

Thermisch gespoten aluminiumlagen (toepassing, kosten en ontwerpaspecten)

Deze publicatie is gemaakt om een overzicht te geven van de mogelijkheden van het toepassen van thermisch gespoten aluminium deklagen. Naast deze publicatie verschijnen in het kader van het project "Nieuwe coating-technieken voor het MKB" nog vier andere publicaties die gezamenlijk een, zij het niet volledig, beeld geven van coatingtechnologie in het algemeen en de vele aspecten die daarmee samenhangen.

De andere vier publicaties (te downloaden via <http://www.coating-online.nl>) zijn:
TI.05.23 "Dunne deklagen",
TI.05.24 "Dikke deklagen",
TI.05.26 "Coaten van producten uit dunne plaat" en
TI.05.27 "Kwaliteitsborging van (harde) deklagen".

Inhoud

1	Inleiding	1
2	TSA-lagen en toepassingen	2
3	Kostenaspecten	5
4	Milieueffecten van TSA-lagen	6
5	Ontwerpaspecten bij corrosiewering met TSA	7
6	Het aanbrengen van TSA-lagen	8
7	Kwalificatie en keuring	9
8	Falen van TSA-lagen	10
9	Toekomstvisie	11
10	Referenties	12
11	Van belang zijnde NEN-normen	13
	Bijlage A Indicatief voorbeeld integrale kostenvergelijking	14

1 Inleiding

Thermisch gespoten aluminium (Engels: Thermal Sprayed Aluminium) lagen, hierna kort TSA-lagen genoemd, worden wereldwijd al sinds 1956 toegepast als corrosiewerende laag, vooral in toepassingen in of in de buurt van zeewater. De tijd lijkt angebroken dat ook andere toepassingen meer aandacht krijgen, zodat vooral het MKB kan profiteren van de mogelijkheden van TSA-lagen. Deze publicatie put uit voorbeelden waarbij corrosiewering voorop staat. Er zijn relatief weinig voorbeelden van andere toepassingen dan corrosiewering, maar dat gaat onge-

twijfeld veranderen. De bedoeling is vooral een overzicht te geven voor de beslisser, ontwerper/constructeur, hetgeen zou kunnen leiden tot nieuwe toepassingen.

Er zijn twee basis-beschermmechanismen tegen corrosie, namelijk afsluiting en opoffering. De TSA-laag beschermt actief doordat:

- 1) deze onedeler is dan het onderliggende staal en daardoor kathodische bescherming biedt door opoffering.
- 2) de laag zichzelf afsluit met oxides, waardoor de opoffersnelheid laag is.
- 3) deze in water en bij vocht tevens zelfreparerend is: grotere defecten in de TSA-laag worden beschermd door kalkneerslag op het defect.

Door de lage opoffersnelheid is de beschermduur groot ten opzichte van organische verflagen en zinklagen, mits de laag voldoende dik wordt aangebracht. Deze bescherming is in lucht van toepassing voor lagen die dikker zijn dan een minimale dikte van circa 200 µm; bij dunnere lagen kan in lucht corrosie van het staal optreden, voordat de poriën kunnen afsluiten. Op de porositeit van TSA-lagen wordt in hoofdstuk 2 verder ingegaan.

Tabel 1 geeft een globaal vergelijkend overzicht van verschillende typen beschermelingen.

tabel 1 Principevergelijking van verfsystemen, hot dip zinklagen en TSA-lagen voor corrosiebescherming in agressief zeeklimaat

stelsel	verfsysteem	zinklaag (hot dip)	TSA-laag
principe bescherming	passief/afsluitend en actief ¹⁾	actief/kathodisch	actief afsluitend bij poriën en beschadiging; actief/kathodisch en zelfreparerend
aanbrengtijd deklaag	afhankelijk van droogtijden	afhankelijk van gewenste laagdikte (dompeltijd)	afhankelijk van aantal spuitpistolen en gewenste laagdikte
op locatie aan te brengen?	ja	nee	ja
reparatie mogelijk (met dezelfde techniek)?	ja	nee	ja
onderhoud	Elke 5 tot 10 jaar (afhankelijk van de expositieduur en het milieu)	geen	geen
globale beschermduur	circa 15 tot 25 jaar	10 - 20 jaar afhankelijk van agressiviteit milieu en laagdikte	40 - 60 jaar afhankelijk van de gekozen laagdikte in het specifieke milieu ²⁾
totale beschermduur bepaald door:	degradatie bindmiddel	opoffersnelheid en laagdikte in het specifieke milieu	opoffersnelheid en laagdikte in het specifieke milieu
stuurparameters voor beschermduur	systeemkeuze en onderhoud	laagdikte	laagdikte en sealer ²⁾
structuur onderliggend staal verandert bij het aanbrengen van de laag	nee	ja (hoge aanbrengtemperatuur)	nee
bepalking afmetingen werkstuk	nee	ja (badgrootte)	nee

1) Bijvoorbeeld bij gebruik van zinkstof- of zinksilicaat primers.

2) Bij gebruik van een sealer kan de beschermduur van een TSA-laag vanaf 15 jaar worden vergroot. Zie hoofdstuk 2 voor meer info over het toepassen van sealers.

N.B. ► Voor alle deklagen geldt dat onder gunstige condities een (aanzienlijke) langere beschermduur mogelijk is. In agressief milieu kan de beschermduur van een zinklaag aanzienlijk worden bekort, omdat deze laag bescherming biedt door zich op te offeren: actieve bescherming. Deze opoffersnelheid neemt in een agressief milieu toe. TSA-lagen beschermen door een combinatie van opoffering (actief) en afsluiten (passief). Als gevolg hiervan kunnen TSA-lagen OOK in een agressief milieu langer bescherming bieden dan zinklagen.

► Voor meer informatie over thermische spuitprocessen in het algemeen en voor het geval van TSA-lagen in het bijzonder wordt verwezen naar de publicaties VM 95 [3] en VM 108 [4] die op de site www.coating-online.nl zijn te downloaden.

► De site www.metalliseren.nl richt zich specifiek op TSA-lagen.

► Meer informatie over thermische zinklagen is te vinden op www.sdvonline.nl.

► Voor algemene informatie over verfspuiten kunt u terecht op www.vmb-online.nl.

Tabel 2 geeft een overzicht van de beschermduur (in jaren) van verflagen en TSA-lagen onder verschillende condities.

tabel 2 De globale beschermduur in jaren van verflagen en TSA-lagen onder verschillende toepassingscondities¹⁾

condities	verf	TSA ²⁾
in landlucht met zonbestraling	20...30 ³⁾	40...60
in zeelucht met zonbestraling	15...25 ³⁾	40...60
in zoetwater: ▶ bij condens op permanente schaduwvlakken (zoals de onderkant van bruggen) ▶ bij ongelijke en geklonken vlakken met veel onderbrekingen	10...20	40...60
in zeewater	10...20	40...60
zeer agressief milieu (dooizouten, enz.)	10	40...60

1) De opgegeven beschermduur kan per project en per locatie verschillen en is indicatief. Door middel van de laagdikte kan worden gestuurd op beschermduur. Indien de TSA-laag wordt bedekt met een sealer of verflaag, is een dunnere alulaag mogelijk.
2) Bij voldoende laagdikte. Hierop wordt ingegaan in § 2.4.
3) Het interval bij objecten in lucht kan worden vergroot door middel van tussentijds onderhoud.

De corrosiesnelheid van de TSA-laag in zeewater ligt tussen de 1 en 5 µm per jaar. In zoet water ligt deze een factor 10 lager. De corrosiesnelheid in lucht is lager dan in zoet water. Op dit aspect wordt in hoofdstuk 2 nader ingegaan.

In zeewater, de splashzone en in zoetwater is voor de TSA-laag geen goed coatingalternatief beschikbaar voor een beschermduur van 25 jaar of langer. In droge condities en voor kortere toepassingsperioden zijn die alternatieven vaak wel aanwezig, bijvoorbeeld in de vorm van (thermische) zinklagen.

De keuze tussen verfspuiten en aluminiseren wordt in hoofdzaak bepaald door de integrale kosten en de milieubelasting over de gehele gebruiksduur van het object. Afhankelijk van de gebruiksduur van de toepassing kunnen integrale kosten van TSA-lagen lager uitvallen dan die van verflagen of dompelverzinklagen, wat de toepassing van TSA rechtvaardigt (zie hoofdstuk 3). Tevens belast aluminium en zijn oxiden het milieu niet (zie hoofdstuk 4).

Er kunnen beperkingen zijn bij het aanbrengen van TSA-lagen, zoals onvoldoende bereikbaarheid voor het spuitpistool als gevolg van het ontwerp. Hierop wordt ingegaan in hoofdstuk 5. Beperkingen bij het aanbrengen van de laag hebben verder te maken met veiligheidseisen, het optreden van overspray (verlaging van de laagkwaliteit) en met mogelijk optredende diktevariaties. Zie hiervoor hoofdstuk 6 en 7.

TSA-lagen worden in Nederland nog beperkt toegepast. De niet geringe praktijkkennis is in Nederland nog onvoldoende verspreid. Onderzoek van onder andere het Nederlands Corrosie Centrum heeft de belangrijkste behoeften aan kennis aangetoond:

- ▶ de mogelijkheden van TSA-lagen;
- ▶ invloed van het milieu;
- ▶ de rol die het ontwerp van de constructie speelt;
- ▶ de grenzen van toepasbaarheid van TSA-lagen;
- ▶ duidelijke kwalificatiemethoden;
- ▶ kostenaspecten;
- ▶ het uiterlijk van de laag gedurende toepassing.

Verder is er een brede behoefte gebleken aan voorlichting met een zo compleet mogelijk overzicht van de laatste stand van zaken op het gebied van TSA-lagen, met de nadruk op de toepassingsmogelijkheden en gebruikaspecten. Dit vooral met het oog op potentiële beslissers, ontwerpers en architecten die de inzet van TSA-lagen overwegen en willen afzetten tegen moge-

lijke alternatieven (zie hiervoor hoofdstuk 5). Aspecten zoals kwalificatie, keuring, inspectie en onderhoud zijn hierbij belangrijke aandachtspunten. Hierop wordt met name in de hoofdstukken 7 en 8 ingegaan.

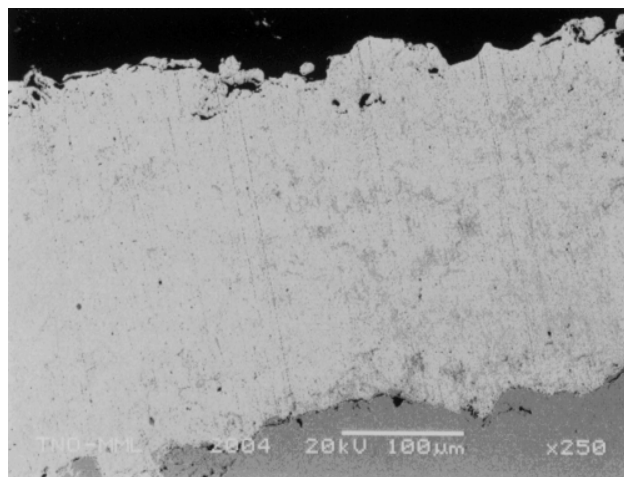
Deze publicatie heeft dan ook als belangrijkste doel om in de genoemde informatiebehoefte te voorzien, of te verwijzen naar relevante bronnen van informatie. Daarbij wordt er een globale vergelijking gegeven met toepassing van verflagen, zinklagen en TSA-lagen voor corrosiewerende toepassingen.

2 TSA-lagen en toepassingen

2.1 Wat is een TSA-laag?

Een TSA-laag is een conserveringslaag van aluminium voor het beschermen van de stalen ondergrond tegen corrosie (zie figuren 1 en 2). De laag is opgebouwd uit gestolde aluminiumdeeltjes in de vorm van lamellen, is daardoor poreus (5-10%) en bevat doorlopende poriën.

De belangrijkste uitgangsmaterialen voor het opbrengen van een TSA-laag zijn Al (99,5%) en AlMg5.



figuur 1 SEM (Scanning Electron Microscope) doorsnede van een TSA-laag op staal



figuur 2 Het opspuiten van een TSA-laag

2.2 Waarop is de werking van de TSA-laag materiaalkundig gebaseerd?

Er spelen in principe twee beschermmechanismen een rol:

- 1) Kathodische bescherming (actief): Het onedeler aluminium offert zich op ten gunste van het onderliggende staal en vormt corrosieproducten op basis van aluminiumoxide.
- 2) Afsluiting van het omringende milieu nadat de poriën in de laag door deze corrosieproducten zijn afgesloten (passieve bescherming), en in water: bedekking van defecten met kalk.

Door de poreuze opbouw van de opgespoten aluminium-lamellen sluit de TSA-laag aanvankelijk niet volledig af. Bij laagdikten tot circa 200 µm komt het onderliggende staal door aaneengesloten poriën tot op het substraat in contact met het corrosieve milieu. Bij toepassingen in lucht kan dan aanvangscorrosie "bloeden" optreden. Oorzaak is dat de poriën vanwege de geringe laagdikte onvoldoende water (elektrolyt) kunnen bevatten om kathodisch te kunnen beschermen en omdat tot deze laagdikte de poriën aaneengesloten door kunnen lopen tot op het stalen substraat, waardoor deze aan het corrosieve milieu wordt blootgesteld. Na verloop van tijd (afhankelijk van het toepassingsmilieu) stopt dit bloeden als gevolg van het afsluiten van de poriën met aluminiumoxiden. Bloeden treedt niet op als de laag dikker is dan circa 200 µm, omdat de poriën dan niet aaneengesloten doorlopen tot aan het substraat.

Indien de laag aanmerkelijk dunner is dan 200 µm, zal een TSA-laag in lucht geen bescherming kunnen bieden tegen corrosie. Een TSA-laag met een geringe dikte zal in water wel kathodisch kunnen beschermen, daar er nu een elektrolyt aanwezig is.

De tijd die nodig is voor het volledig afsluiten van de poriën varieert van enkele weken in zeewater tot maanden onder atmosferische omstandigheden. Dit heeft tot gevolg dat de aanvankelijk poreuze TSA-laag het staal alsnog geheel afsluit, waarna het opofferen van het aluminium nagenoeg tot stilstand komt. Ook bij scheuren in de TSA-laag vindt deze afsluiting met aluminiumoxiden plaats. Spleetcorrosie wordt hierdoor voorkomen.

In water wordt onbedekt staal ter plaatse van defecten kathodisch beschermd door het omringende aluminium. Doordat defecten bedekt worden met een kalklaagje, stopt na enige tijd de opoffering van de TSA-laag nagenoeg volledig (zie kader 1). Dit kan worden aangetoond aan de hand van de corrosiepotentiaal voor en na blootstelling aan (zee)water. Vóór de blootstelling is de potentiaal ongeveer gelijk aan die van het basismateriaal. Erna komt deze overeen met die van (passief) aluminium [25].

Waarop is de vorming van kalkneerslag op defecten van de TSA-laag gebaseerd?

De TSA-laag is anodisch (minder edel) in contact met staal en polariseert het staal. De potentiaal in en op de laag wordt negatiever. Daardoor verschuiven ook andere evenwichtsreacties die zich aan het oppervlak afspelen (water reactie, neerslaan van zouten enz.). Als gevolg hiervan ontstaat een alkalisch milieu met een verhoogde pH.

In het zeewater zit ook bicarbonaat (HCO_3^-), dat met de aanwezige OH^- ionen bij de TSA-laag overgaat in carbonaat (CO_3^{2-}). Het carbonaat zal met de sporen opgelost aluminium een kalkachtige neerslag geven van aluminiumcarbonaat.

Door middel van opgedrukte stroom kan men sturen om de afzetting van deze kalkachtige laag te bevorderen. Aangezien in zeewater ook magnesium voorkomt, zal dan naast aluminiumcarbonaat (aragoniet) ook magnesiumhydroxide (bruciet) worden afgezet. Dergelijke afzettingen vertragen de laagdikteafname van het aluminium en vormen tegelijkertijd een beschermende laag op eventueel aanwezige defecten.

kader 1 Bescherming van defecten door kalkneerslag

2.3 Wanneer past men TSA-lagen toe? Corrosiewerende eigenschappen

TSA-lagen worden vooral toegepast voor corrosiebescherming. De beschermduur van de lagen kan gelijk zijn aan de levensduur van het object: 40 tot 60 jaar of langer. Afhankelijk van de laagdikte en de aard van de constructie zijn de directe applicatiekosten 1,5 tot 2 maal hoger dan bij verf dat direct op staal is aangebracht. TSA-lagen komen dan ook in aanmerking als de integrale kosten over de totale levensduur van de constructie

lager zijn dan bij gebruikelijke verflagen. Op het aspect van kosten wordt verder ingegaan in hoofdstuk 3.

Andere corrosiebeschermende deklaagsystemen waarmee de TSA-lagen kunnen worden vergeleken bij het maken van keuzes, zijn onder andere thermisch en galvanisch verzinken en thermisch aluminiseren of hot dip aluminiseren. Hierop wordt ingegaan in de publicatie TI.05.24 - "Toepassen van dikke deklaag" (via www.coating-online.nl vrij te downloaden).

Naast aluminium is zinkaluminium (85-15) een veelvuldig toegepaste thermisch gespoten deklaag. Hoewel de thermisch gespoten zinkaluminium deklaag minder corrosiebestendig is dan een vergelijkbare TSA-laag (met name onder hoge chloridebelasting presteert 85/15, zoals zinkaluminium ook wel wordt genoemd, aanzienlijk minder) kent deze laag onder bepaalde omstandigheden toch wel de nodige voordelen. Zo is de structuur van de 85/15 deklaag aanzienlijk minder ruw dan die van een vergelijkbare TSA-laag. Ook is de applicatie van een 85/15 deklaag minder kritisch en daardoor eenvoudiger dan van een TSA-laag. Dit heeft echter als nadeel dat applicatiefouten minder snel aan het licht zullen komen dan bij een TSA-laag. Een dunne 85/15 laag (maximaal 60 µm) wordt vaak als primer onder een 3-laags natlak-systeem toegepast, zoals bijvoorbeeld bij off- en near-shore windturbinemasten (o.a. in het offshore windmolenpark voor de kust bij Egmond).

De corrosiewerende eigenschappen van TSA-lagen zijn zeer gunstig. Ook de weerstand tegen putcorrosie (pitting) is goed. Er zijn geen voorbeelden bekend dat er in combinatie met een TSA-laag filiforme corrosie optreedt (zie ook kader 2).

Filiforme corrosie is een vorm van aantasting die zich kan voordoen bij (gecoat) aluminium, staal, magnesium en zink. Het gaat om een aantasting in draadvorm (= filiform), waarbij het draadvormige corrosieproduct uiteindelijk losraakt van de ondergrond. In een verder stadium van de aantasting kan ook de coating op een aantal plaatsen losraken.

kader 2 Filiforme corrosie

Zolang de TSA-lagen in een pH-bereik tussen ongeveer 3,9 en 8,7 worden toegepast, zijn zij ongeveer even stabiel als in neutraal water.

Het aanbrengen van een verflaag op een TSA-laag vindt vooral in die gevallen plaats waarin esthetische eisen worden gesteld, of om het effect van vervuiling zoveel mogelijk tegen te gaan (bijvoorbeeld wanneer er koperdeeltjes van bovenleidingen, in het geval van de spoorwegen, op het aluminium terechtkomen). Omdat door de werking van het TSA corrosie onder de verflaag niet kan optreden, houdt de verflaag langer stand. Tevens blijkt de toepassing van een geschikte sealer (zie ook kader 3) de beschermduur van een TSA-laag te vergroten met minstens tien tot vijftien jaar.

Wat gebeurt er bij het sealen van een TSA-laag?

Binnen het vakgebied van het thermisch spuiten worden veelvuldig sealers toegepast. Een sealer is een impregneermiddel dat in staat is om de poriën, die van nature aanwezig zijn in een TSA-laag, vrijwel volledig op te vullen. Hierdoor wordt het grootste gedeelte van het oppervlak van de thermisch gespoten laag beschermd tegen corrosie en erosie, hetgeen de beschermduur van de laag met minstens 15 jaar kan verlengen. Tevens kan een geschikte sealer het fenomeen van aanvangsroest ondervangen.

Een geschikte sealer moet dun vloeibaar (laagviskeus) zijn, een hoge oppervlakteactiviteit bezitten voor een goede capillaire werking en voldoende gevuld zijn om de poriën met vaste stof op te vullen. Het spreekt voor zich dat de sealer neutraal moet reageren ten opzichte van de thermisch gespoten laag.

kader 3 Sealers

2.4 Beschermduur en vereiste dikte van lagen

Tabel 3 geeft een overzicht van de theoretische beschermduur en vereiste laagdikte voor TSA-lagen in diverse milieus.

tabel 3 Theoretische beschermduur en vereiste laagdikte van TSA

milieu	TSA				
	onderhoud/ vervangen na	dikteafname per jaar	dikteafname in 50 jaar	vereiste dikte zonder sealer	vereiste dikte met sealer
	(jaar)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
landlucht	40...60	< 0,3	< 15	260	180
zeelucht	40...60	< 0,3	< 15	260	180
zoet water	40...60	0,3	15	300	220
zeewater	40...60	3	150	350	260
agressief milieu	40...60	5	250	450	260

Overigens kan de TSA-laag dikker worden aangebracht. De hechtsterkte moet echter worden gewaarborgd, omdat bij een grotere laagdikte krimpspanningen kunnen optreden. Dit wordt gedaan door de laag tijdens het spuiten in meerdere passages op te bouwen.

Door het meten van de laagdikte van de TSA-laag en deze te delen door de opoffersnelheid, kan in principe de resterende beschermduur worden berekend. In lucht geldt de eerder genoemde drempeldikte van circa 200 micrometer. Deze moet dus van de gemeten waarde worden afgetrokken.

Bijvoorbeeld: Er wordt een laagdikte TSA van 210 μm in zeelucht gemeten. Hiervoor geldt volgens tabel 3 een dikteafname van maximaal 0,3 μm per jaar. De beschermduur is dan 210-200 gedeeld door 0,3 is ruim 30 jaar.

De TSA-laag is - indien op de juiste wijze aangebracht - in principe decennia lang onderhoudsvrij, omdat de laagdikte maar zeer langzaam afneemt (zie tabel 3). De belangrijkste parameters bij het aanbrengen van de laag zijn daarom laagdikte en hechtsterkte. De dikte is belangrijk voor de beschermduur. De hechtsterkte is belangrijk om loslaten van de TSA-laag te voorkomen.

2.5 Het uiterlijk van TSA-lagen

Kleur

Een TSA-laag is zilvergrijs (zie figuur 4). Andere kleuren zijn niet commercieel verkrijgbaar. Indien er bepaalde kleureisen gelden, is bedekking van de TSA-laag met een verflaag noodzakelijk.



figuur 4 Het uiterlijk van een TSA-laag

Overschilderen van de verflaag kan na 20 jaar nodig zijn om esthetische redenen door een verkrijgt (dof) uiterlijk van de verflaag. Milieuvoorzorgingen zijn daarbij niet nodig, doordat de laag niet aangestruild behoeft te worden. Een verflaag houdt op een TSA-laag overigens langer stand dan op een stalen ondergrond, doordat er geen ondercorrosie optreedt.

Kleur-laagdikte variaties

Indien de TSA-laag met de hand wordt gespoten, zijn diktevariaties onvermijdelijk en kan er een gestreept uiterlijk met structuurverschillen ontstaan. Zeker daar waar over een beperkt gebied de laag alsnog op dikte gebracht moet worden, ontstaat een gevlekt uiterlijk.

Door middel van opspuiten met een robot zal de vereiste laagdikte vrijwel altijd in één keer gehaald worden, waardoor bijspuiten achterwege kan blijven. Echter, zowel bij handmatig als bij gerobotiseerd opspuiten kunnen verschillen in laagdikte en kleur optreden. Indien gerobotiseerd opspuiten niet mogelijk is en toch een strak uiterlijk wordt verlangd, kan de TSA-laag (nominale dikte 260 μm) worden geseald met een al of niet gekleurde sealer. Een sealer is een kleurloze epoxylaag die in de poriën van de TSA-laag kan indringen. Na het borstelen (met een messing borstel) ontstaat er ook een gelijkmatig oppervlak. Borstelen met een staalborstel kan vliegroest door corrosie van staaldeeltjes veroorzaken. Er verdwijnt daarvoor echter circa 30 μm laagdikte. Sealen is goedkoper.

Roest

Op plaatsen in lucht waar de TSA-laag onvoldoende dik is, kan roest optreden.

Vliegroest

Bruine uitslag kan het gevolg zijn van vliegroest, bijvoorbeeld door slijpwerkzaamheden. Vliegroest ontstaat wanneer ijzerdeeltjes op de TSA-laag terecht komen en daar corroderen, of door langstromend roestwater van stalen delen elders. Vliegroest kan - evenals aanvangsroest - met een (messing) borstel worden verwijderd.

2.6 Toepassingen

Bij Rijkswaterstaat

Rijkswaterstaat onderzoekt het beschermmechanisme, de integrale kosten, milieubelasting, mogelijkheden en beperkingen van TSA-lagen sinds 1994. De toepassingen van TSA-lagen bij Rijkswaterstaat zijn gerealiseerd met het oog op corrosiebescherming. De belangrijkste drijfveer is verlaging van de integrale kosten en milieubelasting. Het inzicht dat niet alleen de applicatiekosten, maar alle bijkomende kosten en ook de gevolggkosten moeten worden meegenomen voor het bepalen van de integrale kosten, speelt hierbij een belangrijke rol. Het voordeel van het lange onderhoudsinterval van het conserveringssysteem wordt daardoor duidelijk.

Toepassingen zijn het stalen frame van het geluidsscherm langs de A16, de sluisdeuren en meerpalen in de Zandkreeksluis, de roldeur in de Westsluis bij Terneuzen, de damwand van de haveningang van Texel, evenals een grote serie hydraulische kleppenblokken en kabeltrommels die zich bevinden in het maritieme milieu van de Stormvloedkering Oosterschelde.

Bij ProRail

ProRail is in 1999 actief de mogelijkheden van TSA-lagen gaan onderzoeken. Belangrijke drijfveer hierbij is het terugdringen van de integrale kosten door het verlengen van de onderhoudscyclus, waarbij het realiseren van onderhoudsvrije stalen constructies het uiteindelijke doel is. Elk onderhoudsmoment is namelijk zeer kostbaar, niet zozeer vanwege het onderhoud zelf, als wel vanwege de hoge stremmingkosten. Daarnaast spelen de verminderde milieubelasting als het gevolg van de toepassing van TSA-lagen een belangrijke rol.

Voorbeelden van ProRail projecten zijn onder andere: het ZHES spoorviaduct in Den Haag (2000), brug over de Leidsche Trekvaart bij Vogelenzang (2003), Nootdorpboog over de A12 (2004), Brug over het Twentekanaal bij Eefde (2004, 2005), Fietsbrug over de Westergo - Zoetermeerlijn (2005) en de bruggen over de Delft en Korte Verspronckweg in Haarlem (2005). ProRail heeft er niet uitsluitend om esthetische redenen

voor gekozen de TSA-lagen te sealen en van een gekleurde toplaag te voorzien. Het sealen en overschilderen heeft namelijk een positieve uitwerking op de beschermduur van het totale systeem.

Gemeentewerken Rotterdam - Randstadrail

In opdracht van Gemeentewerken Rotterdam is een gedeelte van de damwand van de Amazonehaven in Rotterdam gealuminiseerd. Het hefplateau in de hefbrug van Alphen a/d Rijn is in 2003 gerestaureerd en gealuminiseerd. In opdracht van Randstadrail wordt een nieuw te bouwen station aan de Beatrixlaan in Den Haag volledig gealuminiseerd. Oplevering vindt plaats in 2005-2006.

Offshore industrie

Shell (STATOIL) heeft onder meer het Troll-platform voor de Noorse kust, totale oppervlakte circa 250.000 vierkante meter, beschermd met TSA-lagen (zie figuur 5). Hier wordt een totale levensduur van 50 jaar verwacht. Daarnaast worden TSA-lagen, ter voorkoming van de hoge onderhoudskosten bij andere lagen, veelvuldig in de offshore toegepast.

Recentelijk, op de NACE 2004 Corrosion Conferentie, hebben diverse offshore operators een overzicht gegeven van hun ervaringen met TSA op offshore productie platforms. ConocoPhillips gebruikt TSA-lagen al sinds 1984 op het Hutton platform en Shell Expro gebruikt TSA omdat men 30 jaar onderhoudsvrije applicatie verwacht.



figuur 5 Het Troll productieplatform voor aardgas

Procesindustrie

In de procesindustrie worden TSA-lagen gebruikt voor diverse toepassingen. Inwendig wordt TSA gebruikt in koolstofstalen vaten ter voorkoming van verkleuring van witte producten door oppervlakkige corrosie van het koolstofstaal. Aluminiumoxide is wit en geeft geen verkleuring aan witte kunststoffen. In het algemeen kunnen TSA-lagen inwendig corrosiebescherming geven aan koolstofstaal in milieu met een pH tussen 3,9 en 8,7. Het grote voordeel is hierbij dat TSA anodisch is ten opzichte van koolstofstaal en er dus geen versnelde corrosie optreedt van het koolstofstaal bij een defect en aan de rand. Ook wordt TSA inwendig toegepast om spanningscorrosie van koolstofstalen toestellen te voorkomen in sommige media, zoals bijvoorbeeld in een zwak zure omgeving (o.a. $\text{CO}/\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$).

Externe corrosie van koolstofstaal onder isolatie (Corrosion Under Insulation = CUI) is een groot probleem in de procesindustrie, vooral dichtbij zee en koeltorens. Organische coatings zijn niet betrouwbaar indien een beschermduur van meer dan 10 jaar gewenst is. Onderzoek van de Amerikaanse marine en enkele petrochemische bedrijven heeft aangetoond dat TSA-lagen tot 30 jaar bescherming geven en het isolatiesysteem onderhoudsvrij maakt. De applicatie van TSA ter voorkoming van CUI is erkend en opgenomen in de NACE Recommended

Practice: RP00198-2004. In Nederland zijn door Corrosie Contact Groep van de Nederlandse Proces industrie TSA specificaties voor CUI preventie in voorbereiding. Deze specificaties worden opgenomen in het CINI (Commissie Isolatie Nederlandse Industrie) Handboek, een nationaal en internationaal gebruikte industriestandaard voor isolatie. Door deze activiteiten zal deze TSA-applicatie een grote vlucht nemen, aangezien de levensduurkostenberekening zeer gunstig is voor TSA ter voorkoming van CUI.

Een niet zo voor de hand liggende toepassing in de procesindustrie zijn op schoorstenen aangebrachte TSA-lagen. Deze lagen blijken prima tegen de verhoogde temperaturen bestand te zijn.

Daarnaast worden TSA-lagen ook op gewapend beton gespoten en gebruikt als bescherming tegen betonrot, corrosie van de stalen bewapening.

Overig

In Amerika, Scandinavië en Japan worden TSA-lagen veelvuldig toegepast voor het beschermen van stalen objecten zoals bruggen en sluizen tegen corrosie.

Overige mogelijke toepassingen worden beschreven in hoofdstuk 9.

3 Kostenaspecten

De informatie in deze publicatie past in het kader van Life Cycle Cost Management (LCCM). Bij LCCM wordt er naar gestreefd om keuzes van ontwerp- en materiaalvarianten objectief te maken op basis van de integrale kosten die bij realisatie, tijdens en aan het eind van de levensduur van het object zullen worden gemaakt.

De kosten tijdens het vervaardigen van een gecoat product en tevens tijdens de gehele gebruiksduur zijn een belangrijk criterium om al of niet over te gaan tot het toepassen van een TSA-laag. Daarbij moet onderscheid worden gemaakt tussen de applicatiekosten (voor het aanbrengen van de laag) en de integrale kosten.

Dit hoofdstuk gaat kort in op het begrip 'integrale kosten', omdat deze in hoge mate bepalend zijn bij de afweging tussen verfspuiten en aluminiseren.

3.1 Toelichting op 'integrale kosten'

Bij het maken van ontwerpkeuzes moeten niet alleen de bouwkosten worden beschouwd, maar alle kosten die gemaakt zijn voorafgaand aan en volgend op het bouwen. Een keuze die qua productiekosten duurder is, kan over de totale levensduur gezien toch goedkoper zijn.

Met integrale kosten worden daarom bedoeld:

1. Bouwkosten, inclusief ontwerp- en conserveringskosten.
2. Onderhoudskosten, inclusief bedrijfskosten, milieumaatregelen en eventueel gevolgcosten door onderhoud.
3. Kringloopkosten (bij sloop of hergebruik).

De integrale kosten en de milieubelasting van constructies kunnen sterk dalen door een groter onderhoudsinterval en het voorkomen van onderhoud. Het aantal malen dat kosten voor onderhoud, milieumaatregelen en de gevolgen van het onderhoud gemaakt worden, neemt daardoor af. Verlenging van het onderhoudsinterval kan worden gerealiseerd door ontwerpvereenvoudiging, het gebruik van alternatieve materialen in plaats van geverfd staal, en het gebruik van alternatieve deklagen.

De ontwerper/constructeur legt de kiem voor het onderhoudsinterval en daarmee voor de integrale kosten van de constructie. Het is goed om technieken voor het verlagen van deze kosten reeds tijdens de ontwerpfase toe te passen. Vaak kan een alternatief zoals een TSA-laag alsnog worden toegepast in de gebruiksfase.

Invloed onderhoudsinterval op integrale kosten en dek-laagkeuze

De beschermduur heeft grote invloed op de integrale kosten. Hoe langer de beschermduur, hoe groter het onderhoudsinterval kan zijn. Het aantal malen dat onderhoudskosten, bedrijfskosten en gevolgkosten moeten worden uitgegeven tijdens de levensduur van het object, kan dan dalen. TSA-lagen hebben de potentie 50 jaar bescherming te bieden. Bij objecten met een gebruiksduur van 50 jaar zou dan geen onderhoud meer nodig zijn. De hogere kosten bij het aluminiseren worden terugverdiend, indien de gebruiksduur van het object langer is dan de beschermduur van de verflaag.

3.2 Integrale kostenvergelijking verfspuiten en aluminiseren

Een voorbeeld van een integrale kostenvergelijking afkomstig van Rijkswaterstaat is in meer details terug te vinden in Bijlage A.

3.3 Voorbeeld

Voor Rijkswaterstaat is in het kader van een materiaalkeuze voor een nieuwe loopbrug, de Noordlandbrug in Zeeland, een integrale kostenvergelijking opgesteld (zie ook bijlage A). De resultaten zijn in tabel 4 samengevat. Uiteindelijk is toch niet voor de goedkoopste oplossing gekozen, maar voor glasvezel versterkte kunststoffen. In dit geval is deze keuze gemaakt op grond van een onderzoek naar de milieueffecten. Over het algemeen blijkt dat bij het verlagen van de integrale kosten de milieubelasting ook omlaag gaat.

tabel 4 Vergelijking van integrale kosten voor verschillende materialen voor de Noordlandbrug [11]

kosten in k€	staal + verf	staal + alulaag	GVK ¹⁾	RVS 316L	aluminium
bouwkosten	40	50	70	110	77
onderhoudskosten 50 jaar	30	5	17	5	19
totaalkosten	70	55	87	115	96
kostenvolgorde	2	1	3	5	4

1) Glasvezel Versterkte Kunststoffen

3.4 Conclusies en aanbevelingen

Uit de integrale kostenvergelijkingen volgt dat besparingen door het aluminiseren het grootst zijn bij nieuwe objecten in een agressief milieu. Gevolgkosten kunnen grote invloed hebben op de integrale kosten en de keuze van het conserveringssysteem. Uiteraard kunnen kostenoverwegingen anders uitpakken bij andere toepassingen, bijvoorbeeld in de procesindustrie.

Hieruit volgen de volgende aanbevelingen:

- ▶ Minimaliseer de integrale kosten reeds in de ontwerp-fase.
- ▶ Behandel objecten met een gebruiksduur vanaf 20 jaar die zich in en bij water bevinden altijd met een TSA-laag. Dit geldt ook voor objecten met permanente schaduwvlakken.
- ▶ Aluminiseer bij voorkeur vanaf nieuwbouw.
- ▶ Indien gevolgkosten zoals stilstand in productie relevant zijn, dienen ontwerp en onderhoud op een dusdanige manier plaats te vinden, dat deze worden vermeden.
- ▶ Overweeg om de TSA-laag te sealer. Het aanbrengen van een dunnere TSA-laag voorzien van een sealer kan goedkoper zijn dan alleen een dikkere TSA-laag.

4 Milieueffecten van TSA-lagen

Om de milieueffecten van TSA-lagen ten opzichte van organische deklagen objectief in kaart te kunnen brengen, kan gebruik worden gemaakt van de methode "Milieu Modelleren[®] (MM)" [46]. Deze methode bepaalt de milieubelasting van een conserveringssysteem op basis van een drietal parameters, te weten energiebelasting, de uitstoot van vluchtige oplosmiddelen en de stort van vervuild straalgrit.

4.1 ProRail Oosterbeek

De methode is voor het eerst toegepast ten behoeve van ProRail in het kader van een Europees subsidietraject (LIFE), waarbij voor het project "Verlenging Oosterbeek" naar een duurzame en milieuverantwoorde alternatieve conservering van een stalen kunstwerk werd gezocht. Een TSA-laag in een tweetal varianten werd hierbij als alternatief beschouwd en tezamen met het conventionele systeem werd er onderzoek verricht naar de volgende drie systemen (met een gebruiksduur van 100 jaar):

- Een (traditioneel) 3-laags natlak met DLD (droge laagdikte) van 300 µm.
- Een TSA-laag van 350 µm met een heldere epoxy sealer, DLD 50 µm.
- Een TSA-laag van 350 µm met een gekleurde epoxy sealer, DLD 50 µm.

De resultaten waren als volgt:

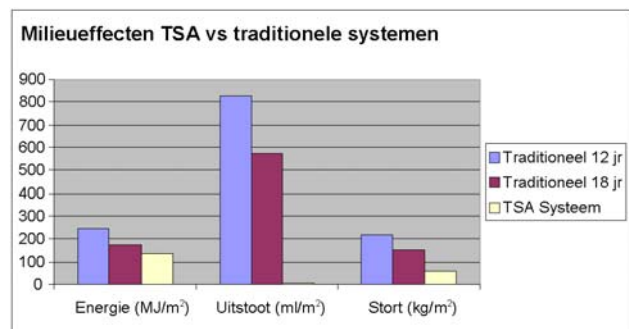
- ▶ Bij gebruik van TSA-systemen bedroeg de energiebelasting 65-70% van het traditionele systeem.
- ▶ De uitstoot van organische stoffen (t.g.v. de sealer) lag bij het traditionele systeem een factor 6-8 hoger dan bij het TSA-systeem; de kleur van de sealer heeft geen invloed.
- ▶ In het geval van toepassing van het traditionele systeem zal veel meer verontreinigd straalgrit afgevoerd moeten worden.

4.2 Roldeur 5, Westsluis Terneuzen

Binnen het kader van het haalbaarheidsonderzoek naar het aluminiseren van roldeur 5 van de Westsluis te Terneuzen [12] zijn de milieueffecten nader onderzocht met de eerder genoemde MM methode. De drie onderzochte systemen waren:

- Traditioneel systeem met een onderhoudscyclus van 12 jaar,
- Traditioneel systeem met een onderhoudscyclus van 18 jaar,
- TSA-laag met minimaal een onderhoudscyclus van 60 jaar (5% vervangen). (Toelichting: De dikteafname en de ervaringen tot nu toe ondersteunen een beschermduur van minstens 50 jaar in landlucht, dus weinig agressief).

De resultaten, uitgesplitst naar energiebelasting, uitstoot vluchtige stoffen en stort van verontreinigd staalgrit zijn grafische weergegeven in figuur 5.



© 2001 M&O Beheer BV

figuur 5 Vergelijking milieubelasting voor roldeur 5 van de Westsluis te Terneuzen

Op basis van deze resultaten kan worden geconcludeerd dat bij de roldeur van de Westsluis te Terneuzen TSA aanzienlijk minder milieubelastend is dan een traditioneel verfsysteem.

5 Ontwerpaspecten bij corrosiewering met TSA

Ontwerpers dienen in het algemeen te zorgen voor een applicatie- en onderhoudsvriendelijk ontwerp. Bij bestaande constructies kunnen hiervoor aanpassingen nodig zijn, zoals bijvoorbeeld het "afboxen" ofwel dichtlassen van holle ruimten. Afboxen kan nodig zijn indien de temperatuur tijdens het opspuiten te hoog zou oplopen voor de spuitser, of indien de constructie plaatsens bevat die voor het spuitpistool moeilijk zijn te bereiken.

Hierna volgt een opsomming van ontwerpaspecten waarmee rekening kan worden gehouden:

Werkafstand

Er dient rekening te worden gehouden met de applicatiemethode: er is een bepaalde afstand nodig van het spuitpistool tot het te behandelen oppervlak (15-20 cm) en de ruimte die nodig is voor het manoeuvreren van het spuitpistool (25-30 cm). Het ontwerp dient daarom te voorzien in een voldoende vrijelijk beschikbare ruimte ten opzichte van het te behandelen oppervlak.

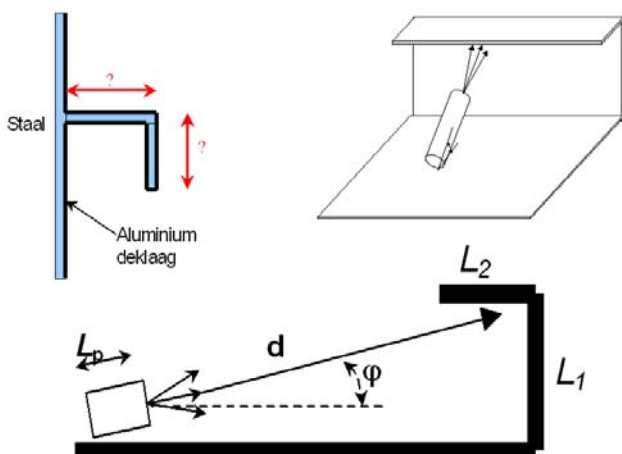
Afrondingsstralen

Scherpe randen moeten worden vermeden door afronding aan te brengen. Dit is zeer belangrijk. De minimale afrondingsstraal is 3 mm.

Vermijd moeilijk bereikbare plaatsen ("micheholes")

Maak constructies applicatievriendelijk door het vermijden van openingen (zoals afwateringsgaten, laspoortjes en "micheholes") die kleiner zijn dan 100 mm.

De hechting en kwaliteit van de TSA-laag wordt, naast de reinheid van oppervlak, ook bepaald door de spuihoek. Het verband tussen spuihoek en hechtsterkte blijkt uit de figuren 6 en 7 [16]. Door het creëren van (te) moeilijk toegankelijke plaatsen kunnen ontoelaatbare spuihoeken ontstaan. Dit moet dus worden vermeden.

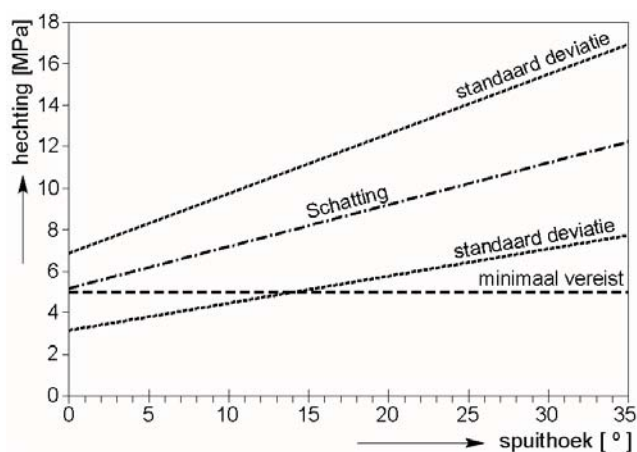


figuur 6 Variabelen bij het bepalen van de hechtsterkte van de alulaag

Boutverbindingen in water

Boutkoppen en onderleggingen moeten worden meegealuminiseerd. Indien na het aluminiseren constructiedelen met een boutverbinding worden verbonden aan de gealuminiseerde constructie, zou de boutkop vooraf moeten worden gealuminiseerd. Dit is nog niet gebruikelijk.

Gebruik van roestvaststalen bouten wordt alleen boven water aangeraden. Opofferen van de TSA-laag kan wor-



figuur 7 De hechtsterkte van een TSA-laag als functie van de spuihoek [16]. Het gaat hier om een 99.7 TSA-laag elektrisch gespoten. Conclusies:

- ▶ Bij een spuihoek groter dan 15 graden ten opzichte van het te spuiten oppervlak is de hechttingswaarde groter dan de minimaal vereiste 5 MPa volgens NBD 10300.
- ▶ In 15% van de gevallen zal statistisch gezien de hechttingswaarde kleiner zijn. Een grotere spuihoek dan 15 graden wordt daarom aanbevolen.

den voorkomen door het gebruik van isolatiebussen (van hardweefsel) om galvanisch contact tussen de TSA-laag en de bout met onderlegging te voorkomen.

Voor onderwatertoepassingen wordt aangeraden om kale bouten te gebruiken. Deze worden beschermd door het omringende aluminium. Over de snelheid waarmee de TSA-laag zich hierbij opoffert, zijn nog geen gegevens beschikbaar. Vanwege de gunstige verhouding tussen anodisch en kathodisch oppervlak (een lage stroomdichtheid in A/m²) kan dit beperkt zijn. De bout zal zoals bij een defect worden bedekt met kalkneerslag. Om het kathodisch oppervlak te verkleinen, is het raadzaam de boutkoppen/moeren te bedekken met een aluminiumhoudende laag.

Bij gesealde vlakken in water worden kale bouten in mindere mate kathodisch beschermd door de TSA-laag, doordat deze ten dele is afgedekt door de sealer. In het algemeen wordt hierbij het gebruik van gealuminiseerde bouten aanbevolen.

Combineren van aluminiseren en kathodisch beschermen

In principe is het mogelijk om het deel van het stalen object dat zich boven water bevindt te aluminiseren, en het deel dat zich in water bevindt actief kathodisch te beschermen. Het onderste deel van de TSA-laag zal zich in water bevinden en onder invloed staan van het actieve kathodisch beschermingsysteem. Het kathodisch beschermingsysteem moet dus zodanig worden ontworpen dat de TSA-laag daardoor niet wordt aangetast. Dit betekent een waarde ten opzichte van een Ag/AgCl-referentie-elektrode die in ieder geval lager is dan de corrosiepotentiaal van aluminium in zeewater, namelijk -1,05 Volt.

Onderdelen voorzien van een TSA-laag

Voorbeelden van industriële onderdelen met een TSA-laag zijn: onderdelen van wielgeleidingen in en bij water, hydraulische kleppenblokken, kabeltrommels, assen, pennen, deksels, borgplaten, enz.

Contactvlak voor kunststof glijlagers aluminiseren en slijpen

Het deel van een as dat dient als loopvlak voor een glijlager, kan op de gewenste oppervlakteruwheid van 0,5 µm Ra worden nagedraaid of walsvormd.

Pengat verbindingen

De demontage van constructiedelen kan worden vergemakkelijkt door het aluminiseren van de verbindingen. Volstaan kan worden met het aluminiseren van de stalen pen. Het oppervlak moet worden nabewerkt op de gewenste diameter. Het gat - in contact met de gealuminiseerde pen - wordt kathodisch meebeschermd door de TSA-laag. Grote gaten die bereikbaar zijn voor het spuitpistool wel aluminiseren. Voor pengatverbindingen moet de hechtsterkte van de laag meer zijn dan 10 MPa (zie [14], waarin de volgende praktijksituatie werd gesimuleerd: een stalen pen met een diameter van 50 mm werd met een speling van 0,1 mm gedrukt tegen een TSA-laag met een dikte van 0,2 mm. Bij een maximale contactspanning van 49 MPa en een gemiddelde contactspanning van 38 MPa kwam de laag niet los).

Brandbestendigheid

TSA-lagen zijn brandbestendiger dan de meeste andere oppervlaktelagen. Dit maakt toepassingen interessant op plaatsen waar brandwering belangrijk is.

Laagdikte, milieu en beschermduur

Met de laagdikte wordt gestuurd op de vereiste beschermduur van bijvoorbeeld 50 jaar (zie tabel 3). De kleinste nominale laagdikte in lucht is dan 260 µm. Een laagdiktemeting bestaat uit het gemiddelde van tenminste drie laagdiktemetingen binnen een onderlinge afstand van 0,1 m.

Cosmetische eisen

Het uiterlijk van de TSA-laag is al besproken in § 2.5. Wanneer er wordt geseald, dient men erop te letten dat bij verticale oppervlakken de sealer tijdens het aanbrengen enigszins kan 'uitzakken'. Hierdoor kunnen kleurverschillen ontstaan.

Wel of geen 5% magnesium toevoegen?

Voor de corrosiebescherming is er geen voordeel van de toevoeging van AlMg5 gebleken. Het spuiten van AlMg5 maakt het aanbrengproces echter minder kritisch (daar waar spuithoek en afstand niet goed kunnen worden gehandhaafd door de productgeometrie) en daardoor mogelijk goedkoper.

Men moet bij het gebruik van AlMg5 echter oog hebben voor de hogere brandbaarheid van het overspray stof dan dat van Al 99,5.

Verfspuiten van TSA-lagen

Redenen om een TSA-laag van een verflaag te voorzien zijn:

- ▶ **Esthetisch**
In dat geval betreft het constructies of constructiedelen die zich boven water bevinden. Een viskeuze primer die in staat is om in de poriën van de TSA-laag te dringen is nodig om blaasvorming te voorkomen. Verfspuiten kan zowel op de TSA-laag als op een geseald TSA-oppervlak worden uitgevoerd.
- ▶ **Verminderen van vervuiling**
Verfspuiten op een TSA-laag vindt ook plaats om vervuiling van de relatief ruwe TSA-laag tegen te gaan.

Het onderhoud van deze verflagen blijft beperkt tot afschuren en vervangen van de verkrijte toplaag. Doordat er geen ondercorrosie optreedt, is afstralen van de verflaag niet nodig. Daardoor zijn nauwelijks milieuvoorzieningen nodig.

Sealen van TSA-lagen (zie ook § 2.2)

Het sealen van poriën in de TSA-laag resulteert in een egaler uiterlijk. Aluminiumoxiden kunnen door het langs stromende water worden meegevoerd waardoor de TSA-laag zichzelf sneller opoffert. Het is nog niet duidelijk welke waterstroomsnelheid in praktijkcondities ontoelaatbaar is. Door sealen wordt dit effect uitgesteld, afhankelijk van de levensduur van de sealer. De prijs van sealen ligt in de orde van grootte van € 7 /m².

Invloed van de porositeit op de beschermduur in water

De poriën in de TSA-laag worden afgesloten met alumi-

niumoxiden. Toch heeft de porositeit invloed op de op-offersnelheid omdat deze toeneemt met het natte oppervlak. Bij een lagere porositeit neemt het natte oppervlak af en kan een langere beschermduur worden verwacht. De invloed van de porositeit op de beschermduur is relatief gering (circa 10%).

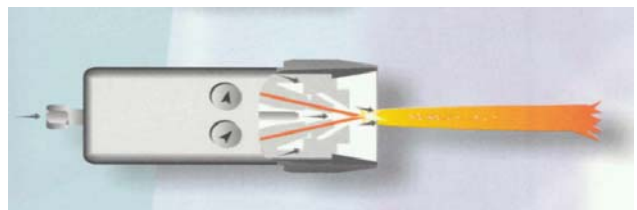
Een lagere porositeit is ook gunstig voor TSA-lagen in stromend water. De aluminiumoxides zitten vaster in kleinere poriën en worden daardoor moeilijker door het langs stromende water afgevoerd.

In principe kan de applicateur de porositeit van de laag beïnvloeden met behulp van de instelling van spuitparameters. Elektrisch draadspuiten levert een lagere porositeit dan autogeen vlamspuiten.

6 Het aanbrengen van TSA-lagen

De TSA-laag wordt aangebracht door het opspuiten van gesmolten aluminiumdeeltjes op een gestraald staaloppervlak. Het smelten van het aluminium wordt gerealiseerd met een elektrische vlamboog of een autogeen gasvlam. Bij het elektrisch aluminiseren worden twee aluminiumdraden naar een pistool gevoerd. Op de twee draden wordt een potentiaalverschil gezet met een hoog amperage. De twee draden worden in het pistool naar elkaar toe geleid, waardoor een vlamboog ontstaat. Door middel van perslucht wordt het gesmolten aluminium in zeer kleine deeltjes op het staal gespoten. De deeltjes bereiken daarbij een snelheid van 100 tot 150 m/s.

Figuur 8 geeft een schematische weergave van een elektrisch draadspuitpistool.

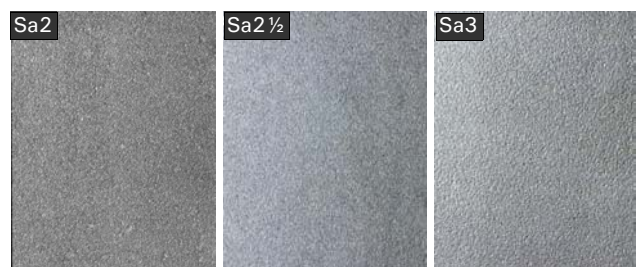


figuur 8 Schematische weergave van een elektrisch draadspuitpistool

Oppervlaktebehandeling (ruwheid en reinheid)

Stralen van het substraat voor het aanbrengen van de laag moet gebeuren bij Sa 2½ (grof grit - abrasief G of korund volgens ISO 8501-1 met een ruwheid Rz 80 tot 120 volgens ISO 8503-4). Als de Sa-waarde kleiner is dan 2,5 moet er opnieuw worden gestraald. De Sa-waarde van een oppervlak geeft de reinheid weer, ofwel de mate waarin het oppervlak vrij is van oxides. Om te voorkomen dat een laag tussentijds oxideert, dient de gewenste laagdikte van de TSA-laag zonder onderbreking te worden aangebracht.

In figuur 9 worden voorbeelden gegeven van staaloppervlakken met verschillende Sa-waarden.



figuur 9 Staaloppervlakken met verschillende Sa-waarden

Dichtheid en hechting van de alulaag zijn bij vlamspuiten duidelijk geringer dan bij een elektrisch vlamboogproces. Dit heeft ertoe geleid dat in de specificaties van de Noorse oliemaatschappijen vlamspuiten alleen wordt toegestaan in overleg met de afnemer, en alleen voor reparaties op plaatsen die voor elektrische vlamboogprocessen moeilijk bereikbaar zijn. Elektrisch spuiten leidt tot een hogere aanbrengsnelheid.

Zink- en zinkaluminiumlagen (85-15) worden met thermisch spuiten op een vergelijkbare wijze aangebracht. Bij het aanbrengen in geringe laagdikte -tot ca. 75 µm- wordt dit ook wel 'schooperen' genoemd. Thermisch gespoten dekragen van zink en zinkaluminium hebben in het algemeen een minder ruw oppervlak dan TSA-lagen.

Voor meer informatie over spuiten met een autogene gasvlam of een elektrische vlamboog wordt verwezen naar literatuur (VM 95 [3] en VM108, hoofdstuk 9 [4]). Hier wordt volstaan met informatie over de gebruiksaspecten.

Met de hand kan een spuitster onder ideale omstandigheden bij een gewenste laagdikte van 200 - 300 µm tot circa 2,5 - 4 m² per uur voorzien van een TSA-laag. Het gelijktijdig gebruiken tot 10 spuitpistolen is mogelijk. Er kunnen opzetstukken worden gebruikt die het aanbrengen van de TSA-laag mogelijk maken op moeilijk bereikbare plaatsen zoals laspoorten. Het gebruik van dergelijke hulpmiddelen vermindert echter de hechting en de opbrengsnelheid van de TSA-laag. Grote vlakken, buizen, balken en profielen kunnen met behulp van de robot worden opgespoten.

Bij het aanbrengen van TSA-lagen met de hand kan er een diktevariatie van meer dan honderd procent ontstaan. Dit kan ook het geval zijn bij het aanbrengen van de laag met een robot, maar dan alleen daar waar afzonderlijk aangebrachte lagen elkaar overlappen.

Voor een optimale kwaliteit van de TSA-laag is het tevens van groot belang dat de gebruikte perslucht tijdens het spuiten zo zuiver mogelijk is (met name vermijden van vocht en olie).

Zuiver aluminium spuitdraad is geschikt voor het elektrisch spuitproces en autogeen spuiten. De poedervorm is geschikt voor thermische spuit- en plasma-installaties. Nadelig is het grote prijsverschil ten opzichte van de draadvorm.

tabel 5 Technische gegevens van zuivere TSA-lagen

samenstelling	aluminium 99,5%
smeltpunt	660 °C
dichtheid	2,4 kg.dm ³
hardheid	Rh 80 (Rockwell B)
elektrochemische potentiaal	-0,72 Vsce (Volt t.o.v. standaard Calomel elektrode)
maximale bedrijfstemperatuur	480 °C
max. water/stoomtemperatuur	ca. 200 °C
hechtsterkte	Op gestraald staal met Sa 2,5 *: 9 MPa voor autogeen draadspuiten en 12 MPa voor elektrisch draadspuiten (volgens ISO 4624)
* Stralen tot Sa 2,5 volgens ISO 8501-1 met een ruwheid Ry5 50 - 80 volgens ISO 8503 - 4	

Spuitgegevens

Als draadpistolen worden gebruikt, dienen parameters te worden toegepast volgens bijbehorende spuittabellen van de leverancier.

Veiligheids- en arbo-aspecten

Er dient de nodige aandacht te worden besteed aan veiligheid- en arbeidsomstandigheden volgens de wettelijke eisen die daarvoor gelden. Wij noemen enkele essentiële punten:

- ▶ Aluminiumstof en -poeder kan afhankelijk van de concentratie en de manier van bewaren ontvlambaar zijn. Het stof van aluminium dat vrijkomt tijdens het aanbrengen van een TSA-laag is uiterst brandbaar en kan bij specifieke concentraties leiden tot gevaarlijke situaties voor zowel spuiters als omgeving (adequate stofafzuiging en filtering is noodzakelijk!).
- ▶ Tijdens het elektrisch draadspuiten van aluminium komen hoge doseringen UV-straling vrij. Het is daarom noodzakelijk dat de spuiters niet aan de straling worden blootgesteld. Door middel van beschermende kleding wordt dit voorkomen. Naast de juiste kleding vraagt dit ook om bescherming van de ogen middels lasglazen, sterkte 7 of hoger.
- ▶ Het aluminiseren gaat gepaard met een hoge geluidbelasting: ca. 105 dB(A) of hoger. Het gebruik van gehoorbeschermingsmiddelen is noodzakelijk.
- ▶ Bij het aluminiseren komt veel warmte en aluminiumstof vrij. Behalve direct brandgevaar, kan het stof een belemmering zijn voor de arbeidsomstandigheden en de hechting van de TSA-laag. Tijdens het spuiten wordt daarom gebruik gemaakt van afzuiging met speciale filters, ter bescherming van de spuitster. Houdt als indicatie rekening met een afzuigcapaciteit van 6000 m³/uur per spuitpistool.
- ▶ Het gebruik van ondeugdelijke filters is onveilig en kan leiden tot grote vertraging bij het applicatieproces.

Bestaande constructie aluminiseren

Bij bestaande constructies kan het nodig zijn om beperkte ruimten die onvoldoende geventileerd kunnen worden, af te sluiten door middel van dichtlassen (afboxen). Dit kan gevolgen hebben voor het eigen gewicht van de constructie: grotere massa en/of meer drijfvermogen.

Ook moet worden gelet op het verwijderen van de wals-huid door middel van stralen en op overige harde vlakken zoals snijkanten alvorens te stralen. Snijvlakken als gevolg van snijbranden en krimpranden moeten eerst worden geslepen en dan pas gestraald. Het afronden van hoeken is hierbij essentieel voor een goed resultaat.

Richtlijnen

Een publicatie van de American Welding Society [7] geeft een opsomming van richtlijnen voor voorbehandeling (stralen), veiligheid, gebruikt aluminiseermateriaal, apparatuur, inspectie en andere zaken zoals afvalbeheer en eisen te stellen aan personeel. ProRail maakt gebruik van de eigen Richtlijn "Applicatie-eisen Thermisch gespoten Aluminium" uit 2004 [13].

7 Kwalificatie en keuring

7.1 Leveringsvoorwaarden

Voor thermische spuitlagen zijn separate documenten verschenen die het proces van kwaliteitsborging beschrijven [9, 10].

7.2 Bestekseisen

Als voorbeeld kunnen specificaties gelden die Rijkswaterstaat stelt in haar 'Eisen Thermische Spuitlagen, NBD 10300 [15] (deze is gratis op te vragen):

- ▶ Straalreinheid: Sa 2½ volgens ISO 8501-1.
- ▶ Straalruwheid: Ry5 80 tot 100 µm volgens ISO 8503-4.
- ▶ Hechtsterkte: 5 MPa of meer, afhankelijk van de toepassing (ISO 4624). De nominale laagdikte 260 µm of groter, afhankelijk van milieu en beschermduur.

- ▶ De absoluut minimale laagdikte van circa 195 µm.
- ▶ De spreiding in de laagdikte: bij 90% van de metingen mag de laagdikte niet minder dan 85% van de nominale laagdikte zijn. De laagdikte mag nooit minder dan 75% van de nominale laagdikte zijn. Bij een nominale laagdikte van 260 µm geldt dat de absolute minimum laagdikte van circa 195 µm overal gehaald moet worden. Er geldt geen maximum laagdikte. Aan de geëiste hechtsterkte moet echter worden voldaan.
- ▶ Conditie waaronder wel of niet gespoten mag worden: verwijzing in het bestek naar een spuitvoorschrift.
- ▶ Testen en keuringen.

7.3 Keuringseisen

De TSA-laag wordt in hoofdzaak gekeurd op dikte en hechting [15]. Bovendien wordt een leveranciersverklaring geëist. Daarin zijn onder meer de garantie en de resultaten van de keuringen vastgelegd.

De variatie in laagdikte is bij TSA-lagen veel groter dan bij verf. Daarom wordt aanbevolen om voor het keuren van de laagdikte tweemaal zoveel diktemetingen uit te voeren als gebruikelijk is bij verflagen (zie hoofdstuk 8.3).

Ondanks de diktecontrole kan de laagdikte plaatselijk toch onvoldoende zijn. Om deze plaatsen te ontdekken, wordt de constructie die van de TSA-laag is voorzien, met water besproeid en vervolgens gedurende een week geëxposeerd aan de buitenlucht. Plaatsen met mogelijk onvoldoende laagdikte zijn dan te herkennen aan een bruine uitslag. Aanvullende diktemetingen kunnen hierover uitsluitsel geven. Het bovenstaande geldt uitsluitend voor niet-gesealde lagen.

Indien de laagdikte voldoende blijkt, is de bruine uitslag het gevolg van "aanvangsroest" (zie § 8.5). Aanvangsroest kan met een (messing) borstel worden verwijderd.

7.4 Vergroten van de TSA-laagdikte

Waar de TSA-laag onvoldoende is, moet deze worden aangestraald totdat alle roest is verdwenen. Na het aanstralen en het verwijderen van de roest wordt de TSA-laag alsnog op de juiste dikte gebracht. Hierbij ontstaat overlap op de TSA-laag met voldoende laagdikte. Dit is geen bezwaar, mits ook deze is aangestraald en eventuele verontreinigingen zijn verwijderd.

Bij plaatselijke reparatie worden hoge eisen gesteld aan het straalwerk. Indien onvoldoende wordt aangestraald, laat de TSA-laag los.

7.5 Roest bij de eerste expositie aan water

Zoals eerder gezegd: de TSA-laag is poreus. De porositeit wordt al snel opgevuld met aluminiumoxiden. Voordat de poriën zijn opgevuld met oxiden, zijn deze toegankelijk voor water. Waar de laagdikte kritisch is, kan dit na de eerste expositie aan water een bruine uitslag veroorzaken, de zogenaamde aanvangsroest (zie § 8.5).

Het optreden van roest kan een aanwijzing zijn dat de dikte van de TSA-laag onvoldoende is. Als verkleuringen niet zijn toegestaan, dienen TSA-lagen in lucht altijd dikker te zijn dan circa 200 µm.

8 Falen van TSA-lagen

8.1 Falen van de TSA-laag onder corrosieve omstandigheden

Onderzoek heeft het beschermmechanisme aan het licht gebracht [5, 25, 29]. Uit de praktijk, alsmede vanuit literatuuronderzoek, blijkt dat falende TSA-lagen weinig voorkomen.

8.2 Mogelijke faaloorzaken van TSA-lagen zonder verlaag of sealer

Op dit moment kunnen de volgende faalmechanismen en aanbevelingen worden genoemd:

- ▶ Plaatselijk slechte hechting van de TSA-laag op plaatsen die voor het stralen en de applicatie lastig bereikbaar zijn. Een slechte hechting vermindert niet de corrosiebescherming door de TSA-laag, maar kan de opoffersnelheid van de laag wel vergroten. Applicateurs kunnen speciale spuitmonden gebruiken voor het bereiken van moeilijke locaties zoals laspoorten en hoekverstijvingen.
- ▶ Versnelde opoffering van de TSA-laag door snel langstromend water dat de aluminiumoxiden uit de poriën verwijderd. De corrosiesnelheid van het aluminium neemt daardoor toe. Dit kan worden voorkomen door TSA-lagen die in contact zullen komen met snelstromend water, te sealer. Op dit moment is bij praktijktoepassingen de noodzaak voor het sealer nog niet aangetoond.
- ▶ Afname van de laagdikte door opoffering totdat de kritische minimale laagdikte is onderschreden.
- ▶ In de TSA-laag kan evenwijdig aan de stalen ondergrond scheurvorming ontstaan, ook wel interlamellaire delaminatie genoemd. De hechting van de laag aan het stalen substraat is hierbij voldoende. Deze situatie kan zich voordoen indien de TSA-laag met een te lange tussentijd op de vereiste dikte wordt gespoten. In de tussentijd kan oxidevorming van de TSA-laag en/of neerslaan van chloriden of stofdeeltjes die zich in de lucht bevinden de hechting van de later opgespoten TSA-laag verminderen.
- ▶ Oplossen van de TSA-laag door contact met uithardend beton bij staalbetonbruggen. Dit kan worden voorkomen door de TSA-laag die in contact met beton zal komen, vooraf af te plakken.

8.3 Laagdikte en beschermduur

De beschermduur van de TSA-laag neemt toe met de laagdikte. De TSA-laag mag in lucht nergens dunner zijn dan circa 195 µm. Afspraak hierbij is dat een diktemeting het resultaat moet zijn van het gemiddelde van drie laagdiktemetingen op een onderlinge afstanden van 0,1 m.

De beschermduur van TSA-lagen onder verschillende condities wordt gegeven in § 2.4. Er is daardoor kennis beschikbaar om bij bestaande objecten het verband tussen de laagdikte en de resterende beschermduur vast te kunnen stellen. TSA-lagen offeren zichzelf op en beschermen daarbij het onderliggende staal tegen corrosie. Doordat de TSA-laag zichzelf afsluit met een beschermende oxidehuid, verloopt het opofferproces langzaam. Indien de TSA-laag te dun geworden is door opoffering (of te dun is aangebracht), begint het onderliggende staal ter plaatse te roesten. Bij afnamekeuring op de laagdikte kan hiervan gebruik worden gemaakt (zie § 7.4 en 7.5).

8.4 Vliegroeest

Bruine uitslag kan het gevolg zijn van vliegroeest. Vliegroeest ontstaat als ijzerdeeltjes op de TSA-laag terechtkomen en daar corroderen, of door langstromend roestwater van stalen delen elders.

8.5 Aanvangsroest

Dit 'bloeden' is een aanvangseffect dat op kan treden bij een laagdikte tot circa 200 µm en mede afhankelijk van de porositeit van de TSA-laag. Naarmate de porositeit van de laag kleiner is - dat wil zeggen de TSA-laag dichter is - neemt de kans op aanvangsroest af. Dit geldt natuurlijk ook indien de laag is geseald.

8.6 Kratertjes in de TSA-laag

In de TSA-laag kan evenwijdig aan de stalen ondergrond scheurvorming ontstaan: interlamellaire delaminatie

(voor een mogelijke oorzaak zie § 8.2). Een tweede oorzaak kan een te hoge applicatietemperatuur zijn, door te trage voortbeweging van de spuit, hetgeen ook bij gerobotiseerd spuiten mogelijk is. Hierdoor worden thermische restspanningen evenwijdig aan het substraat ingebracht die ook interlamellaire scheuren veroorzaken.

Het gevolg van de interlamellaire scheuren is dat de (op zich gewenste) aluminiumoxides het bovenste deel van de TSA-laag plaatselijk kunnen opdrukken. Dit uit zich in het ontstaan van kratertjes (zie figuur 10). Het onderliggende staal blijft beschermd zolang de TSA-laag zich opoffert. De opoffersnelheid zal echter groter zijn doordat de oppervlakte is toegenomen door de vorming van kratertjes. De beschermduur van een TSA-laag met kratertjes zal dus korter zijn.



figuur 10 Ontstaan van kratertjes als gevolg van interlamellaire scheuren die de TSA-laag opdrukken

8.7 *Faalorzaken van TSA-lagen met verlaag of sealer*

8.7.1 *Blaasjes in de verlaag of sealer*

TSA-lagen zijn poreus. Onder de verlaag of sealer kunnen na het aanbrengen blaasjes ontstaan indien de poriën onvoldoende zijn gevuld. Dit kan worden voorkomen door het aanbrengen van een primerlaag of sealer met een lage oppervlaktetension.

8.7.2 *Verkrijten van de verlaag*

De verlaag kan door de invloed van UV-licht verkleuren en verkrijten. Schuren van de verkrijte laag en het aanbrengen van de cosmetische toplaag kan na 20 jaar nodig zijn. Doordat er geen onderroest kan optreden, is verwijderen van de verlaag niet nodig. Daarom zijn slechts beperkte milieumaatregelen nodig.

8.8 *Onderhoud op locatie*

Het ontstaan van bruine uitslag tijdens de gebruiksduur kan een aanwijzing zijn dat de laagdikte onvoldoende geworden is, dus minder dan circa 200 micrometer. Eerst moet worden nagegaan of de uitslag het gevolg is van aanvangsroest of vliegroest. Dit laatste is het geval als de uitslag met een (messing) borstel kan worden verwijderd.

Indien er sprake is van corrosie van het staal, dan moet de TSA-laag (lokaal) worden verwijderd door gritstralen tot er voldoende straalreinheid en ruwheid is verkregen. Opspuiten van een TSA-laag is dan op locatie mogelijk.

Een sealer kan het onderhoudsinterval met minstens 15 jaar vergroten.

8.9 *Bijzondere expositieomstandigheden*

Bij een onjuiste applicatie of onder expositieomstandigheden die niet bedoeld zijn voor TSA-lagen (zoals te hoge of te lage pH, dat wil zeggen lager dan 3,9 of hoger dan 8,7, of cavitatie, hoge stroomsnelheden e.d.), kan het beschermmechanisme van de TSA-laag falen. Verwacht mag worden dat dit zich snel uit in corrosie van het stalen substraat.

9 *Toekomstvisie*

9.1 *Toepassingen bij normale temperaturen*

9.1.1 *Corrosiewering*

Het verduurzamen van stalen constructies met TSA-lagen zal toenemen bij toepassingen in landlucht waar langere tijd geen onderhoud gewenst is, zoals bij geluidsschermen, masten, bruggen vangrails en straatmeubilair.

ISO 12944 geeft aan dat alleen TSA-lagen in alle negentien bestudeerde industriële en maritieme klimaten langer dan twintig jaar bescherming bieden. De Canadian Standards Organisation gaat uit van ruim veertig jaar bescherming in de meeste gebruiksomstandigheden waar corrosie een rol speelt. In het buitenland zijn er al vele referentieprojecten en neemt de toepassing van TSA-lagen voor langdurige corrosiebescherming snel toe.

Waar een beschermduur van circa 20 jaar voldoende is, zijn TSA-lagen duurder dan verflagen, zinklagen of Zinkal-lagen.

Door verdere optimalisatie van het applicatieproces is de verwachting dat de beschermduur van TSA-lagen tegen corrosie hoger dan 50 jaar komt te liggen.

Het gebruik van sealers op TSA-lagen kan in de praktijk toenemen.

Het conserveren van stalen constructiedelen met TSA-lagen zal de potentie van staal als constructiemateriaal kunnen versterken. Dit is noodzakelijk nu zeer hogesterktebeton als constructiemateriaal sterk in opkomst is.

9.1.2 *Overige toepassingen van TSA-lagen*

TSA als antisliplaag

Behalve toepassing op het dek van schepen is vermeldenswaard dat het Millenniumwiel in Londen is gealuminiseerd ter plaatse van de aandrijfvelgen. De TSA-laag maakt daar contact met aandrijfwielen van rubber. De ruwheid van de TSA-laag is daar noodzakelijk voor het versnellen, bewegen en vertragen van het Millenniumwiel. Bovendien beschermt de TSA-laag de velg tegen corrosie.

Apparatenbouw

In de apparatenbouw, en bij toepassingen in de levensmiddelen- en procesindustrie kunnen TSA-lagen interessant zijn als corrosiewering. Vooral voor de procesindustrie zijn er voordelen, omdat TSA-lagen in één bewerking kunnen worden aangebracht op warme stalen oppervlakken. Bij organisch verfsystemen moet tussen het aanbrengen van de primerlaag en andere lagen worden gewacht, totdat de lagen droog zijn. Ook zijn organische lagen gevoeliger voor mechanische beschadigingen. TSA-lagen zijn uitermate geschikt ter voorkoming van corrosie onder isolatie (CUI) in de procesindustrie.

Herstel van gietstukken

Aluminium gietstukken kunnen porositeit aan het oppervlak vertonen die voor de sterkte van het product soms niet van belang is, maar die visueel niet acceptabel is. Door deze plekken licht aan te stralen en van een TSA-laag te voorzien, gevolgd door handmatig wegslijpen van het overtollige materiaal, kan weer een strak oppervlak worden verkregen.

Moulding

Door de relatief lage deeltjestemperatuur en de grote plasticiteit van de spuitdeeltjes is TSA zeer geschikt voor het kopiëren van driedimensionale vormen of modellen. Nadat het model voorzien is van een dunne coating die voor de lossing moet zorgen, kan, met de nodige voorzorgen, een TSA-laag worden aangebracht, die tot in de kleinste details de vorm en oppervlaktestructuur van het model overneemt. Op deze wijze kunnen snel en goedkoop mallen worden geproduceerd met een TSA-laag.

Reflectielaag

Een grote gloeilampenproducent zocht naar alternatieven voor een reflecterende coating op kopspiegellampen. Na zeer zorgvuldig ontvetten van het glas en het opspuiten van aluminium bleek de aangebrachte laag aan de glaszijde, dus op het hechtingsvlak, zo glad te zijn, dat een perfecte reflectie werd verkregen.

9.2 Toepassingen bij verhoogde temperaturen

Rookgasafvoeren

Indien gebruik wordt gemaakt van kanalen in rookgas-systemen van een laaggelegeerd koolstofstaal, kan corrosie aan de binnenkant optreden. Dit kan zowel op de hete plaatsen geschieden als op de delen waar de gassen zijn afgekoeld tot onder het dauwpunt en waar condensatie optreedt. Afhankelijk van de samenstelling van de gassen kan TSA hier een oplossing bieden.

Panbodems

Het gebruik van RVS pannen voor de huishouding is de laatste jaren enorm toegenomen. De warmtegeleiding en daarmee de warmteverdeling in dergelijke pannen is slecht. Dit probleem is opgelost door de stalen panbodems aan de buitenzijde te voorzien van de goed geleidende TSA-laag van enkele millimeters dikte en deze na te draaien. Hiermee wordt tevens een perfect vlakke bodem verkregen die nodig is voor keramische kookplaten.

Overig

Aluminium smelt bij ca. 660 °C. De toepassing van zure TSA-lagen is daardoor beperkt tot niet al te hoge temperaturen. Daarbij kan men denken aan onderdelen van heetgassystemen en uitlaatsystemen, bij ketels van elektriciteitscentrales, waarbij de gassen best heet kunnen zijn mits het onderdeel maar voldoende gekoeld blijft. Tijdens gebruik kunnen - afhankelijk van het substraat - door diffusie aluminides worden gevormd, die ook een goede bescherming kunnen bieden, maar vaak bros zijn! Deze aluminides kunnen worden gevormd bij expositietemperaturen boven 315 °C (zie publicatie "Dikke deklagen", www.coating-online.nl).

Bij temperaturen boven 400-500 °C maakt men gebruik van aluminium diffusielagen (via pack aluminiseren, een behandeling met hete gassen, aangebracht), of van HVOF of plasmaspuiten van bijvoorbeeld FeCrAlY lagen (of van intermetallische verbindingen: aluminides). Toepassingen zijn dan: het beschermen tegen heetgasoxidatie/corrosie tot ca. 1100 °C, bijvoorbeeld voor turbineonderdelen, heetgaskanalen, kleppen, schermen, veren, beugels, enz.

10 Referenties

- [1] Publicaties over het spuitproces:
 - Michael Knepper: Das Lichtbogenspritzen - Anlagentechnik und Anwendungen; Sonderlehrgang Oberflächenbeschichten durch Thermisches Spritzen der SLV Duisburg, 1999.
 - Martin Scholte: Schooperen - Corrosiebescherming in combinatie met een organische coating; Carrosserie 9-1996.
- [2] Referentiedocument "Conservering op staal", versie 4.0, september 2004, Bouwdienst Rijkswaterstaat.
- [3] VM 95 - "Thermisch spuiten"; FME-CWM, 1992; www.coating-online.nl.
- [4] VM 108 - "Corrosiebestendige en slijtvaste oppervlaktelagen door oplassen en thermisch spuiten"; FME-CWM, 1998; www.coating-online.nl.
- [5] Mark Vreijling; Proefschrift; Electrochemical Characterisation of Metallic Thermally Sprayed Coatings; 20 november 1998.
- [6] D. Ros; "Besparingskennis door innovaties met materialen, Rijkswaterstaat NIQ-A-N 200425, 21 september 2004.
- [7] Guide for the protection of steel with thermal sprayed coatings of aluminium and zinc and their alloys and components, uitg. American Welding Society, New York 1993, zie ook www.aws.org.
- [8] BS 5493 (Code of practice for protective coatings of iron and steel structures against corrosion), 1977. Inmiddels vervangen door BS EN ISO 14713 (Protection against corrosion of iron and steel in structures. Zinc and aluminium coatings. Guidelines), 1999. Zie ook: www.bsonline.techindex.co.uk.
- [9] Document TN 02-96: Raamwerk voor het opstellen van procesbeschrijvingen (FME-CWM 2003).
- [10] TI.05.27 "Kwaliteitsborging van (harde) deklagen", FME-CWM 2005, zie ook www.coating-online.nl.
- [11] Daniel, Noordzij, Nagtegaal; Toegangsbrug aanleg in de richting binnenhaven Noordland; Variantenstudie naar vier materiaalopties; TAN-R-99088; 8-4-1999.
- [12] J.A. de Jong en A.J. de Munter; Rapport haalbaarheid aluminiseren roldeur 5, Westsluis te Terneuzen, Rijkswaterstaat 4838R-JJO-01.119, 9 juli 2001.
- [13] Document RLN00068: Applicatie eisen Thermisch gespoten aluminium (ProRail 2004).
- [14] TNO-rapport 97MI/00999/SLO "Belastbaarheid van een thermisch gespoten aluminium deklaag in een pen-gatverbinding". Datum: 5 december 1997. Auteur : H.M. Slot.
- [15] Ros, Blom; Eisen thermische spuitlagen, NBD 10300, versie 2005, RWS Bouwdienst.
- [16] Coolegem, Ferrari; TNO-rapport CA00.9045; Thermisch Gespoten Aluminium Deklagen, Beton en Geometrie; 20 november 2000.
- [17] Coolegem, Lauterbach; TNO-rapport CA00.9003; Literatuurstudie naar de interacties tussen thermisch gespoten aluminium deklagen, staal en beton; 15 november 2000.
- [18] Ros; Handreiking alulagen; Conceptversie 13, oktober 2000.
- [19] Schipper, Terpstra; Shell Global Solutions OP.00.20374; Invloed van een thermisch gespoten aluminium coating op de toepasbaarheid van inspectietechnieken op stalen bruggen; augustus 2000.
- [20] Ros; Cursus Thermisch gespoten aluminium deklagen; Conceptversie 16 februari 2000.
- [21] Ros; Otter; Aluminium deklagen breken door bij Rijkswaterstaat; 1 - 2000.
- [22] Ros; Land + Water nummer 10/1999; Minder onderhoud met aluminium deklagen; Doorbraak in kathodische bescherming van staalconstructies; oktober 1999.
- [23] Kuroda, Takemoto; Ten Year Interim Report of Thermal Sprayed Zn, Al, and Zn-Al Coating Exposed to Marine Corrosion bij Japan Association of Corrosion Control; page 1017.1024; 1999.
- [24] Klinge Protection of Norwegian Steel Bridges against Corrosion; Stahlbau 68, Heft 5; 1999.
- [25] Vreijling, Suurmond; TNO-Industrie; Corrosiebescherming met Thermisch Gespoten Aluminium Deklagen in Zeewater, Zoetwater en Lucht; TNO-rapport CA98.9032; 3 december 1998.
- [26] Vreijling; Electrochemical Characterisation of Metallic Thermally Sprayed Coatings; 20 november 1998.
- [27] Kogler, Peter, Farschon U.S. Department of Transportation; Federal Highway Administration; Report No. FHWAORD096-058; Environmentally Acceptable Materials for the Corrosion Protection of Steel Bridges; January 1997.
- [28] Kogler, Ault, Farschon; Environmentally Acceptable Materials for the Corrosion protection of Steel Bridges; FHWA-RD-96-58; (7-jaar praktijkonderzoek verf en metaallagen). Januari 1997.
- [29] Vreijling, Willemsen; Centrum TNO-Coatings;

- Aluminium deklagen voor stalen constructies in maritiem milieu; TNO-rapport nr. CA/95.1033; Evaluatie van de corrosiebescherming; 29 november 1995.
- [30] Vreijling, Van Westing, Ferrari; Centrum TNO-Coatings; Literatuuronderzoek Aluminium deklagen voor stalen constructies in maritiem milieu; Rapportnummer C94.1010; 8 maart 1994.
- [31] SMOZ; Mededelingenblad jaargang 17 nr. 6, blz. 50; Praktijktoeppassing van aludeklagen in zee-water; December 1991.
- [32] Gartland, Eggen SINTEF Corrosion Center; Thermal sprayed aluminium coating in sea water with and without cathodic protection; 1990.
- [33] Rosbrook, Thomason, Byrd; Flame-Sprayed-Aluminium Coatings Used on subsea Components; Coatings & Linings; September 1989.
- [34] Werk; Karakterisering vlamgespoten lagen in het kader van het SMOZ-project Metallieke Lagen; Hoogovens rapport 61742; 1987.
- [35] Harding; Testing of Metallic and Inorganic coatings; 14-15 april 1986.
- [36] Vardon; Flame sprayed aluminium coatings for corrosion control of the Hutton tension leg components; Anti-corrosion; Juli 1986.
- [37] Kain, Baker; Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel; ASTM PCN 04-947000-04; (34 jaar onderzoek); 1986.
- [38] Round; The development and Use of Electric Arc Sprayed Aluminium Coatings for corrosion protection, Proceeding of the 9th International Thermal Spraying Conference, blz. 392-399; 1980.
- [39] Kreienbühl, Kunzmann, Widmer; Corrosion protection bij arc sprayed aluminium: new developments; Proceeding of the 8th International Thermal Spraying Conference blz. 436-442; 1976.
- [40] Jay Bland; Corrosion tests of flame-sprayed coated steel, 19 year report C2.14 - 74; American Welding Society (AWS).
- [41] Experience on "Thermal Spray Aluminium (TSA)" coatings on offshore Structures, Desmond Tiong and Halimah Pit, NACE Corrosion 2004, Paper No 04022.
- [42] Deterioration of TSA coatings on Hot Risers due to Thermal Cycling, W.H. Thomason, et al., NACE Corrosion 2004, Paper No. 04021.
- [43] Performance History of Thermal-Spray Aluminum Coatings in Offshore Service, K.P. Fischer, NACE Materials Performance, April 1995, page 27.
- [44] Strategies to prevent CUI in Petrochemical industry piping, B.J. Fitzgerald, et al. NACE Corrosion, 2003, Paper No 03029.
- [45] NACE Standard RP 0198-2004, The Control of Corrosion Under Thermal Insulation and Fire-proofing Materials - A System Approach.
- [46] On the Economical and Environmental Aspects of TSA Coatings, A.J. de Munter, A. Bult and J.A. de Jong, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002, Essen Germany.

11 Van belang zijnde NEN-normen

NEN-ISO 2063

Metallische en andere niet-organische lagen. Thermisch Spuiten. Zink, Aluminium en hun legeringen. Editie oktober 1993.

NEN-EN-ISO 3882

Metallische en andere niet-organische deklagen. Overzicht van methoden voor het meten van de dikte. Ontwerp januari 2000.

NEN-EN-ISO 10308

Metallieke deklagen. Overzicht van poreusheidsproeven. Editie: september 1997.

NEN-EN 13214

Thermisch Spuiten. Coördinatie van thermisch Spuiten. Taken en verantwoordelijkheden. Editie: Februari 2001.

NEN-ISO 14917

Thermisch spuiten. Terminologie, classificatie. Editie: september 1999

NEN-EN-ISO 14918

Thermisch spuiten. Het kwalificeren van thermisch spuiters. Editie: oktober 1998.

NEN-EN-ISO 14919

Thermisch spuiten. Draden, staven en snoeren voor vlam- en boogspuiten. Indeling. Technische leveringsvoorwaarden. Editie: september 2001.

NEN-EN-ISO 14922-1

Thermisch spuiten. Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen. Deel 1: Leidraad voor de keuze en de toepassing. Editie: augustus 1999.

NEN-EN-ISO 14922-2

Thermisch spuiten. Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen. Deel 2: Uitgebreide kwaliteitseisen. Editie: augustus 1999.

NEN-EN-ISO 14922-3

Thermisch spuiten. Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen. Deel 3: Standaard kwaliteitseisen. Editie: augustus 1999.

NEN-EN-ISO 14922-4

Thermisch spuiten. Kwaliteitseisen voor thermisch gespoten onderdelen. Deel 4: Elementaire kwaliteitseisen. Editie: augustus 1999.

NEN-EN-ISO 14923

Thermisch spuiten. Karakterisering en beproeving van thermisch gespoten deklagen. Editie: maart 2000 (ontwerp).

NEN-EN-ISO 17834

Thermisch spuiten. Deklagen voor bescherming tegen corrosie en oxidatie bij verhoogde temperatuur. Taal: Engels. Ontwerpnorm gedateerd september 2001.

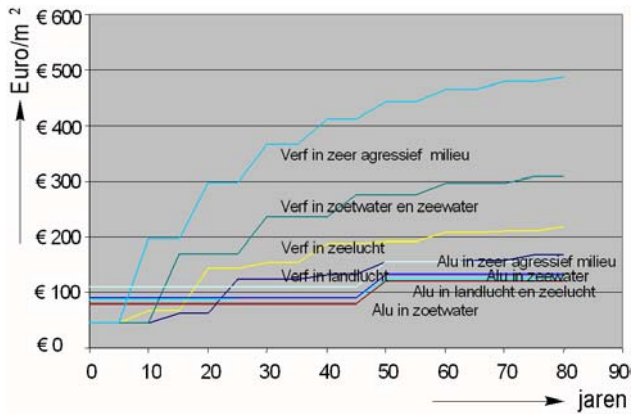
NEN-EN-ISO 8501-1:2001

Voorbehandeling van staal voor het aanbrengen van verven en aanverwante producten - Visuele beoordeling van oppervlaktereinheid.

BIJLAGE A *Indicatief voorbeeld integrale kostenvergelijking tussen aluminiseren en verfspuiten (bron: Rijkswaterstaat)*

Dit voorbeeld is de uitwerking van § 3.2

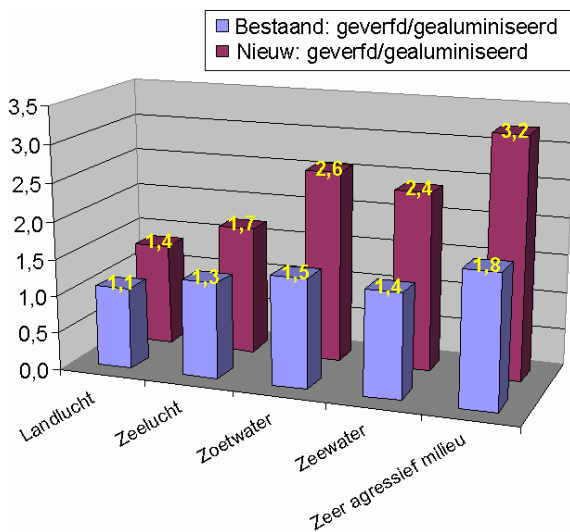
In figuur A1 staan de integrale kosten voor het conserveren van nieuwe stalen objecten door middel van verfspuiten en aluminiseren in landlucht, zeelucht, zoetwater, zeewater en een zeer agressief milieu. CW staat voor Contante Waarde.



figuur A1 CW verfspuiten en aluminiseren bij een nieuw object, inclusief 15 €/m² gevolgkosten

Hierbij wordt opgemerkt dat de onderhoudskosten van gevelde stalen objecten in landlucht en zeelucht in de toekomst kunnen dalen door een gewijzigde onderhoudsstrategie, waarbij het groot onderhoud zoveel mogelijk wordt uitgesteld. Dit geldt niet voor objecten in en bij water, omdat tussentijds onderhoud daar vaak niet mogelijk is [7].

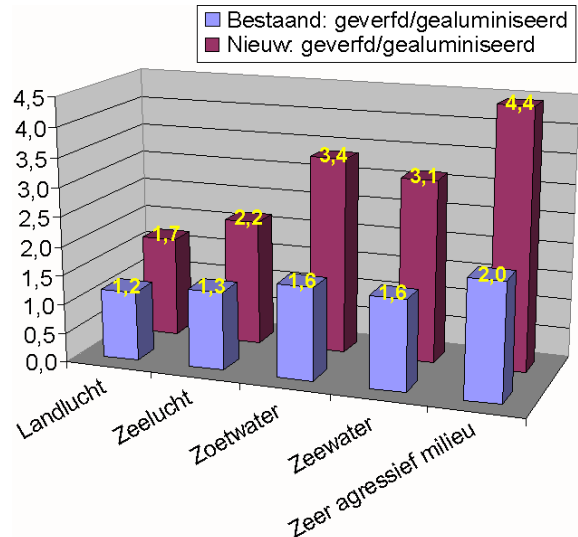
In de staafgrafiek van figuur A2 staan de quotiënten van de integrale kosten van verfspuiten en aluminiseren. Hierbij is aangenomen dat de gevolgkosten slechts 15 €/m² zijn [6].



figuur A2 Quotiënten van de jaarlijks gemiddelde kosten van verfspuiten en aluminiseren, aangenomen dat de maatschappelijke kosten 15 €/m² bedragen

In de staafgrafiek van figuur A3 staan de quotiënten van de integrale kosten voor het verfspuiten en het alumi-

seren bij relatief hoge gevolgkosten: 150 €/m². Het integrale kostenvoordeel van TSA-lagen is daarbij aanmerkelijk groter.



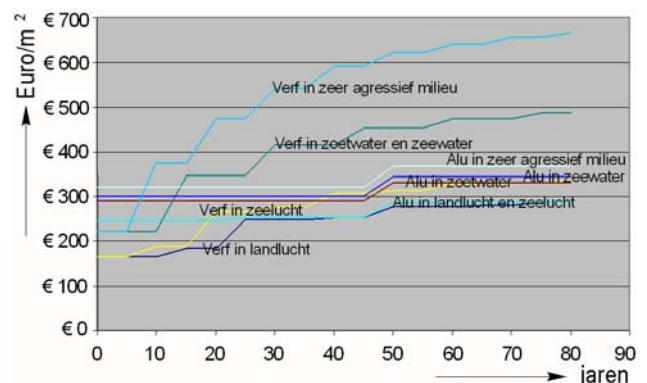
figuur A3 Quotiënten van de jaarlijks gemiddelde kosten van verfspuiten en aluminiseren, aangenomen dat de maatschappelijke kosten 150 €/m² bedragen

Conclusie: Aluminiseren vanuit nieuwbouw is kosteneffectiever dan vanuit de onderhoudssituatie. Het voordeel wordt veroorzaakt doordat bij nieuwbouw alleen de applicatiekosten in de prijsvergelijking meegenomen worden. Bij onderhoud zijn er tal van bijkomende kosten. Het rente-effect daarvan tikt sterk door.

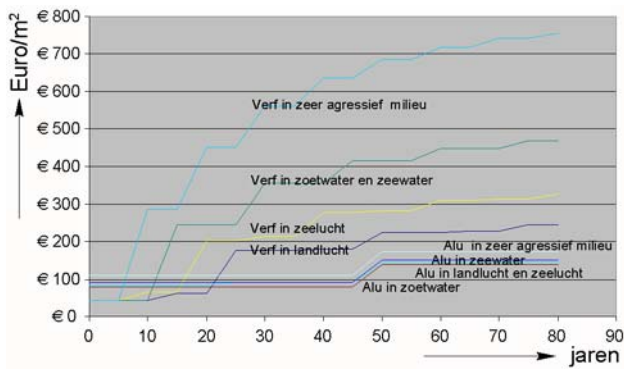
In feite zijn er vier mogelijke situaties:

- ▶ lage gevolgkosten bij een nieuw en een bestaand object;
- ▶ hoge gevolgkosten bij een nieuw en een bestaand object.

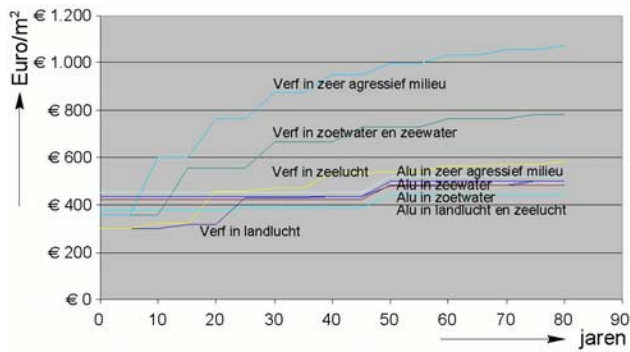
Uit de grafieken in de figuren A1 en A4 t/m A6 blijkt dat de hogere startkosten bij het aluminiseren in bijna alle gevallen bij de eerste uitgespaarde verfbeurt worden terugverdiend. Bovendien is het goedkoper om het object vanuit nieuwbouw te aluminiseren.



figuur A4 CW verfspuiten en aluminiseren bij een bestaand object, inclusief 15 €/m² gevolgkosten



figuur A5 CW verfspuiten en aluminiseren bij een nieuw object, inclusief MK 150 €/m²



figuur A6 CW verfspuiten en aluminiseren bij een bestaand object, inclusief MK 150 €/m²

Auteurs

Deze voorlichtingspublicatie is opgesteld in opdracht van het NIMR in het kader van het project 'Nieuwe coating-technieken voor het MKB. Hierbij waren de volgende organisaties betrokken:

Federatie Dunne Plaat (FDP), Industrieel Technologie Centrum (ITC), Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL), Netherlands Institute for Metals Research (NIMR), SenterNovem, Syntens en Vereniging FME-CWM.

De auteurs, D. Ros (Rijkswaterstaat Bouwdienst), P.P.J. Ramaekers (Rasceur Industrial Innovations) en A.J. de Munter (M&O Beheer) werden ondersteund door een begeleidingsgroep bestaande uit: E. Schuring (ECN), E. de Jonge (Vereniging Thermische Spuittechnieken), J. van de Put (Syntens), H. van der Mijle Meijer (TNO), F. van Rodijnen (Sulzer Metco OSU GmbH), M. Pauw (Bouwen met Staal), F. Westendorp (Kon. Marine), G. Vaessen (GVA) en P. Boers (FME-CWM).

Technische informatie:

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de auteur P.P.J. Ramaekers (tel.: 0495-450387, e-mail: p.p.j.ramaekers@wxs.nl).

Informatie over, en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info-bladen:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,
2713 HX ZOETERMEER
Correspondentie-adres: Postbus 190,
2700 AD ZOETERMEER
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41
Fax: (079) 353 13 65
E-mail: pbo@fme.nl
Internet: www.fme-cwm.nl

Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Adres: Krimkade 20,
2251 KA VOORSCHOTEN
Telefoon: (071) 560 10 70
Fax: (071) 561 14 26
E-mail: info@nil.nl
Internet: www.nil.nl



Netherlands Institute
for Metals Research



Federatie
dunne plaat



SenterNovem



FME CWM



© Vereniging FME-CWM/december 2005 - 03

Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technische Bedrijfskunde
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon 079 - 353 11 00
telefax 079 - 353 13 65
e-mail: pbo@fme.nl
internet: www.fme-cwm.nl

