



HÅNDBOG

OM VARMFORZINKNING

Forord

Stål er vor tids mest anvendte konstruktionsmateriale. Stålet har mange fordele, men desværre også en stor ulempe, nemlig at det korroderer. For at konstruktionen kan få en lang, vedligeholdelsesfri levetid er det af største betydning med en pålidelig korrosionsbeskyttelse, og det er her, varmforzinkningen kommer ind i billedet. Ved at nedsænke konstruktionen i smeltet zink opnår man både en udvendig og indvendig korrosionsbeskyttelse med høj modstandsdygtighed. Varmforzinkning bruges til en lang række produkter, fra små fastgørelseselementer til store bjælker, bro-segmenter, tagspær, lygtepæle, autoværn og facade-elementer. Mulighederne er uendelige. I de sammenhænge, hvor stål indgår, spiller varmforzinkning ofte en vigtig, supplerende rolle.

Denne vejledning er udgivet af Nordic Galvanizers, brancheorganisationen for varmforzinkningsvirksomheder i Norden. På vores hjemmeside, www.nordicgalvanizers.com, er der yderligere oplysninger, og der præsenterer vi løbende nyheder inden for branchen.

Nordic Galvanizers driver et informationskontor i Stockholm, hvor vores medlemmers kunder er velkomne til at kontakte os vedrørende spørgsmål og rådgivning om valg af stål, konstruktionsdesign, standarder, korrosionskategorier, miljøspørgsmål og andet vedrørende varmforzinkning af stål. Nordic Galvanizers arrangerer blandt andet konferencer for medlemsfirmaer, hvor man præsenterer teknologi-udvikling og produktionsforbedringer og deltager i et internationalt samarbejde gennem den europæiske varmforzinkningsorganisation European General Galvanizers Association, EGGA. Ved at vælge en varmforzinker, der er medlem af Nordic Galvanizers, sikrer du som bruger, at dit produkt er varmeforzinket med fokus på kvalitet og miljøbevidsthed. Du kan også hurtigt få hjælp og svar på spørgsmål vedrørende produktet, enten fra din varmforzinker eller fra Nordic Galvanizers informationskontor.

Denne vejledning blev første gang udgivet i 1968 med titlen "Varmforzinkning som korrosionsbeskyttelse". Den blev modtaget med stor interesse og er siden blevet redigeret otte gange og er udkommet på syv forskellige sprog.

I denne ottende udgave er der taget hensyn til de seneste års teknologiske udvikling samt nyheder om miljøspørgsmål. Vejledningen bygger ligesom tidligere på forskningsresultater, erfaringer og oplysninger fra folk i branchen. Det er vores håb, at manualen nu som i tidligere udgaver vil være til nytte og glæde for alle dem, der er praktisk involveret i problemet med at beskytte stål mod korrosion.

Stockholm i september 2020



Annikki Hirn

Indholdsfortegnelse

1. Noget om korrosion og korrosionsbeskyttelse

2. Valg af korrosionsbeskyttelse

3. Forzinkningsmetoder

- 3.1 Varmforzinkning
- 3.2 El-forzinkning, elektrolytisk forzinkning
- 3.3 Termisk sprøjtning, sprøjteforzinkning
- 3.4 Sherardisering
- 3.5 Mekanisk forzinkning
- 3.6 Maling med zinkrig maling

4. Varmforzinkning

- 4.1 Varmforzinkningens fordele og ulemper
- 4.2 Proces
 - 4.2.1 Varmforzinkning af små emner
 - 4.2.2 Tråd- og rørforzinkning
 - 4.2.3 Pladeforzinkning

5. Reaktioner mellem jern og zink

- 5.1 Zinklagets struktur
- 5.2 Aluminiumberoligede stål
- 5.3 Sandelinstål
- 5.4 Siliciumberoligede stål
- 5.5 Indflydelse af legeringselementer i stålet
- 5.6 Indvirkningen af andre faktorer
- 5.7 Indflydelse af legeringselementer i zinkbade
- 5.8 Valg af stål
 - 5.8.1 Aluminiumsberoliget stål med uventet lav reaktivitet
 - 5.8.2 Risiko for Sandelineffekt
 - 5.8.3 Højere lagtykkelser
- 5.9 Jernzink-reaktion ved båndforzinkning

6. Varmforzinket ståls styrkeegenskaber

- 6.1 Trækstyrke, kærslagsstyrke og formbarhed
- 6.2 Svejsespændinger
- 6.3 Udmattelsesstyrke
- 6.4 Sprødhed, revnedannelse
- 6.5 Varmforzinket materiale og brand
- 6.6 Varmforzinket materiale ved eksponering i forhøjet temperatur
- 6.7 Zinkbelægnings modstandskraft mod slitage

7. Konstruktionsudformning og fremstilling

- 7.1 Sikkerhedskrav
- 7.2 Konstruktionsanvisninger
 - 7.2.1 Håndteringsmuligheder
 - 7.2.2 Indbyrdes bevægelighed
 - 7.2.3 Undgå konstruktioner som kan deformeres
 - 7.2.4 Undgå uens overflader og materiale typer
 - 7.2.5 Undgå syrespalter
 - 7.2.6 Overlappende overflader
 - 7.2.7 Undgå lommer
 - 7.2.8 Emner med gevind
 - 7.2.9 Mærkning
 - 7.2.10 Svejsning
 - 7.2.11 Øvrige forhold

8. Standarder

- 8.1 Almene krav
- 8.2 Tykkere belægning end i standarden

9. Kvalitet - kontrol, prøvning og udførelse

- 9.1 Branchestandarder
- 9.2 Lagtykkelse
- 9.3 Udseende
- 9.4 Vedhæftning
- 9.5 Forholdsregler ved afvigelse
- 9.6 Forholdsregler ved skader – reparation
- 9.7 Approved Galvanizer – til byggeprodukter

10. Zinkbelægnings korrosion

- 10.1 Korrosion i atmosfæren
 - 10.1.1 Rødbrun misfarvning
- 10.2 Korrosion i væsker
 - 10.2.1 Hvidrust
- 10.3 Korrosion i jord
- 10.4 Galvanisk korrosion
 - 10.4.1 Zinkbelægnings katodiske beskyttelse
 - 10.4.2 Galvanisk korrosion af forzinket stål i kontakt med indstøbt armering
 - 10.4.3 Zinkbelægnings i kontakt med andre metaller end stål
- 10.5 Varmforzinkede materialer i kontakt med bygningsmaterialer
 - 10.5.1 Korrosionsbeskyttelse for armeringsstål
 - 10.5.2 Varmforzinket armering i kloridmiljø
- 10.6 Pakning og transport af varmforzinket materiale

11. Maling af varmforzinket stål - Duplexsystem

- 11.1 Levetiden på duplexsystem
- 11.2 Nyforzinkede, blanke overflader
- 11.3 Eksponerede, matte overflader
- 11.4 Rengøring og forbehandling
- 11.5 Valg af maling
- 11.6 Pulverlakering
 - 11.6.1 Pinholes
- 11.7 Vigtigt ved duplexbehandling

12. Lysbuesvejsning af zinkbelagt stål - Punktsvejsning

- 12.1 Sprøjt, indtrængning, porer- og revnedannelser
 - 12.1.1 Foranstaltninger mod sprøjt, reduceret indtrængning, porer og interkrystallinsk revnedannelse
- 12.2 Elektrodevalg
- 12.3 Røg
 - 12.3.1 Zinkoxidens skadevirkning
 - 12.3.2 Beskyttelse mod svejserøg
- 12.4 Punktsvejsning

13. Boltesamling

- 13.1 Befæstigelseselementer
- 13.2 Anlægsfladerne
- 13.3 Hulboring
- 13.4 Montering

14. Økonomi ved varmforzinkning

- 14.1 Initialomkostninger
- 14.2 Vedligeholdelsesomkostninger
- 14.3 Levetidsomkostninger

15. Zink i miljøet

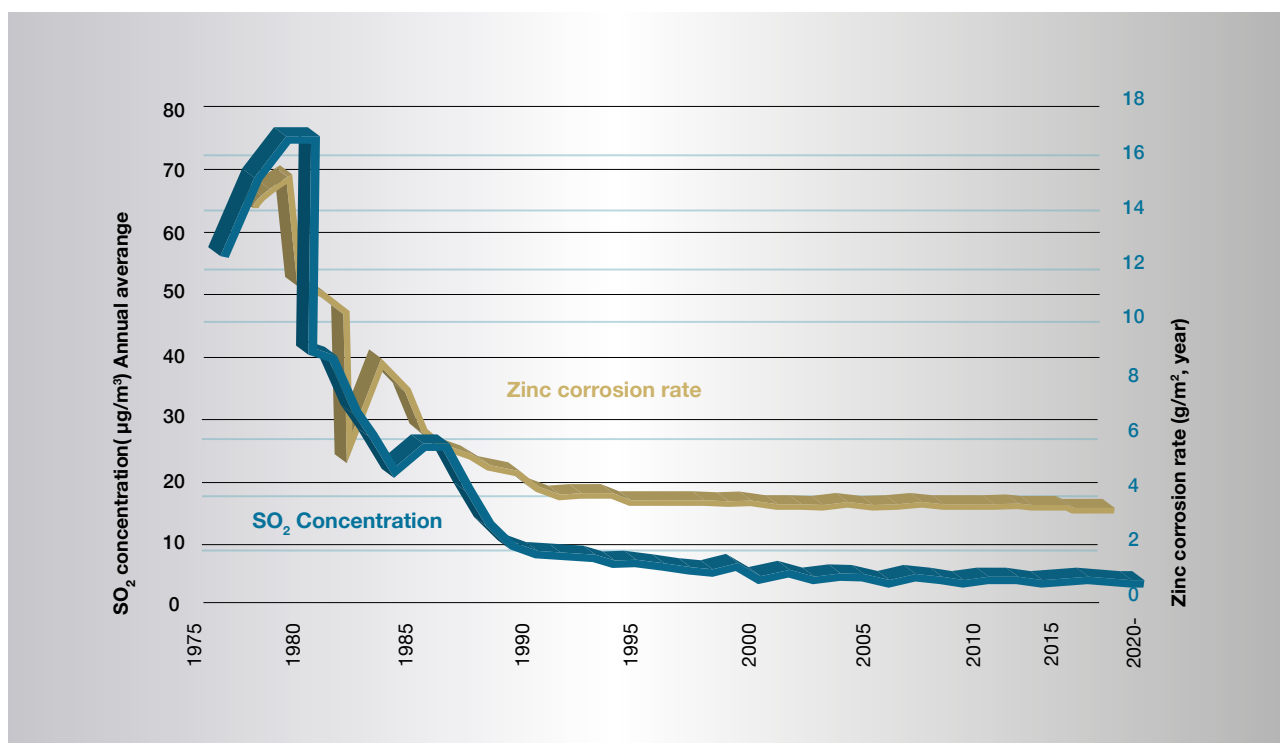
- 15.1 Alment
- 15.2 Zink i organismer
- 15.3 Zinkens biotilgængelighed
- 15.4 Anvendelsesområder
- 15.5 Afstrømning fra varmforzinkede produkter
- 15.6 Fremstilling og energiforbrug
- 15.7 Genanvendelse
- 15.8 Udslip af zink

16. Miljøpåvirkningen af varmforzinkningsprocessen

- 16.1 Branchens miljøarbejde
- 16.2 Produktet
 - 16.2.1 Produktindhold
- 16.3 Emballering og transport
- 16.4 Materialelegenindvinding og energiforbrug
- 16.5 Produktion
 - 16.5.1 Udslip til luft
 - 16.5.2 Udslip til vand
 - 16.5.3 Energigenbrug
 - 16.5.4 Støj og helbred
- 16.6 Miljøprofil
 - 16.6.1 Miljøstyring
- 16.7 Zink i miljøet
- 16.8 Miljøvaredeklaration

17. Referencer

1. Noget om korrosion og korrosionsbeskyttelse



Billede 1-1. Svovldioxid og zinkkorrosion mellem årene 1978-2020 i Stockholm.

I de seneste år er korrosionen reduceret betydeligt både i Danmark og det øvrige Europa. Dette skyldes flere faktorer; den mest åbenbare er atmosfærens reducerede indhold af svovldioxid. Dels er anvendelsen af fyringsolie reduceret, og samtidig indeholder den en lavere mængde svovl end tidligere. Billede 1-2 viser, hvordan zinkens korrosion i Stockholm har ændret sig som følge af det reducerede udslip af svovldioxid, hvilket også er gældende i Danmark.

Korrosion defineres i overensstemmelse med standarden som en fysisk-kemisk reaktion mellem et metal og dets omgivelser. Reaktionen er oftest af elektrokemisk natur. Korrosionen medfører almindeligvis skader på metallets struktur, dets omgivelser eller på det tekniske system, hvori det indgår. Skader på det korroderede emne kaldes primærskader, og skader på andet som følge af den primære korrosion kaldes for sekundærskader. Oftest er det de sekundære skader, der er de mest omkostningstunge for den enkelte eller samfundet.

Stort set alle materialer korroderer og nedbrydes med undtagelse af ædelmetaller.

Ved udvinding af metal tilføres energi, og metallet repræsenterer dermed en højere energitilstand end malmen. Ved korrosion tilstræber metallet at frigøre denne energi og vende tilbage til den naturlige stabile tilstand. Korrosionsprodukterne ligner derfor ofte de grundstoffer, som metallet blev udvundet af.

Den høje energitilstand er imidlertid ikke tilstrækkelig til, at korrosionen opstår. For at få stål til at korrodere – ruste – i almindelig forekommende miljøer, fordres både ilt og vand (relativ fugtighed > 60%).

I Danmark er der året rundt tilstrækkelig mængde af ilt og vand til, at korrosionsprocessen kan foregå.

Stål er uden konkurrence det mest anvendte metal i vor tid, men i mange miljøer er den al for høje korrosionshastighed stålets store ulempe. Derfor er det af stor økonomisk interesse at beskytte stålkonstruktioner mod rust, hvilket kan gøres på følgende måder:

- Legering af stålet med andre grundstoffer. Tilsættes krom (> 13%) får man rustfrit stål, som bliver mere korrosionsbestandigt mod atmosfærisk korrosion, jo mere krom der tilføres. Ved at tilsætte nikkel og molybdæn, kan korrosionsbestandigheden forbedres yderligere. Ved et højt nikkelindhold, får man de korrosionsbestandige monel- og hastelloylegeringer. De fleste legeringer er dog dyre i sammenligning med ulegeret eller lavt legeret stål. Det er også vigtigt at kontrollere, om legeringerne er korrosionsbestandige i det miljø, de skal udsættes for.

- Ændring af korrosionsmiljøet kan ske ved at sænke fugtigheden (affugtning), tørring, temperaturforhøjelse eller med tilsætningen af inhibitorer. Det sidste er meget almindeligt i væskemiljø. Ulempen er, at metoden kun er brugbar i begrænset omfang.

- Katodisk beskyttelse kan opnås ved anvendelse af såkaldte offeranoder, med eller uden påtrykt jævnstrøm. Metoden med offeranoder kan betegnes som en form for kontrolleret galvanisk korrosion, idet man sammensætter metallerne således, at det ene korroderer, medens det andet beskyttes. Katodisk beskyttelse er kun anvendelig, hvor der forekommer en elektrolyt f.eks vand eller fugtig jord. Metoden anvendes til beskyttelse af skibe, kajanlæg, olieplatforme, tanke, rørledninger osv. De mest anvendelige offeranodematerialer er zink og magnesium eller legeringer af disse.

- Overfladebelægninger kan udføres med uorganisk eller organisk materiale for at udelukke fugt og ilt fra ståloverfladen. Dette er den mest almindelige metode for korrosionsbeskyttelse. De uorganiske materialer kan være metaller, legeringer eller emaljer. De organiske kan være maling, bitumen- eller plastprodukter. Det forekommer også, at uorganisk og organisk materiale kombineres med et meget godt korrosionsmæssigt resultat, f.eks maling/plast på zinkbelægninger.

Metalbelægning på stål kan teknisk udføres med de fleste metaller og en del legeringer for at give korrosionsbeskyttelser, slidstyrke eller en dekorativ effekt. Mange metaller er imidlertid dyre og/eller svære at påføre stålet. De kan også være uegnede på grund af høj egenkorrosion eller fordi de er ædlere end stålet. Målet er et metal, som er enkelt at arbejde med, giver en god rustbeskyttelse og er miljømæssigt acceptabelt.

Med ovenstående kriterier som baggrund, er det egentligt kun zink og aluminium, der kan komme på tale. Magnesium kan være et alternativ, men dels er dets egenkorrosion alt for høj, og dels er det meget svært at påføre. Cadmium anvendtes tidligere, især i marine-miljøer, men dels er prisen for høj og af miljøårsager er metallet uegnet.

Aluminium har en interessant volumenpris, og en god korrosionsbestandighed i de fleste miljøer. Aluminium er dog meget svært at anvende, da det let oxideres af ilt. Dette medfører, at vandopløselige elektrolytter ikke kan anvendes, og beskyttelsesgas er nødvendig ved metallisering for at hindre oxidation. Derfor anvendes det først og fremmest i kombination med zink ved belægning på tynde plader. (Aluzink – 55% Al, 43,5% Zn, 1,5% Si) eller på tråd (Galfan – 5% Al, 95% Zn). Termisk sprøjtning med aluminium forekommer i en vis udstrækning.

For metaller og legeringer der anvendes til korrosionsbeskyttelse er den galvaniske spændingsserie, billede 10-8, en god ledetråd, hvis forskellige metaller skal kombineres med hinanden. Et uædelt metal beskytter oftest et ædlere gennem katodisk beskyttelse. En mere udførlig behandling af forskellige korrosions- og korrosionsbeskyttelsesspørgsmål er ikke beskrevet i denne bog. Den interesserede kan finde yderligere information om disse problemer i litteraturen (1, 2, 3).



Billede 1-2. Korrosion på malet autoværn, sammenlignet med varmforzinket værn.

2. Valg af korrosionsbeskyttelse

Ved valg af rustbeskyttelse af stål eller stålkonstruktioner, skal mange tekniske faktorer klarlægges og prøves. Miljøet på montagestedet bør kendes, og belastningerne ved transport, oplagring og montering skal også undersøges. Dette er særlig vigtigt, hvis konstruktionen skal fragtes over lange strækninger f.eks. over hav. Konstruktionens udformning og størrelse, ligesom muligheden for at kunne kontrollere den pålagte overfladebehandling, er også vigtige faktorer.

Der bør også foretages en økonomisk afvejning af alternative løsninger. I de økonomiske overvejelser bør totalomkostningerne for konstruktionen i hele dens levetid tages i betragtning. Det er vigtigt, at valget ikke sker ud fra initialomkostningerne alene.

Totalomkostninger omfatter foruden initialomkostninger også emballageomkostninger ved transport, efterreparation af montageskader, fremtidige vedligeholdelsesomkostninger samt miljøomkostninger osv. Ved en ønsket levetid for en konstruktion på 30 år, bliver 2 til 3 ganges vedligeholdelse i perioden betydeligt dyrere end initialomkostningen, sammenlignet med hvis der vælges en vedligeholdelsesfri korrosionsbeskyttelse. Totalomkostningerne for konstruktionen i hele dens levetid, som initialomkostningerne kun er en del af, kan vise et helt andet billede end det, som blot de første påføringsomkostninger viser.

Korrosions-kategori	Korrosivitet	Eksempler på miljøer	
		Udendørs	Indendørs
C1	Meget lav		Opvarmede bygninger med tør luft og ubetydelige mængder pollutants, f.eks. kontorer, butikker, skoler, hoteller.
C2	Lav	Atmosfære med lav forurening. Mest landlige omgivelser.	Uopvarmede bygninger med skiftende temperatur og fugtighed. Lavfrekvens fra fugtkondensation og luftforurening med lavt indhold, f.eks. sportshaller, pakhuse.
C3	Middel	Atmosfære med en bestemt mængde salt eller moderate mængder luftforurening. Byområder og let industrialiserede områder. Områder med moderat indflydelse fra kysten.	Bygninger med moderat luftfugtighed og en vis mængde luftforurening fra produktionsprocesser, f.eks. bryggerier, mejerier, vaskerier, opvarmede skøjtebaner..
C4	Høj	Atmosfærer med moderat mængde salt eller påtagelige mængder luftforurening. Industri og kystområder.	Bygninger med høj luftfugtighed og stor mængde luftforurening fra produktionsprocesser, f.eks. kemiske industrier, svømmebassiner, værfter, ikke-opvarmede skøjtebaner.
C5	Meget høj	Industriområder med høj fugtighed og aggressiv atmosfære og kystområder med en stor mængde salt i luften.	Bygninger med næsten permanente fugt kondensation og stor mængde luftforurening.
CX	Ekstrem	Industriområder med ekstreme fugtighed og aggressiv tropisk eller sub-tropisk atmosfære. Offshore-områder med en stor mængde salt i luften.	Industribygninger med ekstreme fugtighed og aggressiv atmosfære.

Billede 2-1. Eksempler på miljøer for de forskellige korrosivitetskategorier (4).

For at definere den aktuelle korrosivitetskategori er det hensigtsmæssigt at bruge relevante standarder, se figur 2-1, der giver eksempler på miljøer for forskellige korrosivitetskategorier, og 2-2, der viser, hvor meget stål og zink der skæres pr. år i de forskellige kategorier.

Ved bestemmelse af miljøet og den korrosivitetskategori, den tilhører, kan der vælges passende korrosionsbeskyttelse.

Eftersom korrosionsbeskyttelse i korrosionsklasse C3-C5 oftest handler om maling eller varmforzinkning, sammenlignes nogle procesvariabler for disse metoder i billede 2-3. Sammenligningerne er af naturlige årsager generelle, da der findes utallige varianter af maling

og plastbelægninger, ofte med helt forskellige egenskaber.

Man bør være opmærksom på, at selv om zink og maling lægges på med samme formål, nemlig at beskytte mod rustangreb, så virker de på helt forskellige måder. Zinkbelægninger korroderer fra overfladen og ind mod stålet og giver katodisk beskyttelse ved skader på belægningen. Der opstår ikke rust mellem zinklaget og stålet. Maling ødelægges derimod oftest ved, at der dannes rust i grænselaget mellem belægning og stål. Belægningen giver ingen katodisk beskyttelse, og hvis først skaden er sket, breder rustangrebet sig under denne.

Korrosions-kategori	Korrosionshastighed ($\mu/\text{år}$) (1-årig eksponering ¹)			
	Stål		Zink	
	Korrosion (g/m^2)	Lagtykkelses-reduktion (μ)	Korrosion (g/m^2)	Lagtykkelses-reduktion (μ)
C1	≤ 10	$\leq 1,3$	$\leq 0,7$	$\leq 0,1$
C2	$> 10 - 200$	$> 1,3 - 25$	$> 0,7 - 5$	$> 0,1 - 0,7$
C3	$> 200 - 400$	$> 25 - 50$	$> 5 - 15$	$> 0,7 - 2,1$
C4	$> 400 - 650$	$> 50 - 80$	$> 15 - 30$	$> 2,1 - 4,2$
C5	$> 650 - 1500$	$> 80 - 200$	$> 30 - 60$	$> 4,2 - 8,4$
CX	$> 1500 - 5500$	$> 200 - 700$	$> 60 - 180$	$> 8,4 - 25$

Billede 2-2. Korrosionshastighed i de forskellige kategorier.

¹ Korrosionshastighed pr år er i almindelighed højere i begyndelsen af eksponeringen.

Faktor	Malingssystem	Varmforzinkning
Forbehandling	Sandblæsning til Sa 2,5. Utilstrækkelig rengøring kan mindske systemets levetid med 60-80%. Kontrol af forbehandlingen er af afgørende betydning	Bejdsning i syre er en nødvendig del af processen. Hvis ståloverfladen ikke er ren, dannes der ingen belægning. Kontrol af forbehandlingen er ikke nødvendig.
Procesvariabler	Omhyggelig blanding, omrøring og korrekt fortyn-ning er faktorer af stor vigtighed.	De små variationer, som er mulige, har kun lille eller ingen betydning for zinkbelægningens kvalitet.
Påføring	Belægningens opbygning og ensartethed varierer med påføringsmetoden. Kontrol ved hvert stadium af påføringen er betydningsfuld. Sandblæste overflader er reaktive og må males indenfor kort tid efter sandblæsningen.	Zinkbelægningen dannes ved reaktion mellem jern og zink. Reaktionen styres af fysisk-kemisk lov.
1. Temperatur	Et godt resultat er svært at opnå, hvis lufttemperaturen er lavere end +10 °C eller over +35 °C. Overflader, der udsættes for direkte sol, kan let få for høj temperatur.	Påvirkes ikke af lufttemperaturen eller normale variationer i procestemperaturen.
2. Fugtighed	Dug og kondens forhindrer malingsprocessen, som heller ikke bør ske, hvis den relative fugtighed er over 80%.	Påvirkes ikke.
3. Luftforurening	Damp, røg, gasser, støv og andre forureninger reducerer malingens kvalitet.	Påvirkes ikke.
Ståltipe	Ingen indflydelse.	Stålets indhold af først og fremmest silicium og fosfor påvirker belægningens tykkelse og udseende.
1. Tykkelse	Af stor betydning for levetiden. Varierer med antallet af påføringslag og -metode. Kontrol af tykkelsen ved hvert lag er vigtig.	Reaktionen mellem jern og zink giver en vis standardiseret minimumstykkelse. Øget siliciumindhold i stålet samt øget masse og godstykkelse giver tykkere belægning.
2. Vedhæftning	Berer på forbehandlingen, type af malings-system, tiden mellem forbehandling og grundmaling og hærdetiden mellem lagene.	Zinkbelægningen bindes metallurgisk til stålet.
3. Ensartethed	Malingslaget bliver tyndere over skarpe kanter og hjørner. Huller, små spalter og "skygge-partier" bliver som regel ikke eller kun tyndt belagt.	Total belægning ved neddykning i smeltet zink. Belægningen bliver som regel 50% tykkere på skarpe kanter.
Hærdningstid	God hærdningsmulighed kan variere fra nogle få timer til flere døgn afhængig af malingstype og påføringsforhold. Fuld afhærdning kan tage op til flere uger.	Belægningen størkner helt, nogle sekunder efter at emnet er taget op af zinksmelten.
Deformationer	Ingen.	Indbyggede spændinger, der er opstået ved koldbearbejdning eller svejsning, kan i visse tilfælde udløses og give deformationer.
Kontrol	Må udføres efter forbehandling og efter hvert trin i behandlingen for at sikre en god kvalitet. Kontrol af lagtykkelsen ved påføring og på det færdige gods.	Visuel kontrol og måling af lagtykkelsen efter behandlingen.
Risiko for skader ved transport og håndtering	Stor og kan kræve reparation af både grundmaling og dækmaling.	Belægningen tåler stor mekanisk belastning. Små skader behøver ikke at blive repareret. Store skader repareres ved sprøjteforzinkning eller maling med zinkrig maling.

Billede 2-3. Sammenligning mellem forskellige procesvariablers indflydelse på resultatet ved maling og varmforzinkning.

3. Forzinkningsmetoder

3.1 Varmforzinkning

Stålemnerne renses for fedt, olie, glødeskaller, rust og andre forureninger, dyppes i smeltet zink og får derved en belægning af jernzink-legeringer med ren zink på overfladen. Metoden er den mest anvendte og behandles mere indgående i kapitel 4.

3.2 El-forzinkning, elektrolytisk forzinkning

Ståloverfladen affedtes og rengøres for rust og glødeskaller ved bejdsning. Emnet nedsænkes derefter i en opløsning af zinksalte og tilsluttes som katode til en jævnstrømsspænding. Som anode tilsluttes stave eller kugler af rent zink (elektrolytzink 99,995%). Elektrolytten kan være sur, neutral eller basisk, og zinksaltets type afhænger heraf.

Når strømmen tilsluttes, opløses zink ved anoden og vandrer som zinkioner mod katoden, hvor zinken udfældes på ståloverfladen. Strømstyrken, dvs. hvor stor del af strømmen der er nødvendig for udfældning, har stor betydning for stål, som er følsomt overfor brint-skørhed, idet overskudsstrømmen hovedsagelig udfælder brint.

Større konstruktioner hænges normalt op i værktøj (kroge, galger, fixturer etc.), mens mindre konstruktioner (skrue, møtrikker, beslag, etc.) placeres i tromler. Værktøjet eller tromlen flyttes derefter fra bad til bad, ofte af en programstyret robot.

Det udfældede zinklag har kun en mekanisk vedhæftning på ståloverfladen, men med en meget finkrystallinsk struktur (billede 3-1). Standardiserede lagtykkelser er 3, 5, 8, 12 og 20 mikrometer ($\mu\text{m} = \text{my}$). Normalt lægges der 5-8 mikrometer på. Tyndere lag forekommer ofte på smådele, mens det tykkere lag ($> 20 \mu\text{m}$) kun kan opnås på emner med enkel geometri f.eks. tråd. Ved lagtykkelser på over $15 \mu\text{m}$ er det oftest mere økonomisk at varmforzinke materialerne. Man bør være opmærksom på, at forskellen på lagtykkelsen ved el-forzinkning kan variere over materialets overflade, afhængig af konstruktionens form og anodeplacering. Hjælpeanoder skal anvendes for at få belægning i indvendige eller skærmede partier.

Zinkbelægningens overflade er meget jævn og med en "sølvagtig" metalglans. Ved specielle tilsætninger til badet kan man opnå en såkaldt højglans. El-forzinkede materialer bliver normalt kromatiserede for at opnå beskyttelse mod korrosion under oplagring og transport. Kromlaget er oftest farveløst eller blå, men kan, afhængig af tykkelsen, have en gulbrun eller grøn farve.

El-forzinkede materialer bør ikke anvendes udendørs, med mindre der er tale om meget korte perioder. Der skal man i stedet bruge varmforzinkede emner.

3.3 Termisk sprøjtning, sprøjteforzinkning

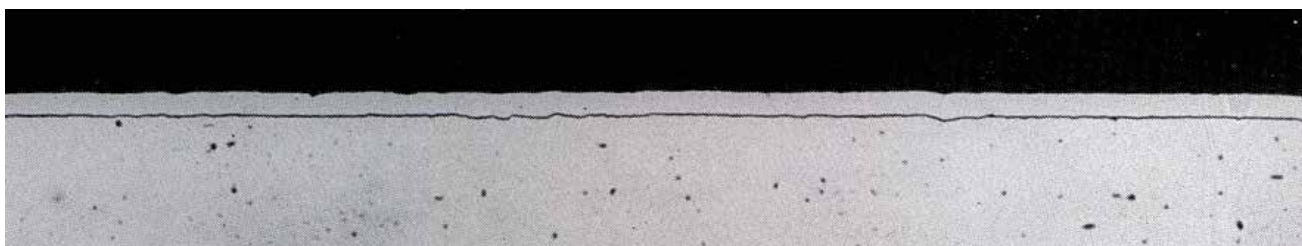
Stålet rengøres ved omhyggelig sandblæsning – mindst til Sa 2,5 ifølge standard. Zink i tråd- eller pulverform tilføres en sprøjtepistol og smeltes i en gasflamme eller lysbue (billede 3-2). De smeltede dråber kastes mod ståloverfladen ved hjælp af trykluft.

Vedhæftningen på ståloverfladen er kun mekanisk og zinklaget bliver noget porøst og med en ru overflade. Overfladen er velegnet til efterfølgende maling, hvilket yderligere forbedrer korrosionsbeskyttelsen (billede 3-3).

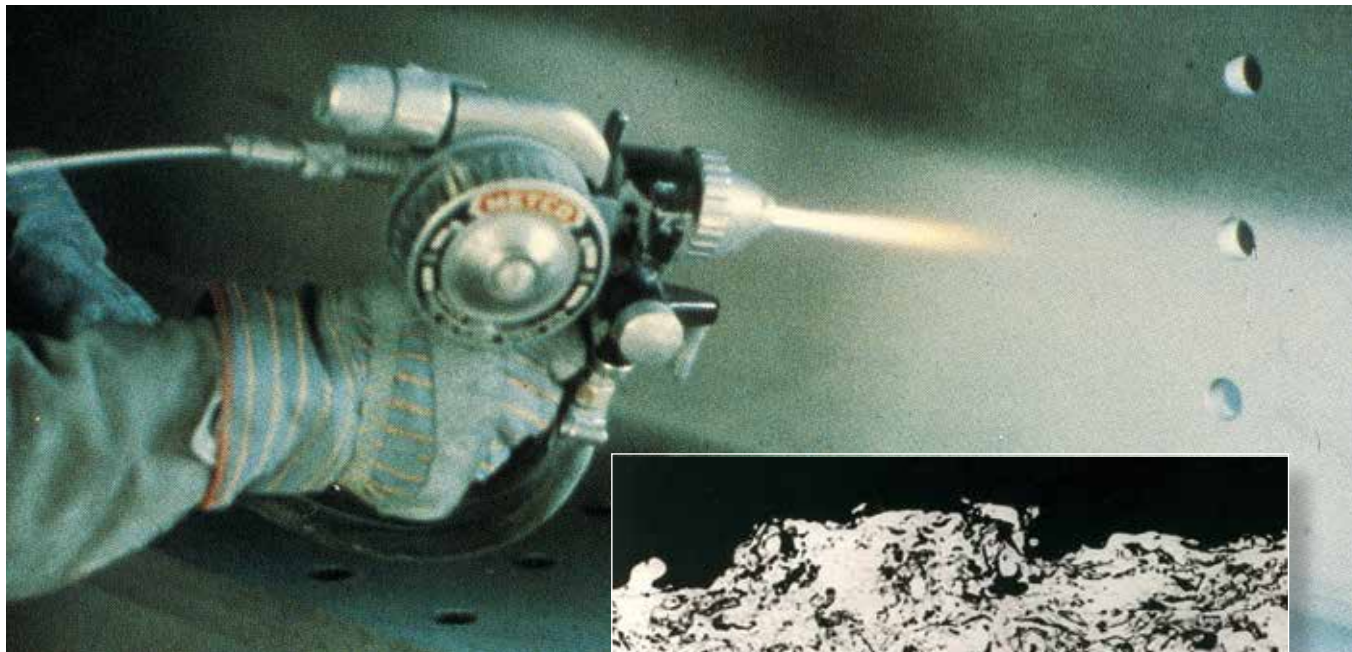
Lagtykkelsen kan variere fra ca. 30 til 300 mikrometer. For at opnå en korrosionsbeskyttelse svarende til varmforzinkning, bør lagtykkelsen være cirka 20% større end det varmforzinkede lag. Metoden er anvendelig for større konstruktioner med ikke alt for kompliceret udformning.

Vær opmærksom på, at det f.eks. er svært at behandle rør indvendigt. Sprøjteforzinkning er også velegnet til reparation af zinkbelægninger på varmforzinkede emner, som er skadet under håndtering eller ved svejsning.

Se også gældende standard samt (6).



Billede 3-1. Tværsnit gennem elektrolytisk påført zinklag.



Billede 3-2. Sprøjteforzinkning.



Billede 3-3. Tværsnit gennem sprøjteforzinket belægning

3.4 Sherardisering

Stålemner, der er rengjorte ved bejdsning, lægges sammen med zinkpulver og sand i en tromle, der under rotation opvarmes til lidt under zinkens smelte-temperatur. Efter nogen tid ved denne temperatur og under fortsat rotation, reagerer jern og zink med hinanden og danner en jernzink-legering på ståloverfladen.

Sherardisering giver en relativ tynd mørkegrå belægning (15-40 μm), med god vedhæftning og meget jævn lagtykkelse, selv på emner med meget kompliceret geometri. Metoden har omtrent samme anvendelsesområde som el-forzinkning.

Distek Termodiffusion er en videreudvikling af sherardisering. Processen anvendes i temperaturområdet 320-450 °C.

Internationale standarder for sherardisering er nu tilgængelige, ISO 14713-3. Før i tiden har man anvendt Britisk Standard. Metoden anvendes i begrænset udstrækning i de nordiske lande.

3.5 Mekanisk forzinkning

Efter affedtning, bejdsning og forkobring lægges materialerne i en tromle sammen med glaskugler, zinkpulver og aktiverende kemikalier. Materialerne tromles

derefter, så zinken med hjælp af glaskuglerne vedhæfter sig emnerne.

Lagtykkelsen reguleres gennem den tilsatte mængde af zinkpulver. Sædvanligvis lægges mellem 10-15 mikrometer zink på ståloverfladen, men tykkere lag kan også opnås. Belægningen bliver meget jævn, selv på emner med kompliceret geometri. Overfladen bliver mat.

Mekanisk forzinkning er velegnet til hærdet stål med hårdheder over 40 HRC, som ved andre metoder kan risikere at blive udsat for brintskørhed.

3.5 Maling med zinkrig maling

Som ved sprøjteforzinkning skal ståloverfladen sandblæses til mindst Sa 2,5. Rensning med skraber og stålborste giver ikke et tilfredsstillende resultat.

Zinkrig maling består af finkornet zinkpulver i et organisk eller uorganisk bindemiddel, og fås både som en- og tokomponentmaling. For at de enkelte zinkpartikler skal komme i god elektrisk kontakt med hinanden og med ståloverfladen, skal zinkindholdet i den tørre malingsfilm være mindst 92 vægt-%, hvilket modsvarer 62 volumen-%. Malingen kan påføres med sprøjte eller pensel.

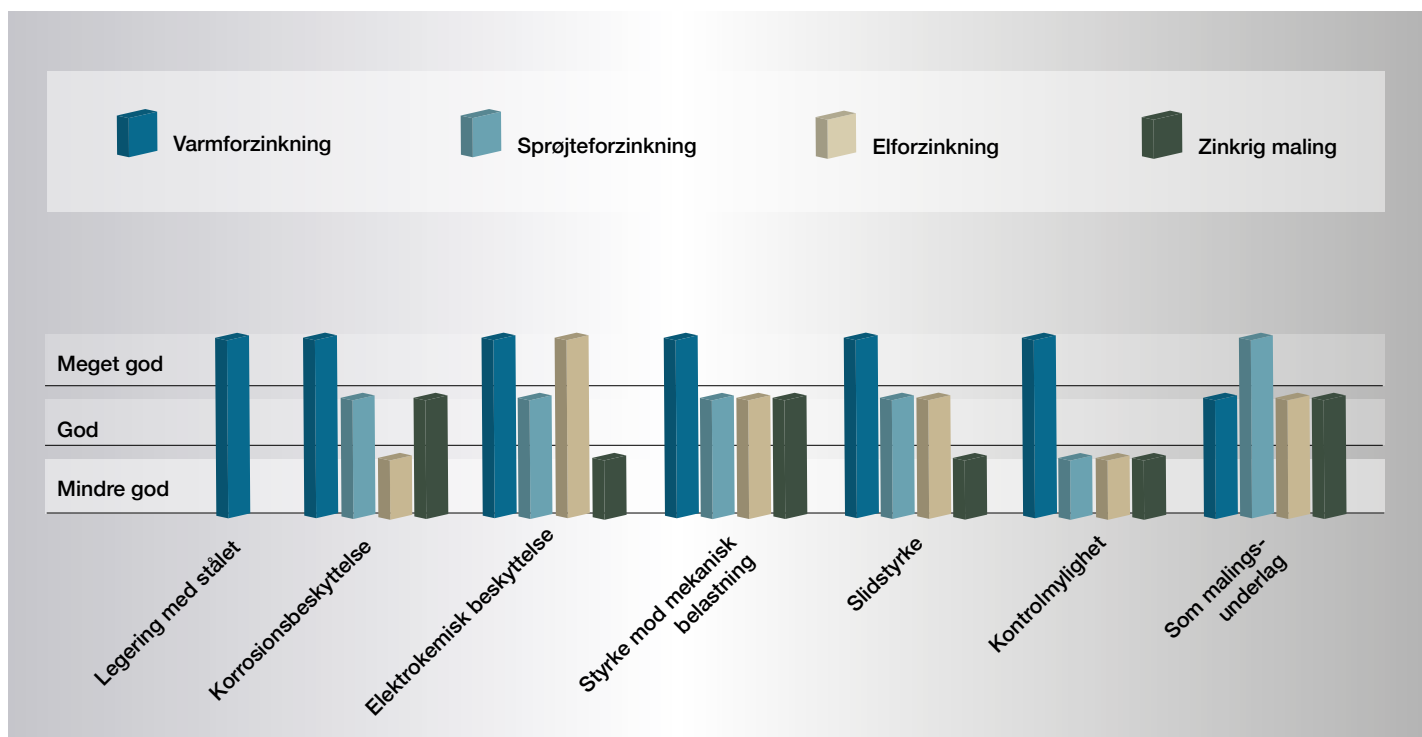
Maling med zinkrig maling betegnes ofte som "koldgalvanisering", og tilsyneladende vil man hermed give det indtryk, at malingen giver en zinkbelægning, der kvalitativt kan sidestilles med den, der opnås ved varmforzinkning. Som det fremgår af billede 3-4, er dette dog langt fra tilfældet. Maling med zinkrig maling er en malemetode og ikke en metalbelægningsmetode.

Zinkrig maling kan anvendes til at reparere småskader i den varmforzinkede overflade. Påføring sker med pensel og lagtykkelsen skal mindst være 20% højere end zinklagtykkelsen. Hvis det skadede område bliver udsat for belastning, skal en anden reparationsmetode vælges.

En sammenligning af egenskaberne ved de forskellige belægninger er vist i figur 3-5.



Billede 3-4. Tværsnit gennem zinkrig farve.



Billede 3-5. Relativ sammenligning mellem egenskaber for forskellige zinkbelægninger og zinkrig maling. Mekanisk forzinkning er ikke med i sammenligningen, men kan nærmest sammenlignes med el-forzinkning.

4. Varmforzinkning

Den franske kemiker Melouin opdagede allerede 1741, at zink kan beskytte stål mod korrosion. Metoden fik dog ikke større praktisk anvendelse, før hans landsmand, ingeniør Stanislaus Sorel, indførte bejdsning i svovlsyre som forbehandling. Den 10. maj 1837 indsendte Sorel sin første patentansøgning, der omhandlede varmforzinkning og var baseret på stort set samme principper, som anvendes i dag.

I et tillæg til sin patentansøgning i juli 1837, kaldte Sorel metoden for "galvanisering". Han hentydede til den galvaniske celle, der opstår, hvis zinkbelægningen skades, og hvor stålet i skaden bliver katode og beskyttes mod korrosionen af den omgivne zink. Navnet er siden blevet adopteret af andre metoder for belægning af stål med zink og anvendes i almenhed for elektrolytisk metaludfældning. For at undgå forveksling bør dypning i varm zink derfor benævnes varmforzinkning (billede 4-1).



Billede 4-1. Varmforzinkning.

4.1 Varmforzinkningens fordele og ulemper

Blandt fordelene kan særligt følgende nævnes:

- Lav initialpris
- Lang levetid og lave levetidsomkostninger – mange gange giver den en vedligeholdelsesfri rustbeskyttelse i hele konstruktionens levetid
- Behandlingen udføres i faste anlæg efter en fastlagt rutine, det betyder stor sikkerhed mod fejl
- Zinkbelægningens kvalitet er ikke afhængig af vejrliget
- Jævn og kvalitativ optimal belægning selv på svært tilgængelige flader (billede 4-2)

- Ligeså tyk eller tykkere belægning på skarpe kanter og hjørner, som på plane flader (billede 4-3 og 4-4)
- Zinkbelægningens gode egenskaber mht. at modstå mekaniske påvirkninger ved transport, omlastning og montering. Skader ved håndtering og deraf følgende efterreparation på montagestedet er sjældne
- Såfremt skader opstår, beskyttes stålet katodisk mod rust i mindre ridser og slagmærker
- Varmforzinket stål kan svejses med de kendte svejsemetoder
- Enkel og hurtig kvalitetskontrol.

Blandt ulemperne kan nævnes:

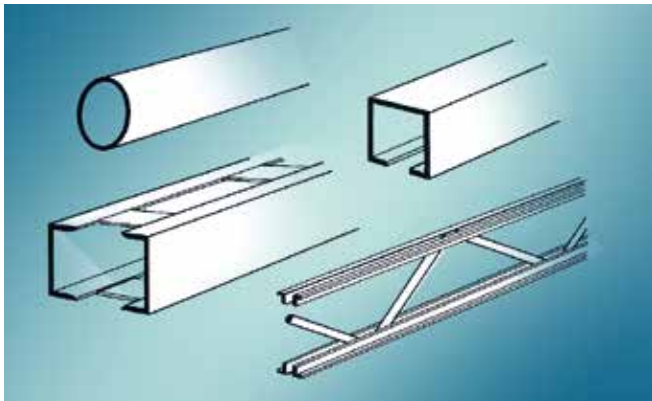
- Kan kun udføres i stationære anlæg
- Zinkbelægningens kulør kan kun ændres ved maling
- Konstruktionens størrelse kan begrænses af zinkbadets størrelse, hvis man ikke svejser bagefter. Alternativet kan være at bolte materialerne sammen
- En vis risiko for, at plane flader og lange slanke bjælker slår sig under varmepåvirkning i zinkbadet
- Svejsning af zinkbelagt stål kan kræve afvigende procedure i forhold til ubelagt stål, bl.a. må man sørge for bedre ventilation, da der er risiko for zinkfeber.

4.2 Proces

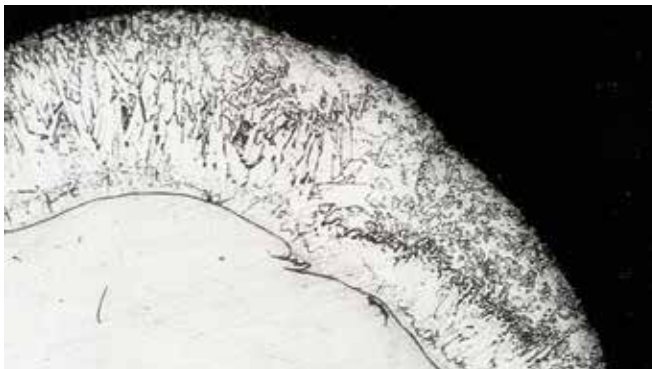
Hvis ståloverfladen er forurenset med maling, f.eks. ikke vandopløselig mærkemaling, svejseslagger eller gravrust, må disse først fjernes ved mekanisk bearbejdning, sandblæsning eller slibning. Formsand på støbegods skal fjernes ved omhyggelig afrensning, da silikatindeholdende sand ikke kan bejdses væk i saltsyre eller jernklorid.

Fedt, olie og sod fjernes normalt i et alkalisk affedtningsbad. I den senere tid er man begyndt at anvende mere miljøvenlige tensidbade med bakterier, der fjerner fedt og olier.

Disse bade gør, at man kan undlade skyllebadet og gå direkte til bejdsebadene for at afsyre rust og glødeskal. Bejdsningen sker i saltsyre (ca. 10-12%) eller i jernkloridbad (5% saltsyre og ca. 170 gram jernklorid). Inden dypning i den smeltede zink skal materialerne først flusses. Flusmidlets funktion er at opløse oxiderne på stål- og badoverfladen, så stål og zink kommer i ren metallisk kontakt med hinanden. Dette kan gøres på to forskellige måder, se nedenstående.



Billede 4-2. Eksempel på profiler og konstruktioner med vanskelige og skærmende overflader for de fleste belægningsmetoder. Varmforzinkning giver alle overflader en lige god belægning.



Billede 4-3. Tværsnit gennem gevindtop på en varmforzinket skrue. Bemærk, at belægningen på gevindtoppen er noget tykkere end på fladen.

a) Den tørre metode, i daglig tale benævnt tørforzinkning (Billede 4-5)

Efter affedtning, bejdsning og skylning dyppes stål-

emnerne i et flusbad, som er en vandig opløsning af zinkammoniumklorid, og tørres herefter. Gennem kontinuerlig rensning af flusbadet, holdes jernindholdet nede, hvilket formindsker dannelsen af hårdzink i zinkbadet.

Ved dypning i flusbadet får materialet et tyndt lag af flussalt, som holder oxiddannelsen væk. Fluslaget renser også badoverfladen for oxider ved neddybningen i smeltet zink. Før dypning og inden konstruktionerne igen tages op, skal zinkoverfladen skummes ren for oxider og flusrester.

Når stålemnerne er taget op, kan de luft- eller vandkøles, og er derefter klar til afrensning, kontrol, pakning og forsendelse.

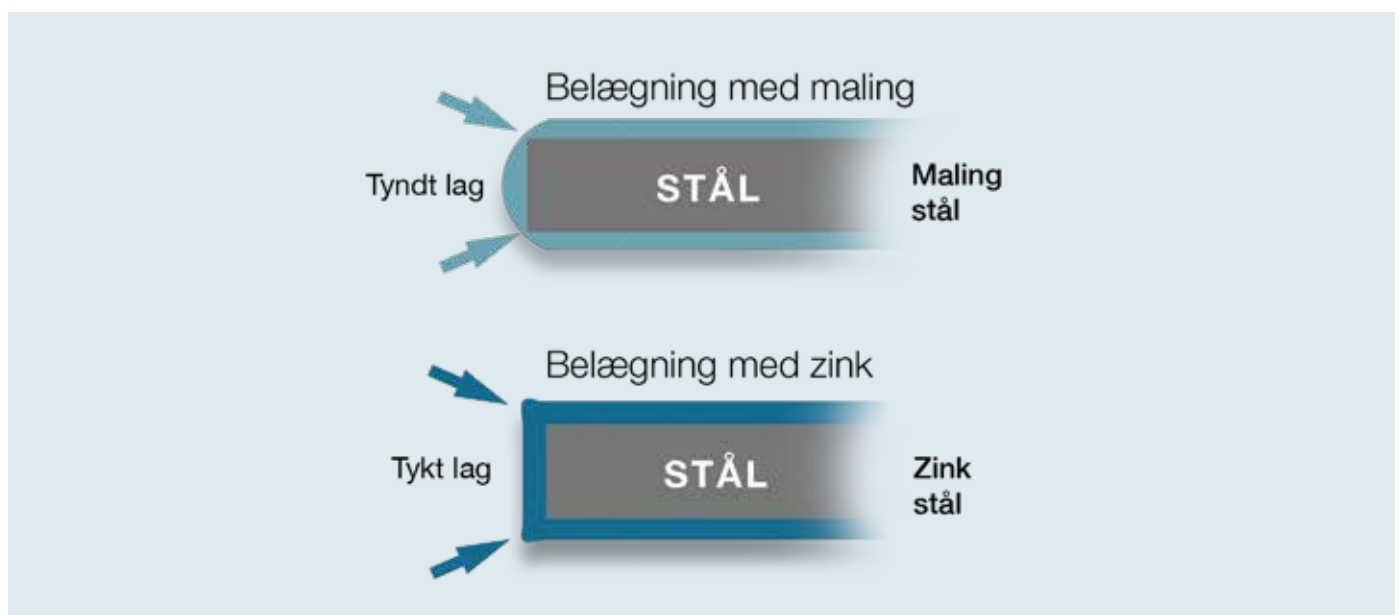
b) Den våde metode, i daglig tale benævnt vådforzinkning (Billede 4-6)

Ved vådforzinkning deles zinkbadets overflade i to dele. På den ene del lægges et flusmiddel – ammoniumklorid – som smelter ved varmen fra badet. Stålemnet, som efter bejdsning er fugtigt, dyppes gennem det smeltede flusmiddel ned i zinkbadet.

Man flytter derefter materialerne til den flusfrie del og badoverfladen skummes ren for oxider og flusrester. Materialet kan nu løftes op gennem en ren, blank zinkoverflade.

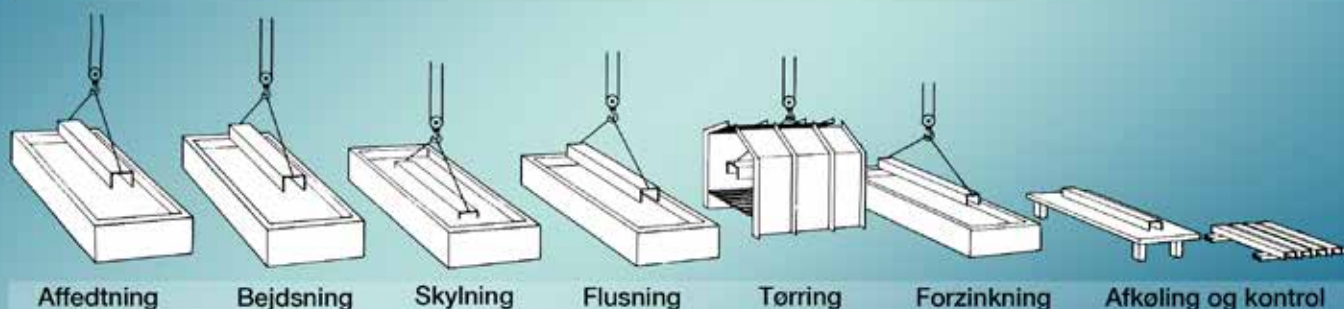
Når stålmaterialerne er taget op, kan de luft- eller vandkøles, og er derefter klar til kontrol, eventuelt efterbehandling, pakning og forsendelse.

Ovenstående metoder giver ud fra et kvalitets- og rustbeskyttelses-synspunkt helt ligeværdige belægninger. Den tørre metode bliver mere og mere almindelig, da den er lettere at tilpasse en lukket proces.



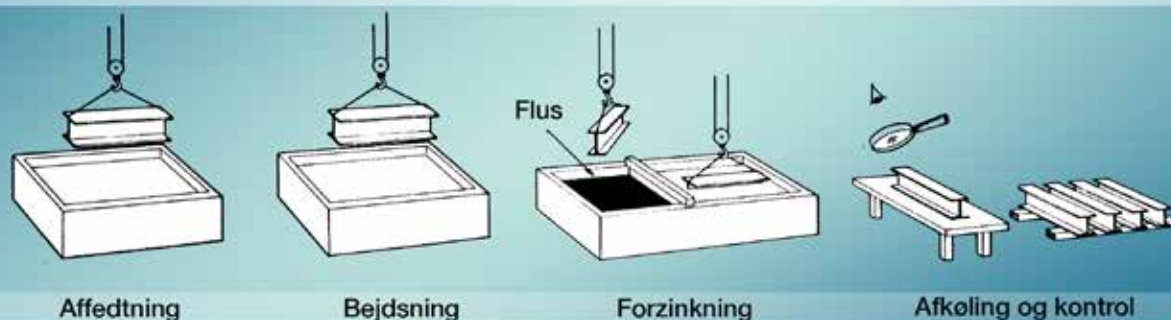
Billede 4-4. Belægninger med maling bliver tyndere på hjørner og skarpe kanter. Zinkbelægninger bliver derimod tykkere på disse steder.

Tørforzinkning



Billede 4-5. Princip for varmforzinkning efter den tørre metode. Skylning af godset mellem affedtning og bejdsning kan forekomme.

Vådforzinkning



Billede 4-6. Princip for varmforzinkning efter den våde metode. Skylning af godset mellem affedtning og bejdsning kan forekomme.

4.2.1 Varmforzinkning af små emner – centrifugering (Billede 4-7)

Små emner som søm, skruer, bolte, møtrikker, skiver, beslag osv. rengøres som tidligere beskrevet og fyldes i perforerede kurve, som dyppes i zinksmelten. Når kurven tages op, placeres den i en fritstående centrifuge eller centrifugeres direkte over badoverfladen, se billede 4-7. Ved rotation (ca. 800 omdr./minut) slynges en del af zinken af overfladen, som bliver fri for dråbedannelser og ujævnheder. Dypning sker normalt ved høj temperatur (540-560 °C) og zinklaget bliver noget tyndere og får ofte et mere mat udseende end ved stykvis dypning i lav temperatur (450-460 °C).

4.2.2 Tråd- og rørforzinkning

Tråd, smalle bånd og rør varmforzinkes enten efter den tørre eller den våde metode – eller ved en kombination af begge – i kontinuerligt arbejdende anlæg. Umiddelbart efter zinkbadet stryges (tråd) eller blæses (rør) den

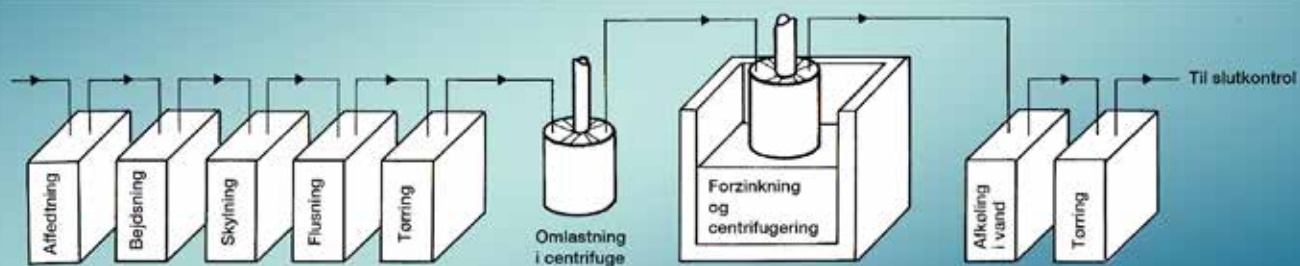
overskydende zink af overfladen, som på den måde bliver fri fra ujævnheder. Zinkbelægningens tykkelse kan varieres indenfor visse grænser, afhængig af hvor tæt der stryges, eller alt efter hvor kraftigt der blæses.

4.2.3 Pladeforzinkning

Tyndplader varmforzinkes i kontinuerlige produktionslinier, hvor alle processerne er sammenkoblet i et sluttet system. Basismaterialet er koldtvalede plader i coils, og det ene bånd svejses til det andet til et endeløst bånd, billede 4-8.

Efter affedtning bejdses eller oxideres båndet. Derefter renses overfladen for oxider ved reduktion ved 950 °C, og samtidig fås en udglødning, der gør stålet blødt. Båndoverfladen er herefter metallisk ren og føres gennem en beskyttelsesgas ned i zinkbadet. Fra zinkbadet føres båndet lodret op mellem såkaldte jetknive, hvorigennem der blæses fine luft- eller dampstråler,

Forzinkning med centrifugering

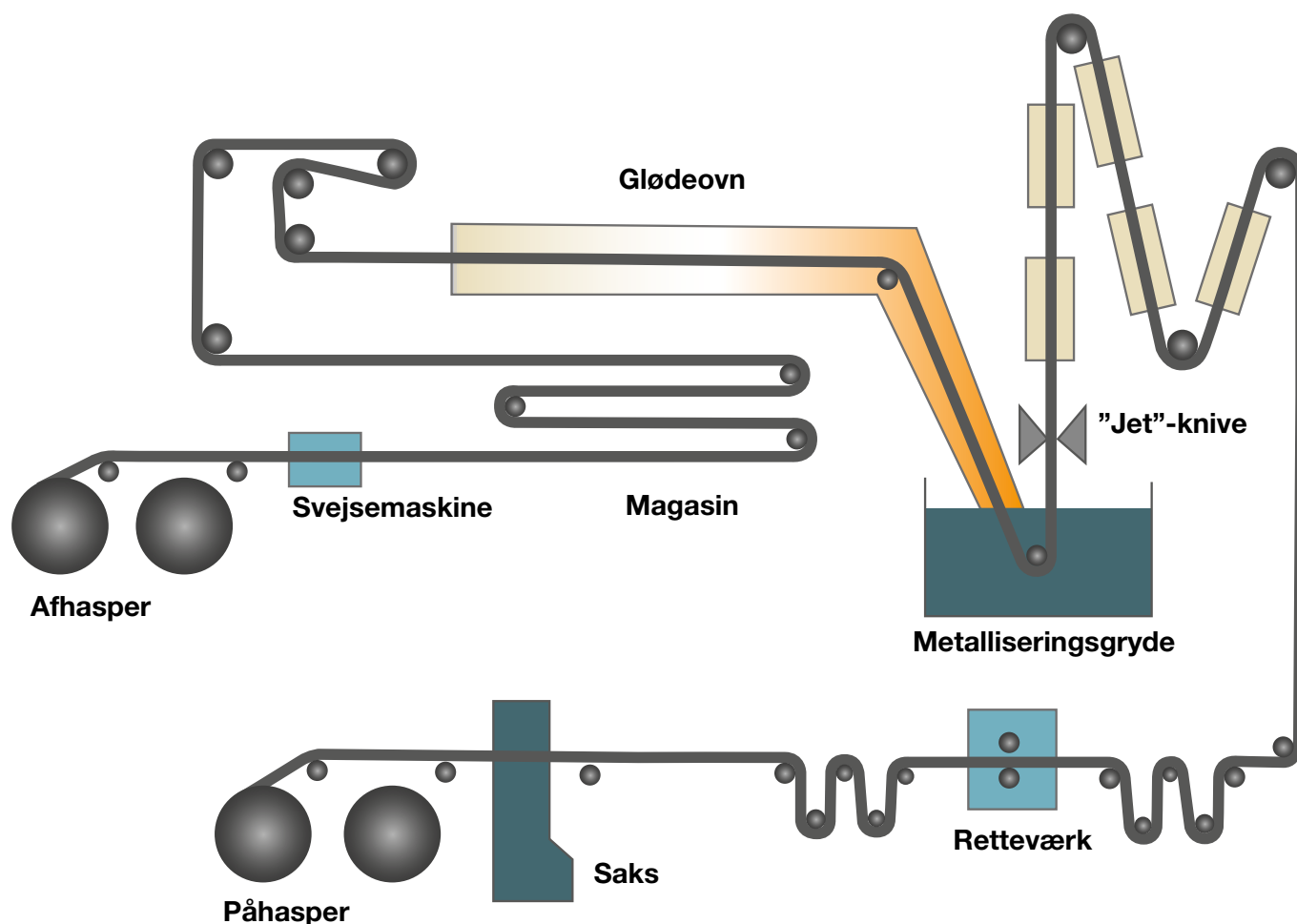


Billede 4-7. Princip for højtemperaturforzinkning i centrifuge. Skyllning af godset mellem affledning og bejdsning kan forekomme.

der skærer zinkbelægningen ned til den ønskede tykkelse.

Kontrol af lagtykkelsen og styring af jetknive sker ved hjælp af lagtykkelsesmålere og computere. Efter koldtreducering, retning og behandling mod hvidrust føres båndet frem til formatklipping eller oprulning for levering eller senere plastbelægning.

Tyndplader forzinkes enten med mikrolegeret, lavlegeret eller højlegeret zink. I alle tilfælde er aluminium den vigtigste legeringstilsats, og det typiske indhold er hhv. 0,2% (varmforzinket plade), 5% (Galfan) og 55% (Aluzink, Galvalume). Tyndt båndstål kan varmforzinkes på samme måde som tyndplade.



Billede 4-8. Arbejdsgang i anlæg for varmforzinkning af tyndplade.

5. Reaktioner mellem jern og zink

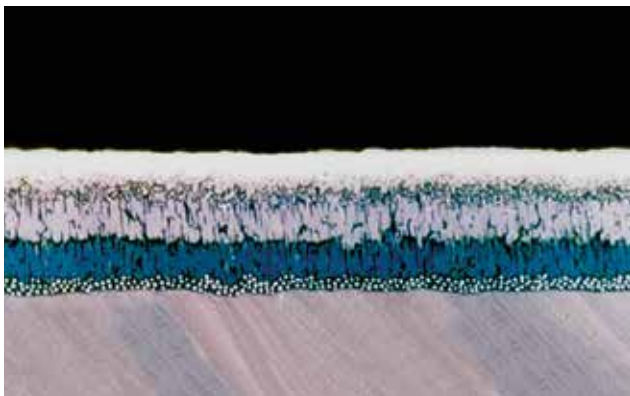
5.1 Zinklagets struktur

Ved normal varmforzinkning er zinksmeltens temperatur 450-460 °C. Ved varmforzinkning af småemner (massegods) som beslag, skruer, møtrikker og skiver anvendes ofte temperaturer på omkring 540-560 °C bl.a. for at forbedre centrifugeringen. Ved temperaturer over 470 °C kræves et keramisk materiale. Ved lavere temperaturer kan diglen være fremstillet af rent jern.

Når stål kommer i kontakt med smeltet zink, sker der en reaktion mellem metallerne, og der dannes en jern-zink-legering på ståloverfladen. Denne legering bygges op af forskellige jernzink-faser med gradvist aftagende jernindhold mod ydersiden. Når stålet tages op af zinksmelten, fæstnes et lag af ren zink på den yderste legeringsfase. Billede 5-1 viser den skematiske opbygning af en sådan belægning.

Belægningens tykkelse og overfladens udseende bestemmes af, hvordan reaktionen sker, og hvordan det yderste zinklag størkner. Reaktionsforløbet varierer relativt og absolut med et stort antal parametre. Af disse parametre, er stålets sammensætning af stor betydning, men også ståloverfladens beskaffenhed (f.eks. struktur, kornstørrelse, spændinger samt ujævnheder), zinksmeltens sammensætning, dyppetider osv. indvirker på forskellig måde. Forløbet bliver altså meget kompliceret og er endnu ikke klarlagt i alle detaljer.

Ved støbningen af stål tilsættes enten silicium eller aluminium for at binde ilt, og stålet bliver beroliget. Stål kan støbes uden disse tilsætninger og kaldes da



Billede 5-1. Skematisk tværsnit af zinkbelægningen, som den opbygges ved varmforzinkning. Etalaget med 0,3% Fe, zetalaget med 5,8-7,7% Fe, deltalaget med 7-11% Fe og gammalaget 21-28% Fe.

uberoligede. Indholdet af silicium (Si) og i visse tilfælde også fosfor, se kapitel 5.1, er af stor betydning for reaktionen ved varmforzinkning.

5.2 Aluminiumberoligede stål

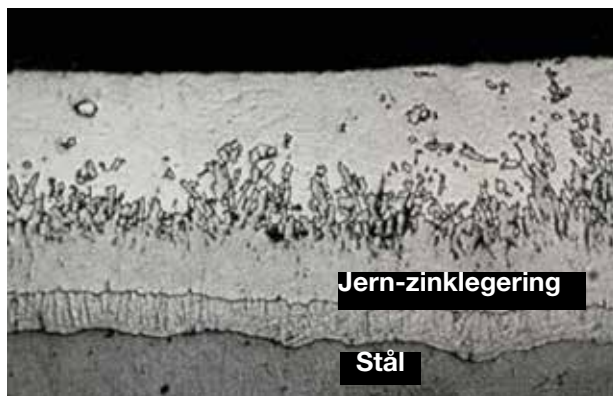
Denne ståltype inkluderer stål med et silicium- og fosforindhold under 0,03%

Ved varmforzinkning af uberoligede og aluminiumberoligede stål pakkes jernzink-krystaller tæt (billede 5-2) i legeringslaget, og den smeltede zink hindres i at nå ståloverfladen. Reaktionen kan kun ske mellem det jern og den zink, som diffunderer gennem legeringslaget, og resultatet bliver, at reaktions- og tilvæksthastigheden aftager, og belægningen bliver relativ tynd.

Når zinken i det yderste lag størkner, bliver overfladen glat og antager en blålig metalglans (billede 5-7). I nogle tilfælde, især på tyndplade, kan zinken størkne i form af tilfældigt rettede krystaller. Dette giver overfladen et særpræget "blomstermønster", (vismut-, bly- eller tin-tilsætning i zinkbadet forstærker blomstermønstret ved stykgods varmforzinkning), der bl.a. afhænger af størkningshastigheden.

Mønstret er hverken tegn på god eller dårlig kvalitet, og har heller ikke nogen betydning for zinkbelægningens levetid.

Ved kontinuerlig varmforzinkning af brede bånd kan mønstrets udbredelse kontrolleres, hvilket ikke er tilfældet ved varmforzinkning af stykgods.



Billede 5-2. Tværsnit gennem belægningen på uberoligede stål. På aluminiumberoligede stål er belægningen opbygget på samme måde.

5.3 "Sandelinstål"

Stål med et silicium+fosforindhold i området 0,03-0,14 vægtsprocent kaldes i varmforzinkningssammenhæng for "Sandelinstål", efter sin opdager Robert W. Sandelin, og kræver en speciel badsammensætning ved varmforzinkning. I et konventionelt varmforzinkningsbad bliver reaktionen mellem stål og zink meget kraftig og laget tykt og uregelmæssigt, ofte med dårligere vedhæftning. Det er krystallerne i det yderste legeringslag, zeta-fasen, som danner små lange stængler kornene, og vokser meget hurtigt, se billede 5-5 og 5-6. Hvis man ikke har adgang til legerede forzinkningsbade, se kapitel 5-5, skal denne type stål undgås ved varmforzinkning.

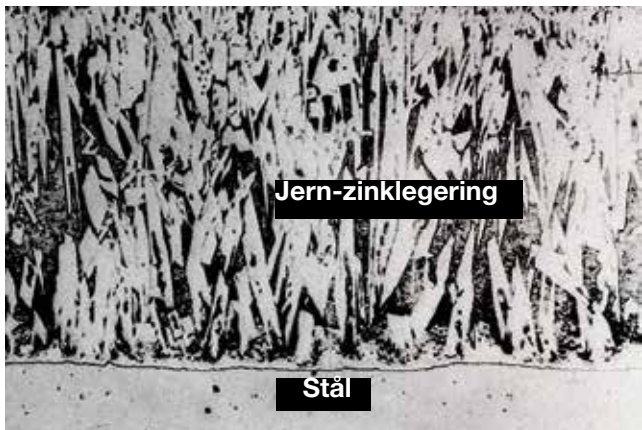


Billede 5-3. Tværsnit af zinkbelægningen på Sandelinstål med 0,06% Si. Forzinkningen udført ved 460 °C

5.4 Siliciumberoligede stål

Siliciumberoligede stål egnet til varmforzinkning har et Si-indhold $\geq 0,15\%$. Zeta-fasen ses her som lange stængler (billede 5-4).

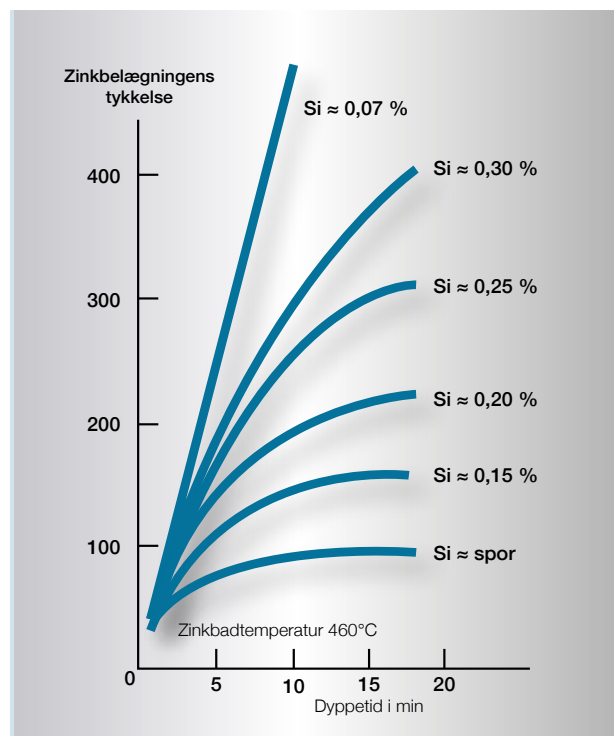
Også denne strukturform er ligesom hos Sandelin-stålet tyndt og tillader zink fra badet i smeltet form at diffundere mellem krystallerne. Reaktionen bremses ikke som hos de uberoligede eller aluminiumberoligede stål, men vedbliver i hele det tidsrum, emnet be-



Billede 5-4. Tværsnit gennem belægningen på siliciumberoligede stål med 0,26% Si. Forzinkningen er udført ved 460 °C.

finder sig i badet. Belægningens tykkelse øges altså kraftigt med dyppetiden (billede 5-6), og laget bliver som regel temmelig tykt. Til forskel fra Sandelin stålet, er væksten kontrolleret og laget er jævner med god vedhæftning til stålet.

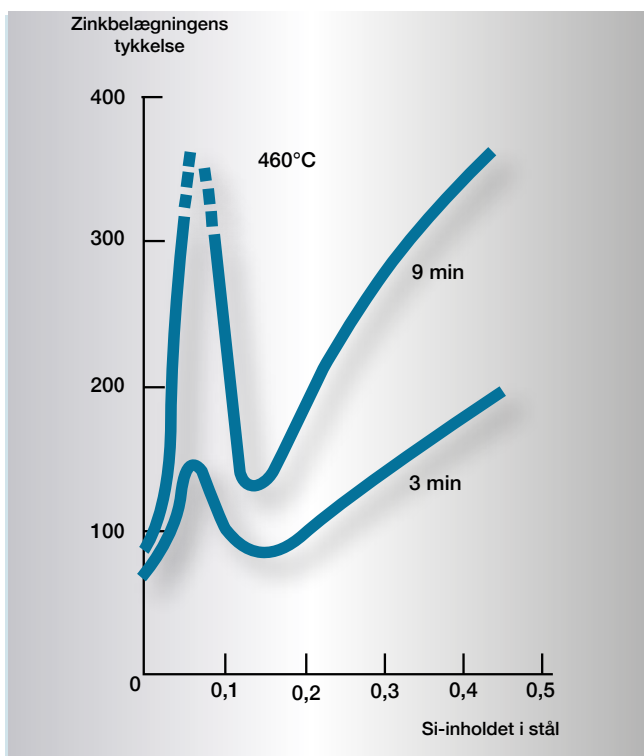
Det skal bemærkes, at den dårlige pakning af legeringslaget ikke betyder, at belægningen bliver "porøs" og fyldt med huller. Afstanden mellem legeringskrystallerne er altid fyldt med ren zink. Samme kompakte og fuldstændig metalliske belægning, som opstår ved uberoligede eller aluminiumsberoligede stål, opnås altså også ved siliciumberoligede stål.



Billede 5-5. Reaktionen mellem dyppetider og zinkbelægningens tykkelse for stål med forskellige siliciumindhold. Kurverne er middelværdier baseret på såvel forsøg som praktiske erfaringer. Betydelige variationer kan forekomme ved stål med samme siliciumindhold men fra forskellige charger.

Siliciums indflydelse tiltager ikke retlinet med øget indhold, men følger kurverne, som er vist på billede 5-5. Disse kurver, ligesom dem i billede 5-6, viser middelværdierne. Variationerne kan være betydelige mellem stål med samme siliciumindhold, men fra forskellige charge, ligesom variationer i samme charge også kan forekomme.

Det menes, at variationerne bl.a. skyldes, at til trods for det totale siliciumindhold i forskellige stål er det samme, kan den mængde silicium, som binder til oxygen, variere. Der findes hermed større eller mindre mængde opløst silicium i stålet, og det er denne mængde, der påvirker reaktionen (7). Det kompliceres yderligere af, at reaktionen mellem jern og zink kun sker på nogle



Billede 5-6. Relationerne mellem stålets siliciumindhold og zinkbelægningens tykkelse ved dyppetider på 9 hhv. 3 minutter ved 460 °C. Betydelige variationer kan forekomme ved stål med samme siliciumindhold men fra forskellige charger. Den høje reaktivitet mellem 0,03% og 0,14% Si kaldes Sandelineffekten.



Billede 5-7. Varmforzinkede rør med forskelligt indhold af silicium. Enkelte rør har et indhold af silicium som gør dem egnede til varmforzinkning. Andre rør har et indhold af silicium som ligger i Sandelinområdet (0,03-0,14%) som gør dem uegnede til varmforzinkning, med et mat gråt udseende, og dårlig vedhæftning til følge.

mikrometers dybde i ståloverfladen. Det har vist sig, at silicium kan ligge ujævnt i stålets overflade (8). Dette gælder også andre elementer som svovl og fosfor, som også kan påvirke reaktionsforløbet mellem jern og zink (9).

Selv på siliciumberoligede stål fæstnes der yderst et

lag af ren zink, når den tages op af zinksmelten. Reaktionshastigheden på disse stål kan dog være så høj, at renzinklaget helt ændres til jernzink-legering, inden overfladen er nedkølet. Reaktionen ophører først, når temperaturen er under 225 °C. Jernzink-dannelsen kan altså gå helt ud til belægningens yderside, som så bliver mat, ru og med en lys- eller mørkegrå farve (billede 5-7). Farven bestemmes af mængden af jernzink-krystaller, som er blandet med ren zink i belægningens yderste lag. En stor mængde renzink giver en lys og blank overflade. En mindre mængde renzink giver en grå og mat (jernzink) overflade.

Ofte bliver overfladen ikke entydig grå, men får et flammende udseende med dels matte, grå og dels blanke, lyse partier. Årsagerne hertil kan være mange. Først og fremmest koncentrationen af silicium, men også fosfor og svovl eller andre stoffer i stålets overflade, spændinger i ståloverfladen ligesom stålets varmebehandling og struktur, påvirker alt sammen reaktionsforløbet. Selv afkølingsforløbet efter varmforzinkningen indvirker på dette forhold.

Stålets glathed, specielt ved koldvalsede materialer, spiller også en rolle for zinklagets tilvækst. Overfladen må hverken være for ru eller glat. Zetakrystallerne har tendens til at vokse vinkelret ud fra overfladen. På plane og konvekse flader vokser krystallerne uden at forstyrre hinanden, og smelten kan trænge ind mellem krystallerne og øge tilvæksten. På konkave overflader og i fordybninger blokerer krystallerne derimod for hinanden og forhindrer tilvæksten.

5.5 Indflydelse af legeringselementer i stålet

Kul i mængder under 0,3% har kun lille indflydelse på jernzink-reaktionen, mens et højere kulindhold øger reaktionshastigheden og dermed belægningens tykkelse. Det har også stor betydning, om kullet er bundet i form af perlit, sorbit, martensit osv. (10). Mangan, krom og nikkel øger også reaktionshastigheden, men kun ubetydeligt i de mængder, de findes normalt i lavtlegeret stål (11).

Niobium, titan og vanadium anvendes som finkorndannere i stålet, men optræder i så små mængder i aktuelle ståltyper, at de er uden indflydelse (12).

Svovl- og fosforindholdet er normalt så lavt i konstruktionsstål, at det sjældent har nogen større indflydelse på reaktionen mellem jern og zink. Når det gælder fosfor findes der en undtagelse. Hvis silicium og fosfor ($Si + 2.5 \times P$) sammenlagt når over 0,040%, befinder stålet sig i Sandelinområdet med høj reaktion som følge (koldvalset stål).

Højere svovlindhold – over 0,18%, som findes i visse automatstål, kan øge reaktionshastigheden så meget, at stålet ikke kan varmforzinkes. Angrebet kan blive så kraftigt, at stålet ødelægges.

5.6 Indvirkningen af andre faktorer

Temperaturen i zinkbadet ligger normalt på 455-460 °C, men kan i praksis ligge mellem 440 og 470 °C, uden at det får nævneværdig indflydelse på reaktionshastigheden mellem jern og zink. Sker varmforzinkningen ved 540-560 °C dannes det yderste legeringslag, zeta-fasen, ikke i legeringslaget. Belægningen kommer til at bestå af en blanding af delta-krystaller og zink. Overfladen bliver normalt mat med en lys eller mørkegrå farve.

Da zeta-laget ikke dannes ved varmforzinkning ved høj temperatur, elimineres indflydelsen af silicium på reaktionen mellem jern og zink. Forskellige ståltyper reagerer derfor omtrent ens og får samme belægningstykkelser. Værdier over 100 mikrometer er svære at opnå.

Dyppetiden i zinkbadet er meget afhængig af, hvor let stålemner kan håndteres. Normalt er den mellem 1,5 og 5 minutter. Vanskeligt håndterbart materiale kan dog medføre dyppetider på op til 10 minutter. Dyppetidens indflydelse på forskellige ståltyper fremgår af billede 5-5.

Overfladens ruhed har, som nævnt under pkt. 5.3, stor betydning for belægningens lagtykkelse, der øges med større ruhed. Afhængig af ståltype og profil kan f.eks. x. slyngrensning give 15 til 100% tykkere belægning. Kraftigt rustangreb eller bejdsning uden inhibitorer giver også øget lagtykkelse.

Forskellige overfladebearbejdningsmetoder som afdrejning, slibning og flammeskæring, kan også give uventede effekter ved dannelsen af zinklaget. Gas-, plasma- og laserskæring giver normalt tyndere belægninger i snitfladen.

Stålmaterialets tykkelse indvirker således, at belægningen bliver tyndere med mindsket godstykkelse. Det gælder især ved godstykkelser på under 5 mm. Årsagen er blandt andet, at lettere emner generelt får kortere håndteringstid i zinkbadet. Stålets bearbejdning (valsning) og varmbehandling er heller ikke ens ved forskellige tykkelser og kan give varierende overflade-strukturer, der reagerer forskelligt i zinkbadet.

Zinkbadets sammensætning kan varieres i nogen grad. Basen er elektrolytzink (ofte SHG-zink – Special High Grade) med en renhed på 99,995%. De resterende tusinddele består hovedsageligt af jern. For at påvirke forzinkningsresultatet tilsættes en del legeringsmaterialer.

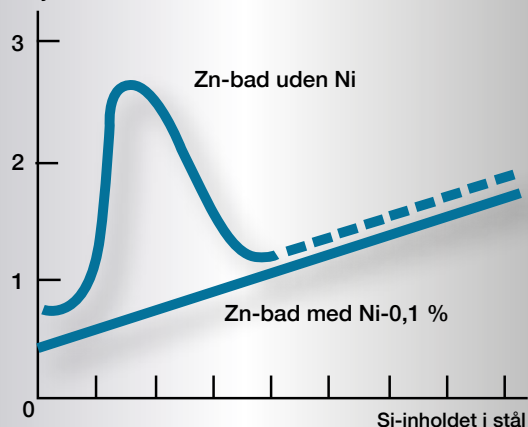
5.7 Indflydelse af legeringselementer i zinkbade

I de seneste år er der foretaget en intensiv forskning med legerede bade. Det drejer sig først og fremmest om aluminium og andre tilsætningsstoffer i et forsøg på at eliminere den kraftige indvirkning af Sandelineffekten (billede 5-6) for at få et blankere lag, bedre afløb og øget korrosionsbestandighed.

Aluminium i små mængder (0,001-0,01%) tilsættes for at give en blankere overflade ved varmforzinkning. Højere indhold forårsager sorte ubelagte pletter i zinkoverfladen, da de eksisterende flusmidler ikke er i stand til at forvandle alt aluminiumoxid. Lidt højere aluminiumindhold anvendes ved varmforzinkning af bånd og tråd (0,1-5%). Ved kontinuerlig varmforzinkning af tyndplade kan et aluminiumindhold på op til 55% anvendes (Aluzink).

Tilsætning af nikkel (0,04-0,07%) i zinkbadet eliminerer toppen af Sandelinkurven og giver en lineær tilvækst ved øget siliciumindhold op til 0,22%. Ved silicium > 0,22% har nikkel ingen effekt på belægningens tykkelse. Billede 5-8 viser lagtykkelseskurvens udseende i nikkellegerede zinkbade. Da nikkel holder zeta-fasens tilvækst tilbage, bliver det rene ydre zinklag tykkere, og belægningen blankere. Nikkel kan også anvendes i kombination med vismut.

Relativ tykkelse



Billede 5-8. Relationerne mellem stålets siliciumindhold og zinkbelægningens tykkelse ved forzinkning i nikkellegeret zinksmelte (0,1% Ni).

Tilsættes bly til zinkbadet, påvirkes viskositeten og overfladespændingen. Nogle undlader dette i dag af miljømæssige årsager. I stedet for bly, kan vismut i mængder mellem 0,1-0,2% anvendes. Vismut har vist sig at have lige så gode eller bedre egenskaber end bly, når det gælder om at påvirke afløbet af zink ved optagning fra badet. Selve vedhæftningen bliver bedre, og markant bedre ved højtemperaturforzinkning.

Tin bruges ind imellem i kombination med vismut, hvilket giver zinklaget et karakteristisk blomstermønster. Indholdet af tin ligger omkring 1%.

Flere danske varmforzinkere er certificeret efter DAST 022, for at leve op til kravene som leverandør til bærende stålkonstruktioner til Tyskland. Ifølge denne standard må badet ikke indeholde tilnærmelsesvis så store legeringsmængder, som ovenfor beskrevet.

5.8 Valg af stål

Da zinklagets tykkelse i høj grad bestemmes af det anvendte ståls siliciumindhold, er det denne faktor, som i hovedtræk styrer belægningstykkelsen. Det er derfor vigtigt, at konstruktøren/kunden kender indholdet, for at få opfyldt sine krav.

5.8.1 Aluminiumsberoliget stål med uventet lav reaktivitet

Aluminiumsberoliget stål indeholder også lave indhold af silicium, hvilket påvirker reaktiviteten. I de senere år er aluminiumsberoliget stål med såkaldt lavt siliciumindhold, under 0,01% og aluminiumindhold over 0,035% blevet mere og mere almindelige. Disse stål har mange positive egenskaber med hensyn til skæring og formbarhed, men det lave siliciumindhold i kombination med det høje aluminiumindhold betyder, at zinklagene kan være lavere end angivet i varmforzinkningsstandarden DS-EN ISO 1461. Hvis varmforzinkningen også udføres i et nikkellegeret bad, som er almindeligt i dag, da nikkel anses for at tilføje flere positive egenskaber, reducerer dette reaktiviteten yderligere med et lavere lag som følge heraf. En afvigelse fra standarden for sådanne stål kan aftales mellem kunden og varmforzinkeren. Hvis en afvigelse ikke kan accepteres, skal denne type stål sandblæses inden varmforzinkning.

5.8.2 Risiko for Sandelineffekt

Generelt kan man sige, at ved normale krav til emnets overfladefinish efter varmforzinkning gælder følgende vilkår ved valg af aluminiumsberoliget stål til både varm- og koldvalset stål:

Si+P < 0,03 vægtprocent

dvs. stålet skal have et totalt silicium- og fosforindhold, der ligger under 0,03 vægtprocent.

Såfremt det visuelle indtryk af den varmforzinkede overflade er af afgørende betydning, bl.a. ved arkitektoniske konstruktioner, bør følgende vilkår for materialevalget anvendes, når det drejer sig om koldvalset stål (28):

Si < 0,03 og Si+2,5 P < 0,04 vægtprocent

Når det drejer sig om varmvalset stål, er det siliciumindholdet der er det kritiske, hvorimod fosforindholdet er af mindre betydning, hvorfor følgende vilkår for materialevalg bør anvendes (29):

Si < 0,02 og Si+2,5P < 0,09 vægtprocent

5.8.3 Højere lagtykkelser

Skal det forzinkede stål anvendes i mere korrosivt miljø, eller ønskes der en særlig lang levetid for zinklaget, bør belægningen være tykkere end kravene i DS/EN ISO 1461. Siliciumindholdet i stålet skal være > 0,22%.

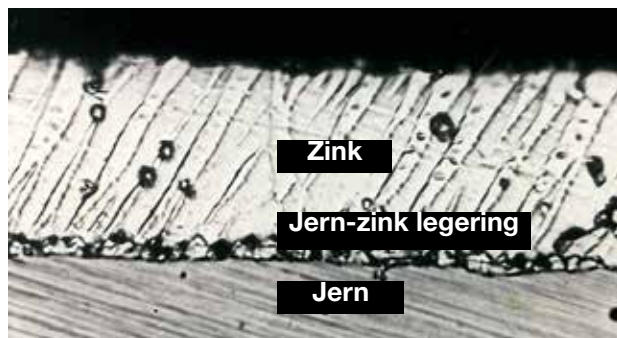
Jo højere indhold desto tykkere zinklag. Ønskes en blank overflade, bør stålet være uberoliget eller aluminiumsberoliget (uden siliciumindhold).

Automatstål er normalt ikke egnet til varmforzinkning. Indhold af svovl over 0,18 vægt% bevirker, at stålet ætzes kraftigt ved syrebejdningen, og at jernzinkreaktionen bliver så kraftig, at stålet ødelægges.

5.9 Jernzink-reaktion ved båndforzinkning

Ved kontinuerlig varmforzinkning af tyndplade er udgangsmaterialet koldreduceret stålbånd med en for metoden tilpasset kemisk sammensætning. Dyppetiden er meget kort og temperaturen holdes indenfor snævre grænser. Zinkbadet legeres med lidt aluminium – ca. 0,2% – som har den egenskab at hæmme jernzinkreaktionen ved korte dyppetider. Legeringslaget bliver tyndt, ca. 1-2 mikrometer, og resten af belægningen består af 7-30 mikrometer ren zink (billede 5-9) afhængig af anvendelsesområde.

Jernzink-legeringerne er relativt hårde og sprøde, men når størstedelen erstattes af blød formbar zink, kan en kontinuerlig varmforzinket plade bøjes, bukkes, falses, presses og til og med dybtrækkes, uden at belægningen revner eller skaller af.



Billede 5-9. Tværsnit gennem zinkbelægningen på kontinuerligt forzinket tyndplade.

6. Varmforzinket ståls styrkeegenskaber

6.1 Trækstyrke, kærslagstyrke og formbarhed

I både svejst som usvejst tilstand er stålets flydespænding, trækstyrke, forlængelse og krympning så godt som uforandret efter varmforzinkningen.

Styrken hos koldbearbejdet eller varmbehandlet stål kan nedsættes ved varmforzinkning. Hvor stor reduktionen bliver, afhænger af bearbejdningsgraden samt varmebehandlingens art, f.eks. hvis anløbningsstemperaturen er lavere end zinkbadets temperatur.

Kærslagstyrken hos varmforzinket stål reduceres noget sammenlignet med kunstigt forædlede prøver, men ikke så meget at stålets anvendelsesmuligheder påvirkes.

Formbarheden hos stål påvirkes ikke ved varmforzinkning. Kraftig bukning kan dog medføre, at zinkbelægningen krakelerer.

6.2 Svejse-spændinger

I svejste konstruktioner reduceres svejse-spændinger med 50-60% ved varmforzinkning. Hærdespændinger, i den varmepåvirkede zone, reduceres også. Svejste konstruktioner får på sin vis en større statisk styrke i varmforzinket tilstand.

6.3 Udmattelsesstyrke

Udmattelsesstyrke hos forskellige ståloverflader påvirkes mere eller mindre af varmforzinkning. Uberoliget og aluminiumsberoliget stål får en relativ lille nedsættelse, mens den hos siliciumberoliget stål kan blive betydelig. Årsagen er zinklagets opbygning. Siliciumberoliget stål har en større andel jernzink-fase i laget, se kapitel 5.3. Jernzink-fasen er hård og sprød og der kan opstå revner i legeringslaget, som siden kan virke som adviser for revnedannelser i ståloverfladen.

Ved fastlæggelse af udmattelsesdata i laboratorier, sammenlignes varmforzinkede materialer med nyt, ubehandlet stål. Eksponeres en ubehandlet konstruktion – uden korrosionsbeskyttelse – udendørs, angribes den omgående af rust. Ætsegruber opstår i ståloverfladen, hvilke tjener som revneanvisninger i stålet, og udmattelsesstyrken falder hurtigt. Det samme gælder for en malet konstruktion, der skades i malingen og angribes af rust. Hos varmforzinket stål beskytter zinken mod korrosion og den sænkning i udmattelsesstyrke, som varmforzinkning forårsager, er betydeligt

mindre end den sænkning, et korrosionsangreb giver (billede 6-1).

6.4 Sprødhed, revnedannelse

Ved varmforzinkning bør man være opmærksom på, om materialet er koldbearbejdet. Påvirkningen er størst ved uberoliget stål. Koldbearbejdning reducerer et ståls kærslagsstyrke, og efterfølgende ældning ved høje temperaturer forstærker denne effekt. Ved varmforzinkning af koldbearbejdet stål sker der en opvarmning (460 °C), som i nogle tilfælde kan fremskynde ældning.

I tilfælde, hvor man er i tvivl, bør man udføre en prøveforzinkning. Giver det værdier, som ikke kan godkendes, skal der udføres en afspændingsglødning ved 600-650 °C eller endnu bedre en normalisering. Ældningstilbøjeligt stål er nu til dags forholdsvis sjældne.

Brint- eller hydrogenskørhed opstår ikke ved varmforzinkning af normale ulegerede og lavtlegerede konstruktionsstål. Derimod kan hærdet stål med brudstyrke på 1.050 N/mm² eller derover (fra hårdhed 33 Rockwell C) optage brint i bejdsbadet, hvilket kan medføre skørhed. Der bør altid udføres prøveforzinkning med disse materialer, inden større partier varmforzinkes. Sandblæsning i stedet for bejdsning er en mulighed for at undgå problemet.

Interkrystallinsk revnedannelse eller zinksprødhed kan forekomme på grund af indtrængning af zink i stålets korngrænser. Det forudsætter dog, at der er opbygget store spændinger i stålet. Risikoen for, at dette kan ske med almindeligt konstruktionsstål, er meget lille, hvorimod hærdede stål er mere følsomme.

6.5 Varmforzinket materiale og brand

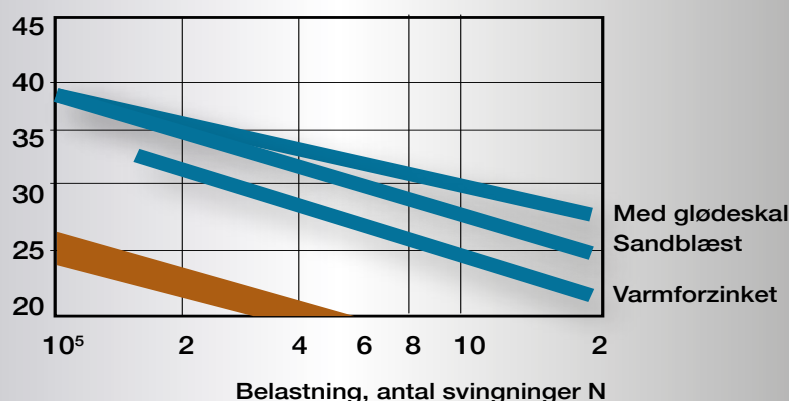
Varmforzinket stål brænder ikke, men holdbarheden mindskes, når temperaturen stiger. Stålkonstruktioner forbliver stabile, til den kritiske temperatur opnås. Dette sker mellem 500-750 °C, afhængig af belastningsforholdene.

Brandbeskyttelsen begynder altid på planlægningsstadiet. Brandrisiko og omkostninger for brandbeskyttelse kan ofte reduceres på tegningsstadiet.

Brandmodstandstiden er den minimumstid i minutter, hvor en konstruktion fuldfører sin opgave ved en standardbrand. Konstruktionen må således ikke kollapse

Pulserende belastning

$\sigma_{\max} - \sigma_{\min}$
kp/mm²



Billede 6-1. Wöhlerkurve for stål S355. Det grå bånd indikerer forløbet ved normal korrosionsudmatning.

under denne tid. Minimumstiden ligger til grund for klassificering efter billede 6-2.

Tiden kan forlænges ved hjælp af følgende forholdsregler:

- Forsinkelse af varme-indtrængning med hjælp af dækning (dækning med beton eller mineralfiber)
- Bortledning af varmen f.eks. ved at fylde søjler med vand eller beton.

Før varmforzinkning vælges der ofte det første alternativ og konstruktionen klassificeres da i Brandmodstandsklasse F 30-60.

Når det gælder brandbeskyttelsesklasser, kan man i princippet anvende samme metoder for varmforzinket stål som for ubelagt stål.

6.6 Varmforzinket materiale ved eksponering i forhøjet temperatur

I projektet "Varmforzinkning af svåra stål", som blev udført i Nordic Galvanizers' regi og i samarbejde med Institutet för Metallforskning, studerede man, hvordan varmforzinkede lag opfører sig ved forhøjede tempe-

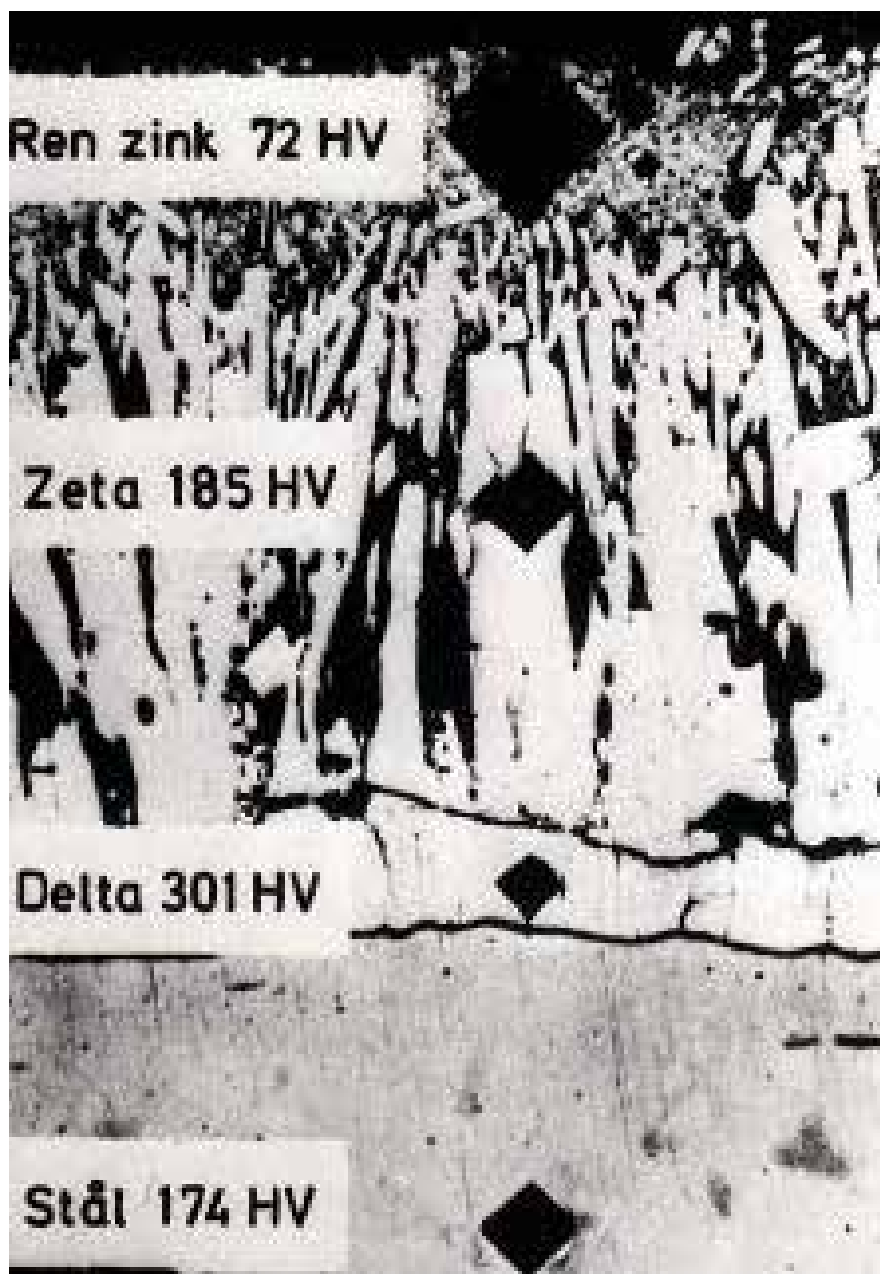
raturer. Tidligere er der sagt, at laget er stabilt ved temperaturer op til 275 °C (13). Dette er sandt, hvis eksponeringen er forholdsvis kort, men for eksponeringstider længere end nogle uger, stemmer ovenstående gradtal ikke.

Studierne har vist, at højtemperatur-forzinkede materialer tåler varmeeksponering dårligere end lavtemperatur-forzinkede materialer. Dette skyldes, at varmen medfører diffusionsbetingede faseforvandlinger i zinklaget, dvs. den yderste rene zinkfase forvandles til intermetallisk fase. Når intermetallisk fase (jernzink-faser) forekommer i hele laget, øges sprødheden og sprækkedannelser kan ske i laget, specielt når det køler (cykliske forløb). Belægninger pålagt ved højtemperatur er mere følsomme, eftersom de ofte allerede fra begyndelsen kun indeholder intermetallisk fase.

Kombinationer med forhøjede temperaturer og mekanisk påvirkning, f.eks. i form af vibrationer, skal undgås. Bedste mulighed for at klare forhøjede temperaturer i længere tid har således belægninger udført ved normal temperatur med stor andel ren zink.

Brandmodstandsklasse	Brandmodstandtid, minutter	Betegnelse i bygningsinspektionsreglerne
F 30	≥ 30	Brandresistent
F 60	≥ 60	Brandresistent
F 90	≥ 90	Ildfast
F 120	≥ 120	Ildfast
F 180	≥ 180	Meget ildfast

Tabel 6-2. Brandmodstandsklasser.



Billede 6-3. Mikroskopisk tvær-
snit i varmforzinket stål, med
hårdhedsmåling i stålet, samt i
zinklagets forskellige faser.

Varmforzinket stål bør anvendes ved følgende maksimale temperaturer:

- Lavtemperaturlag 225 °C (250 °C kan anvendes i kortere tid)
- Højtemperaturlag 200 °C

6.7 Zinkbelægnings modstandskraft mod slitage

Ren zink er et blødt metal, men alligevel hårdere end de fleste organiske overfladebelægnings.

De intermetalliske jern-zinkfaser som dannes ved varmforzinkning er derimod meget hårde, og hårdere end almindeligt konstruktionsstål. Jern-zinkfasernes modstandskraft mod slitage er derfor betydeligt bedre end ren zink.

Forsøg har vist, at legeringslaget har en modstandskraft mod slitage, som er 4-5 gange bedre end ren-zinklaget.

Varmforzinkning anvendes ofte til produkter hvor overfladen udsættes for ekstraordinær slitage, som f.eks. paneler på køretøjer, trailere, trappetrin, lemme i gulve, håndlister, osv.

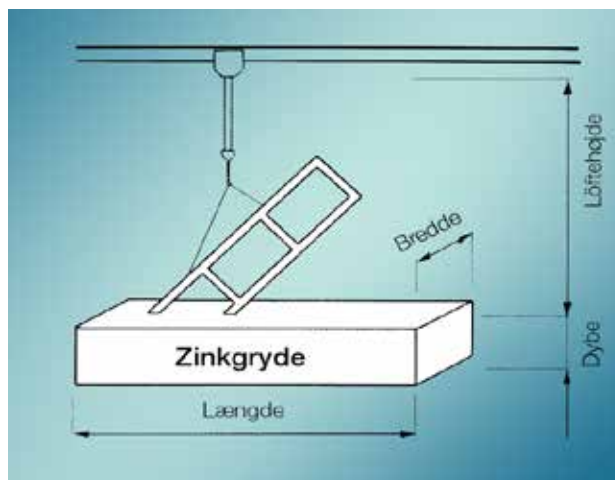
7. Konstruktionsudformning og fremstilling

Når en konstruktion skal varmforzinkes, er der visse forhold ved dens udformning, man skal være opmærksom på. Derudover vil opfyldelsen af de krav, der normalt stilles til god bearbejdning, opsvejsning og hensyntagen til efterfølgende overfladebehandling også gælde for konstruktioner, der skal varmforzinkes. Visse detaljer kræver dog speciel opmærksomhed ved varmforzinkning:

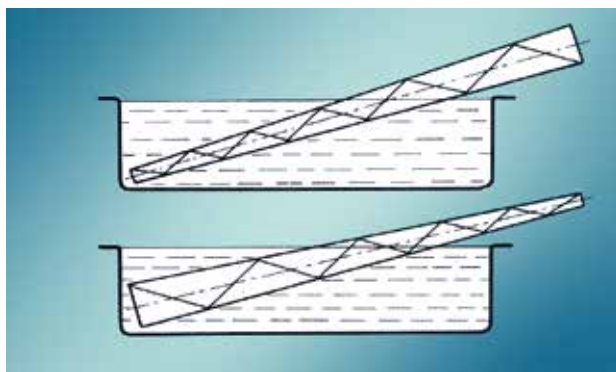
- Størrelsen på zinkgryder. Grydens mål (billede 7-3) bestemmer størrelsen på konstruktionen. Indimellem kan dobbeltdypning løse problemet (billede 7-4), alternativt kan man samle konstruktionen efter varmforzinkningen.
- Boltesamlinger er at foretrække frem for en svejsning, eftersom svejsningen beskadiger zinklaget, som dermed skal repareres.
- Konstruktionens vægt. Varmforzinkeren har kun mulighed for at tage imod materialer, som truck eller kran kan klare.



Billede 7-1. Varmforzinkning af kabelstiger, som løftes skråt, for at få et godt afløb af zinken.



Billede 7-2. Principskitse for varmforzinkning.



Billede 7-3. Principskitse for dobbeltdyp.

7.1 Sikkerhedskrav

Varmforzinkning medfører, at materialerne dyppes i flere forbehandlingsbade og derefter i smeltet zink. Dette bevirker, at konstruktioner med lukkede hulrum som f.eks. rørkonstruktioner, sammensvejste flader og beholdere skal forsynes med synlige huller til dræning og udluftning. Manglende huller kan medføre, at konstruktionen eksploderer i varmforzinkningsbadet.

Bejdsesyre har en stor evne til at trænge ind gennem porer i svejsningerne. Når emnet dyppes i zinksmelten, vil indesluttet væskeansamlinger fordampe og forårsage opbygning af et stort overtryk, som kan medføre sprængning. Risikoen for alvorlige person- og materialeskader ved en sådan sprængning er meget stor. Se endvidere kap. 7.2.5 og 7.2.9.

Passende hulstørrelser er angivet i billede 7-2. Bemærk, at dette er minimumstørrelser, hullerne må

Rund profil (mm)	Kvadratisk profil (mm)	Rektangulær profil (mm)	Diameter, gennemgående hul (mm)
20	< 20	30x15	10
30	< 30	40x20	12
40	< 40	50x30	14
50	< 50	60x40	16
60	< 60	80x40	20
80	< 80	100x60	20
100	< 100	120x80	25
120	< 120	160x80	30
160	< 160	200x120	30

Billede 7-4. Mindste anbefalede hulstørrelse for udluftning af rørkonstruktioner.

meget gerne laves større, så længe konstruktionens styrke ikke forringes.

Hullerne skal placeres, så bejdsesyre og zink frit kan løbe ind og ud af konstruktionen uden at danne lommer (se billedmateriale).

I tvivlstilfælde anbefales at kontakte den virksomhed, der skal udføre varmforzinkningen, for at drøfte alternative placeringer og hulstørrelser.

7.2 Konstruktionsanvisninger

Følgende anvisninger er ikke nødvendige forudsætninger for, at varmforzinkningen kan udføres, men efterkommes de, bliver kvaliteten bedre og arbejdet lettes.

7.2.1 Håndteringsmuligheder

En større konstruktion bør opbygges af let håndterlige enheder, som sammenbygges efter varmforzink-

ndre anhugningsmuligheder for dyppeværktøjer. Rørstudse på beholdere skal placeres som på billede 7-8.

7.2.2 Indbyrdes bevægelighed

Dele, der skal være bevægelige i forhold til hinanden, bør monteres efter varmforzinkningen. Er dette ikke muligt, skal der være et mellemrum på 1 mm på hver side, dvs. 2 mm større end akslen.

7.2.3 Undgå konstruktioner som kan deformeres

Sammensæt ikke konstruktioner med alt for store forskelle i materialetykkelse (billede 7-7). Opvarmningen i zinkbadet vil være forskellig for forskellige godstykker og kan betyde, at konstruktionen deformeres. Store plane flader med pladetykkelser under 3-4 mm bør forstærkes (billede 7-9) for at formindske risikoen for at konstruktionen deformeres.

7.2.4 Undgå uens overflader og materialetyper

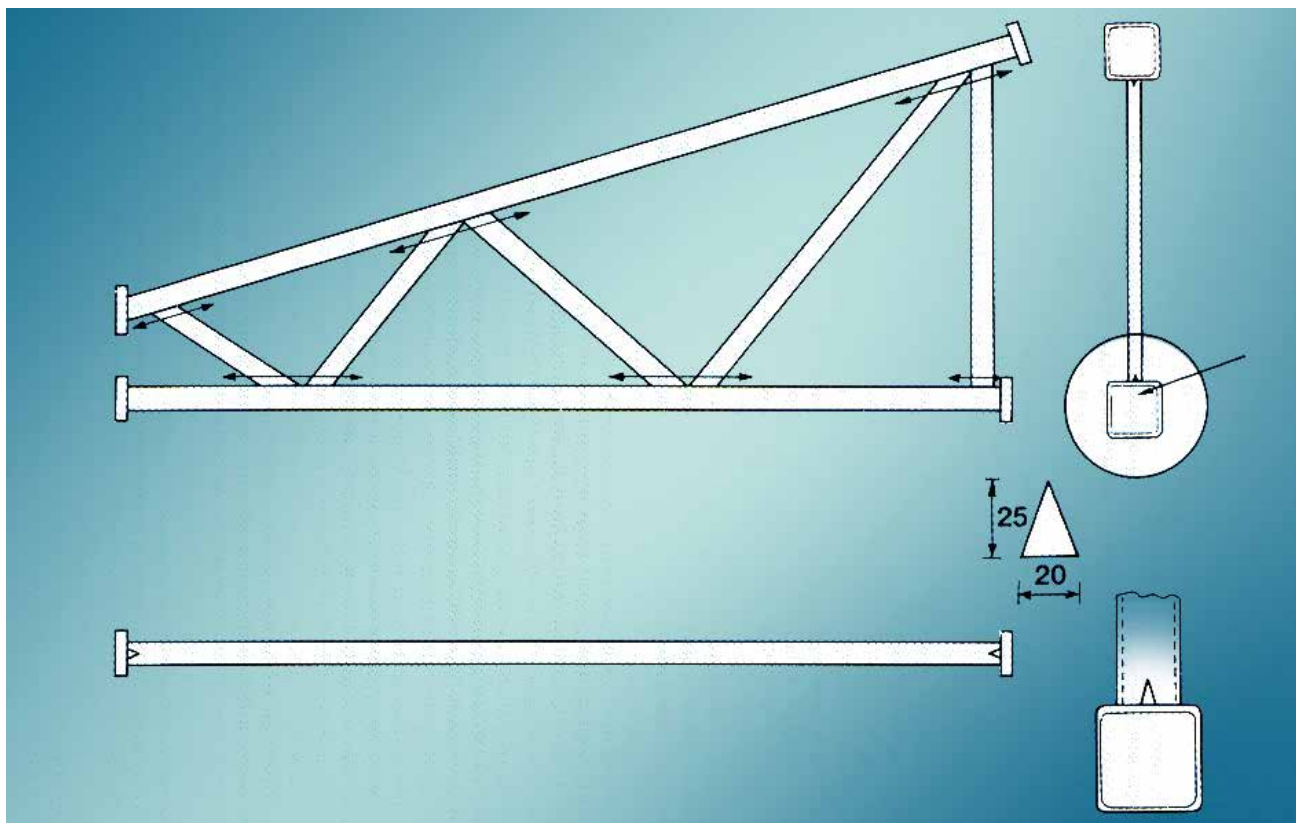
Nyt stål, stål med gravrust og støbejern kræver forskellig forbehandling og må derfor ikke svejses sammen. Zinkbelægningerne bliver også forskellig i lagtykkelse og udseende.

Überoligede og aluminiumsberoligede stål bør ikke svejses sammen med siliciumberoligede stål, idet overfladens udseende og lagtykkelse bliver forskellig, billede 5-7.

7.2.5 Undgå syrespalter

Konstruktioner skal udformes, så der ikke opstår smalle spalter se billede 7-10 og 7-13. Stumpsømsvejsning er i forzinkningssammenhæng bedre end overlapsvejsning.

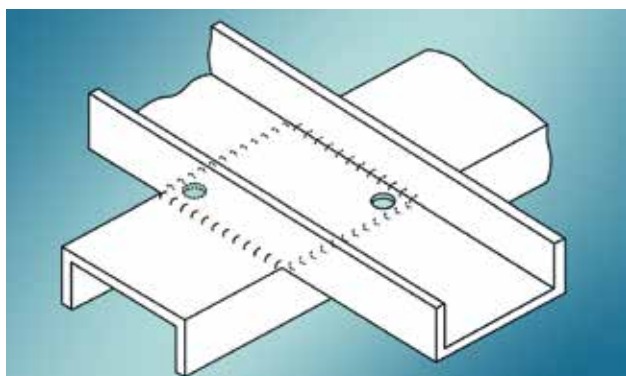
Udføres overlapsvejsning, skal hele fugen fuldsvejses, og det er vigtigt, at der ikke opstår porer. Er spalten mellem anlægsfladerne større end 70 cm², skal der bores et hul til udluftning på grund af eksplosionsfaren, billede 7-6.



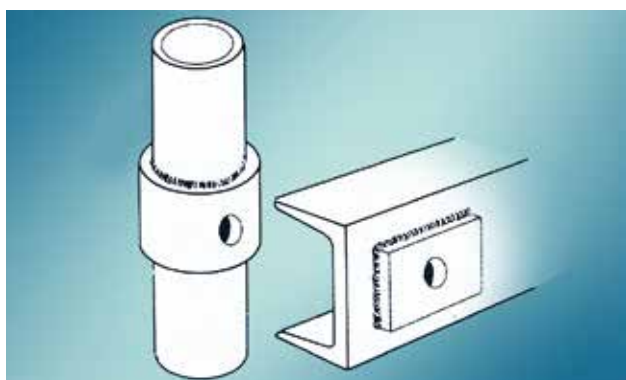
Billede 7-5. I svejste konstruktioner må der bores hul i alle knudepunkter til udluftning og gennemstrømning af væsker og zink. Lukkede rør kan eksplodere i zinksmelten.

7.2.6 Overlappende overflader

Som ved indvendige hulrum (kapitel 7.1) skal overlappende overflader forsynes med huller til dræning og udluftning. Utilstrækkelig boring af huller kan få konstruktionen til at sprænge i det varme zinkbad. Instruktions om hullernes størrelse og placering er anført i tabel 7.2.

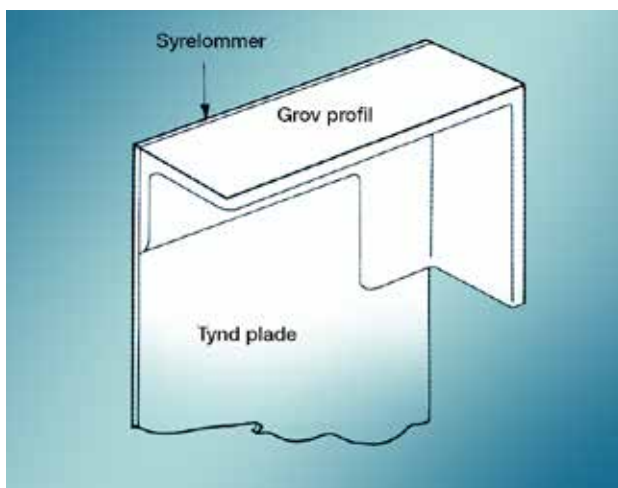


Billede 7-6. Konstruktioner med påsvejste forstærkninger og overlapsvejsninger skal forsynes med hul.

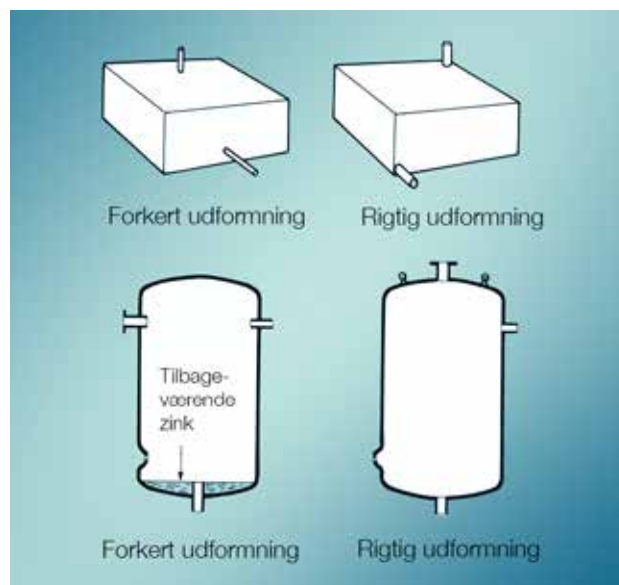


Overlappende overflade	Anbefalet foranstaltning
Op til 100 cm ²	Tætsvejset rundt om. Materialet skal være tørt ved svejsningen, og overfladerne glatte, så de kan sammenføjes med det mindste mulige mellemrum.
100 til 1000 cm ²	Diagonalt placeret (se billede ovenfor): • 2 x ≥ 12 mm huller i hjørnerne • (Alternativt: 2 x ≥ 25 mm intermitterende svejsning i hjørnerne)
1000 til 2500 cm ²	• 4 x ≥ 12 mm huller i hjørnerne • (Alternativt: 4 x ≥ 25 mm intermitterende svejsning i hjørnerne)
≥ 2500 cm ²	Diagonalt placeret (se billede ovenfor): • 2 ≥ 12 mm huller i hjørnerne og derudover huller for hver 300 mm rundt om hele den påsvejsede plade • (Alternativt: 2 ≥ 25 mm intermitterende svejsning i hjørnerne og derudover ≥ 25 mm intermitterende svejsning for hver 300 mm rundt om hele den påsvejsede plade)

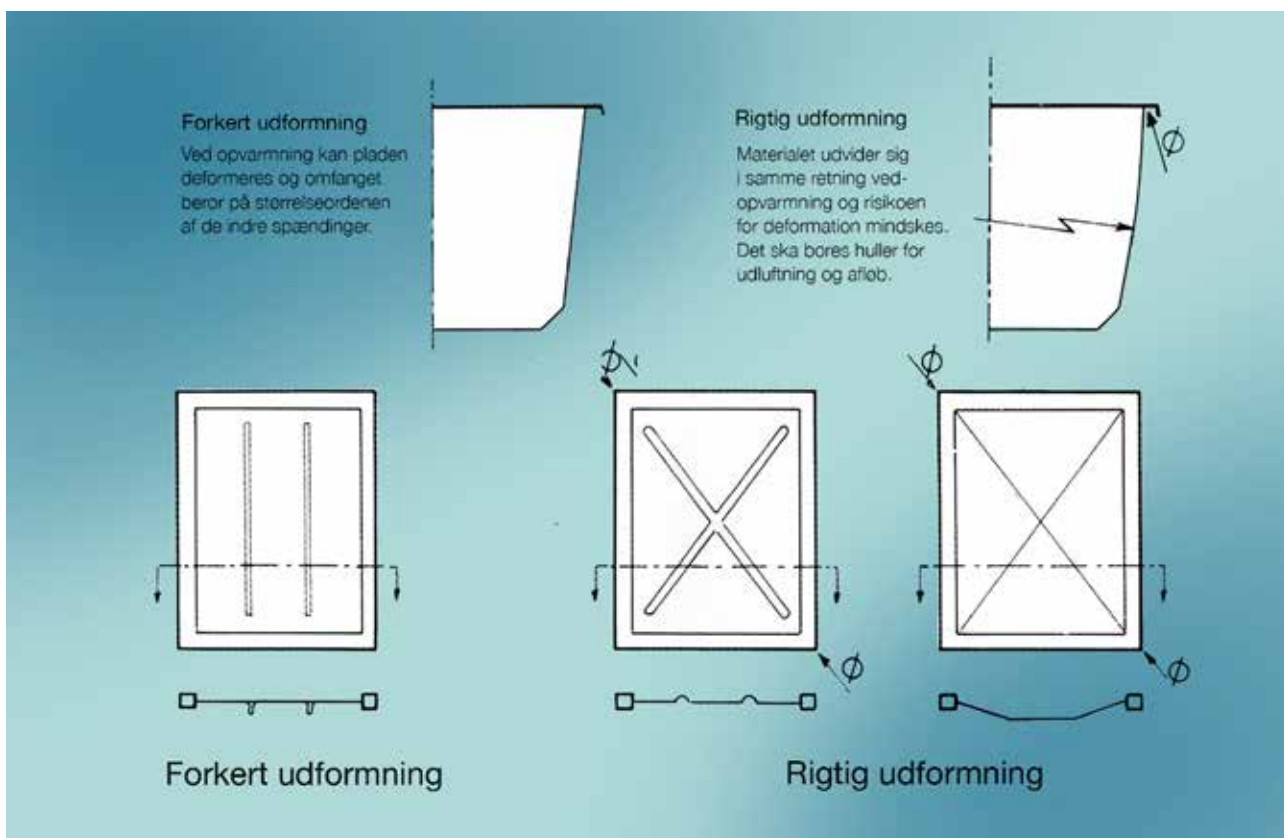
Tabel 7-2. anbefalinger vedrørende afløbshuller for overlappende overflader og deres størrelse og placering i henhold til standarden ISO 14713-2. Hullerne skal placeres på en passende måde i forhold til, hvordan konstruktionen skal hænge under nedsænkningen.



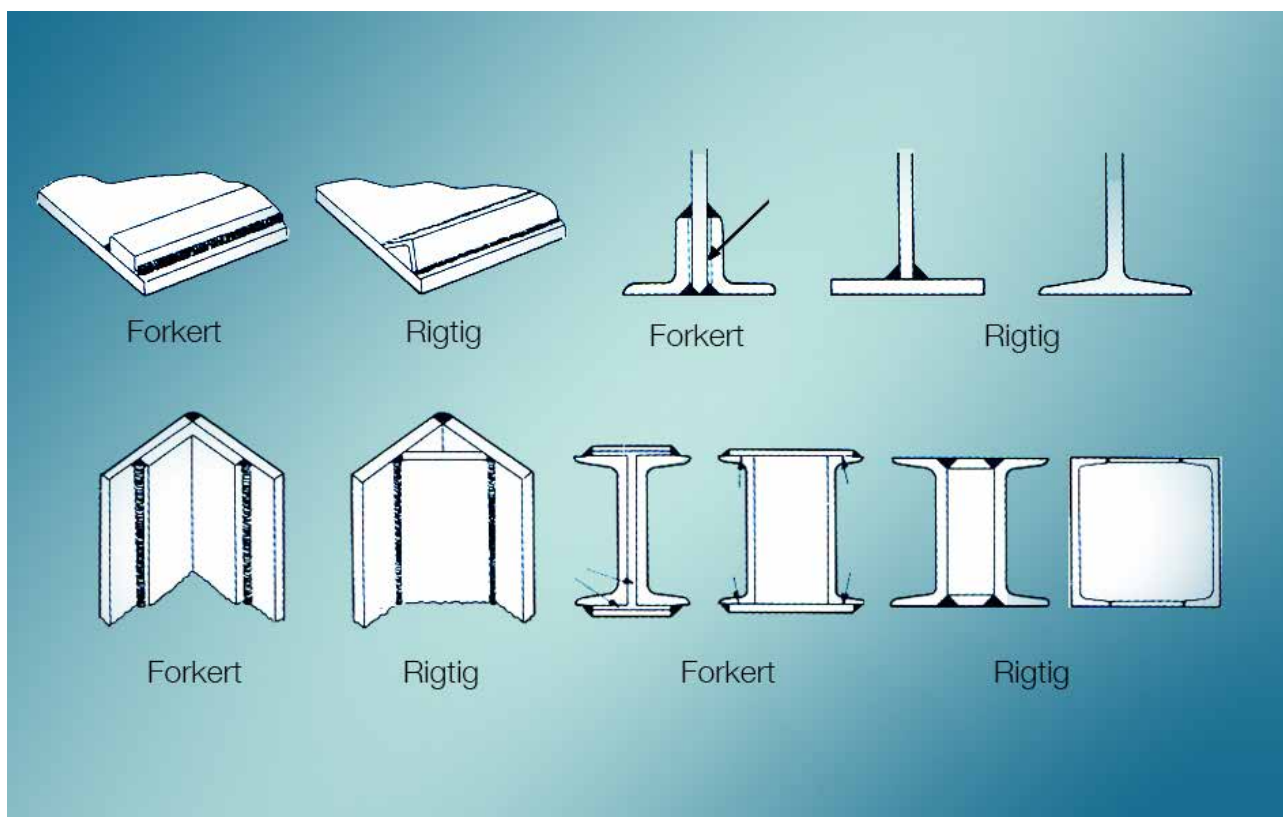
Billede 7-7. Svejs ikke materialer sammen, der har stor forskel i godstykkelse. Her er risikoen for deformation ved opvarmning og afkøling stor.



Billede 7-8. Rørstudse, der ikke er plane med beholders inderside, forhindrer fuldstændig fyldning og tømning i forbehandlingsbade og zinksmelte. Rørtilslutningerne bør placeres diagonalt og være rigelig dimensioneret. På større beholdere bør der være løfteøjjer for at lette håndteringen.



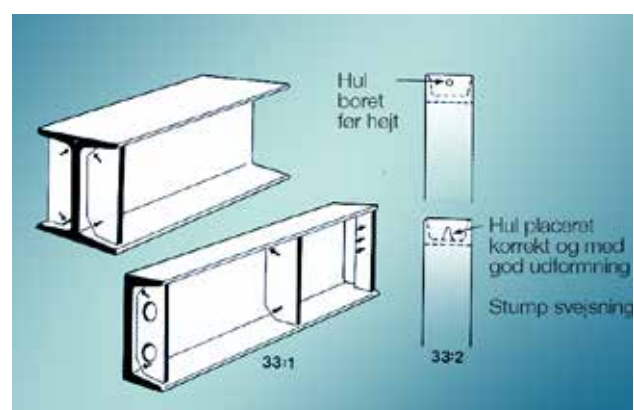
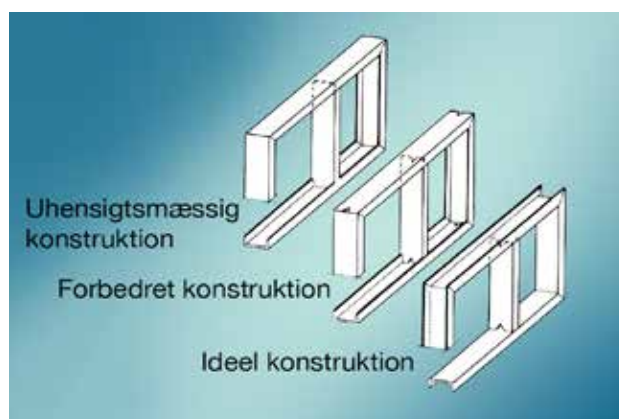
Billede 7-9. Eksempler på forstærkning af plader for at minimere deformationer.



Billede 7-10. Eksempler på udformning af konstruktioner for at undgå syrespalter.



Billede 7-11. Syrelommer, hvor syren og jernsaltene har ætset hul på zinklaget med misfarvninger til følge.



Billede 7-12. Forstærkningsplader i f.eks. bjælker bør tildannes, så der bliver en tværgående spalte ved kroppen, eller hjørnerne afklippes, så konstruktionen kan fyldes og tømmes. Laves der udlufts- og afløbshuller, skal de placeres så nær ved bjælkens krop som muligt. Diagonaler i gitterkonstruktioner bør ikke støde op til yderrammen.

7.2.7 Undgå lommer

Udform konstruktionen, så der ikke dannes luftlommer, når den sænkes ned i bade og i zinksmelten, og ikke samler væske og zink, når den tages op (billedene 7-12). Zink i udrænedede lommer kan forårsage en ujævn overflade.

7.2.8 Emner med gevind

Udvendige gevind skal skæres med undermål, for at møtrikken kan skrues på efter varmforzinkningen. Pasende reduktion af gevinddiameteren er angivet i standarden. Observer, at det er middeldiameteren, som bestemmer. Indvendige gevind skæres eller renses til nominelt mål efter varmforzinkningen. Zinkbelægningen på det udvendige gevind beskytter også stålet i det indvendige.

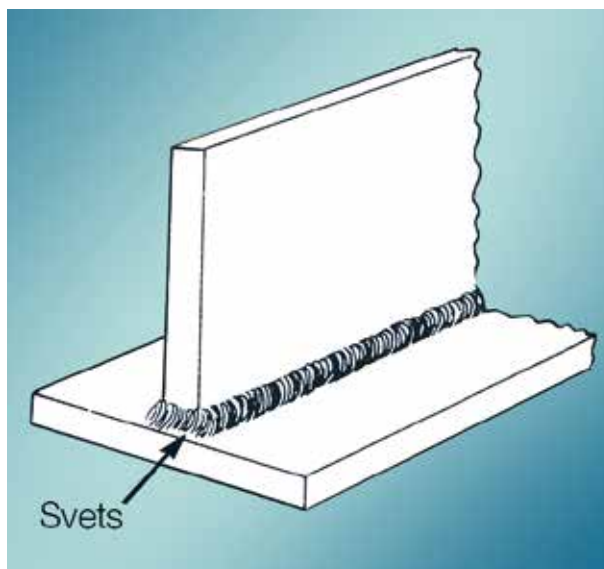
7.2.9 Mærkning

Midlertidig mærkning af materialer, der skal varmforzinkes, skal udføres med vandopløselige farver. Permanent mærkning kan gøres ved at stemple med bogstaver eller tal i stålet eller fastgøre en mærkeplade til emnet. Stemplingen skal være tilstrækkelig dyb, så den kan læses efter varmforzinkningen.

7.2.10 Svejsning

Svejsninger skal være fri for porer, som ellers vil resultere i syrespalter. Ved dobbeltsidig svejsning skal der svejses hen over pladeenderne, så væske ikke kan trænge ind i eventuelle spalter (billede 7-13) og der ikke kan opstå syrelommer.

Svejsemetoder, som ikke giver slagger, som MIG-svejsning, er at foretrække. Anvendes belagte elektroder, skal svejseslaggerne renses omhyggeligt af, da de ikke går af ved normal bejdsning, og ved varmforzinkningen efterlader sorte pletter på overfladen.



Billede 7-13. Fuldsvejs samlinger så syrelommer undgås.

7.2.11 Øvrige forhold

En forudsætning for at få et godt resultat af varmforzinkning er rene ståloverflader. Forsøg at holde overfladen ren for maling, fedt, olie og tjære etc., da disse urenheder ikke fjernes ved bejdsning, men kræver ekstrabehandling som fx. affedtning, sandblæsning, afbrænding eller slibning. Forureninger kan være svære at opdage i tide, og hvis de bliver siddende, efterlader de sorte ubehandlede pletter, der kan resultere i, at omforzinkning må foretages på kundens regning.

Flamme-, plasma- og laserskæring giver overflader, som påvirker varmforzinkningen. Zinklaget kan blive for tyndt og vedhæftningen dårlig. Disse skårne kanter bør slibes eller rejses før varmforzinkning ned til upåvirket materiale.

8. Standarder

For stykvis varmforzinkning angives bl.a. kvalitetskrav ifølge dansk standard, som også er international standard: Standard DS/EN ISO 1461 "Varmforzinkning. Belægnings på emner af jern og stål, påført ved varmforzinkning. Specifikationer og prøvningsmetoder".

Yderligere oplysninger om zink som korrosionsbeskyttelse findes i standarden EN ISO 14713 "Protection against corrosion of iron and steel in structures - Zinc coatings - Guidelines and recommendations: Part 1 - General", samt "Part 2 - Hot Dip Galvanizing". Nogle oplysninger, der tidligere fandtes i 1999-udgaven af EN ISO 1461, er blevet flyttet til ISO 14713 "Part 2".

8.1 Almene krav

Standarden angiver, at zinklagets udseende, tykkelse, struktur, fysiske samt kemiske egenskaber, påvirkes af materialets kemiske sammensatte masse, og af forholdene ved varmforzinkning. Kravene til information mellem varmforzinkere og kunde findes i en serie bilag til standarden.

Nogle varmforzinkningsfirmaer er kvalitetssikrede efter DS/EN ISO 9000.

Normalt er laveste lagtykkelseskrav gældende og udseende, som det angives i standarden DS/EN ISO 1461.

For at ovenstående krav kan opfyldes, skal kunden give varmforzinkeren oplysninger om stålqualität og

Materiale tykkelse mm	Lokal lagtykkelse μm	Middel lagtykkelse μm
Stål > 6 mm	70	85
Stål > 3 - ≤ 6 mm	55	70
Stål ≥ 1,5 - ≤ 3 mm	45	55
Stål < 1,5 mm	35	45
Støbegods ≥ 6 mm	70	80
Støbegods < 6 mm	60	70

Billede 8-1. Belægningsmasse og lagtykkelse på varmforzinket stål iht. DS/EN ISO 1461.

ønsket lagtykkelsesklasse ifølge standarden.

8.2 Tykkere belægning end i standarden

I nogle tilfælde kan det være ønskeligt med tykkere belægnings end angivet i standarden. Det kan f.eks. være tilfældet i mere aggressive miljøer, eller hvor man ønsker ekstra lang levetid.

Specifikationen af sådanne tykkere belægnings skal aftales mellem varmforzinker og køber, da det f.eks. stiller ekstra krav til stålets kemiske sammensætning og/eller sandblæsning.

Lagtykkelse, μm	Anbefalet siliciumindhold	Grænseværdi Silicium
Fe/Zn 115	0,18	0,15-0,21
Fe/Zn 165	0,25	0,22-0,28
Fe/Zn 215	0,32	0,29-0,35

Tabelle 8-2. Vejledende og grænseværdier for silicium, hvor højere lagtykkelseslag ønskes.

9. Kvalitet– kontrol, prøvning og udførelse

Normalt er det de laveste kvalitetskrav vedrørende lagtykkelsen og udseende, som angives i standarden DS/EN ISO 1461. For at ovenstående krav skal kunne overholdes, skal kunden give varmforzinkeren oplysninger om stål kvalitet og ønsket lagtykkelsesklasse efter standarden (se billede 8-1).

Kunden skal, også ved varmforzinkerens hjælp, vejledes i konstruktionsudformningen for at få det bedst mulige varmforzinkningsresultat.

9.1 Branchestandarder

Nordic Galvanizers har i samarbejde med varmforzinkerne, bistået af Force, udarbejdet en række tekniske vejledninger for bl.a.:

- Måling af zinklagtykkelser
- Valg af stål til varmforzinkning
- Reparation af skader i zinkbelægninger

I branchevejledningen "Måling af zinklagtykkelser" findes der anvisninger for, hvordan lokal- og middellagtykkelser skal måles. Særlig lokallagtykkelse udføres ofte forkert, da man tror, at nogle få målinger udgør den lokale værdi. I stedet skal et begrænset prøvningsområde defineres, hvor tre eller fem målinger udføres. Middelværdien af disse enkelte målinger udgør den lokale lagtykkelseværdi. Middelværdien af tre eller fem testområder udgør siden middellagtykkelsen.

Branchevejledningerne kan rekvireres hos Nordic Galvanizers.

Ovenstående vejledninger samt kvalitetssikringen ligger til grund for den kontrol og prøvning, som udføres hos varmforzinkeren.

9.2 Lagtykkelse

Til kontrol af lagtykkelse på stykvis varmforzinkede emner anvendes den magnetiske metode, som er hurtig og let at udføre, uden at beskadige emnet. På billede 9-1 vises det instrument, der oftest anvendes.

9.3 Udseende

Man kan stille forskellige krav til det varmforzinkede materiales overflade. At den er jævn og fri for synlige fejl som blærer, spidser, zinkaske, flusmiddel og ubelagte områder. Klumper, dråber og tykke løbere af zink må ikke forekomme i et sådant omfang, at de forstyr-



Billede 9-1. Måling af lagtykkelse.

rer konstruktionens funktion. Det belagte emne skal være rent og fri for skader.

Eftersom overfladens udseende er afhængig af kundens valg af siliciumindhold, kan overfladen bestå af mørkegrå områder, celleformede mønstre af grå linjer mellem lyse områder eller blanke, sølvfarvede områder. Da udseendet er afhængigt af både kundens og varmforzinkerens håndtering, kan der opstå afvigelser ved varmforzinkning. Der er vigtigt, at kunden og varmforzinkerer er enige om funktionskravene.

Stilles der særlige krav til belægningens udseende, jævnhed eller materialets funktion efter varmforzinkningen, skal det drøftes parterne imellem på tilbudsstadiet. Ved at anvende DS/EN ISO 1461 kan kravene defineres allerede fra starten.

9.4 Vedhæftning

Det, der normalt regnes som belægningens vedhæftning, er evnen til at modstå mekanisk påvirkning f.eks. bukning, vridning, slag osv. Disse egenskaber har stor betydning for tråd og tyndplade, men i mindre grad for stykvis forzinkede materialer.

Zinklagets opbygning medfører, at nogle belægninger tåler større mekanisk belastning end andre. I DS/EN ISO 1461 afsnit 6.4 omtales de krav, man normalt kan forvente til vedhæftning på varmforzinkning.

9.5 Forholdsregler ved afvigelse

Afhængig af den eventuelle afvigelse ved varmforzinkningen, skal der træffes foranstaltninger. Ved ubelagte

overflader over 0,5% eller over 10 cm², skal det efter standarden omforzinkes, hvis ikke andet er aftalt med ordregiver.

Når zinkoverfladens glathed bedømmes, må man gøre sig klart, at varmforzinkning indebærer dypning i en metalsmelte, og at det smeltede zink skal løbe af, når konstruktionen tages op af badet. Konstruktionens forskellige dele får også kortere eller længere tid i zinkbadet, hvilket ses ved varierende værdier på zinklagets tykkelse.

Hvidrust og en del ujævnheder er ikke fejl og berettiger således ikke til reklamation, da disse ofte skyldes håndtering efter konstruktionen har forladt varmforzinkeren. Hvidrust behøver som regel ikke behandles, da den forsvinder ved udendørs eksponering. Hvidrust er ikke kassationsgrundlag i henhold til DS/EN ISO 1461.

Små ujævnheder, som ikke er til gene for funktionen eller skæmmes udseendet alvorligt, bør ikke pudses af. Afrensning med fil og slibning gør ofte større skade end gavn.

Ved svejsning af varmforzinket stål bliver selve svejsningen ubehandlet. På begge sider af svejsningen ødelægges desuden en del af belægningen.

9.6 Forholdsregler ved skader – reparation

Skulle skader forekomme, skal disse repareres så korrosionsbeskyttelsen bliver mindst lige så god, som den ikke skadede overflade. For at få en sådan korrosionsbeskyttelse, er rengøring af den skadede overflade meget vigtig.

Hvis f.eks. zinken skaller af, plejer gamma- og deltaget oftest at være tilbage på ståloverfladen med et zinklag på 5-10 mikrometer. Da behøver man kun en lettere stålbørstning med en rustfri stålbørste for at fjerne eventuelle korrosionsprodukter. Derefter males skadestedet med zinkrig maling, oftest kaldt "koldgalvanisering". Bemærk, at spraymaling giver begrænset lagtykkelse, og derfor skal reparationen gentages et antal gange. Maling med pensel giver et tykkere lag. Måling skal foretages for at se, om zinklaget har opnået nominel værdi på 100 mikrometer.

Ved gennemslibning, repareres skaden på den samme måde.

Bedømmes det, at skadeoverfladen er for svær at få ren, bør den slibes eller sandblæses.

Ved rengøring skal løstsiddende zink i overgangen mellem det intakte zinklag og skaden fjernes. Ellers "rejser" denne zink sig specielt ved reparation med metallisering.

Opdages skader i forbindelse med varmforzinkningsprocessen, og mens stålet er varmt, er reparation med loddezink en god reparationsmetode. Sorte pletter kan repareres med slibning og brug af loddezink.

Ved duplexbehandling er det meget vigtigt, at reparationen sker professionelt. Overgange mellem skadestedet og den fejlfri zinkoverflade bør være ren og jævn, da "kanteffekter" forstærkes ved efterfølgende maling.

Reparation af svejseoverflader bør udføres hurtigst muligt, da de ellers rust. Den bedste måde at reparere på er at rengøre overfladen med en rustfri stålbørste og derefter male med zinkrig maling.

Er det opstået rød rust på overfladen, skal den slibes eller sandblæses før maling. For videre oplysninger, se branchestandarden "Efterbearbejdning".

9.7 Approved Galvanizer – til byggeprodukter

Ved at vælge en Approved Galvanizer sikres det, at kvaliteten og systematikken i forbindelse med varmforzinkningen er på det rette niveau til bærende konstruktionsdele, der skal CE-mærkes af konstruktionsproducenten. Virksomheder med ret til at kalde sig Approved Galvanizer har gennemgået en certificering, der er tilpasset til varmforzinkningsindustrien, og har bl.a. vist, at man overholder standarderne: (relevante dele)

EN ISO 1461
EN ISO 14713-2
EN 1090-2 (relevante dele)



Approved Galvanizer er udviklet af Nordic Galvanizers sammen med kunderepræsentanter og brancheorganisationen MVR samt certificeringsorganet Nordcert for at gøre det let og sikkert for producenter af stålkonstruktioner at vælge varmforzinkning som korrosionsbeskyttelse.

10. Zinkbelægningskorrosion

Stål er vor tids mest anvendte materiale. Desværre har stål en stor ulempe og det er dets høje korrosionshastighed. At beskytte materialer og konstruktioner af stål er derfor af stor værdi.

Den bedste korrosionsbeskyttelse opnås med zink. Zinkbelægningen på stål beskytter mod korrosion på to måder:

- Som barriere, dvs. forhindrer oxygen og fugt i at trænge ind til ståloverfladen
- Ved at give katodisk beskyttelse i ridser, slagmærker, klippekanter osv.

Zink er et uædelt metal med stor korrosionstilbøjelighed. At korrosionshastigheden trods alt er lav i de fleste miljøer skyldes, at metallets overflade hurtigt bliver dækket af korrosionsprodukter, som yder beskyttelse mod videre korrosion.

10.1 Korrosion i atmosfæren

Når en varmforzinket konstruktion tages op af zinkbadet, angribes overfladen omgående af luftens ilt og danner zinkoxid. Luftens indhold af vand og kuldioxid ændrer hurtigt laget til basiske zinkkarbonater. Men luften indeholder også svovldioxid, som omdanner det basiske zinkkarbonat til mere letopløseligt zinksulfid og zinksulfat. Luftens indhold af svovldioxid er dog mindsket kraftigt de seneste år (billede 1-2), og dermed også zinkens korrosionshastighed.

Atmosfærens indhold af svovldioxid påvirker således korrosionshastigheden, og derfor er korrosionen højere i industriatmosfære end i by- og landsbymiljø. Eksponeringsvinklen er af betydning i alle miljøer. Korrosionen er højere på en horisontal overflade end på en vertikal. Overflader, der befinder sig i læ, korroderer mindre end ubeskyttede overflader.

Zinklag, som eksponeres nogle måneder i atmosfæren, får en mat, lysegrå kulør (billede 10-1).

I havmiljø påvirkes zinkens korrosion af luftens saltindhold. I havluft findes små mængder af magnesiumsalte med en god passiverende virkning, og korrosionen er derfor ikke så stor, som man kunne forestille sig. Saltindholdet aftager jo længere man kommer ind i landet.



Billede 10-1. Eksponeret overflade af en zinkbelægning med et ydre lag af ren zink. Den blanke overflade er erstattet af et gråt korrosionsprodukt, sommetider kaldet zinkpatina.

Zinkens korrosion påvirkes altså af mange faktorer. En universel formel for korrosionshastighed kan man ikke opstille. Mange års erfaring og et utal af langtidsforsøg med zink som rustbeskyttelse, har givet et godt kendskab til zinkens korrosion og korrosionshastighed i forskellige miljøer. Vi har i dag eksempler på zinkbelægnings, som er eksponeret i over hundrede år.

10.1.1 Rødbrun misfarvning

Siliciumberoligede stål, som har en stor andel jern-zink-fase i zinklaget, kan efter en tids eksponering få en rødbrun farve, som med tiden bliver mørkere. Når jernzink-legeringen korroderer, frigøres der jern, der sammen med luftens fugtighed eller regn danner rust. Rusten kan, selv ved små mængder, give en kraftig misfarvning (billede 10-2).

Er misfarvningen meget kraftig, kan man få det indtryk, at rustbeskyttelsen er meget nedsat eller ophørt. Dette er dog sjældent tilfældet. Jernzink-legeringen beskytter det underliggende stål bedre mod korrosion – op til 30% – i forhold til den beskyttelse, ren zink giver. De misfarvede overflader kan med fordel males, hvis det kræves af hensyn til udseendet.

En misfarvet lysmast, der var eksponeret i 30 år, havde ved en undersøgelse ca. 70 mikrometer zink tilbage – tilstrækkeligt for yderligere 50 års levetid.



Billede 10-2. Rødbrun misfarvning.

10.2 Korrosion i væsker

Når en forzinket konstruktion nedsænkes i en væske, dannes der, som ved eksponering i luft, et beskyttende lag af korrosionsprodukter. Væske kan være sur eller alkalisk og indeholde løse eller faste aggressive emner. Væskens strømningshastighed og temperatur har også betydning. Tilsammen kan disse faktorer medføre, at beskyttelseslaget får en meget varieret sammensætning eller at det ikke dannes overhovedet.

Den elektrokemiske korrosion, som i luft spiller en underordnet rolle, har stor betydning i væsker, og sker over et større eller mindre område, afhængig af væskens ledningsevne og zinklagets beskyttende virkning.

Størst betydning har væskens pH-værdi. Zinkens korrosionshastighed er normalt relativ lav og stabil i pH-området 5,5-12,5 (evt. grafisk visning) og ved temperaturer mellem 0 °C og 20 °C. Hårdt vand, som indeholder kalk og magnesium, er ikke særlig aggressivt. Stofferne danner sammen med kulsyre svært opløselige karbonater på zinkoverfladen og giver et stabilt beskyttelseslag, der forhindrer yderligere korrosion.

Blødt vand angriber ofte zink, idet beskyttelseslaget ikke dannes på grund af manglende salte. I sjældne tilfælde kan der også ske en polaritetsbytning mellem zink og stål, så stålet bliver anode (opløsningspol) i elementet med risiko for punktkorrosion. Polaritetsbytning modvirkes af kulsyre, sulfater og klorider og

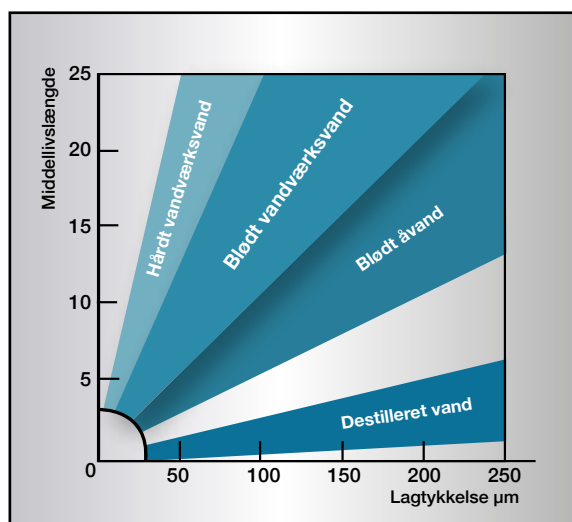
sker derfor ikke i f.eks. havvand, men kan derimod forekomme i meget rent vand (f.eks. kondensvand). Aggressivt blødt vand findes i visse floder og søer i Finland, Norge og Sverige.

Ved strømningshastigheder over 0,5 m/s forhindres dannelsen af beskyttelseslaget på zinkoverfladen, og korrosionen bliver hurtigere.

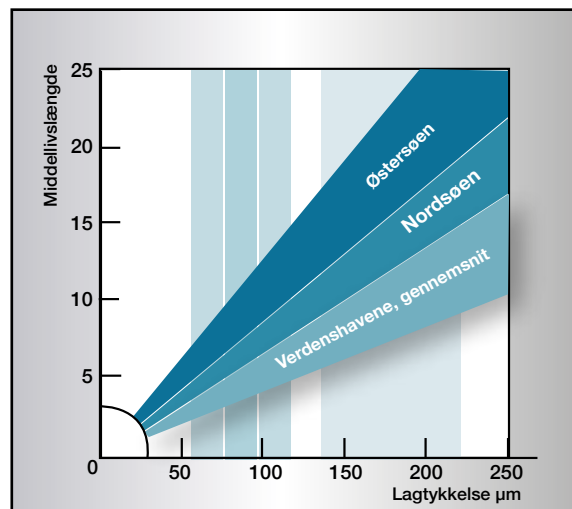
I vand har temperaturen stor betydning for korrosionshastigheden. Ved mere end 55 °C får korrosionsprodukterne en grovkornet struktur på overfladen og mister vedhæftningen til zinkoverfladen. De falder let af og bløtlægger ny, frisk zink, som igen angribes meget hurtigt.

Korrosionshastigheden opnår et maksimum ved ca. 70 °C for senere at synke, så den ved 100 °C er af samme størrelsesorden som ved 50 °C.

Som det fremgår, er korrosionsforløbet i vand meget komplekst og universelle regler er svære at give. Billede 10-3 angiver praktiske erfaringer og retningsværdier for forskellige vandtyper. For yderligere information se referencer (17,18,19,20)



Billede 10-3. Forholdet mellem zinklagets tykkelse og belægningsens middellivslængde i forskellige typer vand.



10.2.1 Hvidrust

Til tider opstår en hvid, melet og voluminøs belægning kaldet hvidrust på den forzinkede overflade (billede 10-4). Belægningen kan opstå på nyforzinkede blanke overflader, som ligger tæt sammen og udsættes for kondens eller regnvand, uden mulighed for efterfølgende hurtig tørring.

Dette kan forekomme, når spalter dannes, f.eks. mellem konstruktionsflader eller mellem tætpakkede plader.

Materialeoverflader, som har god luftgennemstrømning og har opbygget et normalt beskyttelseslag af korrosionsprodukter, angribes sjældent. Angrebet stopper, når der er fri luftgennemgang. Tilbageværende hvidrust slides langsomt væk af vind og vejr. Zinkoverfladen får atter et normalt varmforzinket udseende.

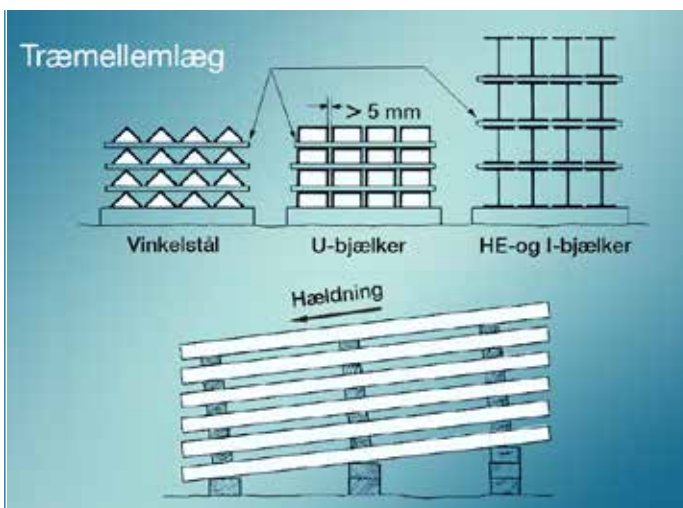
Da hvidrust har en meget stor volumen, ca. 500 gange større end den renzink, den dannes af, kan et angreb forekomme alvorligt. Ofte har angrebet imidlertid kun lille eller ingen betydning for korrosionsbeskyttelsens levetid. På meget tynde belægninger, som f.eks. el-forzinkede emner, kan et kraftigt angreb dog være alvorligt.

Hvidrust undgås bedst, hvis de forzinkede flader ved lagring og transport forhindres i at komme i kontakt med regn- eller kondensvand. Materialer, der opbevares udendørs, bør lægges, så vandet frit kan løbe af, og lufttilgangen er fri til alle flader (billede 10-5).

Hvidrust kan, helt eller delvist, fjernes ved forsigtig mekanisk eller kemisk behandling. Varmforzinkningsstandarden DS/EN ISO 1461 godtager ikke hvidrust som kassationsgrundlag.



Billede 10-4. Hvidrust dannet mellem sammenlagte materialer.



Billede 10-5. For at undgå hvidrust, bør materialerne lagres, så vandsamlinger undgås og med mellemlag, så fladerne holdes adskilt.

10.3 Korrosion i jord

Korrosionsforholdene i jord er meget komplicerede, og variationerne kan være meget store indenfor små afstande. Den danske jord er i almindelighed ikke særlig aggressiv, men der er store variationer, hvorfor man må vurdere forholdene fra sted til sted, baseret på lokale jordbundsforhold (billede 10-6). Middelkorrosionen for zink plejer at være 5 mikrometer pr år.

En metode til at bestemme jordens korrosivitet er at måle dens specifikke modstand (billede 10-7). Kan jordens specifikke modstand ikke bestemmes, giver billede 10-6 en vis vejledning. Det er tilrådeligt at søge ekspertbistand i spørgsmål om metallers eksponering i jord.

Jordart	Aggressivitet
Kalk, kalkmergel, moræne, sandmergel	Lille
Sand, grus, ler, tørv, mosejord	Svag
Humusrig jord	Stor

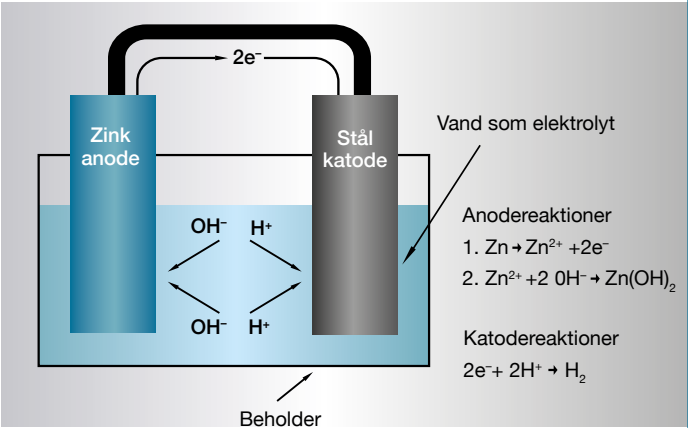
Billede 10-6. Forskellige jordarters korrosivitet.

10.4 Galvanisk korrosion

Hvis to forskellige metaller eller legeringer, som helt eller delvist er omgivet af en elektrolyt, kobles sammen, opstår der en galvanisk celle. Hvilket af metallerne, der bliver anode eller katode, bestemmes af deres elektro-

depotentiale i elektrolytten. I havvand, som modsvarer de fleste praktiske forhold, indtager et udpluk af forskellige metaller og legeringer pladserne i spændingsrækken, som angivet ved billede 10-10.

Hvis stål kobles sammen med kobber eller messing, bliver stålet anode i elementet og korroderer. Kobles stål derimod sammen med cadmium, aluminium, zink eller magnesium, bliver stålet katode i elementet og beskyttes, mens anodemetallet forbruges (billede 10-9). Galvanisk korrosion kaldes også bimetalkorrosion og anvendes til at beskytte konstruktioner i vand mod korrosion under benævnelsen katodisk beskyttelse.



Billede 10-8. Galvanisk korrosion af zink i kontakt med stål.



Billede 10-10. Galvanisk spændingsrække i havvand ved + 25 °C.

Nr	Aggressivitet	Jordtilstand	Specifik modstand i ohm	Beskyttelsesmetode
1	Lille	Tør	> 100	Varmforzinkning > 200 µm
2	Lille	Fugtig	> 450	Varmforzinkning > 200 µm
3	Svag	Tør	< 100	Varmforzinkning > 200 µm samt et tillæg på grundmaterialet på 0,5 mm på hver side
4	Svag	Fugtig	150 - 450	Som under pkt. 3
5	Stor	Fugtig	50 - 150	Varmforzinkning > 200 µm samt et tillæg på hver side på 1 mm
6	Meget stor	Fugtig eller hvis svovl-syre kan dannes	< 50 - 100	Som under pkt 5, men med 1500 mikrometer maling

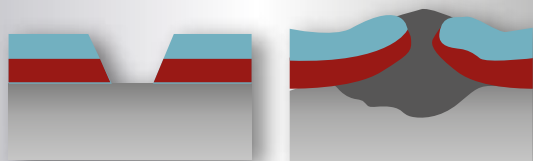
Billede 10-7. Jordaggressivitet ved forskellig specifik modstand, samt forslag til velegnet korrosionsbeskyttelse.

Belægning med zink



En galvanisk celle dannes. Zinken i kanten af skaden korroderer. Korrosionsproduktet udfældes og beskytter skaden. Stålet beskyttes også ved, at det er katodisk i forhold til zinkbelægningen.

Belægning med maling



Stålet rustner, hvor malingen er beskadiget. Rusten kryber under malingen som løftes fri af ståloverfladen. Korrosionen fortsætter, til skaden reparerer.

Belægning med ædlere metal end stål



Belægningsmetaller ædlere end stål, f.eks. nikkel, krom og kobber giver anledning til hurtig korrosion i en skade, end hvis stålet var ubelagt. Korrosionen sker ofte i form af punkttæring, som til og med kan gå igennem stålet.

Billede 10-9. Skematisk afbildning af følgevirkningerne af skader i forskellige rustbeskyttelsesbelægninger.

10.4.1 Zinkbelægningens katodiske beskyttelse

I varmforzinket stål står zink og stål i god elektrisk kontakt med hinanden. Skades zinkbelægningen, opstår der, hvis der er en elektrolyt til stede, en galvanisk celle. I cellen bliver zinken anode (opløsningspol) og korroderer. Det frilagte stål bliver katode og beskyttes mod korrosion.

I begyndelsesfasen kan man ofte se en svag rustdan-

nelse på den frilagte ståloverflade. Zinkbelægningen korroderer og svært opløselige zinkforbindelser udfældes på overfladen og beskytter stålet mod fortsat angreb (billede 10-10). Dette omtales ofte som "at zinken er selvhelende", hvilket dog ikke er korrekt, da zinklaget ikke gendannes. Takket være den katodiske beskyttelse, som zinken genererer, sker der ingen underrust af zinkbelægninger, som det kendes under malinger eller belægninger af ædlere metaller (billede 10-11).



Billede 10-11. Et 6 mm bredt fræset spor gennem en 60 µm tyk zinkbelægning på stål og eksponeret i 5 år i svært industrimiljø i Holland. Bemærk, belægningen af zinksalte i sporet og uden nogen tegn på rustgennemslag.

I vand og nedgravet i jord skal der altid anvendes fraisolering, da der ikke må være metallisk kontakt mellem zink og de mere ædle metaller, hvis man skal undgå galvanisk korrosion på zink. Der må heller ikke være indirekte metallisk kontakt via andre konstruktionsdele.

I vand og jord har arealforholdet mellem anodeflade (det uædle, korroderende metal) og katodeflade afgørende betydning for, hvor kraftig den galvaniske korkorrosion bliver. Mest ugunstig er et stort katodeareal i forhold til et lille anodeareal.

Kobber og kobberlegeringer er mere ædle end zink, og zinken vil derfor blive udsat for galvanisk korrosion ved kontakt med kobber. På zinkoverfladerne op mod kobberlegeringen vil der ske en fældning af kobberioner, der forstærker den galvaniske korrosion. Af samme årsag bør man ikke anvende kobber eller kobberlegeringer, hvor regnvand kan løbe fra kobberoverflader og ud på zink. Regnvandet vil indeholde lidt opløst kobber, der fældes som små mikroskopiske kobberpartikler på zinkoverfladen, der herved udsættes for galvanisk korrosion.

10.4.2 Galvanisk korrosion af forzinket stål i kontakt med indstøbt armering

Hvis varmforzinket stål kommer i kontakt med armeringsstål indstøbt i beton, og der er en elektrolyt i tilslutning til det varmforzinkede stål, kan der opstå en galvanisk korrosionscelle. Man er blevet opmærksom på dette problem inden for vej anlæg, hvor varmforzinkede pæle er kommet i kontakt med broarmering, og i staldmiljøer, hvor der er skabt kontakt for at potentialudlignende bygningen.

Når almindeligt armeringsjern af kulstofstål støbes ind i beton, bliver det passiveret (ædelt), hvilket betyder, at det får samme korrosionspotentiale som rustfrit stål. Hvis staldinventaret, der normalt er varmforzinket, forbindes med den indstøbte armering, dannes der en galvanisk celle, hvor der i nogle tilfælde er set meget hurtige korrosionsforløb hos zinken.

Når zinken er korroderet væk, fortsætter angrebet på det underliggende stål, hvilket betyder, at pæle og lister efterhånden bortkorroderer. Det skyldes, at stålet i inventaret har et korrosionspotentiale, der er betydeligt mere negativt (uædelt) i væske, gødning eller fugtig strøelse end passiveret indstøbt stål.

Selvom det er samme type stål, medfører de forskellige miljøer, som materialet anvendes i, at det indstøbte stål bliver katoden og det fugtekspoonerede stål anoden i den galvaniske celle.

Ved galvanisk korrosion spiller størrelsen på katodens (ædlere metal) og anoden (uædlere metal) en vigtig rolle. I dette tilfælde har armeringsmåtten (katoden) en stor volumen i forhold til det varmforzinkede stål, hvis anodeoverflade kun består af det/de lokale mindre områder, hvor elektrolytten har kontakt med metallet. Dette ulige størrelsesforhold bidrager yderligere til det accelererede korrosionsforløb.

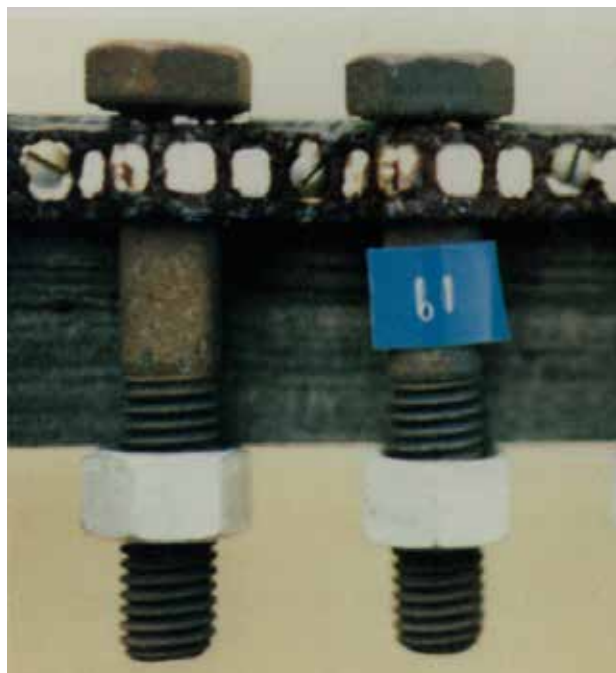
Korrosionsangrebene ses f.eks. på inventardele i boksenes underdele, der kommer i kontakt med urin og gødning, eller i forbindelse med dyrenes drikkekar. Diverse faktorer afgør, hvor hurtigt korrosionsforløbet sker. Forholdet mellem tør og våd tid for de udsatte overflader, strøelsestype, dyrenes adfærd og opstaldningssystem (bås/boks/løsdrift) påvirker korrosionsforløbet. Generelt kan man sige, at strøelse med stor sugsevne normalt giver et tørrere miljø og reducerer risikoen for accelererede korrosionsforløb.

Inden for vej anlæg sker den galvaniske korrosion i bunden af pælene, hvor der forekommer elektrolytter i form af regnvand, snesjap og vejsalt.

For at afbryde korrosionen skal enten kontakten mellem det varmforzinkede stål og den indstøbte armering eller kontakten mellem det varmforzinkede stål og elektrolytten afbrydes. Sidstnævnte kan f.eks. ske med konstruktionsændringer eller isolering med maling eller andet materiale, der påføres på de udsatte områder af det varmforzinkede stål.

10.4.3 Zinkbelægninger i kontakt med andre metaller end stål

Som det fremgår af billede 10-8, er zink elektrokemisk uædel i forhold til de fleste andre brugsmetaller, hvilket betyder, at zink beskytter disse mod korrosion ved offervirkning. Dette svarer til, at zinken udsættes for galvanisk korrosion. Man skal i videst muligt omfang



Billede 10-12. Varmforzinkede skruer med syrefaste møtrikker. Efter 15 års exponering i et maritimt miljø er der ingen galvanisk korrosion.



Billede 10-13. Messingskrue i varmforzinket plade angriber zinken.

undgå sådanne koblinger. I luft kan der opnås en god beskyttelse ved at anvende ikke ledende mellemlag af plast eller gummi.

I nogelunde tørre miljøer, kan aluminium og rustfrit stål ofte direkte sammensættes med forzinket materiale, uden der opstår mærkbar korrosion (se billede 10-12). I vand og nedgravet i jord skal der altid anvendes fraisolering, da der ikke må være metallisk kontakt mellem zink og de mere ædle metaller, hvis man skal undgå galvanisk korrosion på zink. Der må heller ikke være indirekte metallisk kontakt via andre konstruktionsdele.

I vand og jord har arealforholdet mellem anodeflade (det uædle, korroderende metal) og katodeflade afgørende betydning for, hvor kraftig den galvaniske korrosion bliver. Mest ugunstig er et stort katodeareal

i forhold til et lille anodeareal.

Kobber og kobberlegeringer er mere ædle end zink, og zinken vil derfor blive udsat for galvanisk korrosion ved kontakt med kobber. På zinkoverfladerne op mod kobberlegeringen vil der ske en fældning af kobberioner, der forstærker den galvaniske korrosion. Af samme årsag bør man ikke anvende kobber eller kobberlegeringer, hvor regnvand kan løbe fra kobberoverflader og ud på zink. Regnvandet vil indeholde lidt opløst kobber, der fældes som små mikroskopiske kobberpartikler på zinkoverfladen, der herved udsættes for galvanisk korrosion.

10.5 Varmforzinkede materialer i kontakt med bygningsmaterialer

Armeret beton er et betydeligt materiale i nutidens konstruktioner. Motorvejsbroer, parkeringshuse, kontorbygninger, tunneler m.m. er alle konstruerede for at drage fordele af armeret beton.

I mange tilfælde behøver armeringen ikke nogen ekstra korrosionsbeskyttelse for at undgå rustangreb. Det høje alkaliske miljø i beton giver en tynd oxidfilm på stålet, som "passiverer" eller beskytter stålet mod yderligere korrosion.

Imidlertid sker det ofte, at denne "passivering" ikke virker eller virker dårligt.

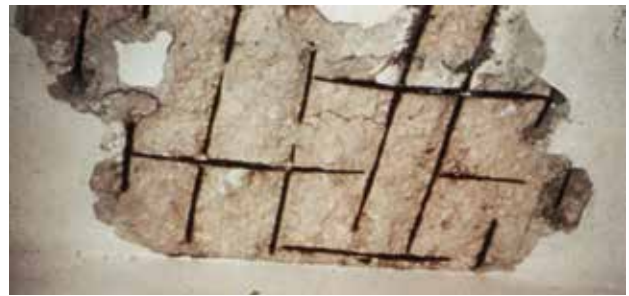
F.eks. hvis:

- Betonen har sprækker, spaltninger, sandlommer eller tyndt dækningslag
- Neutralisering af alkaliteten er sket
- Klorid-indtrængning sker (saltning eller maritim atmosfære)

Frem for alt gælder dette "overfladearmeringen". Skader på armeret beton er øget blandt andet pga. øget saltning eller luftforureninger. Derfor bruges i dag udtrykket "betoncancer". Skader på forskellige betonkonstruktioner forekommer oftere end man tidligere troede (billede 10-14). Når korrosionen er indtruffet ved armeringen, er den meget svær, og kostbar, at reparere. Behovet for at beskytte armering bliver mere og mere nødvendig for visse applikationer.

10.5.1 Korrosionsbeskyttelse for armeringsstål

Varmforzinkningens mulighed for at beskytte armeringen fra korrosion bekræftes gennem praktisk anvendelse i mange lande. Mange fine bygningskonstruktioner har varmforzinket armering, netop for at undgå sprængninger med omkostningstunge vedligeholdelser til følge. Den sikkerhedsrisiko, som nedfaldende beton kan udgøre, frem for alt i tæt bebyggede områder, bør også påpeges.



Billede 10-14. Afskalning af dæklaget over armeringsstålet på grund af armeringsstålets korrosion.



Billede 10-15. Varmforzinket armering i en bro.

Af en eller anden årsag får varmforzinkere ofte ordre på at undlade zinkbelægning på den del, der skal støbes ind i beton. Udover at dette er helt unødvendigt, er omkostningen ofte højere for delvis varmforzinkning end for normal behandling. En af årsagerne kan være, at der tidligere har været en opfattelse af, at vedhæftningen mellem den varmforzinkede overflade og betonen skulle være dårlig. Omhyggelig prøvning har dog vist, at vedhæftning mellem zink og beton, i de fleste tilfælde, er så god, at en mukkert må tages i brug for at skille dem ad (21).

I mange år har man anvendt zink som offeranode for at beskytte skibe, havneanlæg, cisterner mm. mod korrosion. Af tilgængelige metalliske belægninger har varmforzinkede belægninger vist sig at være den mest holdbare, og teknisk fordelagtige. Varmforzinkningen af armeringsstål, som anvendes i beton, har været brugt i mange år over hele verden. Selv ved meget vanskelige forhold har denne overfladebehandling vist sig at være pålidelig.

Detaljerede undersøgelser, bl.a. i Australien og frem for alt på Korrosionsinstitutet i Stockholm, har vist, at varmforzinkning giver følgende fordele: (21)

- Korrosion sker kun 36 timer efter indstøbning og zinktabet er lavt (2-5 μm)
- Zinken giver en katodisk beskyttelse på eksponeret stål, hvilket er en fordel ved afklipning, svejsning eller mekanisk skade på armeringen
- Vedhæftningen mellem armeringsstålet og betonen er god
- Betonsprængning sker ikke
- Risikoen for rustafløb på betonen er elimineret
- Armeret beton oftere kan anvendes i mere aggressive miljøer
- Varierende betonkvalitet, f.eks. dårlig komprimering, kan lettere tolereres
- Tyndere dæklag kan anvendes

10.5.2 Varmforzinket armering i kloridmiljø

Praktisk udførte forsøg på Korrosionsinstituttet viser, at zink klarer sig meget godt i kloridindholdigt miljø. Op til 1,5% klorid i betonen giver ubetydelig korrosion på zinken, mens det ubehandlede jern har betydeligt sværere ved at klare denne koncentration. Zink modstår selv højere kloridindhold betydeligt bedre end jern, men levetiden mindskes. Ubehandlet jern (stål) giver desuden alment korrosion og punktkorrosion. Dette er ikke påvist ved varmforzinket armeringsstål.

Selv i karbonatiseret beton klarer forzinket stål sig bedre end ubehandlet.

Varmforzinket armering er en pålidelig base i god betontechnologi. Den minimerer risici for stålkorrosion og dermed ødelæggelse af betonen, samt giver et stærkt og omkostningseffektivt bidrag til betonens levetid.

Når omkostningerne og konsekvenserne for en korrosionsskade på en udsat bygning er blevet analyseret, er den ekstraomkostning, som varmforzinkningen indebærer, meget begrænset. Den kan næsten ses som en lav forsikringspræmie, som man kun behøver at betale en gang.

Mens prisen for varmforzinket armeringsstål kan være op til 50% højere end for ubehandlet stål, er denne udgift lille i forhold til den totale bygningsomkostning. Afhængig af byggeriets udformning er meromkostningen ofte en ubetydelig del af totalomkostningen.



Billede 10-16. Leveringsklart varmforzinket materiale.



Billede 10-17. Gods pakket luftigt og stødsikkert.

10.6 Pakning og transport af varmforzinket materiale

Selv om belægningen på varmforzinket materiale tåler en ret hård behandling bør materialet ved levering og lagring håndteres forsvarligt/fornuftigt. Simpel forpakning og bundtning af langt materiale giver ikke bare beskyttelse mod mekaniske skader men ofte også logistikmæssige fordele. Forpakning og bundtning skal dog ske således at hvidrust undgås. Mellemlæg placeres, så materialets flader ventileres, se billede 10-16 og 10-17.

11. Maling af varmforzinket stål – Duplexsystem

Mange undersøgelser har vist, at det såkaldte duplexsystem, dvs. varmforzinkning plus maling (billede 11-1), er den mest økonomiske måde at give stålkonstruktioner en lang levetid på. Varmforzinkning giver i sig selv en god rustbeskyttelse, men i særlig aggressive miljøer kan det til tider være ønskeligt at forstærke belægningen. Duplex kan også være aktuelt, hvis fremtidig vedligeholdelse er vanskelig at udføre, eller hvis zinkbelægningen er tynd som på tyndplader.

Æstetiske ønsker – at give den matgrå zinkoverflade et mere farvefyldt udseende eller modsat gøre konstruktionen mindre iøjnefaldende – kan være en anden årsag. Eksempler på dette er advarsel og advarselsmærkning eller modsætningen – maskering. En yderligere begrundelse er som beskyttelse mod galvanisk korrosion, hvis det varmforzinkede stål skal forbindes med et andet metal, f.eks. kobber.



Billede 11-1. Fyret Pater Noster er en af Sveriges første duplexbehandlede konstruktioner. Den blev varmforzinket i 1868 og derefter malet.

11.1 Levetiden på duplexsystem

Et duplexsystem har som regel meget længere levetid, end belægningerne har hver for sig. Hollandske undersøgelser (22) viser, at levetiden kan beregnes af formelen: $L_T = K(L_{Zn} + L_F)$ hvor

L_T = duplexsystemets levetid

L_{Zn} = zinkbelægningens beregnede levetid i den aktuelle miljø.

L_F = malingbelægningens beregnede levetid i det aktuelle miljø, hvis den påføres direkte på stål

K = miljøafhængig synergifaktor, som kan sættes til:

1,5 når systemet eksponeres i korrosionskategori C5 eller permanent nedsænket i havvand

1,6 – 2,0 ved eksponering i korrosionskategori C3 – C4 eller, når tiden, hvor systemet er vådt, er mere end ca. 60%

2,1 – 2,3 ved eksponering i korrosionskategori C2.

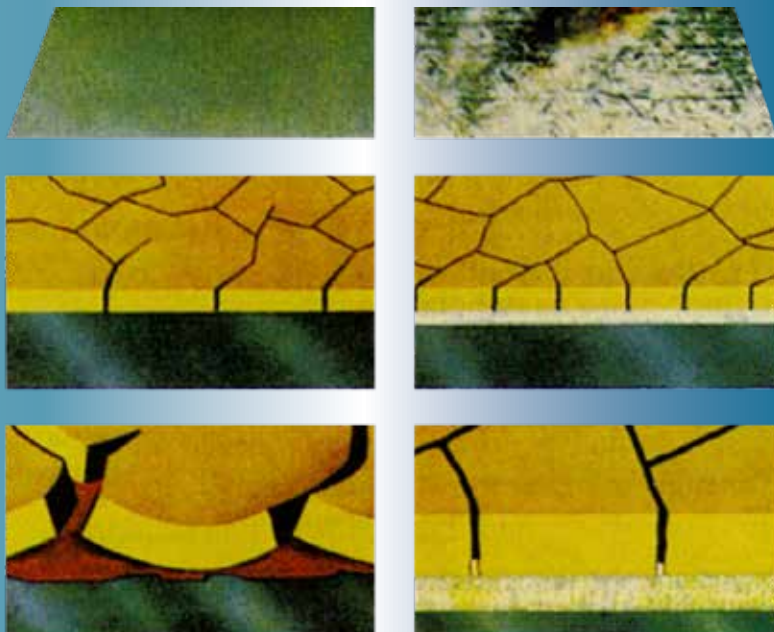
Billede 11-2 viser, hvordan synergieffekten opstår. Forudsætningen er imidlertid, at malingslaget har en god og bestandig vedhæftning til zinkoverfladen. Dette opnås ved at anvende den korrekte type maling på en omhyggeligt rengjort overflade. At male på zink er på mange måder mere krævende end på andre materialer. Små mængder forureninger på overfladen eller forkert type maling kan på kort tid medføre blæredannelse og/eller afskalning (billede 11-3).

Tidligere blev det anbefalet, at zinkoverfladen skulle eksponeres udendørs i 1-2 år, inden den blev malet. Dette var sikkert rigtigt i midten af dette århundrede, hvor luften – i det mindste i de nordiske lande – var temmelig ren, og de korrosionsprodukter, som blev dannet på en zinkoverflade, næsten kun bestod af basiske zinkkarbonater.

Efter en tids eksponering malede man ikke på en reaktiv zinkoverflade, men på et lag af karbonater. Resultatet blev almindeligvis godt, selv ved brug af malinger, som i dag anses for at være uegnede. I dag er denne metode meget usikker.

Dagens atmosfære indeholder mange flere svovlforureninger, og zinkens korrosionsprodukt indeholder vandopløselige zinksalte. Uanset hvilke malingstyper, der påføres på et sådant til dels vandopløseligt lag, vil resultatet blive blæredannelse og afskalning.

For at kunne udføre en tilfredsstillende rengøring, må zinkoverfladens tilstand vurderes.



Billede 11-2. Til venstre: Skematisk tegning, der viser, hvordan mikrorevner i maling på stål forårsager underrust og afskalning. Til højre: Mikrorevner i maling på forzinket materiale fyldes af korrosionsprodukter fra zinken, som har en mindre volume end rust og ikke forårsager afskalning.

11.2 Nyforzinkede, blanke overflader

En blank zinkoverflade anses ofte for tilstrækkelig ren til at male på. I alt for mange tilfælde er dette ikke rigtigt, og resultatet mislykkes.

En nyforzinket overflade er et godt underlag at male på, hvis materialet:

- Ikke er kølet i vand. Kølevandet er sjældent rent. Forskellige salte kan derfor aflejres på zinkoverfladen og siden forringe eller helt ødelægge vedhæftningen af det påførte malingslag
- Ikke lagres i produktionslokalet efter neddykning i zink. Luften i fabrikken indeholder større eller mindre mængder af flusrøg (partikler af zink og ammoniumklorid), som sætter sig på overfladen og giver en vandopløselig film, der ødelægger vedhæftningen mellem zink og maling
- Ikke lagres eller transporteres udendørs i fugtig atmosfære. Risikoen for kondensfugt, som giver hvidrust, er stor, og omfanget af et hvidrustangreb er ikke altid så kraftigt, at det kan ses med det blotte øje
- Ikke lagres mere end 6 timer mellem varmforzinkning og maling. Tiden er naturligvis afhængig af, hvor ren og tør luften er i lagerrummet.

En "fersk" zinkoverflade er altså ikke så ren, som man måske skulle tro. Tynde film af olie og fedtstoffer fra handsker, sko, løftestropper osv. kan desuden for en tid efterlade indtrykket af en blank og ren overflade. De salte, som er nævnt ovenfor, er også i de tynde film, som er aktuelle, gennemsigtige og meget svære at få øje på.

Varmforzinket tyndplade er praktisk taget altid kromatiseret eller olieret for at beskytte mod hvidrust. Kromatlaget er for en større eller mindre del vandopløseligt, og maling på oliefilm lykkes sjældent. Overfladerne skal derfor rengøres inden maling. Kromatering er af miljøhensyn erstattet af polymerer.



Billede 11-3. Maling skaller af pga. fejlagtig behandling før maling (22).

11.3 Eksponerede, matte overflader

Eksponerede, matte zinkoverflader er altid overtrukket med korrosionsprodukter, hvis sammensætning er svær at bestemme. Som tommelfingerregel skal man dog antage, at de indeholder vandopløselige og hygroskopiske salte, og derfor er uegnet som malingsunderlag. Generelt skal der altid rengøres før maling. Malingsfilmen er mere eller mindre vandgennemtrængende, og påføres den en zinkoverflade med vandopløselige salte, betyder det, at der dannes blærer fyldt med saltopløsninger under malingsfilmen. I saltopløsningen

er tilgangen af beskyttelsesfilmdannere dårlig, og zinklaget korroderer. Korrosionsprodukterne spredtes mellem maling og zink, og korrosionsprodukterne presser malingslaget af.

11.4 Rengøring og forbehandling

Erfaringerne viser, at sandsvirpning (let sandblæsning) giver det bedste underlag for maling på zink. Denne lette mekaniske bearbejdning af zinkoverfladen fjerner alle korrosionsprodukter og andre forureninger – selv de vandopløselige – og giver en god vedhæftning. Hvidrust og oliebelægninger fjernes også effektivt.

Mange zinkoverflader er meget blanke og glatte. Her er let sandblæsning også velegnet, da en ru overflade giver en bedre mekanisk forankring for malingen.

Anbefalet data for sandsvirpning af forzinkede overflader gives i billede 11-4. Det er vigtigt, at anvisningerne i denne følges. En dårlig rengøring giver som ævnt et dårligt malingsresultat, men på den anden side kan en for kraftig mekanisk bearbejdning ødelægge zinklaget og opbygge spændinger, som senere kan medføre afskalning af malingen. Ved korrekt udført sandsvirpning regner man med, at ca. 10 µm af zinklaget fjernes.

Yderligere oplysninger gives i Korrosionsinstituttets Håndbog om rustbeskyttelsesmaling (23).

Blæsemiddel	Aluminiumoxid eller korund, silikater, olivin, slagger
Kornstørrelse	0,2-0,5 mm
Mundstykstryk	0,2-0,3 MPa
Mundstykafstand	300-500 mm
Anslagsvinkel	30-60 °
Miljøforhold	20-25 °C, < 50% relativ fugtighed
Overfladeruhed	Fin, ISO 8503,2 (G)
Grundmaling	Senest 20-45 min. efter sandblæsning

Billede 11-4. Blæsedata for sandsvirpning af zinkbelægninger.

Er det ikke muligt at sandsvirpe, anbefales følgende arbejdsgang for industriel lakering:

1. Alkalisk affedtning
2. Omhyggelig afskylning i vand
3. Fosfatering (jern- eller zinkfosfat)
4. Omhyggelig afskylning i vand
5. Tørring
6. Lakering

Noget gods kan være kromateret, i så fald kræves der, udover affedtning, til tider slibning eller behandling med nylonsvamp imprægneret med slibemiddel af aluminiumoxid. Fosfatlaget skal være kontinuerligt og totaldækkende, men så tyndt som muligt. En tykkelse under 1 mikrometer, dvs. 2-4 g/m² anses for optimalt. Ved manuel maling anbefales afvaskning med emulgerende affedtningsmiddel, kombineret med børstning eller slibning med nylonsvamp, og omhyggelig vand-skylning, gerne med højtryksrenser. Da korrosionsprodukternes sammensætning ikke er kendt, er det en fordel at anvende affedtningsmidler tilsat oxidopløsende midler.

11.5 Valg af maling

I forbindelse med farvevalget er det vigtigt at huske, at en farve kan indeholde op til 10-15 forskellige komponenter. Hver producent har sin egen formel på en bestemt farvetype. Råvareleverandørerne har også forskellige opskrifter på deres bindemidler, hvilket betyder, at antallet af varianter bliver meget stort. Farver af samme type, men fra forskellige producenter, kan således i nogle henseender have ret forskellige egenskaber. Det er derfor vigtigt at undersøge med farveproducenten, at grund- og dækfarver matcher hinanden, og aldrig blande grund- og dækfarver fra forskellige producenter.

I tilfælde, hvor varmforzinkede overflader skal males, anbefales det at bruge malingssystemerne i EN ISO 12944-5:2018. Maling af varmforzinket gods er beskrevet i tabel D.1. I denne tabel er angivet egnede malingssystemer til korrosionskategori C2-C5 med forskellige holdbarhedstider. Malingssystemerne har betegnelsen "G".

11.6 Pulverlakering

Forskellige typer pulverlak bliver stadig mere almindeligt på varmforzinket gods. Hvis der stilles ekstra høje krav til overfladefinishen, bliver det varmforzinkede gods i nogle tilfælde slebet helt i bund for at fjerne alle grater og dråber, der kan påvirke udseendet. Dertil kommer, at slibningen giver en meget ren overflade med de bedste forudsætninger for optimal adhæsion. Godset passerer gennem en række forbehandlingsbade før pulverlakeringen. Affedtning, skylning, ætsning, skylning, fosfatering og sealing er eksempler på mulige procestrin. Derefter skal godset tørre. Pulveret påføres elektrostatisk, hvorefter godset transporteres ind i hæardeovnen.

11.6.1 Pinholes

Pinholes er små huller i lakken, der kan variere i størrelse fra små "nålestik" til større porer. Pinholes er primært et æstetisk problem. Korrosionsbeskyttelsen er stadig god pga. zinkens gode beskyttende virkning, men overfladerne kan være mindre tiltalende at se på. Hovedårsagen til dannelse af pinholes er forekomst af fugt og hvidrust på zinkoverfladen, hvilket giver anledning til gasdannelse under hærdeprocessen.

For at forebygge/reducere risikoen for pinholes skal der træffes følgende forholdsregler:

- Zinkoverfladen skal være fri for forureningsstoffer og ujævnheder.
- Undgå at eksponere godset for fugtige miljøer – undgå at der dannes hvidrust.
- Vælg det rigtige stål til varmforzinkning – helst materiale med et lavt siliciumindhold, under 0,03 % – der giver en mere jævn overflade og desuden er mere robust ved sandblæsning.
- Sørg for, at fosfatlaget, der påføres før pulverlakeringen, har nået at tørre ordentligt.
- Forvarm godset.
- Anvend pulver af en særlig "porekvalitet", der modvirker dannelse af pinholes.
- Anvend pulver med lav viskositet, der nemt flyder ud.
- Et tykkere lag pulverlak kan undertiden medføre, at porerne ikke bryder gennem laget og derfor ikke giver synlige defekter.
- Hæv temperaturen langsomt, mens pulverlakken hærder.

11.7 Vigtigt ved duplexbehandling

Varmforzinkerer skal vide på forhånd, om godset skal duplexbehandles, eftersom dette stiller ekstra høje krav til overfladerne. Brug i første omgang stål, der giver et rent zinklag yderst (lavt siliciumindhold), da det bedre tåler sandblæsning. Hvis siliciumholdigt stål allerede er anvendt, skal maleren oplyses om forudsætningerne. Hvis lakeringen udføres af et andet firma end varmforzinkerer, skal det kontrolleres, at firmaet har kompetencen og det rigtige udstyr.



Billede 11-5. "Blå huset" Parkbænk, papirkurv og cykelstativ i pulverlakeret, varmforzinket stål.

12. Lysbuesvejsning af zinkbelagt stål – Punktsvejsning

Zinkbelagt stål kan svejdes uden større problemer med det udstyr og de metoder, der anvendes til sort stål. Data for svejsning af ubelagt materiale kan imidlertid ikke altid anvendes, da zinken har en vis ødelæggende effekt på svejseforløbet, afhængig af belægningens tykkelse, sammensætning og struktur.

I første omgang består problemerne i:

- Øget mængde sprøjt
- Formindsket indtrængning
- Øget porerdannelse i svejsesømmen
- Risiko for interkrystallinsk revnedannelse i svejsesømmen
- Øget røgudvikling

12.1 Sprøjt, indtrængning, porer- og revnedannelser

Elektrodesprøjt er først og fremmest et problem ved MIG-svejsning. Ved svejsning af V-sømsfuger kan sprøjt i visse tilfælde ødelægge buen samt fæste sig i svejsepistolens mundstykke og ødelægge trådmaterialet. Svejestænkene kan endvidere sætte sig fast på overfladen nær svejsestedet og ødelægge udseendet.

Indtrængningen i fugen reduceres, idet zinkbelægningen på fugefladerne forstyrrer buespændingens energibalance, og strømmen reduceres.

Porers dannelse, når fordampet zink og gasser ikke når at forlade smelten, inden den størkner. Ved svejsning med beklædte elektroder er problemet ikke stort. Ved beskyttelsesgassvejsning, og især ved dobbeltsidet K-sømsvejsning, er det ikke usædvanligt, at der opstår en vis porøsitet.

Interkrystallinske revner i svejseområdet, på grund af zinkpenetration, opstår først og fremmest i T-forbindelser. Når der arbejdes med beklædte materialer, skal godstykkelsen være over 13 mm, mens den modsvarende tykkelsesgrænse ved beskyttelsesgassvejsning er 6,5 mm.

12.1.1 Foranstaltninger mod sprøjt, reduceret indtrængning, porer og interkrystallinsk revnedannelse

Problemerne kan let elimineres eller nedbringes til et acceptabelt niveau, hvis en eller flere af følgende foranstaltninger tages i anvendelse:

- Anvend "anti-sprøjt" middel for at forhindre, at dråber sætter sig fast på emnet og i svejse-mundstykket ved beskyttelsesgassvejsning.
- Svejs med afstand mellem fugefladerne på 1,5 mm ved beskyttelsesgassvejsning og 2,5 mm ved svejsning med beklædte elektroder. Dette øger indtrængningen, mindsker antallet af porer, og eliminerer risikoen for interkrystallinsk revnedannelse (zinkpenetration).
- Nedsæt svejsehastigheden. Vip elektroden langs fugen, så der brændes mest muligt zink bort foran smeltebadet. Dette mindsker antallet af porer og risikoen for interkrystallinske revnedannelser.
- Affas den stående plade i T-forbindelse, så der opnås en K- eller ½ V-fuge. Herved elimineres risikoen for interkrystallinsk revnedannelse. Dette gælder i øvrigt uanset om fugefladerne er zinkbelagte eller ej.

12.2 Elektrodevalg

Ved svejsning af T-forbindelser i grove materialer bør man vælge elektroder, der giver lavt siliciumindhold i svejsefugen. Herved mindskes risikoen for interkrystallinsk revnedannelse.

12.3 Røg

Ved svejsning af ubelagt stål opstår der altid røg. Denne røg indeholder varierende mængder af bl.a. jernoxid, ozon, brint, kuloxider, nitrogenoxider og fluorider. Ved svejsning af zinkbelagt stål blandes røgen tillige zinkoxid, som også forekommer ved flammeskæring.

Zinkoxid er en hvid, voluminøs sammensætning, som dannes ved ca. 1.600 °C og er synlig i svejserøgen til forskel fra de tidligere nævnte bestanddele.

12.3.1 Zinkoxidens skadevirkning

Indånding af nydannet zinkoxid kan medføre zinkfeber. Symptomerne ligner influenza og giver feber, kuldegysninger, øget spytdannelse, hovedpine og i svære tilfælde ildebefindende og opkastninger. Zink lagres ikke i kroppen på samme måde som f.eks. bly, cadmium og andre tungmetaller, men afsondres gennem urin og afføring. Symptomerne på zinkfeber forsvinder normalt indenfor nogle timer, og varige følgevirkninger er ikke kendte.

12.3.2 Beskyttelse mod svejserøg

Al svejsning af ubelagte såvel som belagte materialer bør ske med god udsugning af svejserøgen, så svejseren ikke udsættes for risikoen for at indånde røg.

Svejsning udendørs kan som regel ske uden yderligere foranstaltninger mod røg (det anbefales, at der benyttes personlige værnemidler). Manuel lysbuesvejsning

af zinkbelagt stål er behandlet udførligt i litteraturen (24,25).

12.4 Punktsvejsning

De svejsemetoder, der gælder for sort stål, kan også anvendes på forzinket stål. Generelt gælder det, at svejsedata som tid, strømstyrke og elektrodestryk øges i forhold til ubelagt stål, da de må vælges, så zinklaget fortrænges fra svejsestedet. Hvis dette ikke sker, får man kun lodning mellem zinkbelægningerne. På grund af zinkens villighed til at legere med kobber, må elektroderne renses oftere, end når der svejses i ubelagt stål.

Som elektrodemateriale kan anbefales kobber-krom eller kobber-krom-zirkoniumlegeringer. Et godt resultat opnås ved brug af kobberelektroder med hårdmetalspidser. Elektrodespidserne bør være kegleformede med en topvinkel på 120-140°. God køling har meget stor indflydelse på elektrodernes levetid.



13. Boltesamling

At varmforzinke forskellige komponenter hver for sig, og siden hen sammenføje dem med boltesamlinger har flere fordele. Sammenboltede konstruktioner giver mulighed for en 100% varmforzinket konstruktion med en meget lang og vedligeholdelsesfri levetid, og set ud fra et korrosionssynspunkt, uden svage punkter. Ved såvel varmforzinkning som efterfølgende transport opnås meget store fordele, når dette sker med ukomplicerede enkeltkomponenter i stedet for svejste ”halvfabrikata”. Endvidere spares de tidskrævende reparationer af rustbeskyttelsesbelægninger, der ødelægges ved montagesvejsningerne.

De regler, der gælder for styrkeberegning og montering af ubehandlet stål, kan med få undtagelser også anvendes ved varmforzinkede konstruktioner. For at få en ensartet rustbeskyttelse af hele konstruktionen, bør man til sammenbygninger anvende varmforzinkede bolte. Skal boltene have høj forspænding, vokses gevind og anlægsflader på de elementer, som skal drejes ved monteringen.

13.1 Befæstigelselementer

Zinklagets middeldykkelse på lagerførte varmforzinkede bolte og møtrikker med gevind under M10 er ca. 40 mikrometer, og for M10 og derover ca. 60 mikrometer. Møtrikkens gevind er ikke forzinket, men beskyttes af boltens belægning. Lagtykkelse måles ikke i gevind.

Befæstigelselementer op til styrkeklasse 8.8 findes

som lagervarer, og 10.9 kan fås på bestilling. Højere styrkeklasser kan ikke varmforzinkes dels på grund af anløbseffekten og dels på grund af interkrystallinsk revnedannelse.

13.2 Anlægsfladerne

Følgende værdier på friktionskoefficienter for forzinkede overflader er gældende:

- varmforzinkede overflader	0,15
- varmforzinkede og sandblæste overflader	0,35
- sprøjteforzinkede overflader, 50 mikrometer	0,3

Varmforzinkede overflader skal være let stålborstede eller sandblæste. Ved sidstnævnte anvendes samme teknik og blæsedata, som angivet i kapitel 11, Maling af varmforzinket stål – Duplexsystem.

13.3 Hulboring

Ved anvendelse af varmforzinkede bolte skal huldiameteren øges med 0,2 mm. Skal konstruktionen varmforzinkes efter hulboring, øges huldiameteren yderligere med 0,4 mm.

13.4 Montering

Forzinkede bolte i klasse 8.8 spændes med fuld mandkraft med nøglelængde, som angivet i tabel 13-1, eller maskinelt med moment ifølge samme tabel. For bolte i klasse 4.6 mindskes tabellens værdier til det halve.

Skrue-dimension, mm	Trækarm ved manuel tilspænding, mm		Moment ved maskinel tilspænding, Nm	
	Standardskrue klasse 8.8 *	Vokset møtrik **	Standardskrue klasse 8.8 *	Vokset møtrik **
12	150	100	60	40
16	200	150	150	90
20	400	200	300	180
22	550	400	400	240
24	700	500	500	300

Billede 13-1. Trækarm og moment ved normal tilspænding af forzinket skrue i klasse 8.8 (4)

* Møtrikker forudsættes at være behandlet med rustbeskyttelsesolie.

** Der anvendes i dag oftere molybdænsulfid (MSO), hvilket giver nogle andre tilspændingsværdier.

14. Økonomi ved varmforzinkning

At sammenligne omkostningerne for forskellige korrosionsbeskyttelser er ikke let. Der er mange faktorer, der spiller ind, levetid, risiko for skader i overfladebehandlingen, eksponeringsmiljø mv. Zinklagets lange levetid og den mindske risiko, for at småskader skal medføre betydelig nedsat korrosionsbeskyttelse gør desuden, at varmforzinkning i et langt tidsperspektiv næsten altid viser sig billigere end andre metoder for overfladebehandling.

14.1 Initialomkostninger

Mange gange sker valget af korrosionsbeskyttelse kun med indkøbsprisen som udslagsgivende faktor. Dermed er der en overhængende risiko for, at en dårlig korrosionsbeskyttelse vælges, hvilket i fremtiden kan føre til store omkostninger til vedligeholdelsen.

Varmforzinkningsprisen baseres ofte på godsets vægt, medens prisen på maling normalt beregnes ud fra godsets overfladeareal. Relationerne mellem gennemsnitlig godstykkelse og overfladeareal i m^2/ton fremgår af diagrammet i billede 14-2. Et overblik over de relative initialomkostninger for maling og varmforzinkning kan ses i billede 14-3. Oftest plejer valget af korrosionsbeskyttelse at stå mellem varmforzinkning og maling.

14.2 Vedligeholdelsesomkostninger

At vedligeholde en korrosionsbeskyttelse kan koste store summer, specielt når det skal udføres på stedet. Følgende omkostninger kan være aktuelle:

- Fjernelse af den tidligere korrosionbeskyttelse, samt rust
- Opsætning af bygningsstilladser
- Bortskaffelse af den gamle korrosionsbeskyttelse samt deponeringsomkostninger
- Specielle foranstaltninger for svært fremkommelige overflader
- Driftsforstyrrelser og afbrydelsestid
- Påføring af ny korrosionsbeskyttelse
- Transportomkostninger



Billede 14-1. Levetidsomkostningen er af største betydning, når det gælder valg af korrosionsbeskyttelsessystem.

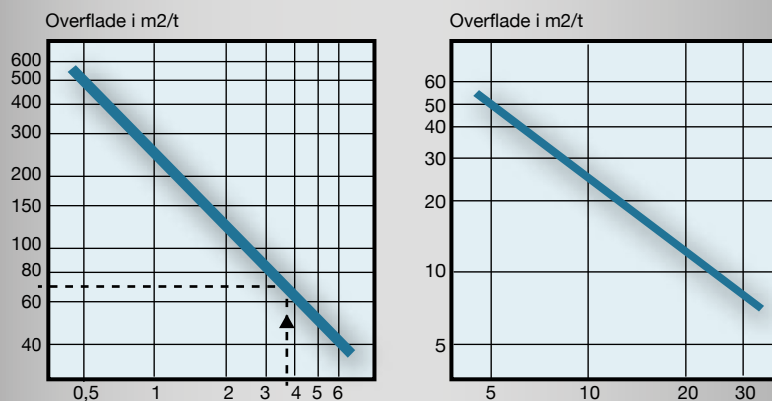
Forsømmelse af vedligeholdelse kan koste endnu mere i form af sekundære skader dvs. følgeskader. Det gælder derfor om at gøre det rigtigt første gang, og dermed mindske eller helt eliminere vedligeholdelsesomkostningerne.

14.3 Levetidsomkostninger

Levetidsomkostningerne er summen af alle omkostninger for en korrosionsbeskyttelse i konstruktionens levetid. Det åbenlyse valg bør være det korrosionsbeskyttelsessystem, der har den laveste levetidsomkostning. At beregne levetidsomkostninger kan være svært uden fuldt kyndigt kendskab. Billede 14-4 giver en god forståelse af denne omkostning, når korrosionsforholdene er iht. korrosionskategori C4 (4).

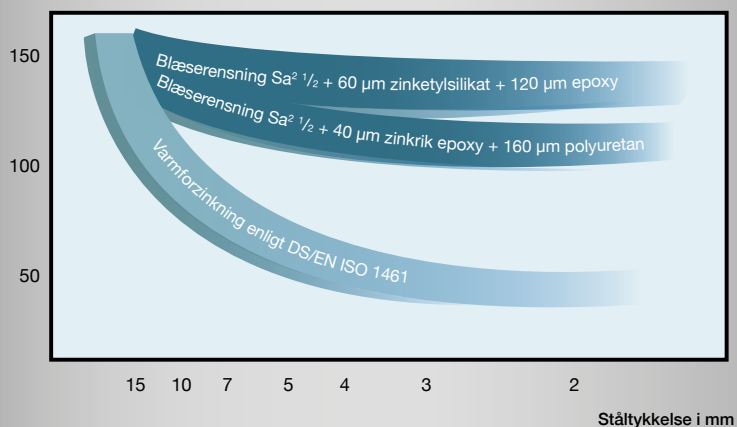
At vælge overfladebehandling med lang levetid, og lave levetidsomkostninger, er at gøre en betydelig indsats for miljøet, eftersom dette sparer på råvarer og energi, samt formindsker kuldioxidudslippet. Den tilbageværende zink er også let at genanvende.

Gennemsnitlig materialetykkelse i mm



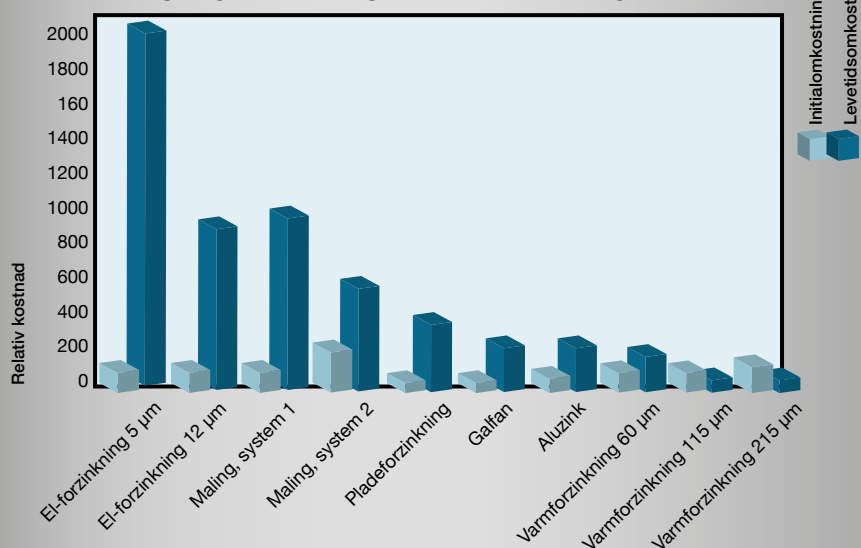
Billede 14-2. Diagram for omregning af godstykkelser til godsoverflade i m²/ton.

Relative omkostninger



Billede 14-3. Prisrelationerne mellem varmforzinkning og malersystem ved forskellige godstykkelser.

Sammenligning af initial- og levetidsomkostninger



Billede 14-4. Relativ sammenligning af initial- og levetidsomkostninger hos forskellige korrosionsbeskyttelser.

15. Zink i miljøet

15.1 Alment

Zink er et lyst, gråblåt, let formbart metal med densiteten $7,14 \text{ g/cm}^3$. Den er en naturlig byggesten i miljøet, og indtager en 24. plads i rangordenen over de emner, der forekommer i jordoverfladen. Middelværdien for zink beregnes til 70 mg/kg . I udvundet form forekommer zink først og fremmest i zinkblende (sphalerit).

Når zink udsættes for fugtig luft, dannes et tyndt lag af hydroxid og karbonat på overfladen. Laget har lav opløselighed i vand og beskytter delvis zinken for videre korrosion. I nutidens høje indhold af svovldioxid dannes zinksulfat på overfladen. Zinksulfatet har høj opløselighed i vand, og vaskes derfor let af, så den ny zinkoverflade udsættes for korrosion. Indholdet af svovldioxid er dog formindsket betydeligt i Europa og Danmark de seneste 20 år, og i dag måles meget lave værdier, se billede 1-2.

Tilstedeværelse af organiske emner danner zinkioner kompleks med bl.a. aminosyrer, peptider, proteiner og nukleotider. Frem for alt thiol- og hydroxylgrupper samt kvælstofflignende viser affinitet (tiltrækningskraft) for zink. Denne tiltrækningskraft til biomolekyler er baggrunden for zinks betydningsfulde rolle som essentielt (livsnødvendigt) mikronæringsmiddel for alle typer af organismer. Man kender til over 300 forskellige enzymer, hvor zink spiller en katalytisk, strukturel eller regulerende rolle. Bl.a. er proteiner med et zinkindhold en hovedfaktor ved regulering af DNA-transkriptionen i cellekernen. Zink indtager også en vigtig rolle i en række andre celfunktioner, f.eks. til at opretholde membraners strukturelle integritet ved hormonreceptor-bindingen og ved overføring af signaler i nervesystemet.

15.2 Zink i organismer

Mennesket behøver 12-15 mg zink pr dag for at opholde kroppens livsnødvendige funktioner samt undgå zinkmangel.

Dette indebærer, at Danmarks befolkning bruger ca. 30 tons zink pr år. Desværre lider mange mennesker i verden af zinkmangel, hvilket hos børn udmønter sig i diarrésygdomme, forringet vækst mv.

Zink bruges i sårsalve, hudcreme, børnepudder, lægemidler, sololie mm. Hos dyr og mennesker er zink betydningsfuld for vigtige hjernefunktioner, immunforsvaret og forplantning.

Zinkmangel hos planter udmønter sig ved betydeligt dårligere vækst. For at modvirke dette, tilsættes tusindvis af tons zink ved gødning af marker. Hos dyr får f.eks. pattegrise zink i foderet for at forbedre immunforsvaret, sårheling, vækst og hud.

I de fleste systemer til at bedømme et emnes miljøfarlighed indgår emnets bioakkumulerbarhed som et centralt kriterium. Dette udtrykkes i almindelighed som emnets biokoncentrationsfaktor (BCF), og bestemmes eksperimentelt med hjælp af vandlevende organismer. Hvis BCF-værdien er over 100, anses emnet for at have et så højt bioakkumuleringspotentiale, at det betragtes som miljøfarligt. En testorganisme, som udsættes for vand med et lavt zinkindhold, optager og akkumulerer mere zink for at tilfredsstille zinkbehovet, hvilket resulterer i højere BCF-værdier. Når den samme testorganisme udsættes for vand med et højere zinkindhold, bliver optagelsen af zink lavere, og derfor opnås en lavere BCF-værdi.



Billede 15-1. Mennesket behøver 12 mg zink pr. dag for at modvirke infektioner.

For emner, hvor optagning og akkumulering i levende organismer styres af veludviklede regelsystemer, såsom essentielle metaller, er BCF-værdien ikke relevant. Dette bliver tydeligt, eftersom BCF-værdien for det essentielle zinkmetal kan antage hvilken som helst af følgende værdier:

- a) For en blåmusling varierede BCF-værdien mellem 600 og 55000 efter 8 døgns eksponering. Zinkindholdet i kroppens væv varierede på trods af disse høje værdier kun med en faktor 2.
- b) For en snegleart varierede BCF-værdien mellem 1100 til 9000 efter 8 døgns eksponering. Zinkindholdet i sneglen varierede kun med en faktor 2.

15.3 Zinkens biotilgængelighed

Biotilgængelighed er et mål for, hvor nemt en organisme optager et bestemt stof, f.eks. et næringsstof, et metal eller en miljøgift. Zink har en evne til at knytte sig i komplekse bindinger i svært opløselige forbindelser, der generelt har lav biotilgængelighed og dermed lav miljøpåvirkning.

15.4 Anvendelsesområder

Zink anvendes først og fremmest til korrosionsbeskyttelse på stål i form af metalbelægninger eller som metallisk pulver (Pigment) i maling, messing og andre zinklegeringer. Zinkkemikalier anvendes inden for vidt forskellige områder såsom lægemiddel, salver, træbeskyttelse, tørremiddel, flotationsreagens, garvningsmiddel, katalysator, fødevaretilsætning, dyrefoder-tilsætning, olietilsætning mm. Zinkoxid er det mest almindelige kemikalie, der indgår i fremstillingen af gummi, præparater til beskyttelse af huden, sårsalver osv.

I Sverige er der lavet en undersøgelse, som viser, at der anvendes omkring 70% af zinken til korrosionsbeskyttelse. En større del af denne mængde bruges til varmforzinkning af koldvalset plade- og konstruktions-elementer. Sveriges årlige behov for zink er 35.000 tons og importeres, som i Danmark, først og fremmest fra Norge og Finland.

15.5 Afstrømning fra varmforzinkede produkter

Der findes en udbredt opfattelse hos mange mennesker om, at brugen af metaller i samfundet udgør et problem, idet korrosionsprodukterne "lækker" ud og påvirker miljøet negativt. Denne opfattelse gælder også zink, der er et almindeligt forekommende metal på grund af den store mængde varmforzinkede produkter i infrastrukturen. For at kunne imødegå disse holdninger med velunderbyggede fakta har zinkbranchen ladet udføre omfattende studier af, hvordan jord og vand forurenes ved korrosion af varmforzinkede produkter i det udendørs miljø. Også i miljøer med mange zinkkilder, f.eks. langs motorveje, hvor zink kan frigøres både fra dæk- og vejslitage, motorolier og korrosion, har de gennemførte studier vist, at zink ikke har nogen negative effekter (28).

Avdelningen för Korrosionslära ved Tekniska Högskolan (KTH) i Stockholm har studeret, hvordan zink, kobber samt rustfrit stål fra tagmaterialer påvirker miljøet. I forbindelse med regn bliver en del af de dannede korrosionsprodukter på metaloverfladerne skyllet bort og ledt væk med regnvandet. Mængden af korrosionsprodukter, der skylles bort, afhænger af en række faktorer, såsom mængden af luftforurening, regnens kemiske sammensætning og pH-værdi samt regnvejrets varighed og intensitet.

De metaller, der forekommer i regnvand fra tagkanten, består hovedsageligt af frie ioner. Studierne viste, at når det metalholdige vand har passeret et jordlag eller har været i kontakt med beton eller kalksten, var over 96 % af det samlede metalindhold forsvundet. Hovedparten af metallerne gik meget hurtigt i forbindelse med jorden, og restmetallerne i vandet havde lav biotilgængelighed og dermed lille miljøpåvirkning (28, 29).

15.6 Fremstilling og energiforbrug

Zink fremstilles først og fremmest af malmen sphalerit, der efter knusning, koncentration og ristning opløses i en elektrolyt. Genudvundet zink fra bl.a. stålvræksstøv, og andre råvarer opløses direkte i elektrolytten. Ved hjælp af strøm fældes zinken ud af elektrolytbadet på aluminiumplader. Pladerne tømmeres for zink, som smeltes ned og støbes til zinkbarrer før levering til forbrugerne. Den zink, som anvendes ved varmforzinkning, har en renhed mellem 98,5 og 99,995% zink.

Naturvårdsverket, som er den svenske pendant til Miljøstyrelsen, har lavet en beregning af det relative energibehov ved primær fremstilling af zink, og opdaget, at energiforbruget er den laveste sammenlignet med samtlige basemetaller, dog med undtagelse af jern. Dette er udregnet ud fra både vægt og volumen. Oplysninger fra en zinkproducent angiver energiforbruget til 12-13 GJ/tons zink. Genudvundet zink fra forzinket stål kræver kun 5% af dette elforbrug, til fremstilling af ny zink. Zink indtager derfor en meget fordelagtig position, i sammenligning med andre basemetaller, når det gælder om besparelser af naturens ressourcer.

15.7 Genanvendelse

Ved varmforzinkning opstår en del procesaffald, sekundære råvarer, hårdzink, aske, filterstøv, som genudvindes.

Af verdens totale årlige zinktonnage kommer ca. 35% i dag fra genindvundet zink.

Zinkens cyklus er 30 til 40 år, hvilket indebærer, at næsten 80% af tilgængelig zink genudvindes. Den zink, som ikke genudvindes, er brugte kemikalier samt den zink, der korroderer væk ved beskyttelse af stålet. Dette gælder både zinkpigment i maling og metalbelægninger.



Billede 15-2. Omkring 80% af den tilgængelige zink genudvindes.

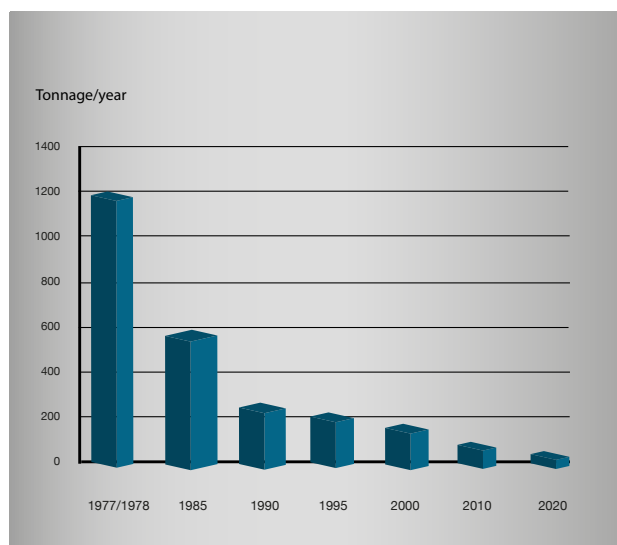
Zink kan genudvindes et uendeligt antal gange uden at det ødelægges. Dette indebærer, at den har sin givne plads i et holdbart (bæredygtigt) samfund.

Ved at beskytte stålet mod korrosion gennem mange årtier, spares jernmalm, energi, transport samt udslip af først og fremmest kuldioxid.

15.8 Udslip af zink

a) Punktkilder

Udslippet er af 2 forskellige slags – udslip til vand eller til luft. Fra punktkilder i Sverige kommer den største mængde af udslip i vand først og fremmest fra miner og skovindustrien. Til luften kommer størstedelen fra skrotbaserede stålværker uden filter og fra træ- og tørveafbrænding. Overfladebehandlingsindustrien har i dag meget effektive rensningsanlæg og det årlige udslip (år 2002) er kun 2 tons. Et større varmforzinkningsanlæg har i dag et årligt udslip på 20-25 kg pr år, hvilket er 4 gange under Naturvårdsverkets værdigrænse.



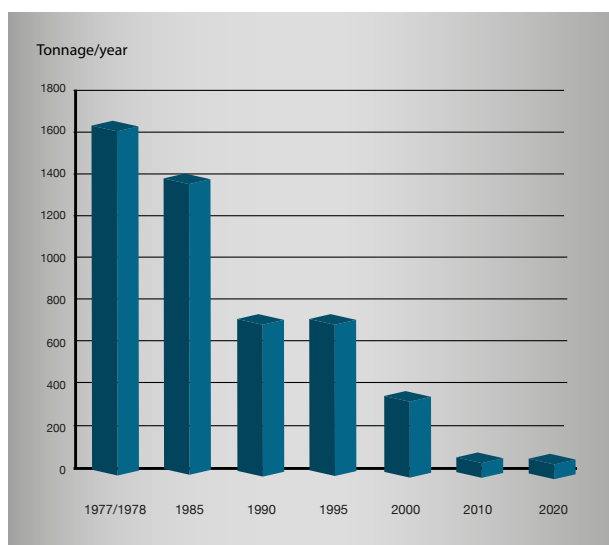
Billede 15-3. Udslippet i luften er formindsket med en faktor 12 de sidste 20 år (30).

Figur 15-3 og 15-4 viser, hvordan udslippet til luft og vand har ændret sig de seneste 20 år. Udslip til luften er formindsket med en faktor 12, og udslippet til vandet med en faktor 4,5.

At formindskningen til vandet er lavere kan forklares ved, at mineaffaldet ved Falu mine lækker zink, på trods af der aldrig har været fremstillet zink.

b) Diffuse udslip

De diffuse udslip kommer først og fremmest fra korrosion, trafikslitage (dæk, asfalt, bremsebelægninger) og husholdningsaffald. En stor del kommer også gennem nedfald fra atmosfæren, pga. udslip i andre lande. Tendensen er nedadgående og i de seneste 10 år er de diffuse udslip mindsket med 40%. En stor årsag til dette er, at svovldioxid indeholdt i atmosfæren er mindsket betydeligt i hele Europa.



Billede 15-4. Udslippet i vandet er formindsket med en faktor 4,5 de seneste 20 år (30).

16. Miljøpåvirkningen af varmforzinkelsesprocessen

16.1 Branchens miljøarbejde

Nordic Galvanizers er brancheorganisation for de nordiske varmforzinkere. Nordic Galvanizers er førende, når det gælder udvikling inden for varmforzinkning og miljøspørgsmål i forbindelse med anvendelse af zink.

Branchens medlemmer driver sine virksomheder med godkendelse af følgende miljøpunkter:

- Miljøpolitik
- Miljødokumentation
- Kemikaliekontrol
- Kontrol af ydre og indre miljøer
- Krav efter Miljøstyrelsen's branchevejledning for varmforzinkning

16.2 Produktet

Ved varmforzinkning af emner og konstruktioner, dypes materialet i smeltet zink enten ved ca. 455 °C (lavtemperatur) eller ved ca. 550 °C (højtemperatur), hvorved en legering mellem jern og zink dannes. Ved lavtemperatur er den bindende legeringstykkelse afhængig af stålets indhold af silicium samt dypetiden. Legeringslaget bliver normalt 70 til 125 µm tykt, men tykkere lag kan opnås. Tynde lag er som regel blanke, mens tykkere lag bliver mere matgrå.

Varmforzinkning bruges for at beskytte stål mod korrosion (rust). I udendørsmiljøer med ovennævnte lagtykkelse holder beskyttelsen oftest over 50 år. Varmforzinkning bruges mest på de produkter, hvor man vil have en sikker og langvarig korrosionsbeskyttelse til lave omkostninger. Med en levetid på over 50 år uden vedligeholdelse bliver levetidsomkostningerne for varmforzinkede produkter meget lav.

Den varmforzinkede overflade kan efter forberedelser males (duplex), for dermed at forlænge korrosionsbeskyttelsen.

Ved varmforzinkning giver zinken, til forskel fra kun maling, stålet en katodisk beskyttelse, hvilket indebærer, at ridser og skader i zinkoverfladen ikke rustner.



Billede 16-1. Varmforzinket skraldespand.

16.2.1 Produktindhold

Den zink, som bruges ved varmforzinkning er enten SHG (Special High Grade), indeholder min. 99,995% zink eller GOB (termisk zink), indeholder min. 98,5% zink.

Zinken har et smeltepunkt på 419 °C.

Udover zink tilføres der nogle promille aluminium i badet og ofte noget nikkel.

Ved varmforzinkning dannes hårdzink, som er en blanding af jern og zink med ca. 95% zink, samt aske, som indeholder ca. 70% zink. Zinken kan genudvindes af begge produkter. Endvidere udvindes både zink og jern af bejdsebade og hydroxidslammet.

16.3 Emballering og transport

De varmforzinkede produkter pakkes og transporteres i bundter eller på paller. Blanke overflader skal ikke pakkes mod hinanden eftersom regn og kondensvand i spalter kan danne hvidrust (zinks korrosionsprodukt) på materialet.

Belægningen kan bedre tåle transportskader end f.eks. maling. Transport af produkterne sker fortrinsvis på lastbil. Om vinteren er det vigtigt at bruge en lukket bil, så materialet ikke udsættes for f.eks. vejsalt.

16.4 Materialelegenindvinding og energiforbrug

Zinken er nem at genudvinde, og i dag bruges 36% returzink til fremstilling af ny zink. Dette svarer til 80% af den tilgængelige zink. Det meste af returzinken kommer fra restprodukter, messing og forzinket stål.

Ved fremstilling af zink går der 13 GJ pr ton zink (Outokumpu Oy). Ved sekundær fremstilling er det tilsvarende tal 0,65 GJ, hvilket indebærer, at zink er et af de billigste metaller at fremstille. Dette indebærer også, at miljøpåvirkningen ved fremstillingen er lavere end hos andre metaller.

16.5 Produktion

Varmforzinkningen udføres på ca. 80 anlæg af forskellig størrelse i Norden, hvoraf de 11 er beliggende i Danmark (2004). En del er kvalitets- og/eller miljøcertificeret. Varmforzinkningen udføres ofte manuelt alt afhængig af størrelse og mængde. Der findes også automatiske anlæg for større mængder af seriematerialer og mindre emner.

16.5.1 Udslip til luft

Ved dypning i zinkbadet opsamles små partikler i filtre. Disse små partikler genudvindes til brug som flusmiddel. Der dannes ikke røggasser indeholdende kuldioxid eller andet kvælstof. Varmforzinkning i lukkede anlæg afgiver således kun et minimalt udslip til luften.

16.5.2 Udslip til vand

Normalt bruges der ikke noget spildevand mellem de forskellige forbehandlingsprocesser der indgår i varmforzinkningsprocessen. Ved automatiske anlæg kan vandskylling forekomme. I disse tilfælde renses og genbruges vandet. I de tilfælde, hvor materialerne vandkøles efter varmforzinkning, renses kølevandet.

16.5.3 Energigenbrug

Ved varmforzinkning bruges ved enkelt skift 600 – 650 KWh pr ton stål og ved tre skift 350 KWh. At spare på energien har stor prioritet. Varmeudvinding fra zink og kølebade bruges bl.a. til opvarmning af lokaler. De fleste procesbade arbejder ved rumtemperatur.

16.5.4 Støj og helbred

Støjen fra anlæggene er som regel lav og forstyrrer ikke omgivelserne. Efter omkring 200 år med varmforzinkning kan det konstateres, at der ikke er forekommet nogle negative helbredseffekter, men tværtimod har positive effekter kunnet ses.

16.6 Miljøprofil

Miljøprofilen udtrykker middelværdien som varmforzinkningsprocessen forårsager ved overfladebehandling (lokale afvigelse kan forekomme)

Zink	60-70 kg pr ton
El, dagtid	600-650 KWh pr ton
El, treholdsskift	350 KWh pr ton
Kuldioxid	0 kg pr ton
Kvælstof	0 kg pr ton
Saltsyre	15 kg pr ton
Flusmiddel	2-3 kg pr ton
Vand	Små volumener, som renses

Restprodukter:

Hårdzink	10 kg pr ton
Aske	15 kg pr ton
Filterstof	0,3 kg pr ton
Hydroxidslam (tørret)	5 kg pr ton

16.6.1 Miljøstyring

Varmforzinkerne har i mange år arbejdet aktivt for et bedre arbejdsmiljø. Det omfatter at spare på energien og råvarerne, forebygge udslip og tage hånd om restprodukterne med henblik på genanvendelse. Processen har udviklet sig med hensyn til både miljøet og mennesket.

Ved hvert anlæg findes der en miljøansvarlig person. Der er indarbejdede rutiner for håndtering af procesbade og proceskemikalier. Anlæggenes forskellige processer dokumenteres regelmæssigt, og en årlig miljødokumentation fremlægges.

16.7 Zink i miljøet

Zink er et essentielt metal, som i små mængder er meget vigtig for de fleste organismer. Et menneske har brug for ca. 12-15 mg pr dag, hvilket svarer til, at den danske befolkning konsumerer tæt på 30 tons zink pr år. Kigger vi på verdens befolkningen, er tallet 30.000 tons zink pr år.

De antropogene udslip til vand og luft er de sidste 20 år formindsket med en faktor 10. Overfladebehandlingsindustriens udslip af zink til vand og luft er allerede så lavt i dag (2-3 tons pr år), at yderligere foranstaltninger næppe er økonomisk motiverbare.

Målinger af zinknedfald (zinkmængde i mos) viser i dag en værdi på 40-50 mg pr kg, hvilket er lavere end det naturlige grundindhold i f.eks Sverige, hvor middeltallet ligger på 70 mg/kg tør jord. Naturvårdsverket har hævet grænsen for den tilladte zinkmængde i jorden til 100 mg/kg (i Målarlandskabene til 150 mg/kg = 100% stigning).

Alle målinger og opfølgninger viser en kraftig reduktion af zinkmængder i vores miljø, og mange områder har i dag mangel på zink. For at modvirke dette, spredes hvert år ca. 1.000 tons zink ud på markerne.

Landner og Lindeström skriver i sin bog "Zink – resurs och/eller hot?" (26), at til trods for det høje totale indhold af zink på visse arealer, findes der ingen oplysninger om, at zink skulle være farligt for omgivelserne. En forklaring på dette kan være, at zink hurtigt kompleksbindes og minerealiseres, hvorfor den bioakkumulerbare del er meget lav.

16.8 Miljøvaredeklaration

Den europæiske varmforzinkningsorganisation EGGA (European General Galvanizers Organization), som Nordic Galvanizers er medlem af, har udarbejdet en miljøvaredeklaration for varmforzinket stål.

En miljøvaredeklaration er en måde at kommunikere produkters miljøegenskaber på og kan bruges på alle slags produkter og tjenester. Miljøvaredeklarationer i henhold til ISO 14025 er baseret på livscyklusanalyse.

En miljøvaredeklaration er en god måde at imødekomme bruges og myndigheders forventninger til relevant miljøinformation. Den bagvedliggende livscyklusanalyse er desuden et fremragende grundlag for yderligere at forbedre et produkts miljøegenskaber. Konstruktion af huse og infrastruktur tegner sig for en stor del af verdens ressourceforbrug. Det har betydet, at miljøspørgsmål bliver stadig vigtigere i planlægning og indkøb. Forskellige byggematerialer har forskellig miljøpåvirkning pr. kg – men har også helt forskellige egenskaber. Det er derfor nødvendigt med nye standarder til at bedømme, hvor miljøvenlige samlede bygningsværker er, for at kunne arbejde systematisk med bæredygtigt byggeri.

LCI-data er et effektivt værktøj, når der skal foretages en detaljeret undersøgelse af produkters og tjenesters miljøpåvirkning i hele deres livscyklus. LCI-data kan dog være vanskelige at tolke for produktbrugerne, og det er derfor mere og mere almindeligt at præsentere et produkts miljømæssige fordele ved hjælp af en miljøvaredeklaration.

Hvordan kan man måle/vurdere, om et materiale eller et produkt er miljømæssigt bæredygtigt? Et stort fælles projekt for at øge viden på dette område blev

indledt i 2004 af varmforzinkere og zinkleverandører i Europa. Formålet med projektet var at undersøge, hvordan varmforzinkningsprocessen og varmforzinket stål klarer sig miljømæssigt sammenlignet med andre konstruktionsmaterialer og overfladebelægninger på markedet. Dataindsamlingen er blevet opdateret ved flere lejligheder og omfattede senest over 1000 ton stål, varmforzinket på 66 forskellige fabrikker i 14 lande i Europa. Resultatet repræsenterer gennemsnitsværdien af et typisk stykvist varmforzinket produkt. Normalt udfærdiges der en EPD (miljøvaredeklaration) til et specifikt produkt.

I dette tilfælde er der dog udfærdiget en generel EPD for en varmforzinket stålplade af en bestemt størrelse.

Miljøvaredeklarationen kan downloades på www.nordicgalvanizers.com.



Billede 16-2. Miljøvaredeklarationen er baseret på data fra et stort antal varmforzinkningsanlæg i Europa og repræsenterer den gennemsnitlige værdi af et typisk stykvist varmforzinket produkt.

17. Referencer

1. Wranglén, G: Metaller korrosion och ytskydd. Almqvist & Wiksell, Stockholm 1967.
2. Mattson, E: Elektrokemi och korrosionslära, Bulletin nr 100, Korrosionsinstitutet, Stockholm 1987.
3. Svendenius G, et al: Korrosion och korrosionsskydd - läromedels-serie, Korrosionsinstitutet, Stockholm 1977.
4. ISO 12944-2:2017, Färg och lack - Korrosionsskydd av stålkon-struktioner genom målning - Del 2: Miljöklassificering.
6. SIS: SIS handbok 160, utgåva 1, Stockholm, 1986.
7. Ruddle, G E et al: Analysis of the Distribution and Form of Silicon in the Steel Surface as Related to the Galvanizing Reaction. Proc Sec Int ILZRO Galv Seminar. St Louis 9-10 June 1976, ILZRO, New York 1976.
8. Leroy, V et al: Galvanizing of Silicon Containing Steels, Ibid.
9. Hänsel, G: Thick and Irregular Galvanized Coatings, Proc 13 Int Galv Conf, London 1982. Zinc Dev Association, London.
10. Bablik, H: Galvanizing (Hot Dip) E & F N Spon Ltd, London W.C.2, 1950.
11. Horstmann, D: Allgemeine Gesetzmässigkeiten des Einflusses von Eisenbegleitern auf die Vorgänge beim Feuerverzinken. Stahl u Eisen 80 (1960) : 22 1531-1540.
12. Horstmann, D: Das Verhalten mikrolegierter Baustähle mit höhe-rer Festigkeit beim Feuerverzinken. Arch Eisenhüttenw. 46 (1975):2, 137-141.
13. Hirn, A: Användande av förzinkade detaljer vid förhöjd tempera-tur, delrapport VII för forskningsuppg. 4020/92 "Förzinkning av svåra stål", IM-3165, Inst för Metallforskning, Stockholm 1994.
14. Nieth, F: Abriebverhalten von Eisen-Zink-Legierungsschichten und Reinzinkschichten. Metalloberfläche 22 (1968):6, 175-177.
15. Schikorr, G: Atmospheric Corrosion Resistance of Zinc. Zinc Dev Association, London 1965.
16. Kucera, V & Mattson, E: Förbättrade zinksikt för korrosions-kydd av järn och stål. Bull 78. Korrosionsinst., Stockholm 1976.
17. Slunder, CJ & Boyd, WK: Zinc: Its Corrosion Resistance. Zinc Dev Association, London 1971.
18. Schwenk, W & Friehe, W: Korrosionsverhalten Feuer- und Spritzverzinkter Stahlbleche mit und ohne Schutzanstrich auf dem Seewasserversuchsstand des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute in Helgoland. Stahl u. Eisen 92 (1972):21 1030-1035.
19. Viktor, V: Korrosion hos zink i sötvatten. Varmförzinkningstek-niska konf. 1962. Nordisk Förzinkningsförening, Stockholm 1963.
20. Wiederholt, W: Korrosionsverhalten von Zink in Wässern. Zinkberatung e.V. Düsseldorf 1965.
21. Vinka, T-G: Korrosion på förzinkat stål och kolstål i karbonati-serad och kloridhaltig betong, Nordisk Korrosion nr 3/2002.
22. van Eijnsbergen, JFH: Duplex Systems Hot Dip Galvanizing plus Painting. The Hauge, 1994.
23. Handbok i Rostskyddsmålning. Bulletin nr 85, upplaga 2, Korrosionsinstitutet. Stockholm 1984.
24. Bland, J: Welding Zinc-Coated Steel. American Welding Soc. Miami, Florida 1972.
25. Thomas, R: Bågsvetsning av zinkbelagt stål. Nordisk Förzink-ningsförening. Stockholm 1974.
26. Landner, L & Lindeström, L: Zink – resurs och/eller hot? En faktaredovisning. Miljöforskargruppen, Stockholm och Fryksta 1996.
27. Landner, L & Reuther, R: Metals in Society and in the Environ-ment, AF-Environmental Research Group and enas Environmental Assessments, Sweden and Germany 2004.
28. Tom Wolley and EGGA Working Group: Varmförzinkning och hållbart byggande, England 2008.
29. Odnevall Wallinder I, Prof. Ph. Dr., Div. for Surface and Cor-rosion Science, www.corrosionscience.se, Tekniska Högskolan Stockholm.
30. Hansson K et al, IVL Swedish Environmental Research Insti-tute, Sörme S et al, SCB and Segersson D, SMHI, On behalf of the Environmental Protection Agency, SMED Report No. 106 2012, Fugitive emissions to air and water, 2012.



Varmforzinkning – den vedligeholdelsesfrie korrosionsbeskyttelse med uovertruffen levetid!

Varmforzinkning giver stål en langvarig vedligeholdelsesfri korrosionsbeskyttelse i de fleste miljøer.

I denne håndbog findes information om stålvalg, konstruktionsudformning, miljøaspekter og andet nyttigt for den, som vil korrosionsbeskytte sit produkt.

Nordic Galvanizers er brancheorganisationen for varmforzinkningsvirksomheder i Norden.

Du kan henvende dig til os med alle spørgsmål vedrørende varmforzinkning af stål.

På vores hjemmeside www.nordicgalvanizers.com findes yderligere information, og der præsenteres løbende nyheder indenfor branchen.

nordic
GALVANIZERS 

info@nordicgalvanizers.com, www.nordicgalvanizers.com, +46 8 446 67 60