kraft AB, Jämtkraft AB, Sollefteåforsens AB, Karlstads Energi AB, Jönköping Energi AB

Energiforsk oktober 2015

Monika Adsten

Områdesansvarig Kärnkraft

Cristian Andersson

Områdesansvarig Vattenkraft

Sammanfattning

I en tidigare studie utförd inom Elforsk (rapport 13:38) framkom att fog-/tätningssmassor och fogband är två polymera produktkategorier som verken prioriterar att få mer kunskap om. Denna rapport tar upp området fog- och tätningssmassor med fokus på vanligt förekommande typer, deras generella egenskaper, hur massorna åldras och en lämplig metodik för inspektion av fogarna. Rapporten är till stor del utförd som en litteraturstudie.

De vanligaste typerna av fogmassor som förekommer på kärnkraftverken tycks vara elastiska fogmassor bestående av polyuretan, silikon, polysulfid eller MS-polymer (en hybrid av polyuretan och silikon).

När det gäller kärnkraftverken påverkas åldringen hos fog-/tätningssmassor mest av strålningsintensitet och -dos, temperatur och närvaron av syre. Massor som sitter utvändigt påverkas även av UV-ljus. På vattenkraftsidan spelar temperatur och fukt stor roll för åldringen. Inom såväl kärnkraft- som vattenkraftverken har fogmassor som är i kontakt med fuktig betong en benägenhet att åldras snabbare än material som saknar den kontakten. Här kan hydrolys av mjukgörare göra materialet sprödare och öka risken för sprickor.

Än idag finns dock ingen *generell* koppling mellan graden av nedbrytning (förändring av egenskaper) och när materialet borde bytas ut för att säkerställa funktionen. Detta beror mycket på att det inte finns några standardiserade polymera material inom industrin, där specifika egenskaper uppnås. Varje tillverkare kör efter sina egna recept och bearbetningen av det polymera materialet skiljer sig också mellan olika tillverkare. En viss fog-/tätningssmassa kan t ex uppfylla sin tätande funktion även om hårdheten har ökat till det dubbla, smärre ytsprickor har uppstått och att massan krympt i fogen. Men genom egna studier kan företagen sätta egna krav om byte av fogmassa, t ex vid en hårdhetsökning på 20 %, då risk för genomgående sprickor konstaterats och att det därmed finns risk för vattenläckage och/eller brandspridning.

I rapporten ges några enklare riktlinjer för hur ofta en inspektion av fogar/tätningar borde göras och hur man kan identifiera olika typer av fogmaterial. Vidare beskrivs olika feltyper vad gäller fogmassor, möjliga orsaker till dessa fel och förslag på åtgärder.

I den senare delen av rapporten finns två studier där fogmassor som varit i drift hos OKG och Forsmark har analyserats. Från analyserna kan konstateras att de fogmassor som undersökts har varit av typerna silikon, polyuretan och MS-polymer. Undersökningar har gjorts med avseende på hårdhet samt genom DMA, DSC och FTIR. Samtliga uppvisar låg hårdhet och lågt T_g, vilket *kan* vara ett tecken på relativt liten åldring. Genom att ta ut material från verken på motsvarande ställen om t ex 1, 2, 5 och 10 år kan man följa om och hur egenskaperna och sammansättningarna förändrats med tiden.

Summary

In a former study performed within a Elforsk project, one main conclusion was that the staff in nuclear power (NPP) and water power plants (WPP) would specifically like to know more about polymeric sealants and expansion joints. This report is about sealants with focus on common existing types, their general properties, how the sealant materials age and a suitable methodology for inspection of sealant joints. The report is written with large input from a literature survey, but also with some input from manufacturers and users.

The most common sealant types existing in the NPP seem to be elastic sealants based on polyurethane, silicone, polysulfide or MS polymers (hybrid of polyurethane and silicone).

In the NPP:s the ageing of sealants is mainly influenced by intensity and dose of radiation, temperature and the presence of oxygen. Materials which are used outdoors can also be affected by UV light. In the WPP:s, temperature and humidity play an important role for ageing. In both NPP:s and WPP:s sealants which are in contact with moistened concrete have a higher tendency of ageing compared to sealants without that contact. In this case the hydrolysis of plasticizers can lead to a more brittle material with higher risk of cracking.

There is today no *general* correlation between the degree of degradation (change of properties) and when the material should be removed and substituted in order to assure the function. This depends on that there are no standardized polymeric materials in the industry, for which specified properties have been achieved. Every material manufacturer produces its material according to its own recipe and process conditions. A certain sealant can for instance fulfill its sealing function, even if the hardness as an example has doubled, minor cracks have occurred and the material has shrunk. But a company can through own studies set its own requirements: for instance change of a certain sealant at a hardness increase of 20 %, when a risk of through cracks, with a potential risk of leakage, has been pointed out.

The report gives some basic guidelines how often sealants should be inspected and how to identify different types of sealants. Furthermore different failures and possible causes to them are described, as well as proposed measures.

In the latter part of the report two studies of analyses of sealants being in operation at OKG and Forsmark plants are described. From the analyses it can be concluded that the analyzed sealants have been of silicone, polyurethane and MS Polymer types. Investigations have been performed regarding hardness, DMA, DSC and FTIR. All of them show low hardness and T_g, which *can* be a sign of a relatively humble ageing. Through picking out material from the plants from the same area in 1, 2, 5 and 10 years gives a possibility to follow the degradation of the sealant with time, i.e. change in properties and constitution.

Innehåll

1	Inledning	8
2	Typer av fog-/tätningssmassor	10
2.1	Allmänt om fog- och tätningssmassor	10
2.1.1	Primning	11
2.2	Plastiska fogmassor	11
2.3	Elastiska fogmassor	11
2.3.1	Polysulfid	12
2.3.2	Silikon	13
2.3.3	Polyuretan	15
2.3.4	MS-polymerer	16
2.4	Vattendispergerade elastiska fogmassor	17
2.5	Val av fogmassa	17
3	Problem med fogar/tätningar	19
4	Åldring och åldringseffekter	20
4.1	Faktorer som påverkar åldringen	20
4.1.1	Skillnader mellan olika typer av fogmassor	21
4.2	Åldringseffekter	24
4.2.1	Bristfällig vidhäftning	24
4.2.2	Bristfällig sammanhållning	25
4.1.3	Bortdrivning/uttryckning	25
4.2.4	Avspjälkning/fläkning/flisning	26
4.2.5	Hårdhetsökning/krackelering/försprödning	26
4.2.6	Midjebildning	27
4.2.7	Ytdefekter som mjukning, kritning, skinnbildning/ missfärgning	28
5	Inspektion av elastiska fogmassor	29
5.1	Identifiering av äldre typ av fogmassa	29
5.2	Identifiering av feltyper och orsaker samt åtgärder	30
5.3	Renovering av fogar	32
6	Analyser av materialprover från OKG	33
6.1	Bakgrund och undersökt material	33
6.2	Undersökning	34
6.2.1	Hårdhetsmätning	34
6.2.2	DMA	35
6.2.3	DSC	35
6.2.4	FTIR	35
6.3	Resultat	35
6.3.1	DMA	35
6.3.2	DSC	38
6.3.3	FTIR	38

6.4	Diskussion	40
6.5	Slutsatser	41
7	Analyser av fogmassor från Forsmark	42
7.1	Bakgrund och undersökt material	42
7.2	Undersökning och resultat	42
7.2.1	Hårdhetsmätning	42
7.2.2	DMA	42
7.2.3	DSC	44
7.2.4	FTIR	45
7.3	Diskussion	46
7.4	Slutsatser	46
8	Förslag på fortsatt arbete	48
9	Referenser	49

1 Inledning

Fogmassor/tätningar används för många applikationer i kärnkraftverken, både i och utanför reaktorinneslutningar. De kan t ex användas som en del i en tryckavgränsning i en gaskylld reaktor, i pumpar, i ventiler, runt rör (se bild 1-1) och som locktätning i transportcontainrar för radioaktivt material. I många fall är de helt eller delvis i kontakt med betong, både inomhus och utomhus.



Figur 1-1 Exempel på fog/tätning (krackelerad) i reaktorinneslutning hos OKG (O3).

Fogmassor är mindre vanligt inom vattenkraften, men injekteringsmassor används t ex för att laga/täta sprickor i betong, där man har en för hög fukthalt för att kunna använda cementbaserat bruk och/eller där sprickorna är för små att täta med bruk. Dessa massor expanderar i kontakt med vatten, vilket möjliggör tätning.

Inom projektets ram har det varit svårt att få ut fogmassor, som varit i drift hos verken, för att testa och försöka kontrollera statusen på. Det har dock inkommit några typer av fogmassor, från OKG och Forsmark, på vilka analyser har utförts.

I det tidigare utförda projektet "Behovsstudie av polymera material i betongkonstruktioner" (Elforsk rapport 13:38, [1]) framkom det att tre huvudtyper av fogmassor/tätningar identifierats vid besök hos verken, samtliga inom gruppen elastiska elastomerer: polysulfid, silikon och polyuretan. Det ska dock noteras att det säkerligen även förekommer andra typer, men de tre nämnda torde vara vanligast.

Elastomer av typen polysulfid användes en hel del inom byggnadsbranschen under 1950- till -70-talet och på den tiden innehöll dessa ofta mjukgöraren PCB (polyklorerad bifenyli). Detta ämne har dock blivit klassat som miljögift eftersom det vid för höga halter påverkar bl a immunförsvaret och fortplantningsförmågan [2]. Sedan 1978 är all nyanvändning av PCB förbjuden [3] och saneringsarbeten inom fastighetsbranschen har pågått under flera år och pågår fortfarande för att ersätta fogmassor med sådana mjukgörare.

Kärnkrafts- och vattenkraftsverken gjorde tidigare materialval som grundade sig mycket på kunskaper och erfarenheter inom byggnadssektorn. Således användes även en hel del PCB-innehållande polysulfid i kärnkraftverken. Ringhals har idag delvis bytt ut sin PCB-

innehållande fogmassa mot en silikonbaserad elastomer. Totalt rör det sig i Ringhals fall om ca 8 km utbytt fogmassa när allt är färdigt [1].

Fogarna har många olika funktioner. De ska dels sammanbinda ("limma") olika byggnadsdelar och komponenter, men samtidigt täta mot t ex vatten, ljud, brand, smuts, damm, ev. rök etc. Dessutom ska fogarna ofta ta upp rörelser i form av t ex vibrationer och sättningar i konstruktionen.

När det gäller fog-och tätningsmassor så spelar deras förmåga att motstå åldring stor roll för verkens säkerhet och drifttillförlitlighet. Själva fognings-/tätningsförfarandet är i allmänhet inte så kostnadskrävande vad gäller materialkostnader, men det kan bli dyrt om allt måste göras om och om det går ut över verkens drift.

I denna rapport ges en översikt av olika typer av vanliga fog-/tätningsmassor, deras egenskaper, faktorer som påverkar åldring och hur åldringen kan yttra sig. Dessutom ges förslag på hur fogar/tätningar ska inspekteras.

Fokus är på fogmassor som förmodligen används eller använts mest inom kärn- och vattenkraftverken, d v s polysulfid, silikon, polyuretan och den något nyare typen MS-polymer (ibland kallad hybridpolyuretan), vilka alla ingår i gruppen *elastiska* fogmassor.

2 Typer av fog-/tätningssmassor

2.1 ALLMÄNT OM FOG- OCH TÄTNINGSMASSOR

Det råder ibland delade meningar om vad som är en fog och vad som är en tätning. Ett fog är planerad och kan beräknas på konstruktionsstadiet vad gäller mängd. En tätning kan avse en oplanerad öppning (spricka) och tätningen utförs ofta med samma material som en fog [4]. Mängden material som åtgår för en tätning är svårare att uppskatta än för en fog.

En fogmassa kan också betraktas som ett "lim", eftersom den sammanbinder delar, t ex betongblock i en vägg- eller golvkonstruktion, se bild 2-1. Ibland används även ordet lim för tätning, speciellt då samma material används för såväl tätning som fogning



Figur 2-1 Till vänster visas foto från en kulvert, där fogmassan försvunnit p g a slitage. Till höger visas fogar med nyligen applicerad fogmassa.

I fortsättningen av *detta kapitel* kommer dock endast ordet fogmassa användas istället för fog-/tätningssmassa. Fogmassan har då både funktionen som fog och tätning.

Det har skett en mindre explosion inom området fogmassor de senaste årtiondena. Ny kemi och nya teknologier på grund av ändrade krav och önskemål vad gäller applicering, miljö och slutegenskaper samt den ökade konkurrensen har gjort att utvecklingstiderna har kortats ned avsevärt. Detta har å andra sidan resulterat i att färre och färre produkter får dokumenterade långtidsegenskaper [5].

När det gäller fogmassor kan man dela in dem på olika sätt. Ett sätt är att dela in dem i plastiska, elastiska och vattendispergerade elastiska ("halvelastiska") fogmassor. Det som i huvudsak avgör vilken klass en fogmassa tillhör är bindemedlet, d v s typen av polymer, och eventuell härdare.

Förutom bindemedel och eventuell härdare så kan fogmassan innehålla tillsatser som t ex antioxidanter (för att förlänga tiden mot oxidation), värmestabilisatorer (för att skydda mot värme), pigment (för att t ex ge en viss kulör), UV-stabilisatorer (för att skydda mot UV-strålning), flamskyddsmedel (för att göra materialet mer svårantändligt) och fungicider (för att skydda mot mögelangrepp).

2.1.1 Primning

Vissa fogmassor i kombination med vissa underlag kan kräva primning av ytorna före fogmassans applicering. Detta för att säkerställa god vidhäftning mellan massan och underlaget. Primern kan i detta sammanhang såväl förstärka en svag porös yta, som rent kemiskt ge bättre vidhäftning till ytan och dessutom täta till ytan för att förhindra fuktinträngning under längre drift [4]. Fuktinträngningen kan förhindras genom att primern fyller ut håligheter i ytprofilen och på sätt ökar kontaktytan med den ofta högviskösa (trögflytande) fogmassan.

Primer kan t ex appliceras genom borstning, sprayning alternativt doppning om man har en löstagbar komponent. Det är viktigt att primerskiktet inte blir för tjockt, man ska "nätt och jämnt kunna se ytprofilens toppar utan primer" (Åke Dolk, ÅD Limprojekt).

2.2 PLASTISKA FOGMASSOR

Plastiska fogmassor är inte så vanliga inom vatten- och kärnkraftverken och berörs därför endast kortfattat här.

De plastiska fogmassorna kännetecknas av att när de utsätts för stora rörelser så blir det en kvartstående deformation i fogmassan, när rörelsen upphör. Dessutom är de känsliga för yttre mekanisk åverkan, väder, vind och UV-strålning.

Hos åldrad plastisk fogmassa är den rörelseupptagande förmågan ungefär hälften av vad den är hos den elastiska fogmassan, se avsnitt 2.3 [4]. Det gäller både när det är fråga om tryck-/dragkrafter och skjuvning.

Plastiska fogmassor är relativt billiga i inköp, men kräver vid nydimensionering i gengäld större fogdjup och därmed mer material än elastiska massor. I slutändan blir materialkostnaderna därför ofta likvärdiga.

De plastiska varianterna brukar delas in i icke torkande, skinnbildande och segplastiska fogmassor. Dessa skiljer sig åt vad gäller bindemedel; icke torkande oljor/polymerer, torkande oljor/polymerer respektive plasticerat butylgummi.

2.3 ELASTISKA FOGMASSOR

Elastiska fogmassor används när man vill ta upp relativt stora fogrörelser i konstruktionen. Massorna finns ofta i olika hårdhetsgrader beroende på användningsområde. Man brukar i detta sammanhang prata om hårdhetsgrad enligt skalan (mikro)shore A. Här innebär A att den intryckningskropp som används är i form av en stympad kon och lämpar sig för "normalmjukt" gummi. Graden av hårdhet anges mellan 0 och 100 grader, där 0 innebär att deformationen vid en specificerad belastning går genom hela materialet och 100 att det inte blir någon deformation alls.

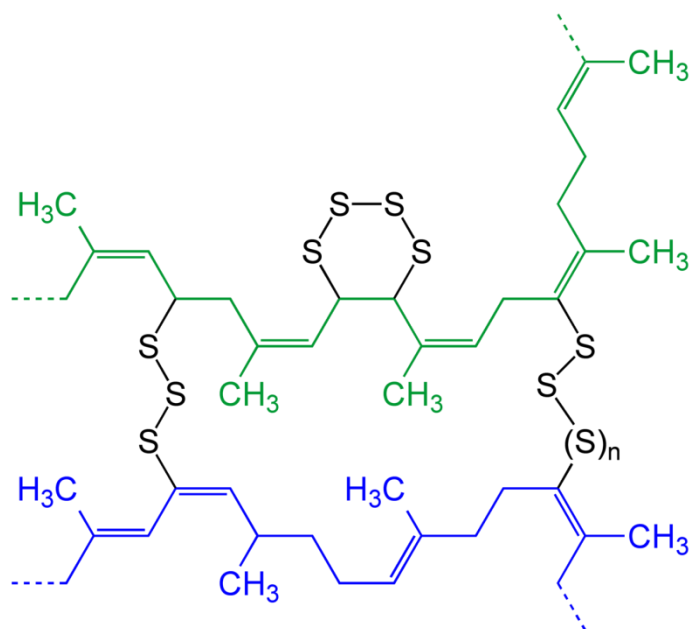
Vid alltför stora rörelser eller för hård massa för den avsedda konstruktionen, desto större är risken att brott/släpp uppstår. En hög hårdhet hos ett material innebär också ofta en hög E-modul (d v s högre styvhet).

De fogmassor som har använts och används mest inom kärn- och vattenkraftverken är till största delen troligtvis av elastisk typ. Som nämnts tidigare är det tre huvudtyper av denna som används; polysulfid (PS), silikon och polyuretan (PU).

När det gäller polyuretan finns det också en typ som kan beskrivas som ett mellanting mellan silikon och polyuretan, ofta benämnd MS-polymer. Denna hybrid har en del egenskaper som påminner om polyuretans och andra om silikons. Vid utvecklingen av MS-polymerer var tanken först och främst att ta fram ett lim/fogmassa som skulle ha silikons väderbeständighet och polyuretans styrka men samtidigt var fri från isocyanater och lösningsmedel.

2.3.1 Polysulfid

Polysulfid som elastomer var vanligare att använda under 60- och 70-talen. Men de anses fortfarande tillhörande kategorin "högpresterande" fogmassor, vilket innebär att de främst används för industriella applikationer. Rent kemiskt kännetecknas polysulfiderna av att de består av föreningar som innehåller kedjor med kolväten och svavel. Exempel på hur en polysulfid kan se ut, som i detta fall även har en tvärbinding bestående av svavelbrygga (svavelvulkaniserat gummi), visas i bild 2-2.



Figur 2-2 Exempel på polysulfid; Denna har svavel såväl *inom* kedjorna som *mellan* kedjorna (tvärbundet svavel, d v s svavelvulkanering).

Som nämnts tidigare användes i polysulfid på 60- och 70-talet ofta den senare giftklassade mjukgöraren PCB. Denna ansågs vara mycket beständig mot olika typer av åldringsmiljöer. De PCB-innehållande fogmassorna var ofta grå-svarta.

Polysulfider finns såväl som 1-komponent- som 2-komponenttyp. Den förstnämnda fukthärdande varianten används företrädesvis som fogmassa. För båda dessa typer gäller att de för så gott som alla material är i behov av primning av ytorna. Före primning krävs också noggrann rengöring av ytorna, d v s avlägsnande av smuts, damm och eventuella oljor/fett.

Polysulfider anses rent generellt ha sämre rörelseupptagningsförmåga än sina konkurrenter silikoner och polyuretaner (se 2.3.2-3). Detta innebär t ex att polysulfiderna inte bör användas i applikationer där fogen utsätts för cyklisk belastning.

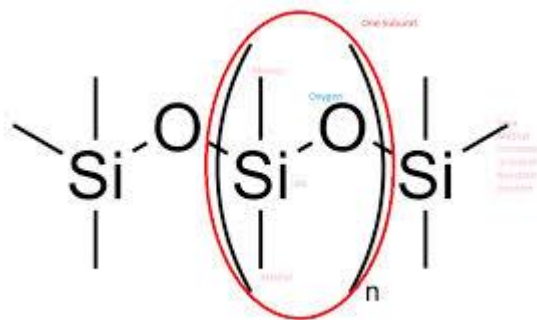
1-komponents polysulfider har i allmänhet långa härdtider, speciellt då luftfuktigheten och temperaturen är låg. Tiden till full uthärdning kan då vara så lång som 1-6 månader [6]. Polysulfider av 2-komponentstyp har betydligt kortare härdtider, ofta full uthärdning efter några dagar.

Polysulfiden har generellt väldigt goda egenskaper i tuffa, fuktiga miljöer (t ex under vatten) och används också där det finns krav på resistens mot diverse kemikalier och bränslen. Polysulfid används en hel del inom flyget, t ex i områden där tätningar kommer i kontakt med flygbränsle.

2.3.2 Silikon

Fogmassa av typen silikon är relativt vanlig på kärnkraftverken. De är vanligtvis av 1-komponentstyp och härdar då med hjälp av luftens och de fogande materialens fuktighet.

Silikonerna är uppbyggda av kiselföreningar och syre (siloxaner), se bild 2-3, medan nästan alla andra elastomer är baserade på kolväten. Detta gör att silikonmaterialen har en del unika egenskaper jämfört med andra "plastlimmer", t ex att användningstemperaturen kan vara väldigt hög utan extra värmehärdning.



Figur 2-3 Typisk struktur i silikonlim; kisel i kombination med syre (siloxan).

Silikon fäster på de flesta material (som inte är helt täta), men kräver rengjord yta och har vanligtvis mycket bra fukt-, UV- och värmebeständighet. Bild 2-4 visar exempel på en ny silikontätning som används i en reaktorinneslutning på OKG (O3).



Figur 2-4 Silikontätning avsedd för höga temperaturer, här i reaktorinneslutning hos OKG.

Silikon behåller även sin elasticitet vid låga temperaturer (minusgrader). Det silikonlim som visas i bild 5, Dow Corning 736, kan enligt Dow Corning användas i intervallet -65 till +260 °C. Under kortare, tillfälliga perioder kan materialet tåla temperaturer upp till ca 315 °C.

Härdtiden för silikonlimmet ovan är ca 2-3 mm/dygn och tillräcklig uthärdning för drift nås normalt efter ca 2-3 dygn (6 mm fog). Full uthärdning uppnås efter 10-14 dagar.

Primning av ytor behöver normalt inte utföras före applicering av silikon. Men i de fall man behöver extra skydd mot fuktinträngning under lång tid eller där man förmodar stora temperaturväxlingar i fogen kan primning rekommenderas.

Primning kan också behöva göras om kontaktytan mellan fogmassan och ytan är liten. Detta kan vara fallet om silikonerna är väldigt högviskösa (tjockflytande) och underlaget har en ytprofil som gör att silikonerna inte "hittar ned" i underlaget. I sådana fall används ofta en primer baserad på silaner (kiselföreningar).

Silikonfogar har generellt sett mycket bra rörelseupptagningsförmåga. Silikonfogmassa finns dock i varianter med såväl låg, medelhög som hög E-modul.

En nackdel med silikonerna är att de inte är övermålningsbara, eftersom färgen fäster mycket dåligt (massan innehåller silikonolja). Silikonoljan kan också migrera ut till kontaktytorna och orsaka problem med vidhäftning när fogar ska renoveras. För att säkerställa bra vidhäftning vid nyfogning måste därför kontaktytorna slipas etc.

Silikonerna tar gärna upp smuts/damm från omgivningen och bildar relativt snabbt skinn på ytan, vilket hindrar vidare bearbetning av materialet innan härdning. Silikonerna kan ur estetisk synpunkt ha nackdelen att de fläcker ned material som betong och natursten.

När 1-komponents silikonfogmassa härdar med hjälp av fukt sker en avspaltning av något ämne. I de första silikonlimmerna var avspaltningsprodukten nästan alltid ättiksyra, med sin karakteristiska lukt. Dessa finns fortfarande kvar på marknaden och används flitigt. De härdar relativt snabbt.

Den nyare generationen av 1-komponents silikonfogmassa kallas "neutralhärdande". Dessa avspaltar mer eller mindre luktfria produkter som kan vara någon form av amin, alkohol, oktoat eller oxim. De neutralhärdande används ofta på plast.

Beroende på typ av neutralhärdare som ingår, så skiljer sig egenskaperna hos silikonerna. Det kan t ex röra sig om skillnader i vidhäftning, härdningstid och risken för att orsaka korrosion på metaller. Silikonmassor som innehåller alkoxysystem är t ex långamhärdande, men lämpar sig bra då man vill undvika metallkorrosion.

De fukthärdande 1-komponentssilikonerna härdar normalt inte till mycket större djup än ca 10 mm, d v s det är så långt in som vatten absorberas. I de fall större härddjup önskas, kan man t ex använda 2-komponents silikonlim. Den andra komponenten innehåller här ett salt vilket ger upphov till fuktbildning inne i limmet. På så sätt blir fogmassan oberoende av fukt från omgivningen och materialet och fogarna kan i princip göras hur tjocka och breda som helst. Härdningen sker vanligtvis snabbt och kontrollerat och dessa 2-komponents silikonerna avspaltar ofta ättiksyra.

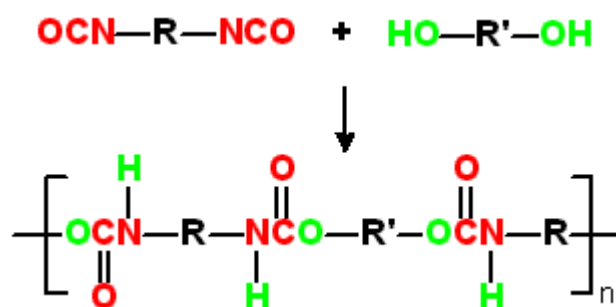
Det finns även 2-komponents silikon som mer liknar de "neutralhärdande" 1-komponentsystemen. Dessa används t ex för tjocka fogar på termoplast som substrat. Här används vanligtvis vatten och katalysator som en del i härdsystemet.

Värmehärdande silikonerna finns som 1- och 2-komponentstyp. Dessa innehåller ofta mineraliskt fyllnadsmaterial för att ge bättre värmeledningsförmåga och/eller ett hårdare material. I de fall man önskar öka den elektriska ledningsförmågan kan ett silikon fyllt med kol eller silver användas. De värmehärdande silikonerna härdas ofta vid temperaturer på ca 130-150 oC med ca 1 timmes härdtid.

2.3.3 Polyuretan

Elastiska fogmassor baserade på polyuretan är vanligtvis av fukthärdande 1-komponentstyp. Dessa uppvisar bra vidhäftning utan primer på de flesta material (dock inte glas).

Polyuretan bildas genom reaktion av isocyanat och polyol (se bild 2-5), som tillsammans med luftens fukt sedan är delaktiga i bildandet av ureabryggor [6].



Figur 2-5 Polyuretan bildas genom reaktion mellan isocyanat (rött) och polyol (grönt)

Det är dessa bryggor som står för polyuretans goda vidhäftning och styrka. I samband med härdningen avspaltas koldioxid genom en kondensationsreaktion. Koldioxiden kan orsaka bubblor (skum) i fogmassan, speciellt vid hög luftfuktighet och/eller mycket fukt på ytan.

2-komponentsvarianten bildar också ureabryggor. Härdtiden för 2-komponents polyuretan är generellt sett kortare än härdtiden för 1-komponentstypen.

På cementbaserade underlag i fuktiga miljöer krävs ofta primer.

Liksom silikoner kan polyuretaner med tiden fläcka ned material som betong och natursten. Detta estetiska problem har dock mindre betydelse i industriella applikationer.

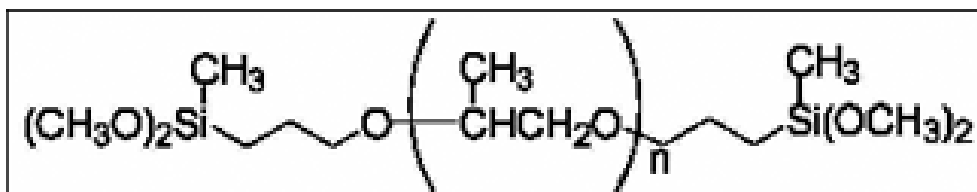
Fogmassor bestående av polyuretan innehåller ofta lite lösningsmedel.

Polyuretanfogar är till skillnad från silikonfogar övermålningsbara.

2.3.4 MS-polymerer

Modifierade silanpolymerer (MS-polymerer), silanmodifierade polymerer (SMP) och silanterminerade polymerer (STP) är olika benämningar på samma typ av fogmassa. Dessa utvecklades och lanserades i Japan under 80-talet. Sedan dess har antalet leverantörer och varianter ökat kraftigt.

I huvudsak finns det två typer av MS-polymerer a) ursprungstypen som har polyeter som ryggrad med silyl- (kiselinnehållande) ändgrupper b) den något senare utvecklade typen med polyuretan som ryggrad och silyl-ändgrupper. På den förstnämnda ser man ibland benämningen STPE (silylterminerad polyeter) och på den andra SPUR (silylmodifierad polyuretan) eller hybridpolyuretan. Den kemiska uppbyggnaden för STPE visas i bild 2-6 nedan. Om man byter ut polyetermolekylerna inom parentes i bild 2-6 mot polyuretan som i bild 2-5 får man SPUR.



Figur 2-6 MS-polymer med polyeter som ryggrad och kiselinnehållande ändgrupper.

MS-polymererna är av 1-komponentstyp, som härdar med inverkan av luftens och materialens fuktighet. De två varianterna ovan, STPE och SPUR skiljer sig inte så mycket åt när det gäller applicerings- och slutegenskaper, se tabellen i avsnitt 2.4.

Principen för silanmodifierad polyuretan är att man utgår från polyuretan och "kopplar på" silaner (kisel föreningar) i ändarna. Genom reaktion med luftens och materialens fukt får man en fogmassa som drar fördel av de positiva egenskaperna från såväl polyuretan som silikon, se ovan. Värt att notera är att hybriderna är fria från såväl isocyanat som lösningsmedel.

Liksom de 1-komponentmassor som beskrivits ovan (avsnitten 2.2.1-3), härdar alltså MS-polymererna med hjälp av luftens fuktighet. I samband med härdningen sker en kondensationsreaktion, varvid metanol avspaltas. Till skillnad från polyuretan finns det ingen risk för bubblor (skum) vid härdningen.

Precis som polyuretan har MS-polymererna bra vidhäftning till de flesta material utan primer. För förbättrad beständighet kan dock primning utföras.

UV-beständigheten för MS-polymerer är generellt något högre än för polyuretan och i nivå med motsvarande för silikoner.

MS-polymerer härdar i allmänhet ganska snabbt, men är dock något trögare än silikon. Hållfastheten är i stort sett samma som för polyuretan, medan elasticiteten/flexibiliteten är i nivå med silikons.

2.4 VATTENDISPERGERADE ELASTISKA FOGMASSOR

Dessa massor är i jämförelse med de plastiska massorna mer elastiska, men inte lika mycket som de elastiska beskrivna under avsnitt 2.2. Bindemedlet är av typen akryldispersioner och dessa fogmassor används mest inomhus i mindre tuffa miljöer vad gäller temperatur, fukt etc. I de fall de används utomhus är det oftast i kombination med en skyddande, täckande färg.

Vattendispergerade fogmassor används troligtvis inte alls inom kärn- och vattenkraftverken. Detta beroende på deras relativt svaga motstånd mot åldring.

2.5 VAL AV FOGMASSA

När man väljer fogmassa måste man förutom slutegenskaperna hos materialet även väga in egenskaper som har med t ex applicering och torkning/härdning att göra. Materialet bör kunna levereras och appliceras på det sätt som beställaren önskar och torkningen/härdningen bör kunna utföras på det sätt och inom den tid och vid de förhållanden som beställaren har som krav.

Mer konkret skulle det kunna innebära att materialet t ex ska kunna sprutas med den typ av appliceringsutrustning som beställaren vill/måste använda. Här kan det t ex röra sig om en mindre fogpistol (kittpistol) eller tryckluftsspruta för lufttäta tuber om ca 300-600 ml eller större fogsprutor där fogmassan är förpackad i påse.

Det skulle också kunna innebära att produkten måste kunna appliceras och torka/härda vid låg temperatur och eventuellt på fuktig yta. Lite fukt på ytan kan vara OK, bidrar till snabbare härdning. Dessutom är det viktigt att bearbetningstiden av massan är tillräckligt lång, d v s att fogen/tätningen kan formas/bearbetas en viss tid efter applicering.

När det gäller torkning/härdning så gäller i allmänhet att 2-komponenttyperna härdar/torkar snabbare än 1-komponenttyperna. Vad gäller 1-komponentmassor så härdar i allmänhet silikon fortast, polysulfid långsammast och polyuretan mitemellan [6]. Men genom tillsatser så kan detta regleras. Härdtiden för polyuretan kan t ex minskas genom tillsatser som amin eller metallkomplex.

Andra faktorer som kan styra val av fogmassa är hälso- och miljöaspekter samt eventuell lukt vid applicering/härdning. Någon anläggning vill kanske t ex inte jobba med massor som innehåller isocyanat, som kräver särskilda restriktioner ur arbetsmiljösynpunkt. Det innebär t ex att polyuretaner inte kan användas. Ett annat företag kan t ex ha restriktioner mot att använda silikoner p g a risken för silikonsmitta vid t ex målning. Ett tredje företag kanske inte vill använda polysulfider på grund av dess karakteristiska lukt.

Tabell 1, som är hämtad från ett utbildningsprogram inom The American Institute of Architects (AIA) [7], ger en viss hjälp vid val av fogmassa. *Det ska dock noga påpekas att egenskaperna inom varje produktgrupp (t ex silikon eller PUR) kan skilja sig ganska mycket mellan individuella produkter. Därför ska tabellen endast ses som en fingervisning av egenskaperna hos respektive produktgrupp.*

Tabell 1. Jämförelser av olika egenskaper hos olika typer av fogmassor [7]: 0=mycket dålig, 5= mycket bra. *Obs!* Tabellen gäller inte för alla produkter inom en produktgrupp utan ger endast en fingervisning om respektive produktgrupp.

Egenskaper	Silikon	PUR	STPE - hybrid	SPUR-hybrid
Väderbeständighet	5	3	4	4
Temperaturbeständighet	5	2	4	3
Rörelseupptagningsförmåga	5	4	4	4
UV-beständighet	5	2	4	4
Kemisk beständighet	3	5	3	5
Nötningsbeständighet	2	5	4	4
Beständighet mot att fläcka ned ytor	3	4	5	5
Motstånd mot smutsupptag	3	5	5	5
Övermålningsbarhet	0	4	5	5
Snabb övermålningsbarhet	0	2	5	5
Litet behov av primer på betong & porösa ytor	0	5	5	5
Applicering vid låg temperatur	3	2	5	2
Liten risk för bubbling under härdning	5	2	5	5
Snabb härdning	5	2	4	4
Lämplig för (strukturell) limning av glas	5	3	0	0
Lösningsmedelsfri	5	0	5	5
Isocyanatfri	5	0	5	5
”Lukt” under härdning	1	4	5	5
Pris	3	4	4	4
Lagringsstabilitet	4	3	5	5

3 Problem med fogar/tätningar

Problem med fogar/tätningar kan ju förutom materialet i sig och dess inverkan av åldring (se avsnitt 4) bero på ett antal olika faktorer. I allmänhet brukar följande tas upp som orsaker till kvalitetsbrister [8]:

- Användarens allmänna brist på kunskaper om egenskaper hos polymera material och fogar/tätningar i synnerhet, t ex vad gäller rengöring, applicering, torkning/härdning, övermålning etc
- Användning av icke lämpligt material för det avsedda underlaget (substratet) eller i den avsedda driftmiljön. Här bör man inhämta information från leverantör och helst också utföra egna laboratoritester vad gäller vidhäftningen
- Icke fackmannamässigt utfört arbete vad gäller eventuell primning, applicering/torkning, övermålning etc:
 - × En primer läggs vanligtvis i ett tunt skikt och ska torka innan fogen/tätningen appliceras
 - × Applicering av fogmassa bör normalt ske inom temperaturområdet +5 till +40 °C
 - × Härd-/torktiden beror mycket på typen av massa (se avsnitt 2) och fukttillgången i luften och materialen (1-komponent)
 - × Övermålning kan inte göras på alla typer av fogmassor och om det görs ska det normalt ske på uthärdad massa
- Felaktig dimensionering, t ex för litet fogdjup i förhållande till fogbredden eller beroende på större rörelser än väntat i konstruktionen:
 - × För tunn fog kan ge upphov till sprickor i fogen på grund av för liten lastöverförande yta
 - × Men även en för tjock fog är riskabelt. Om fogen är för tjock blir fogens inneboende styrka större än de vidhäftningskrafter som finns i kontaktytorna och om konstruktionen drar ihop sig p g a kyla (och fogen maximeras) finns risk för vidhäftningsbrott
- Avsaknad av kvalitetskontroll eller brister i denna

Således är det viktigt med utbildning, dels av de(n) som ska dimensionera och utföra själva fogningen/tätningen, dels av de som ska kontrollera att jobbet utförts på ett fackmannamässigt sätt.

Andra problem som kan uppstå med fogar/tätningar är att de på något sätt utsätts för lokal mekanisk åverkan. Här kan det t ex röra sig om en hårdare detalj som av en slump ligger och gnager/vibrerar mot fogen/tätningen. Apropå gnaga så har det också hänt att gnagare som råttor ger sig på tätningsmaterial i brist på annan föda. Den första problemtypen kan lösas genom att kontrollera att det inte finns vibrerande/rörliga utrustningar eller komponenter i områden med fogmassor, den andra problemtypen åtgärdas bäst med råttfällor.

Ytterligare problem som kan nämnas för fogar/tätningar är att det i områden där fogar utsätts för rörelser, kan vara problem att i verkligheten (on-site) låta fogen genomhärda statiskt innan den kommer att utsättas för de förväntade rörelserna [6]. Det innebär att fogarna/tätningarna kommer att "härda dynamiskt" istället för statiskt, vilket ökar sannolikheten för tidiga kvalitetsproblem. Dessa problem är naturligtvis större för långsamhårdande system.

4 Åldring och åldringseffekter

Ett polymert material åldras alltid, fast mer eller mindre olika snabbt. Om processen för att tillverka materialet blir fel, t ex avvikelse från receptet eller att temperaturen eller hastigheten att tillverka materialet skiljer sig från den specificerade, är sannolikheten troligtvis större att materialet åldras snabbare.

4.1 FAKTORER SOM PÅVERKAR ÅLDNINGEN

Polymera material som fogmassor påverkas/åldras på annat sätt än t ex metalliska material och betong. Generellt sett påverkas polymerer betydligt mer av temperaturen än de andra nämnda materialen och det redan vid relativt låga temperaturer ($< 50\text{ °C}$). Påverkan av solljus och annan strålning (t ex radioaktiv) är ofta betydligt större hos polymera material jämfört med de metalliska. Detta beror i grunden på att krafterna mellan atomerna är betydligt lägre hos polymerer jämfört med hos metaller, d v s det behövs mer energi för att bryta bindningar hos metaller.

De faktorer som påverkar att ett polymert material i sig, typ fogmassa/tätning, åldras i kärnkraftsmiljö är i huvudsak [9]:

- Strålningsintensiteten
- Strålningsdosen
- Temperaturen
- Närvaron av syre

Dessa faktorer spelar olika roll beroende på var i kärnkraftverken de används. I reaktorinneslutningarna utsätts fogmassan/tätningen för hög strålning, hög temperatur men befinner sig i en miljö med relativt låg halt syre. Kärnkraftverkens kylvattenvägar är omfattande och där finns det områden med såväl hög temperatur, hög fuktighet och relativt hög halt syre [1].

Ofta kan det vara så att två eller flera faktorer samverkar när det gäller åldring, d v s man får så kallade synergieffekter. Temperatur och fuktighet är exempel på det. Generellt gäller att såväl en högre temperatur som en högre fuktighet i luften medför snabbare åldring, men en högre temperatur ger också en högre diffusionshastighet av fukten, vilket ytterligare påskyndar åldringen. I litteraturen kan man se exempel på undersökningar där fukten innebär mjukgörning av det polymera materialet, d v s att glastransitionstemperaturen (T_g , "mjukningstemperaturen") blir lägre och att materialet får lägre styrka [10].

Fog- och tätningsmassor används även utomhus i kärn- och vattenkraftverkens byggnader. I sådana applikationer tillkommer ytterligare en viktig faktor för åldringen, nämligen solljuset med dess UV-strålar. I bild 4-1 visas exempel på fogmassa/tätning som troligtvis åldrats p g a UV-strålning.

Ytterligare faktor som kan påverka åldringen är mikrobiell påväxt (mögel etc). Denna kan uppstå under vissa temperatur- och fuktförhållanden.



Figur 4-1 Exempel på fogmassa i betong som åldrats p g a solljus (UV-stålning).

När det gäller tätningar som används i lock till containrar som transporterar radioaktivt avfall är kraven ofta lite annorlunda. Under normala förhållanden måste tätningen här klara av strålning och transporttemperaturer i området -40 till $+40$ °C. Men till detta kommer krav på att tätningen måste tåla höga temperaturer i händelse av brand. Hur höga temperaturer som kan uppstå vid brand beror på containerns konstruktion [9]. I sådana här tätningsapplikationer byts dock tätningarna ut regelbundet och man är därför inte så angelägen om att ta reda på hur tätningen påverkas av radioaktiv strålning. Man är mer intresserad av temperaturens inverkan på nedbrytning av tätningen vid normal drift, men främst i händelse av brand [11-13].

Elastomeriska tätningar används också i tätslutande förpackningar med radioaktivt avfall, som ska klara av sin tätande funktion i kanske flera decennier innan de placeras på en deponi. I sådana fall används ofta speciella metoder för att bedöma långtidseffekter och prediktera livslängden på de alternativa tätningsmaterialen [14].

I vattenkraftverken dominerar troligtvis påverkan av temperatur i kombination med fuktighet och den alkaliska miljön i betongen. Sådan miljö kan fogmassor utsättas för även i kärnkraftverken, speciellt vid vattenvägar för kylvattnet.

Hög temperatur, hög strålningsintensitet och -dos samt inverkan av syre är alltså exempel på hur den omgivande miljön kan påverka åldringen. Till dessa parametrar tillkommer sen eventuell inverkan från t ex statisk, dynamisk och cyklisk belastning på fogmassan samt eventuella vibrationer i konstruktionen.

4.1.1 Skillnader mellan olika typer av fogmassor

Som nämnts tidigare kan det vara svårt att generalisera egenskaper hos fogmassor, eftersom det inte finns några standardiserade material. För varje typ (polysulfid, silikon, polyuretan och hybridpolyuretan) finns nämligen en uppsjö av varianter och inte helt sällan har man tillsatt ett additiv för att bättre uppnå en viss specifik egenskap i färskt eller åldrat tillstånd, t ex ett pigment för att få en viss färg respektive en UV- eller syrestabilisator för att fördröja tiden till nedbrytning av UV-ljus och syre.

Nedan ges exempel på tillvägagångssätt från litteraturen hur man kan jämföra fogmassor i olika typer av laborativa miljöer - utan belastning och med belastning.

Exempel på jämförelser mellan laborativt åldrade fogmassor – utan belastning

Michael Chew et al beskriver ett exempel på en laborativ metod för att jämföra olika egenskaper hos fogmassor, där man först åldrar massorna i olika labmiljöer och därefter

mäter den elastiska återhämtningen (E), "spänsten", för materialet [8]. Den elastiska återhämtningen kan definieras som:

$$E = (L_e - L_r) / (L_e - L_i) \times 100 \quad [\%]$$

där L_i = initiala längden, L_e = expanderad längd, L_r = längd efter återhämtning

I den nämnda undersökningen [8] har man jämfört följande fogmassor (handelsnamn ej angivna):

- 1-komponent silikon
- 1- och 2-komponent polysulfid (1 vardera)
- 1- och 2-komponent polyuretan (3 vardera)

Dessa fogmassor applicerade man i en speciell form, lät härda i 14 dagar så full uthärdning för samtliga massor uppnåddes och lät sedan skära till fogmassorna i bitar om storleken 35 x 5 x 2 mm.

Fogmassorna utsattes sedan för fem olika miljöer:

- A. Referens: förvaring vid normal rumstemperatur, normal luftfuktighet (ej angivna) under 35 dagar
- B. UV-strålning (4 tim vid 70 °C) omväxlande med kondensation (4 tim vid 50 °C) under totalt 1000 timmar
- C. Neddoppning i vatten vid 25-30 °C (pH = 7-8) under totalt 35 dagar
- D. Neddoppning i varmt vatten 70 °C (pH = 7-8) under totalt 35 dagar
- E. Uppvärmning i ugn 70 °C under totalt 35 dagar

Efter respektive åldring gjordes sedan tester på den elastiska återhämtningen E för samtliga fogmassor. Detta utfördes på provbitar som hade $L_i = 25$ mm, drogs ut till $L_e = 37,5$ mm (30 min) och där man sedan mätte längd efter åldring, L_r , efter en timmas återhämtning.

I denna undersökning visade det sig att silikonmassan generellt hade bäst resultat i samtliga miljöer ovan. Vid testperiodens slut, 35 dagar eller 1000 timmar för UV-strålning, var den elastiska återhämtningen runt 90 % i samtliga fall (B-E). Silikon visade sig beständig mot såväl UV-ljus, fukt/vatten som hög temperatur (70 °C). Skillnaden mot referensproverna var små.

När det gäller polysulfiderna var 2-komponentvarianten bättre än 1-komponenten i samtliga fall; i varmt vatten var skillnaden väldigt stor ($E=85$ respektive 40 %). E låg för 2-komponenten runt 70-90 % i samtliga fall, för 1-komponenten var $E= 40-75$ %.

När det gäller polyuretan deltog alltså tre stycken 1-komponenter och tre stycken 2-komponenter i undersökningen, dock åldrades inte alla varianter i alla miljöer. Noterbart här var att 2-komponent polyuretanerna mestadels fick lägre elastisk återhämtning än 1-komponenterna i såväl neddoppning i varmt vatten som i ugnsvärme. Vad gäller ugnsvärme vid 70 °C kunde man konstatera höga E-värden (85-90 %) under de första 14 dagarna, därefter sjönk E kraftigt till 40-60 % för 2-komponenterna, medan den provade 1-komponenten fortfarande uppnådde ca 80 % efter 35 dagar.

När det gäller UV-beständigheten och beständigheten mot neddoppning i vatten (25-30 °C) var dock 2-komponenterna i allmänhet lite bättre.

Enligt författarna är ingen av fogmassorna en universalmassa. Olika fogmassor passar för olika funktioner och material och är mer eller mindre resistenta mot olika miljöer. Den

provade silikonerna får dock gott betyg i denna undersökning, ger heller inte ytdefekter som kritning i någon av de beskrivna miljöerna. Polysulfiderna har i allmänhet lägre elastiska återhämtning än såväl silikonerna som polyuretanerna, men vid höga ugnstemperaturer och i neddoppning i varmt vatten är polysulfiderna bättre än några av polyuretanerna, dock inte alla.

Författarna till artikeln hävdar att dessa testresultat är jämförbara med standardiserade tester som utförts hos ett ackrediterat lab [14]. Sådana här tester kan enligt författarna användas även ute på den kommersiella marknaden för att jämföra fogmassor.

Exempel på jämförelser mellan laborativt åldrade fogmassor – med belastning

I en artikel presenterad på en konferens för ca 10 år sedan [5], diskuteras utvecklingen av en testmetod och resultat som erhållits där man jämfört olika elastiska fogmassor genom accelererad åldring kombinerat med *efterföljande* cyklisk belastning. Metoden skulle användas för utvändiga väggfogmassor i byggnader med stora rörelser.

Efter många år av diskussioner och provningar kom man fram till följande provstorlek och testmetod inkluderande accelererande åldring och cyklisk belastning (översiktligt beskriven):

- Prover av fogmassa om 75 x 12 x 6 mm limmade på anodiserat aluminium
- Konditionering
- 8 veckor i Xenon-lampa och vattenspray vid 65 °C/60 % RF eller 8 veckor med UV-ljus vid 65 °C (8 tim), omväxlande med UV-ljus och vatten spray (8 tim)
- 2 cykler á 4 dagars termomekaniska cykliska rörelser mellan -20 och +70 °C med omväxlande drag- och kompressionskrafter + 3 dagar i vila, dvs 2 veckor totalt. Amplitud på drag och kompression ej angivet.
- Inspektion av proverna ("fullt utdragna") för att kontrollera eventuella ändringar i utseende och eventuella brott, därefter upprepning av ovan nämnda cykler

Tester som sedan utfördes av Oxford Brookes University för att verifiera metoden på 15 utvalda fogmassor (silikoner, polyuretaner, polysulfider, MS-polymerer och silikonmodifierad akrylmasa) från 12 leverantörer visade dock att åldringen med nämnda belastning inte gick tillräckligt fort. Efter totalt fyra cykler med UV-ljus och termomekaniska cykler enligt ovan syntes inga större tecken på åldring för några av de 15 fogmassorna och samtliga prover klarade testet utan brott. Därför valde man att lägga till ytterligare belastningscykler, så kallade *isotermiska utmattningscykler*, till ovan nämnda fyra cykler av Xenon/UV-ljus och termomekanisk cykling. Detta tillägg omfattade:

- 200 cykler á 5 cykler/min med drag-/kompression motsvarande +/-25 % amplitud

I ovan nämnda test hos Oxford Brookes University gav detta tillägg avsedd effekt, d v s åldringen accelererades tillräckligt fort och man beslöt således att lägga till den isoterma utmattningscyklingen som en option till RILEM:s originalmetod.

Ytterligare ett verifieringstest för metoden ovan, med och utan den isoterma utmattningscyklingen som option, har sedan gjorts av Tokyo Institute of Technology. I den undersökningen provades 11 fogmassor (silikoner, polyuretaner, polysulfider, MS-polymerer, polysulfider samt två akryler och en silanmodifierad polyisobutylen) från ett antal olika leverantörer på anodiserat aluminium som substrat. Till skillnad från testet hos Oxford Brookes University användes här Xenon-lampa istället för UV. I något fall utfördes även primning.

Resultaten från Tokyo Institute of Technology visar att RILEM-metoden var utslagsgivande även utan den avslutande isoterma utmattningscyklingen. Eftersom fogmassorna som utvärderats i Tokyo och i Oxford är olika, är resultaten inte jämförbara, men det tycks som Xenon-lampan ger en effektivare åldring än UV-ljuset.

I artikeln görs sedan slutklämmen att de båda studier som beskrivits ovan, Oxford och Tokyo, båda verifierar att RILEM-metoden, med eller utan den isotermiska utmattningscyklingen, kan användas för att rangordna fogmassor med avseende på utomhusåldring under mekanisk belastning. De typer av fel och förändringar i ytans utseende som förekommer hos fogmassorna är liknande de som man iakttagit hos massor som varit i drift under verkliga förhållanden.

4.2 ÅLDRINGSEFFEKTER

När en fogmassa åldras genom inverkan av strålning, hög temperatur, fukt, syre, kemikalier etc kan det bli mer eller mindre synliga resultat/defekter i eller kring fogen. Ibland syns alltså defekterna enkelt med blotta ögat, ibland med svårighet och vissa gånger inte alls.

En annan typ av åldring är, som nämnts i avsnitt 4.1, när en fogmassa utsätts för t ex statisk, dynamisk, cyklisk belastning samt vibrationer. De påverkande krafter som dessa belastningstyper ger upphov till medför att fogmassan åldras fortare. I kombination med hög temperatur och hög fuktighet etc kan dessa belastningstyper påverka fogmassan i ännu högre grad.

I nedanstående bilder ges exempel på hur olika åldringseffekter kan se ut.

4.2.1 Bristfällig vidhäftning

Bristande vidhäftning till underlaget (bild 4-2) kan medföra vidhäftningsbrott (s k adhesions-brott). Detta kan t ex uppstå om underlaget varit smutsigt vid applicering och/eller om skillnaden i ytspänning mellan underlaget och massan varit för liten, d v s fogmassan väter materialet dåligt. Bristande vidhäftning kan också med tiden bli fallet om fukt tränger in mellan ytan och fogmassan, t ex om fogmassan inte hunnit väta ytan ordentligt innan den börjar härda.



Bristande vidhäftning

Figur 4-2 Åldring som orsakat bristfällig vidhäftning till underlaget (adhesionsbrott).

Vidhäftningsbrott kan även uppstå om konstruktionen krymper vid t ex kyla och fogbredden därigenom ökar. Sådana brott uppstår om fogmassans inneboende styrka/krafter är större än de krafter som håller ihop fogmassan mot underlaget. Om fogmassan tappat viktiga tillsatser (t ex mjukörare i kontakt med alkalisk betong) så kan det innebära att massan får sämre vidhäftning till underlaget.

Bild 4-3 visar exempel på fog med sprickor och dålig vidhäftning. Pilen visar ett område där man enkelt kunde lyfta fogen med en sickel.

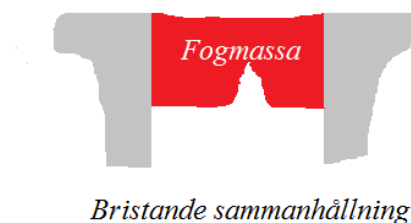


Figur 4-3 Polyuretanfog med sprickor och dålig vidhäftning (se pilen).

En tunn primer kan användas för att öka skillnaden i ytspänning mellan underlag och fogmassa och för att tätta underlaget mot fuktintrång mellan massa och underlag.

4.2.2 Bristfällig sammanhållning

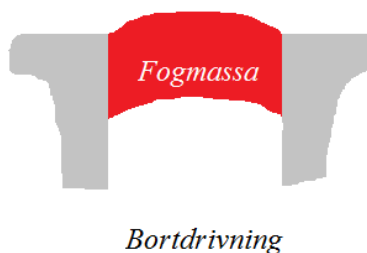
Bristande sammanhållning i en fogmassa kan resultera i brott i fogmassan (materialbrott, s k kohesionsbrott), se bild 4-4. Detta kan med tiden uppstå efter att fogmassans rörlighet, elasticitet, sjunkit p g a att materialet blivit sprödare eller hårdare eller helt enkelt utmattats genom exempelvis cyklisk belastning och/eller vibrationer.



Figur 4-4 Åldring genom bristande sammanhållning i fogmassan.

4.2.3 Bortdrivning/uttryckning

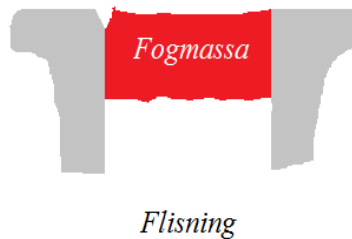
Bortdrivning/uttryckning av material kan t ex uppstå om materialet tar upp mycket fukt (sväller) och/eller om konstruktionen sväller och därigenom trycker ut massan, se bild 4-5.



Figur 4-5 Åldring genom bortdrivning, uttryckning av material.

4.2.4 Avspjälkning/fläkning/flisning

Avspjälkning/fläkning kan t ex uppstå vid en kombination av ogynnsamma krafter som verkar på fogen och ett fogmaterial som med tiden blir mindre elastiskt. Underlaget kan också flisas, så att fläkning uppstår. I bild 4-6 ligger massan till en början dikt an mot kanten, men med tiden kan eventuella rörelser i konstruktionen, och/eller att fogmassan bli styvare genom åldring, resultera i att fogen spricker upp/spjälkas.



Figur 4-6 Åldring genom flisning/spjälkning/fläkning beror dels på ogynnsam konstruktion

4.2.5 Hårdhetsökning/krackelering/försprödning

Det är inte ovanligt att mjukgörare i polymera material försvinner med tiden, t ex i kontakt med fukt och betong. Fukten kan själv till en början tjänstgöra som mjukgörare i t ex elastomerer av polyuretan [15], men med tiden och ofta vid förhöjd temperatur kan mjukgörarna ge sig av och materialet blir då hårdare/sprödare när det torkar [15]. Detta kan ofta konstateras genom viktninskning, uppmätt med t ex termogravimetrisk analys (TGA) [1].

Det synliga resultatet kan med tiden då bli att fogmassan försprödas och krackelerar, se bild 4-7.



Figur 4-7 Åldring där fogmassan blivit hårdare/försprödat och till sist krackelerat.

Om sprickorna blir genomgående i fogen kan konsekvenserna bli att fogmassans tätande funktion uteblir, d v s att fogen läcker. Polyuretanbaserade fogmassor är exempel på fogmassor som kan krackelera vid åldring, t ex p å grund av UV-ljusets inverkan.

Exempel på krackelerad fog i ett kärnkraftverk visas i bild 4-8.



Figur 4-8 Exempel på krackelerad, målad fogmassa i kärnkraftverk.

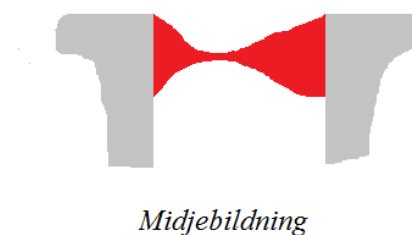
Ett annat exempel på krackelerad fog kan vara om stabilisatorerna mot t ex värme och/eller antioxidanterna mot syre bryts ned, se bild 4-9.



Figur 4-9 Exempel på krackelerad fogmassa i kärnkraftverk, troligtvis p g a värme.

4.2.6 Midjebildning

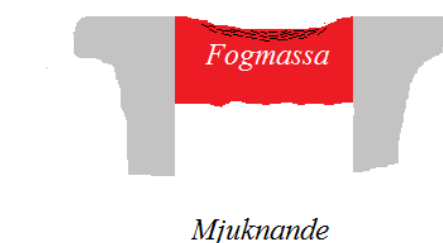
Midjebildning, se bild 4-10, kan vara ett tecken på att materialet har krympt, d v s dragit ihop sig. Detta kan ske på grund av att fogmassan tappat tillsatser och/eller att materialet utsatts för oväntat hög temperatur som drivit ut all jämviktsfukt så mycket att den elastiska återhämtningen reducerats. Midjebildning kan också uppstå genom att konstruktionen utsätts för dragkrafter och att fogbredden därmed ökar.



Figur 4-10 Åldring genom midjebildning

4.2.7 Ytdefekter som mjukning, kritning, skinnbildning/ missfärgning

Mjukning, kritning, skinnbildning och missfärgning är ofta någon form av ytdefekter, se bild 4-11.



Figur 4-11 Åldrig där fogmassan mjuknat, kritat, fått skinn eller missfärgats på ytan.

Mjukning kan t ex bero på att fogen utsatts för oönskade kemikalier, bränslen, lösningsmedel etc. Fukt kan initialt även tjänstgöra som mjukgörare, se avsnitt 4.2.5.

Kritning förekom tidigare hos polysulfidmassor innehållande PCB. Detta vita "damm" kan putsas bort från ytan.

Polysulfidmassor kan även få någonting som kallas "elefantskinn" på ytan, vilket också är ett åldringsfenomen. Denna lite hårdare yta innehåller vanligtvis inga sprickor.

Missfärgning kan ske om pigmenten lakas ur polymeren eller om något additiv lakas ur och reagerar med t ex betong eller metall.

5 Inspektion av elastiska fogmassor

Livslängden på en fogmassa/tätning i sin funktion kan variera mellan ca 2-50 år. Det finns inga generella rekommendationer hur ofta fog-/tätningssmassor bör inspekteras, inom byggnadssektorn används ofta "minst årligen"[16,17,19].

Tyvärr finns det även dåligt med riktlinjer på hur mycket en viss egenskap (mätbar eller inte) får försämrats innan fogmaterialet bör bytas ut. I princip avgörs detta beroende på vilken produkt man använder, i vilken applikation produkten sitter och vilka företagsinterna krav som finns.

Vid inspektioner är det fortfarande visuell kontroll och att lära känna sitt material som gäller, för att avgöra när det är dags för byte. Exempel på mät-/analysmetoder som skulle kunna användas ges i avsnitten Analyser av materialprover (se avsnitt 6-7). Fortfarande återstår det dock att sätta kravnivåer för när det är dags för byte.

En rekommendation kan vara att göra inspektion av fogar minst en gång per år. I miljöer där temperaturen, fuktigheten och/eller strålningen är hög och där säkerheten är extra prioriterad, bör inspektion göras tätare, 2-4 gånger per år.

Nedan ges exempel på typer av inspektioner som kan göras på fogmassor (identifiering av typ av fogmassa respektive identifiering av feltyp) och hur man kan utföra dessa.

5.1 IDENTIFIERING AV ÄLDRE TYP AV FOGMASSA

Ibland kan dokumentationen på ritningar om äldre fogmassor och tätningar vara bristfällig, speciellt hos anläggningar som varit i drift under många år och där man bytt personal ofta. Exempelvis kan man hitta identifikationen "fogmassa röd", vilket inte säger speciellt mycket vad det är för leverantör och typ.

Om man har gammal fogmassa i en anläggning kan det då vara bra att försöka ta reda på vilken typ det är. Om fogmassan ser dålig ut, kan det vara tecken på att just den typen är olämplig i den avsedda applikationen, och omvänt, ser den bra ut så kanske just den typen är lämplig.

I tabell 2 ges en översikt över hur man kan identifiera olika typer av fogmassor. Tabellen baseras delvis på [4,18,19]. Vid osäkerhet om typ, bör ett laboratorium kontaktas.

Tabell 2. Elastiska fogmassor och deras kännetecken [4,18,19].

Typ av fogmassa	Kännetecken
Polysulfid	Kritande vit (damm som kan putsas av) Nyskurna snittytor har karakteristisk lukt (svavel) Inte helt elastisk: om en längd av fogen lämnas i töjt/utdraget tillstånd över natt, går längden inte tillbaka till ursprunglig efter avlastning Avger enstaka brinnande droppar med karakteristisk lukt (svavel) vid förbränning
Polyuretan	Ofta krackelerad yta Nästan helt elastisk, d v s töjd/utdragen fog återgår till ursprunglig längd efter avlastning Ofta hög rivhållfasthet Ingen svavellukt från nyskurna snittytor Avger enstaka brinnande droppar vid antändning, Ev. svart rök Kan ha övermålningsbar yta
Silikon	Ingen kritning, inga sprickor Elastisk eller gummiliknande, d v s töjd/utdragen fog återgår till ursprunglig längd efter avlastning Ofta låg rivhållfasthet Vidhäftningsbrott relativt vanligt Fogar kan vara missfärgade beroende på smutsupptag Underlag (porösa) kan vara missfärgade p g a migrerade mjukgörare Självslocknande efter antändning, brinner utan droppbildning
MS-Polymer	Ingen kritning, inga ytsprickor Nästan helt elastisk, d v s töjd/utdragen fog återgår till ursprunglig längd efter avlastning Avger enstaka brinnande droppar vid antändning

5.2 IDENTIFIERING AV FELTYPER OCH ORSAKER SAMT ÅTGÄRDER

Fogarnas längd och betydelse för säkerheten får avgöra antal inspektioner per längdenhet. Ju kortare och viktigare fog med avseende på säkerheten, desto tätare mellan inspektionspositionerna.

I tabell 3 nedan ges exempel på feltyper som kan upptäckas genom visuell inspektion/okulärbesiktning [4, 16, 18-20]. Tabellen tar även upp möjliga orsaker till respektive feltyp och förslag på lämpliga åtgärder.

För att underlätta besiktningen kan man använda ett mindre verktyg för att peta och försöka lyfta materialet från underlaget. Bild 5-1 visar exempel på utformning av verktyg för att inspektera vidhäftning. Verktöget är som en "isskrapa". Längden på skaftet och vinkeln mellan skaft och skrapa bör anpassas efter graden av åtkomlighet hos fogen. Bredden på skrapan avgörs av fogmassans bredd och fogens åtkomlighet.



Figur 5-1 Ett mindre verktyg, utformat som en "isskrapa", kan användas som hjälp vid besiktning [20].

Resultaten från inspektionerna bör dokumenteras i en projektpärm. Här bör framgå när, var (rum, plats/position), eventuella feltyper, möjliga orsaker, förslag på åtgärd, datum för utförd åtgärd samt ansvarig person(er) för identifiering av feltyper och utförare av åtgärd etc.

Tabell 3. Vanliga feltyper, möjliga orsaker och åtgärder.

Feltyp	Möjlig orsak	Åtgärd – ta bort gammalt material och
Brott i fogmassan (kohesionsbrott)	Felaktigt fogmaterial, d v s för liten elasticitet (initialt eller efter åldring) Felaktigt utformad fog i förhållande till rådande belastningar	Välj ett starkare, mer elastiskt material Utforma fogen för att ta upp lasterna bättre; t ex ökad fogbredd och/eller tjockare fog. Kan t ex innebära uppsågning i betong med fogsåg försedd med diamantklinga
Släpp i kontaktytorna/dålig vidhäftning (adhesionsbrott)	Ikke rengjorda kontaktytor Ikke primad yta, där det borde vara Felaktig fogmassa, t ex för snabb härdning i förhållande till ytprofil Fukt som trängt in mellan fogmassa och underlag (ofta lokalt problem) alternativt fogning utförd på fuktig/kall yta Dåliga fogkanter, t ex att betongen är porös, karbonatiserad eller sprucken Felaktigt utformad fog i förhållande till rådande belastningar	Avlägsna damm, smuts (ev med alkalisk avfettning, låt torka) Prova vidhäftning med och utan primer (kontakta leverantör). Prima ev. ytan och välj fogmassa med längre härdtid så massan får tillräcklig tid att väta ytan (kontakta leverantör) Prima ytan för bättre fuktskydd (kontakta leverantör) Putsa till betongen och applicera vid behov ny betongmassa Utforma fogen för att ta upp lasterna bättre; t ex tunnare fog.
Ytkrackelering (mindre än 25 % av fogdjupet)	Ikke lämpligt fogmaterial	Följ upp befintlig fogmassa 1 ggr/månad. Om förändras, d v s krackelering djupare, åtgärda enligt Djupgående krackeleringar och sprickor nedan.
Djupgående krackeleringar och sprickor (25 % av fogdjupet eller mer)	Felaktigt fogmaterial (polyuretan?) för applikationen Stor miljöpåverkan (materialet åldras)	Välj annan typ av fogmassa (kontakta leverantör) Om möjligt, avskärma från miljöpåverkan (fukt, UV-ljus, strålning etc)?
Hård, icke elastisk massa	Fel massa, plastisk? Åldrad massa	Välj annan typ av massa (kontakta leverantör) Välj annan typ av massa (kontakta leverantör)

Feltyp	Möjlig orsak	Åtgärd – ta bort gammalt material och
Mjukgörning (lokalt)	Innesluten fukt	Ta reda på eventuellt läckage, fuktupptag (dålig dränering etc) och åtgärda
Missfärgning eller förlust av glans	UV-exponering (?) Migrering av ämnen från underlaget till fogmassan	Ingen åtgärd nödvändig, om inga andra problem kan skönjas. Annars byt till en mer UV-beständig typ Ingen åtgärd nödvändig om inga andra problem kan skönjas
Mekanisk påverkan (lokalt)	Anliggande utrustning/kabel etc som skaver Utsatt för gnagare	Avlägsna utrustning/kabel etc från fogen Gillra musfälla

5.3 RENOVERING AV FOGAR

Renovering av fogar innebär så gott som alltid att den gamla fogmassan/tätningssmassan ska tas bort innan en ny appliceras.

Den gamla fogmassan kan tas bort med kniv. Hårdare massa avlägsnas t ex med motordriven kniv eller sticksåg. Kvarsittande rester av den gamla massan tas bort med vinkelslip.

Borttagning av damm, lös smuts etc görs lämpligtvis genom dammsugning. Eventuella fetter, oljerester kan avlägsnas med alkaliskt rengöringsmedel. Om sådana rengöringsmedel används är det viktigt att ytorna får torka (avdunsta) innan applicering utförs.

Om fogbredden ska ökas p g a att man konstaterat att inte tillräckligt stora laster kan tas upp (brott i fogmassan), kan sågning med diamantklinga användas för betong.

Om primning av ytor ska göras för bättre vidhäftning, motstånd mot fukt etc, kan det göras med sprayning eller borstning.

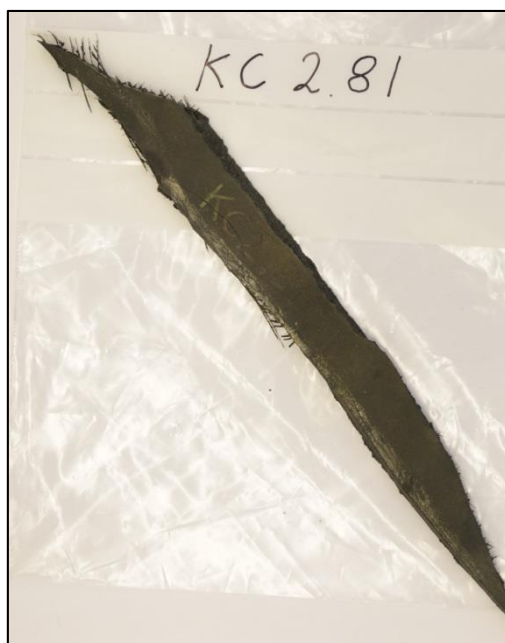
Primning och applicering av fogmassan ska sedan göras av utbildad personal med lämplig appliceringsutrustning. För mindre områden kan en mindre fogpistol med tuber användas, för större en tryckluftsdreven pistol. För riktigt stora ytor kan t ex fogsprutor där massan är förpackad i större plastpåsar användas.

6 Analyser av materialprover från OKG

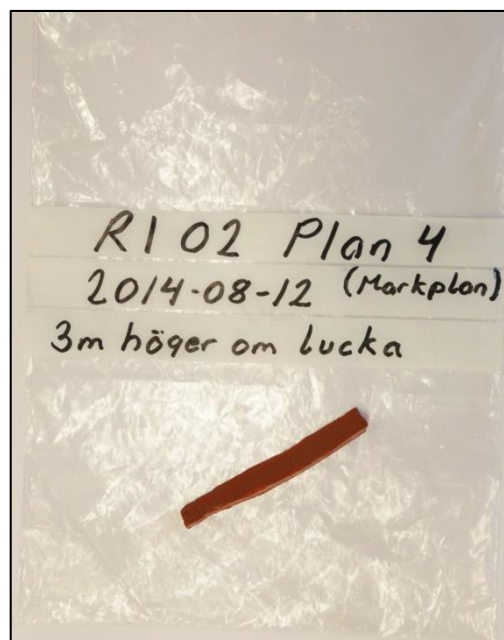
6.1 BAKGRUND OCH UNDERSÖKT MATERIAL

Swerea KIMAB har på uppdrag av Oskarshamnsverkets Kraftgrupp AB (OKG) analyserat fyra olika materialprov [21]. Materialen har undersökts med avseende på lagringsmodul mot temperatur, glastransitionstemperatur och hårdhet. Dessutom har infraröd spektroskopi (FTIR) använts för att få fram information om sammansättning och materialtyp. De undersökta materialen används idag som tätningsmaterial eller skydd mot tätningsmaterial i kärnkraftverk.

De mottagna proverna var märkta enligt bilderna 6-1 t o m 6-4:



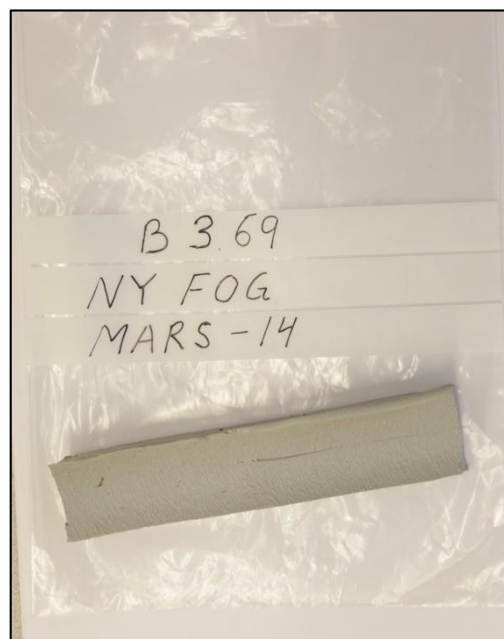
Figur 6-1 KC2.81.



Figur 6-2 R1 02 Plan 4, 2014-08-12 (Markplan), 3m höger om lucka. Prov uttaget från rum R4.60 som ligger i reaktorinneslutningen på O2.



Figur 6-3 B2.36.



Figur 6-4 B3.69, NY FOG, MARS-14.

Materialen har analyserats med avseende på hårdhet, termisk och mekanisk analys. Material- och säkerhetsdatablad för de olika materialen erhöles från OKG.

- Sikaflex® AT-connection, Sika, nya fogmassan som läggs idag (B 3.69)
- Rubber Cloth, National, gummiduk som skydd mot fog och brandtätning vid eftermonterade dilatationsfogar (KC 2.81)
- Dymeric, Tremco AB, den gamla fogmassan (B 2.36)

Även säkerhetsdatablad på Dow Corning® 736 heat resistant/sealant (RI 02) och den primer som används innan fogning bifogades (Sika® Primer-3 N). Enligt databladerna ska materialerna ha egenskaper listade i Tabell 4.

Tabell 4. Materialens egenskaper enligt databladerna.

Material	KC2.81	RI 02	B2.36	B3.69
Mikrohårdhet Shore A	60 ± 5	~	25	25
Användnings- temperatur	-40 – +100°C	~	-50 - +170°C	-40 - +70°C

6.2 UNDERSÖKNING

6.2.1 Hårdhetsmätning

Hårdheten av de olika materialerna mättes med en Bareiss mikrohårdhetsmätare. En provbit av varje material skars till med skalpell för att få en så plan yta som möjligt och tio mätpunkter registrerades för varje material.

6.2.2 DMA

DMA (Dynamical Mechanical Analysis) användes för att få ett begrepp om modul och styvhet i materialen. Denna metod ger även information om glastransitionstemperatur och kan i många fall ge ett tydligare resultat än DSC vad gäller bestämning av mjukningstemperaturer.

Mätningarna utfördes i ett Perkin Elmer Tritec 2000 DMA-instrument i *single cantilever mode*. Proverna analyserades under ett temperatursvep från -80 till 25°C eller från -100 till 25°C med en uppvärmningshastighet på 2°C/min och med en frekvens på 1 Hz.

6.2.3 DSC

Materialproverna analyserades även m h a DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) för att ge information om glastransitionstemperaturer, fasövergångar, smältpunkter etc.

6.2.4 FTIR

Proverna analyserades med FTIR (*Fourier Transform InfraRed spectroscopy*) för att få information om materialtyp. FTIR är en metod för att karaktärisera material med avseende på kemisk struktur och sammansättning.

6.3 RESULTAT

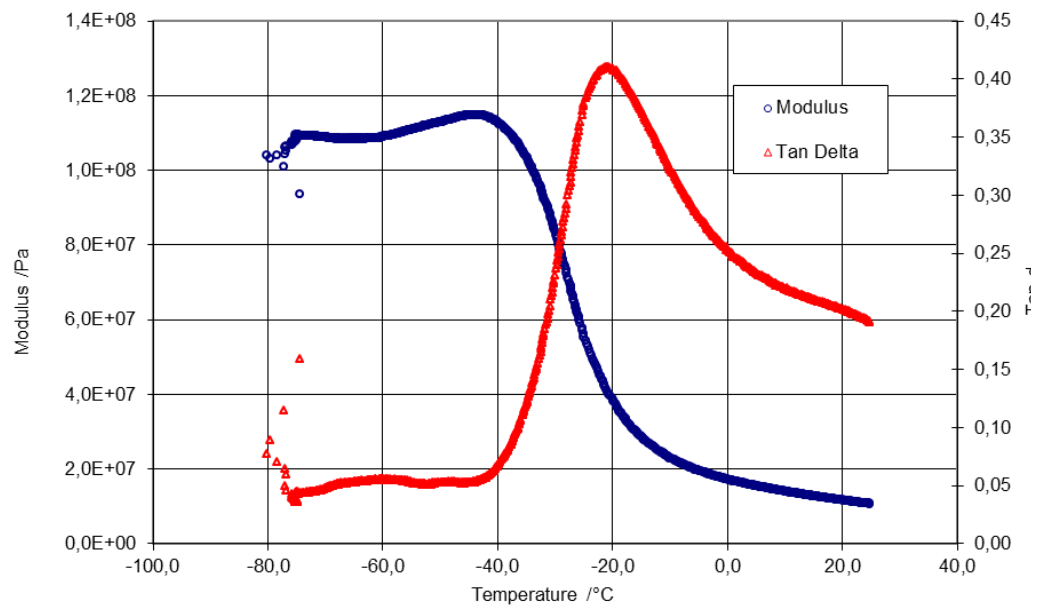
Resultaten från de termiska analyserna är sammanställda i Tabell 5 och visar att glastransitionstemperaturerna (T_g) för samtliga material är mycket låga.

Tabell 5. Hårdhet och glastransitionstemperaturer uppmätta med DSC och DMA.

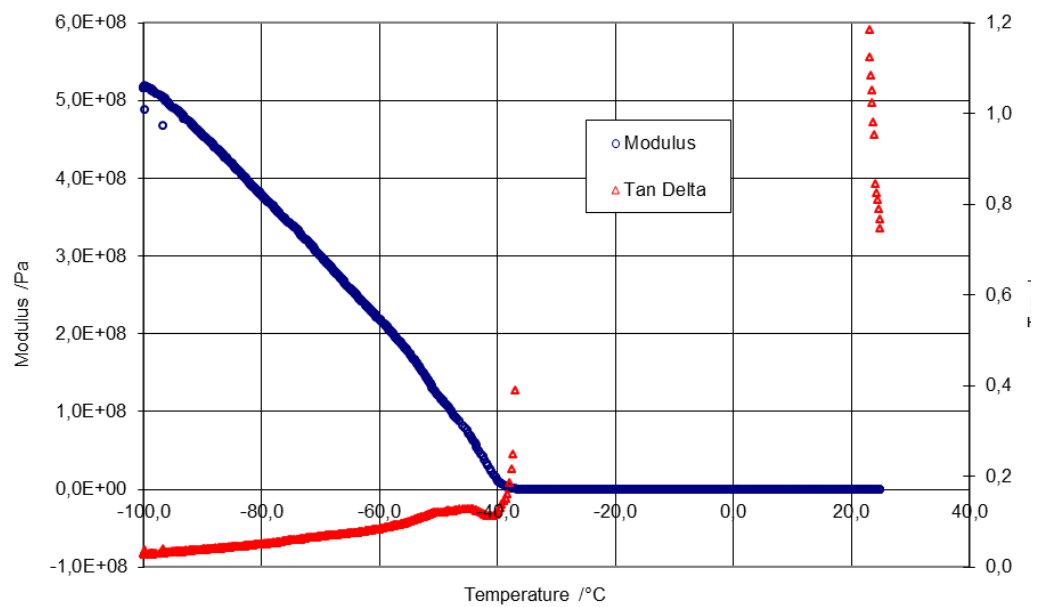
Material	KC2.81	RI 02	B2.36	B3.69
Mikrohardhet Shore A	80 ± 3	21 ± 2	27 ± 3	21 ± 2
T_g (DSC)	-45°C	~	-59°C	-76°C
T_g (DMA)	ca -40°C	ca -40°C	ca -60°C	ca -75°C

6.3.1 DMA

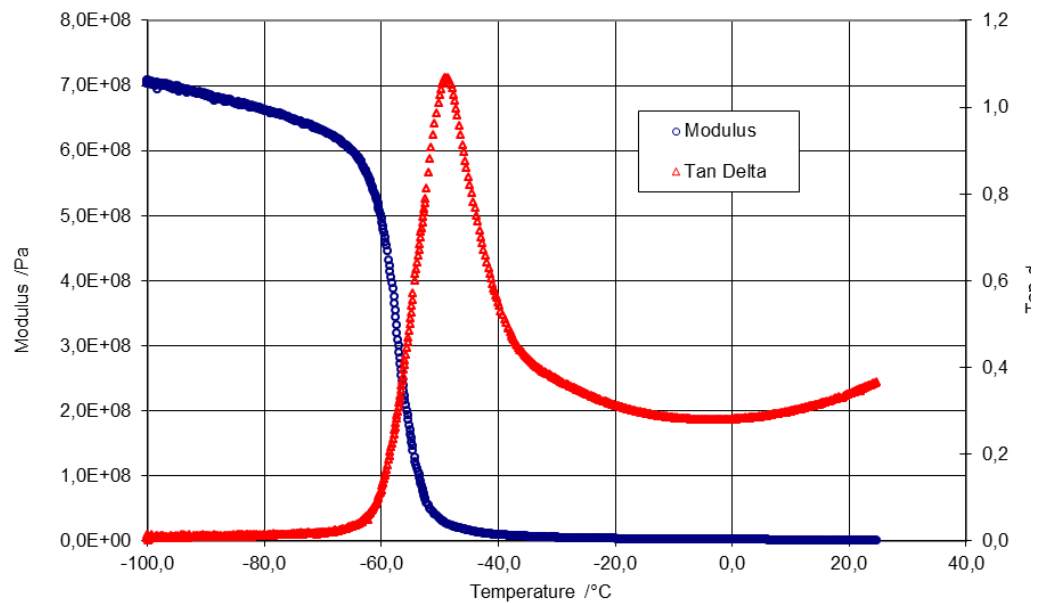
DMA-data är presenterade i bilderna 6-5 t o m 6-8. Bilderna visar både lagringsmodul, E' (blått) och dämpning, $\tan \delta$ (rött). T_g har tagits vid den temperatur där en markant modulnedgång börjar, vilket sammanfaller med den temperatur där dämpningstoppen börjar.



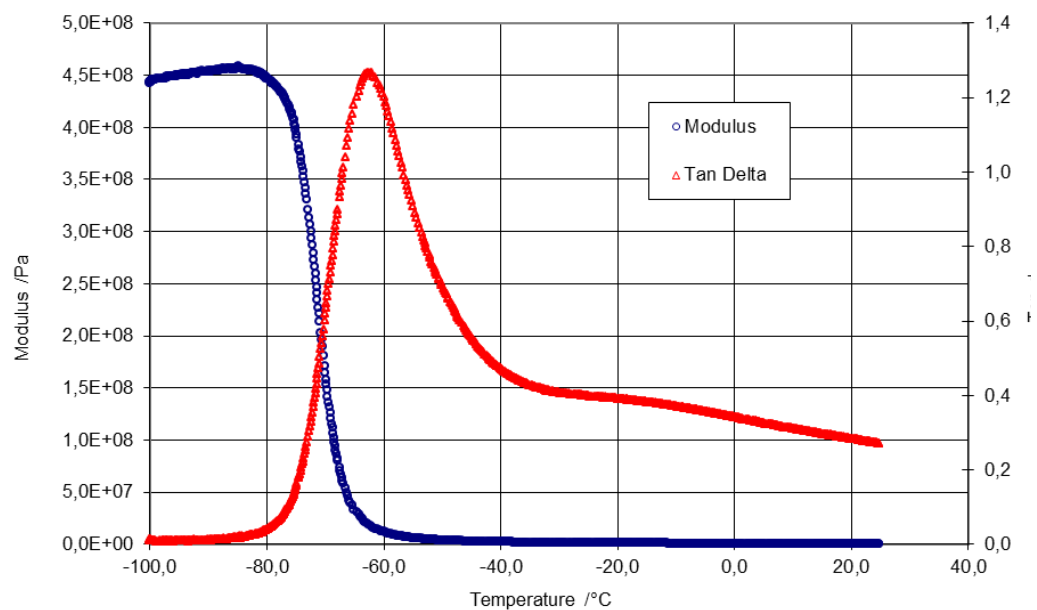
Figur 6-5 24a. DMA-data för KC 2.81.



Figur 6-6 DMA-data för RI02.



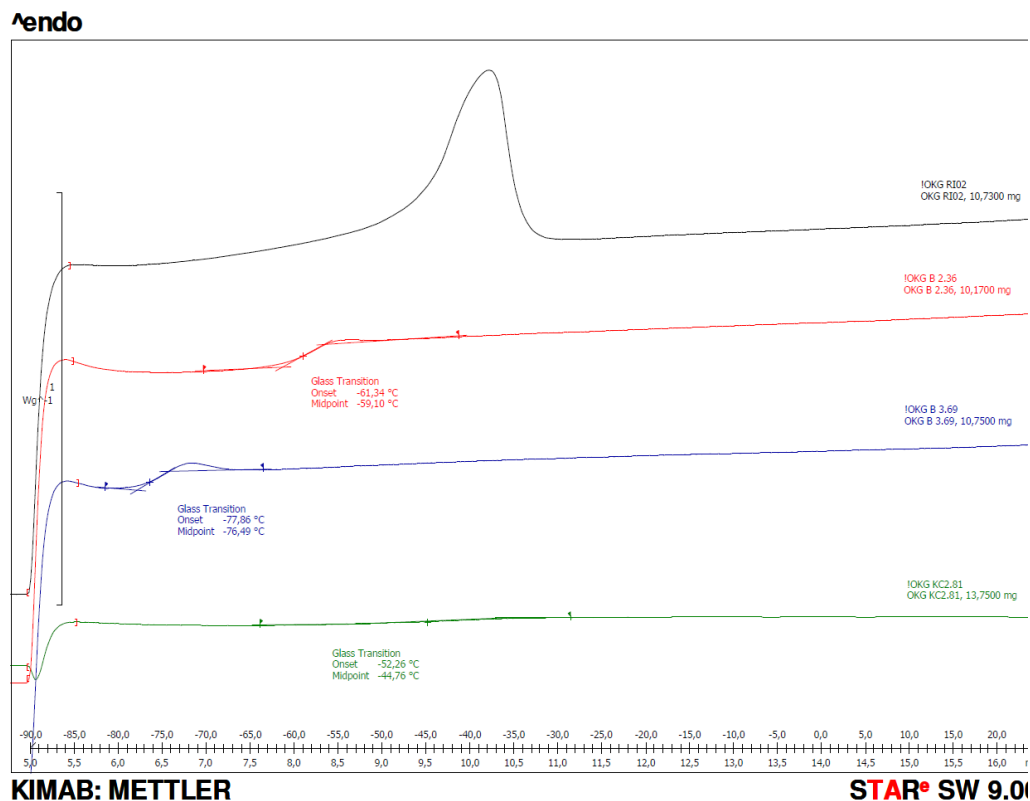
Figur 6-7 DMA-data för B 2.36.



Figur 6-8 DMA-data för B 3.69.

6.3.2 DSC

I bild 6-9 visas ett DSC-termogram för de fyra materialen.

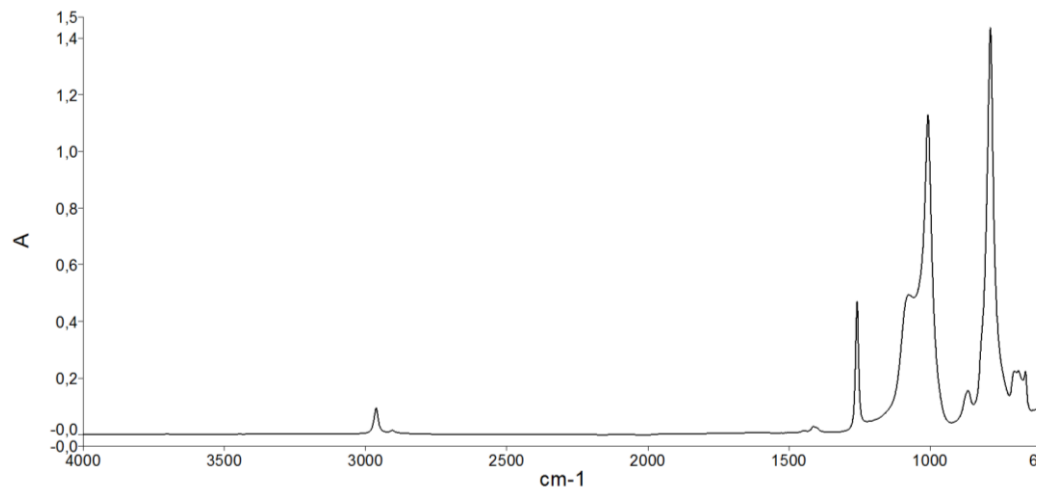


Figur 6-9 DSC-termogram för de fyra olika materialen från OKG.

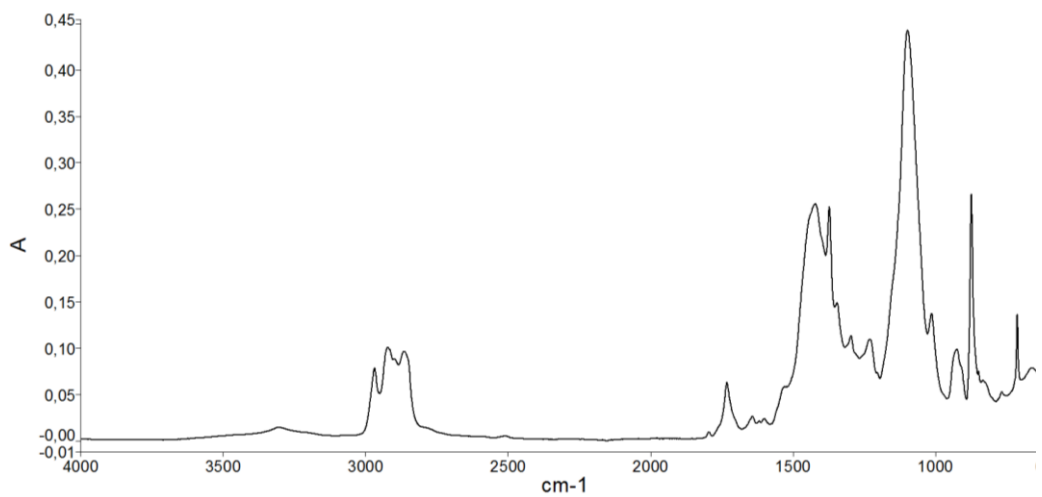
6.3.3 FTIR

FTIR-spektrum för de olika materialen är presenterade i bilderna 6-10 till 6-13. Analyserna visar att prov RI02 är en silikonbaserad elastomer. Materialen B2.36 och B3.69 tycks innehålla uretargrupper och estergrupper och är således sannolikt någon typ av polyesteruretan.

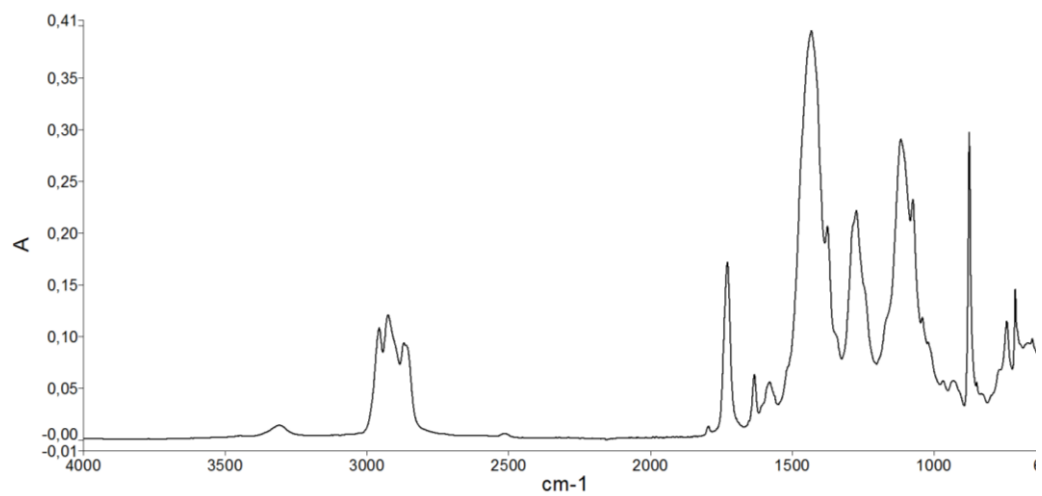
Material KC2.81 (gummiduken) är enligt databladet ett EPDM-gummi och uppvisar inga uppenbara tecken på nedbrytning. Svarta gummi material är generellt svåra att analysera med FTIR.



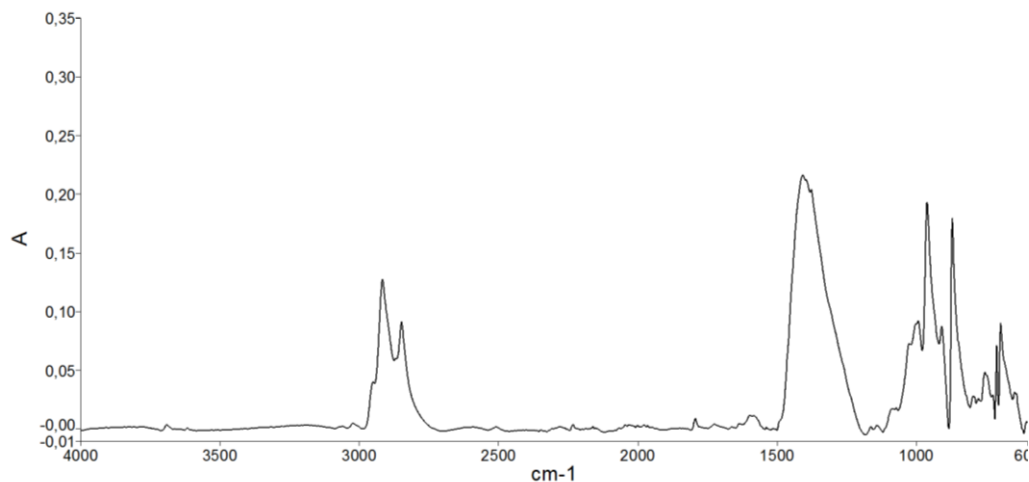
Figur 6-10 FTIR-spektrum för material RI02.



Figur 6-11 FTIR-spektrum för material B2.36.



Figur 6-12 FTIR-spektrum för material B3.69.



Figur 6-13 FTIR-spektrum för material KC 2.81.

6.4 DISKUSSION

Hårdhetsmätningarna visar att de tre polyuretan- och silikoninnehållande materialen B2.36, B3.69 och RI02 är mycket mjuka och har en mikrohårdhet runt 20-25 Shore A, Tabell 5.

Material KC2.81 (gummiduken) uppvisar en hårdhet på ca 80, vilket är ca 20 enheter högre än vad som står specificerat i databladet. Siffrorna i databladet gäller dock ett nytt material som inte varit i drift. En ökande hårdhet under drift anses som rimlig.

Både DSC och DMA-analyserna visar att glastransitionstemperaturerna för samtliga material ligger mycket lågt, ca -40 till -75°C. Då T_g på de analyserade materialen ligger så lågt anses det vara högst sannolikt att materialen kommer att vara mjuka vid låga temperaturer även efter en längre tids drift. Glastransitionstemperaturen T_g , är temperaturen där storskaliga segmentrörelser i polymerkedjorna börjar ske och där materialet börjar mjukna. För en termoplast sker vanligen en mycket markant förändring av E-modulen i detta område.

DMA-kurvorna för tre av materialen, B2.36, B3.69 och KC2.81, visar en mycket tydlig modulnedgång och en tydlig glastransitionstemperatur kan utläsas. RI02 däremot betedde sig annorlunda och blev exceptionellt mycket mjukare vid temperaturer över T_g än de andra materialen, varför denna mätning var svårare att utföra. DSC-data visade även att detta material istället för en tydlig glastransitionstemperatur snarare uppvisade något som ser ut som en smälttopp kring -40°C.

Materialen analyserades även med FTIR för att få en bättre uppfattning om vilka typer av material det rör sig om, och om det som anges i databladet tycks stämma överrens med verkligheten. Då IR-data finns sparad finns även möjligheten att i ett senare skede göra motsvarande analys och få svar på om någon kemisk förändring skett i materialen under drift, t ex oxidation och nedbrytning.

Analyserna visar att prov RI02 är en silikonbaserad elastomer. Materialen B2.36 och B3.69 tycks innehålla uretangerupper och estergrupper och är sannolikt någon typ av polyesteruretan. Enligt databladet skall dessa material just vara silanterminerade fukthärdande polyuretaner vilket tycks stämma överrens med resultatet från analyserna. Prov KC2.81 är enligt databladet ett EPDM-gummi men var svårt att analysera med FTIR.

Tillsats av kimrök i gummi gör dessa material generellt svåranalyserade med denna metod då kimröken absorberar en stor del av IR-strålningen.

6.5 SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras från undersökningen:

- Alla materialen har glastransitionstemperaturer (T_g) mellan -40°C och -75°C .
- T_g på de analyserade materialen ligger mycket lågt och det anses vara högst sannolikt att materialen kommer att vara mjuka vid låga temperaturer även efter en längre tids drift.
- Hårdhetsmätningarna visar att de tre silikoninnehållande materialen B2.36, B3.69 och RI02 är mycket mjuka och har en mikrohårdhet runt 20-25 Shore A. Material KC2.81 uppvisar en mikrohårdhet på ca 80 Shore A.
- Materialen analyserades med FTIR för att få en bättre uppfattning om vilka typer av material det rör sig om, och om det som anges i databladet tycks stämma överrens med verkligheten. Då IR-data finns sparat finns även möjligheten att i ett senare skede göra motsvarande analys och få svar på om någon kemisk förändring skett i materialen under drift, t ex oxidation och nedbrytning.
- FTIR-analyserna visar att prov RI02 är en silikonbaserad elastomer. Materialen B2.36 och B3.69 tycks innehålla både uretangerupper och estergrupper och är sannolikt polyesteruretaner. Prov KC2.81 är enligt databladet ett EPDM-gummi men var svårt att analysera med FTIR. Tillsatsen av kimrök i gummi gör materialen generellt svåranalyserade med denna metod.

7 Analyser av fogmassor från Forsmark

7.1 BAKGRUND OCH UNDERSÖKT MATERIAL

Tre olika fogmassor från Forsmark har analyserats. Materialen var märkta 1.P1.33, 2.C5.03 och 2.L01.05 och har undersökts med avseende på lagringsmodulens temperaturberoende, glastransitionstemperatur och hårdhet. Materialen har även analyserats med infraröd spektroskopi (FTIR) för att få information om sammansättning och materialtyp.

7.2 UNDERSÖKNING OCH RESULTAT

7.2.1 Hårdhetsmätning

Hårdheten av de olika materialen mättes med en Bareiss mikrohårdhetsmätare. En provbit av varje material skars till med skalpell för att få en så plan yta som möjligt och tio mätpunkter registrerades för varje material. Resultaten från hårdhetsmätningarna finns i tabell 6.

Tabell 6. Hårdhet och glastransitionstemperaturer (uppmätta med såväl DMA som DSC) för de tre materialen från Forsmark.

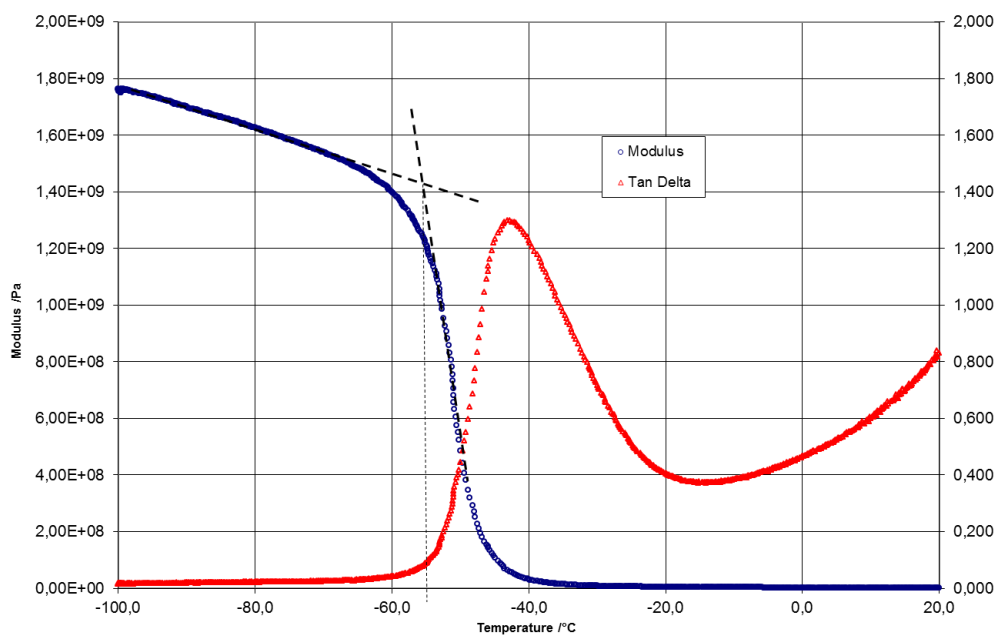
	1.P1.33	2.C5.31	2.L01.05
Mikrohårdhet (Shore A)	32 ± 1	15 ± 1	25 ± 2
Tg (DMA)	- 55°C	- 67°C	- 62°C
Tg (DSC)	- 53°C	- 66°C	- 60°C

7.2.2 DMA

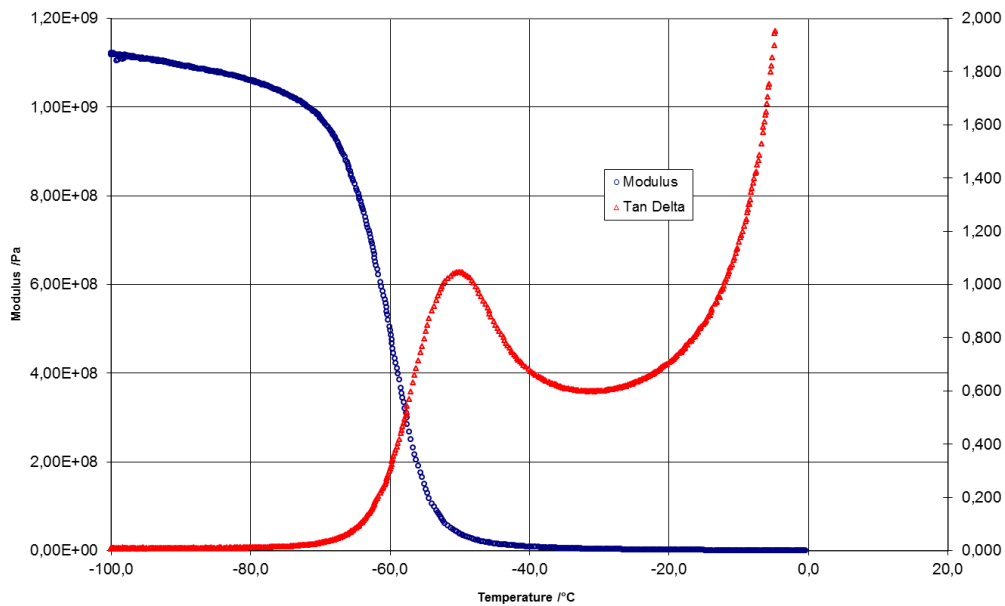
DMA (*Dynamical Mechanical Analysis*) användes för att få ett begrepp om modul och styvhet i materialen. Denna metod ger även information om glastransitionstemperatur och kan i många fall kan ge ett tydligare resultat än DSC vad gäller bestämning av mjukningstemperaturer.

Mätningarna utfördes i *single cantilever mode*, och proverna analyserades under ett temperatursvep från -80 till 25°C eller från -100 till 25°C med en uppvärmningshastighet på 2°C/min och med en frekvens på 1 Hz.

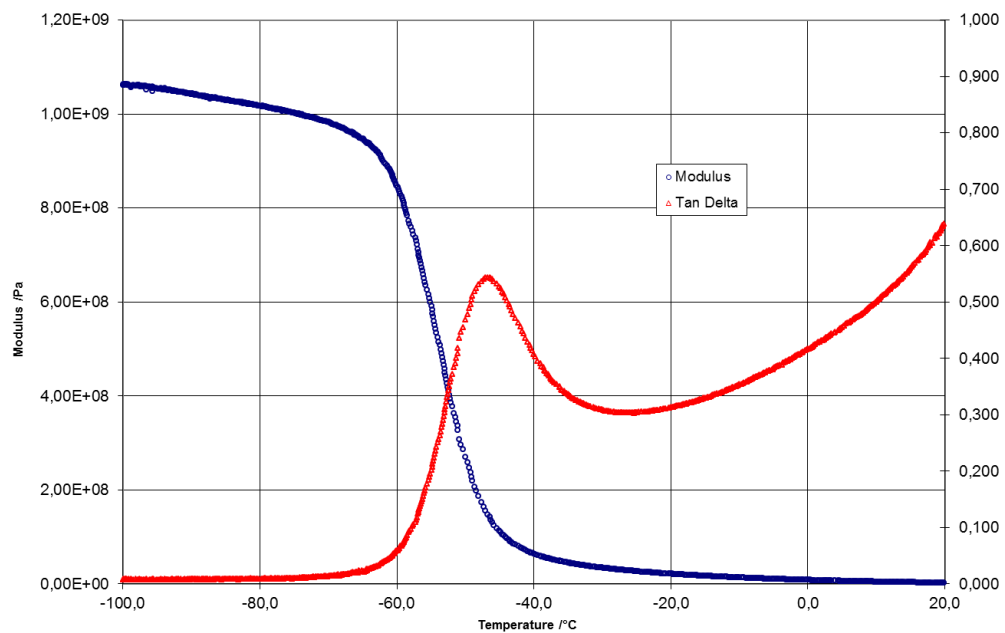
Glastransitionstemperaturen har definierats som interceptet på tangenterna från modulkurvan (se bild 7-1). DMA-data för de tre materialen är plottade i bilderna 7-1 till 7-3. Glastransitionstemperaturerna från DMA-mätningarna finns även i tabell 6.



Figur 7-1 Fog 1.P1.33.



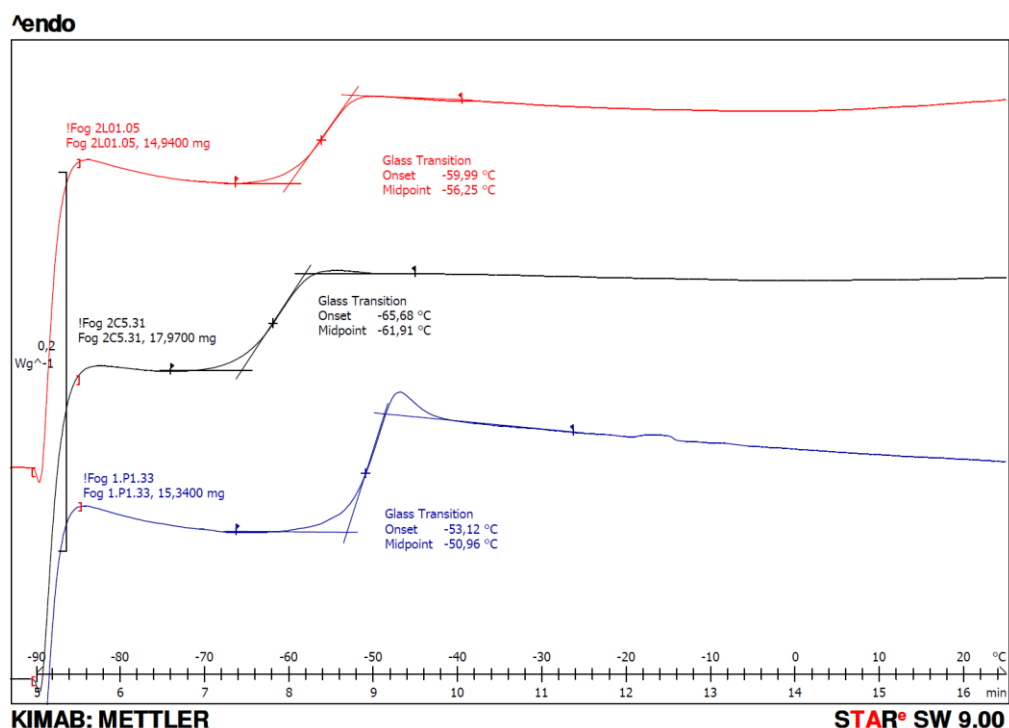
Figur 7-2 Fog 2.C5.03.



Figur 7-3 Fog 2.L01.05.

7.2.3 DSC

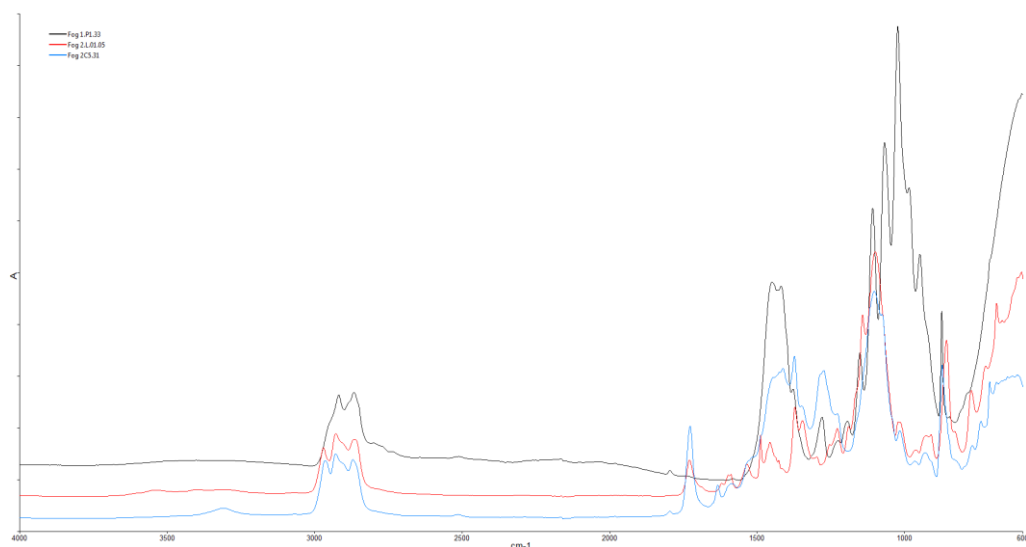
Materialen analyserades även med hjälp av DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) för att ge ytterligare information om glastransitionstemperaturer och fasövergångar, smältpunkter etc. Glastransitionstemperaturerna för de tre materialen finns att utläsa ur DSC-termogrammen i bild 7-4 och i tabell 6.



Figur 7-4 DSC-termogram för de tre olika materialen från Forsmark.

7.2.4 FTIR

Proven analyserades med FTIR (*Fourier Transform InfraRed Spectroscopy*) för att få information om materialtyp. FTIR är en metod för att karaktärisera material med avseende på kemisk struktur och sammansättning.



Figur 7-5 FTIR-spektra för de tre analyserade materialen från Forsmark.

7.3 DISKUSSION

Resultaten från hårdhetsmätningarna och de termiska analyserna finns sammanställda i tabell 6.

Hårdhetsmätningarna visar att de tre materialen skiljer sig något i hårdhet. Fogmassa 1.P1.33 uppvisar en mikrohårdhet (Shore A) på 32, fogmassa 2.C5.31 en hårdhet på ca 15 och fogmassa 2L.01.05 på ca 25.

Både DSC och DMA-analyserna visar att glastransitionstemperaturerna (T_g) för samtliga material ligger mycket lågt, ca -55 till -65°C. Glastransitionstemperaturen är den temperatur där storskaliga segmentrörelser i polymerkedjorna börjar ske och där materialet börjar mjukna. För termoplaster och gummi material sker en mycket markant förändring av E-modulen i detta område.

Då T_g på de analyserade materialen ligger så lågt anses det vara högst sannolikt att materialen kommer att vara mjuka vid mycket låga temperaturer även efter en längre tids användning.

Materialet 1.P1.33 har både en något högre hårdhet och högre T_g än de två andra materialen. Det kan tyda på att detta material har åldrats mer än de två andra materialen. Vi har dock ingen information om hårdhet och T_g för materialen i färskt tillstånd, så denna slutsats är högst osäker.

Materialen analyserades även med FTIR och de tycks vara av olika typ, se bild 29. Två av materialen, 2.C5.31 och 2.L01.05, tycks innehålla uretan- (bl a topp vid 1540 cm^{-1}) och estergrupper (topp vid 1730 cm^{-1}) och är sannolikt olika typer av polyesteruretaner. Vanligt förekommande fogmassor är just silanterminerade polyuretaner. Fogmassa 1.P1.33 innehåller dock ingen estertopp och har således en annan sammansättning. Det är dock svårt att från detta spektrum mer precist säga vad materialet består av. Det är högst troligt att de tre typerna tillhör någon av kategorierna MS-polymer eller polyuretan.

Då IR-data finns sparad finns även möjligheten att i ett senare skede göra motsvarande analys och få svar på om någon kemisk förändring skett i materialen under drift, t ex oxidation och nedbrytning.

7.4 SLUTSATSER

Följande slutsatser kan dras från undersökningen:

- Alla materialen har glastransitionstemperaturer (T_g) mellan ca -55°C och -70°C. Det är i nivå med de T_g som erhöles för fogmassorna från OKG.
- T_g på de analyserade materialen ligger mycket lågt och det anses vara högst sannolikt att materialen kommer att vara mjuka vid låga temperaturer även efter en längre tids drift.
- Hårdhetsmätningarna visar att de tre materialen från Forsmark är mjuka och har en mikrohårdhet runt 15-35 Shore A. Det är i nivå med de hårdheter som erhöles för materialen från OKG.
- Såväl hårdhet som T_g är något högre för 1.P1.33 än för de två andra materialen. Det kan tyda på att detta material har åldrats mer än de andra alternativt redan från början var lite styvare.
- Materialen analyserades med FTIR för att få en bättre uppfattning om vilka typer av material det rör sig om. Då IR-data finns sparad, finns även möjligheten att i ett senare

skede göra motsvarande analys och få svar på om någon kemisk förändring skett i materialen under drift, t ex oxidation och nedbrytning.

- FTIR-analyserna visar inte på någon silikonbaserad elastomer. Samtliga har toppar som påvisar uretangupper. De är troligtvis antingen av typen MS-polymer eller polyuretan.

8 Förslag på fortsatt arbete

Från de inledande testerna/analyserna på material från OKG och Forsmark kan noteras att det går att få ut en hel del information som borde kunna användas för att följa upp hur sammansättning och egenskaper förändras med tiden hos polymera material som fogmassor.

Hårdhetsmätningar och analyser med hjälp av FTIR, DSC och DMA är verktyg som skulle kunna användas för sådan uppföljning.

Ett förslag är att t ex årligen ta ut fogmassor för provning/analys från olika, viktiga och intressanta områden hos de olika anläggningarna. Det kan röra sig om områden där fogmassan utsatts för strålning (reaktorinneslutningar), extra mycket syre, UV-ljus (utomhus), hög fuktnivå, fuktig betong, hög temperatur etc. Analyserna och provningarna dokumenteras och sparas till nästkommande tillfällen. På sådant sätt kan man enkelt göra jämförelser mellan resultat från olika år.

I de områden där fogmassor tas ut, måste nytt material appliceras. Detta görs om möjligt, och om det anses lämpligt (d v s om materialet har uppvisat egenskaper som tidigare ansetts vara tillräckligt bra och fritt från defekter), med samma materialtyp som använts tidigare.

För att enklare kunna plocka ut provmaterial i framtiden, bör en viss mängd ny fogmassa även appliceras på någon slags testplatta av samma material som i aktuell applikation och sedan placeras i aktuell miljö. Resultat från detta nya provmaterial bör dokumenteras och sparas på motsvarande sätt som ovan från årliga tester/analyser.

Mängden fogmassa på dessa testplattor ska minst motsvara den mängd som åtgår för att ta ut provmaterial för samtliga tester/analyser för ett år multiplicerat med antal år som man vill göra uppföljningen.

Genom sådana här uppföljningar kan man sedan lättare sätta upp de krav som borde gälla för en viss fogmassa i en viss applikation, när ett byte borde göras.

9 Referenser

1. Thomas Blomfeldt och Petter Bergsjö, "Behovsstudie av polymera material i betongkonstruktioner", Elforsk rapport 13:38, 2013
2. Annelie Åstebro, "Inventering av fogmassor med PCB – Handbok för fastighetsägare". Miljöförvaltningen Stockholm Stad, 1999
3. Nationalencyklopedin, 15:e bandet. Bra Böcker. 1994. Sid. 23
4. Foghandbok från Sika
5. A.T Wolf, Dow Corning, "Durability Testing of Sealants", The Trouble with Sealants – Sealant Technology Conference, Oxford Brookes of University, School of Technologies, Wednesday 13 October 2004
6. Michael Y.L Chew, "Curing Characteristics and Elastic Recovery of Sealants, Building and Environment, Vol.36, pp 925-929, 2001
7. Ron Blank & Associates, Inc. American Institutes of Architects (AIA) – Continuation Education program. www.ronblank.com
8. Michael Y.L Chew et al, "Elastic Recovery of Sealants", Building and Environment, Vol .32, No3, pp 187-193, 1997
9. S.G. Burnay, "An overview of polymer ageing studies in the nuclear power industry", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 185, pp 4-7, 2001
10. A. Bubakri et al, "Impact of ageing conditions on mechanical properties of thermoplastic polyurethane", Materials and Design 31, pp 4194-4201, 2010
11. S.G. Burnay, K.Nelson, RAMTRANS 2, p 91, 1991
12. D.R Bronowski, SAND94-2207, Sandia National Laboratories, USA, 1995
13. H. Kowalesky et al, PATRAM '98, International Conference on Transport of Radioactive Material, Paris, 1998
14. R.L Clough, S.W. Shalaby; (Eds), ACS Symposium Series No. 475, "Radiation Effects on Polymers", American Chemical Society, 1991
15. P.Davies et al, "Accelerated ageing of polyurethanes (flexible and rigid)for marine applications", Polymer Degradation and Stability, Vol 92, pp 1455-1464, 2007
16. Den Braven Sealants B.V, Technical bulletin TB122013-007, www.denbraven.nl
17. Sika Sverige AB, Metodbeskrivning – Underhåll av fogar, Rengöring och renovering, Corporate Construction, No: 850 58 03 (författare CH. Voellm), version 1 (06/12)
18. Homeowner Protection Office, branch of BC Officing, Building Envelope Maintenance Bulletin No 5, www.bchousing.org
19. Svenska Fogbranschens Riksförbund, SRF-rekommendation nr 4, Juni 1994, Rev aug 2004

20. Pecora Corporation, Joint Sealant Inspection, Technical Bulletin #103.
www.pecora.com
21. J. Samuelsson och M. Källrot Janstål, "Mätning av materialparametrar hos gummimaterial", KIMAB-rapport 11823, 2015

FOGMASSOR I BETONG- KONSTRUKTIONER

Den här rapporten behandlar området fog- och tätningsmassor med fokus på vanligt förekommande typer av massor, deras generella egenskaper, hur de åldras och en lämplig metodik för inspektion av fogarna.

Här ges några enkla riktlinjer för hur ofta en inspektion av fogar och tätningar bör göras och hur man kan identifiera olika typer av fogmaterial. Vidare beskrivs olika typer av fel på fogmassor, möjliga orsaker till dessa fel och förslag på åtgärder.

Rapporten ger också förslag på analyser som skulle kunna användas för att försöka bedöma statusen på fogmassorna. Förslagen grundar sig på analyser som är gjorda på fogmassor som varit i drift på OKG och Forsmark.

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