



Katholieke Universiteit Leuven
Faculteit Toegepaste Wetenschappen
Departement Burgerlijke Bouwkunde

VERBINDINGEN VAN NATUURSTEEN
DOOR HET AANGIETEN MET LOOD VAN
ANKERSTAVEN:
TECHNOLOGIE EN ALTERNATIEVEN

E 2001-2002

Promotoren: Prof. Dr. Ir. D. Van Gemert
Prof. Dr. Ir. Arch. K. Van Balen

Peter Lembrechts
Bram Vandewalle

Toelating tot bruikleen

De auteurs geven de toelating deze eindverhandeling voor consultatie beschikbaar te stellen en delen ervan te kopiëren voor eigen gebruik. Elk ander gebruik valt onder de strikte beperkingen van het auteursrechts; in het bijzonder wordt er gewezen op de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze eindverhandeling.

Leuven, 20 mei 2002

“ Notre temps, et notre temps seulement depuis le commencement des siècles historiques, a pris en face du passé une attitude inusitée... . En Asie... lorsqu’un temple ou un palais subissait les dégradations du temps, on en élevait... un autre à côté. On ne détruit pas pour cela l’ancien édifice ; on l’abandonne à l’action des siècles qui s’en empare comme d’une chose qui lui appartient pour la ronger peu à peu. Les Romains restituaient mais ne restauraient pas, et la preuve, c’est que le Latin n’a pas de mot qui corresponde à notre mot restauration, suivant la signification qu’on lui donne aujourd’hui. Intaurare, reficere, renovare, ne veulent pas dire restaurer, mais rétablir, refaire à neuf. Lorsque l’Empereur Adrien prétendit remettre en bon état une quantité de monuments de l’ancienne Grèce ou de l’Asie mineure, il procéda de telle façon qu’il soulèverait contre lui aujourd’hui toutes les sociétés archéologiques de l’Europe bien qu’il eut des prétentions aux connaissances de l’Antiquité. ... Le Moyen Age n’eut pas plus que l’Antiquité le sentiment de restauration comme nous les comprenons aujourd’hui, loin de là. Fallait-il dans un édifice du XIIème siècle, remplacer un chapiteau du XIIIème, du XIVème ou du XVème siècle qu’on posait à sa place. Sur une longue frise de crochets du XIIIème siècle, un morceau, un seul, venait-il à manquer, c’était un ornement dans le goût du moment qu’on incrustait... “

*Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1814 – 1879)
in ‘Dictionnaire de l’Architecte’ – ‘Restauration’*

Inhoudstafel

Dankwoord

Inhoudstafel

1. Inleiding	p. 1
2. Aangieten met lood: situering in de bouw- en restauratiewereld	p. 4
2.1. Historische schets	p. 4
2.2. Waar worden deze verbindingen teruggevonden in de praktijk?	p. 8
2.3. Richtlijnen bij restauratiewerken	p. 12
2.4. Algemene eisen van de verbinding	p. 14
3. Aangieten met lood: technologie	p. 16
3.1. Historisch gebruikte materialen	p. 16
3.1.1. Smeedijzer	p. 16
3.1.1.1. Historische productiemethode	p. 16
3.1.1.2. Eigenschappen	p. 17
3.1.1.3. Roestvast staal als alternatief voor smeedijzer	p. 18
3.1.2. Lood	p. 19
3.1.2.1. Productiemethode: historisch en hedendaags	p. 19
3.1.2.2. Mechanische eigenschappen en densiteit	p. 22
3.1.2.3. Thermische eigenschappen	p. 23
3.1.3. Historische alternatieven voor smeedijzer	p. 24
3.1.4. Historische alternatieven voor lood	p. 26
3.1.5. Conclusie	p. 26
3.2. Procedure van het aangieten met lood	p. 27
3.2.1. Verticale verbindingen	p. 27
3.2.2. Horizontale verbindingen	p. 29
3.3. Milieu en veiligheid	p. 31
3.3.1. Invloed op het milieu	p. 31
3.3.2. Invloed op de gezondheid	p. 32
3.3.3. Regelgeving	p. 32
3.3.4. Preventiemaatregelen	p. 33
3.4. Corrosieaantasting	p. 35
3.4.1. Inleiding problematiek	p. 35
3.4.2. Algemene corrosieprincipes	p. 37
3.4.2.1. Fundamenten van corrosie: anodische en kathodische reactie	p. 37
3.4.2.2. Thermodynamica van corrosie: elektrodepotentialen en potentiaalreeksen	p. 39
3.4.2.3. Kinetiek van de corrosiereactie	p. 42

3.4.3.	Vormen van corrosie	p. 43
3.4.3.1.	Uniforme (algemene) corrosie	p. 43
3.4.3.2.	Putvormige corrosie	p. 44
3.4.3.3.	Spleetcorrosie	p. 45
3.4.3.4.	Galvanische corrosie	p. 46
3.4.3.5.	Spanningscorrosie	p. 48
3.4.3.6.	Interkristallijne corrosie	p. 48
3.4.3.7.	Selectieve corrosie	p. 48
3.4.3.8.	Erosiecorrosie	p. 49
3.4.4.	De corrosiegevoeligheid van gebruikte materialen	p. 49
3.4.4.1.	Smeedijzer	p. 49
3.4.4.2.	Koper en brons	p. 50
3.4.4.3.	Roestvast staal AISI 304 en AISI 316	p. 52
3.4.4.4.	Lood	p. 52
3.4.5.	Vocht in de natuursteen	p. 53
3.4.6.	De corrosieproblematiek van de met lood aangegoten ankerstaaf in natuursteen	p. 55
3.5.	Vervormbaarheid	p. 59
3.6.	Kostprijs	p. 60
3.7.	Problemen en onderzoeksprocedure	p. 61
4.	Proefprogramma	p. 64
4.1.	Fysische samenstelling	p. 64
4.1.1.	Doel van de proef	p. 64
4.1.2.	Proefstukken	p. 65
4.1.3.	Proef	p. 66
4.1.4.	Resultaten	p. 68
4.1.5.	Literatuur: de eigenschappen van sporenelementen in lood	p. 70
4.1.6.	Bespreking van de resultaten	p. 72
4.2.	Lichtmicroscopie en hardheidsmeting	p. 74
4.2.1.	Doel van de proef	p. 74
4.2.2.	Proefstukken	p. 74
4.2.3.	Proef	p. 75
4.2.3.1.	Lichtmicroscopie	p. 75
4.2.3.2.	Hardheidsmeting	p. 75
4.2.4.	Resultaten	p. 77
4.2.4.1.	Lichtmicroscopie	p. 77
4.2.4.2.	Hardheidsmeting	p. 78
4.2.5.	Bespreking van de resultaten	p. 79
4.2.5.1.	Lichtmicroscopie	p. 79
4.2.5.2.	Vaste-oplossingsharding en precipitatieharding	p. 81
4.2.5.2.1.	Kristaldefecten	p. 81

4.2.5.2.2. Verstevigingsmechanismen	p. 82
4.2.5.3. Hardheidsmeting	p. 85
4.3. Zoutneveltest	p. 88
4.3.1. Doel van de proef	p. 88
4.3.2. Proefstukken	p. 89
4.3.2.1. Materialen en de verschillende configuraties	p. 89
4.3.2.2. Aanmaak proefstukken	p. 91
4.3.3. Proef	p. 94
4.3.4. Resultaten	p. 97
5. Alternatieven voor het aangieten met lood: hedendaagse ontwikkelingen	p. 102
5.1. Alternatieven voor smeedijzeren ankers	p. 102
5.1.1. Glasvezelstaven	p. 102
5.1.2. Titanium	p. 104
5.2. Alternatieven voor lood	p. 106
5.2.1. Mortel	p. 106
5.2.2. Epoxymortels	p. 106
5.2.3. Polyesterharsen	p. 108
5.3. Hedendaagse restauraties	p. 109
5.3.1. Verbindingen gerealiseerd zonder ankerstaaf	p. 109
5.3.2. Enkele voorbeelden van hedendaagse restauraties	p. 110
5.3.3. Besluit	p. 112
5.4. Titanium in combinatie met mortel	p. 112
5.5. Glasvezelstaven in combinatie met een epoxymortel	p. 114
6. Conclusie	p. 117
7. Lijst van figuren	p. 120
8. Lijst van tabellen	p. 123
9. Bibliografie	p. 124
10. Geraadpleegde internetadressen	p. 130
Bijlage 1	p. 131
Bijlage 2	p. 132
Bijlage 3	p. 137
Bijlage 4	p. 138

Dankwoord

Er wordt wel eens gezegd dat ‘professoren je helpen om problemen op te lossen die je zonder hen nooit gehad had’. Hoewel daar misschien een grond van waarheid inzigt, willen we de professoren en hun medewerkers aan de KULeuven toch van harte bedanken voor onze vorming gedurende de voorbije vijf jaar.

In het bijzonder willen we onze promotors, professor D. Van Gemert en professor K. Van Balen, danken voor hun begeleiding van dit eindwerk. Professor D. Van Gemert slaagde er in om zijn lessen tijdens de drie ingenieursjaren boeiend en aanschouwelijk te maken door de theorie telkens te illustreren met praktijkvoorbeelden. Als onze bouwkundige geest de voorbije jaren kritisch is aangescherpt, dan is dit voor een groot deel de verdienste van professor D. Van Gemert die ons telkens opnieuw op het hart drukte voldoende kritisch te staan ten aanzien van metingen en proefresultaten, ten aanzien van stellingen van ‘experts’, ten aanzien van (soms dure) voorgestelde probleemoplossingen,... . Professor K. Van Balen leerde ons wat meer te kijken naar gebouwen met de blik van een historicus en een architect. In zijn lessen ‘ingenieur en architectuur’ wees hij ons op het technisch vernuft dat in sommige historische en moderne bouwwerken aanwezig is en gaf hij nuttige wenken omtrent het presenteren van papers en eindwerken.

Als we in het begin van het academiejaar onmiddellijk vlot van start konden gaan is dat dankzij onze begeleiders Luc Schueremans en Sven Ignoul. Luc spoorde ons gedurende het eerste semester aan en zette ons op de goede weg. Sven bracht ons in contact met interessante mensen zoals Lode De Clercq en Arie Roelandt en verschaftte ons enkele nuttige tips. Sven en Luc, bedankt voor de leerrijke en aangename gesprekken..

Voor het uitvoeren van ons proefprogramma deden we beroep op de mensen van het departement MTM van de KULeuven. We willen hier in het bijzonder professor L. Froyen bedanken voor zijn tijd, zijn klare en geduldige uitleg en zijn enthousiasme. Ook professor M. De Bonte willen we bedanken voor zijn uitleg en ondersteuning bij het uitvoeren van de corrosieproeven.

Wat onze thesis onder andere zo boeiend maakte, waren de vele interessante contacten met mensen van buiten de universiteit.

In het bijzonder willen we bouwhistoricus Lode De Clercq bedanken voor zijn interesse in ons eindwerk, voor zijn hulp bij het opzoeken in oude literatuur en voor de kans die hij ons bood om in zijn prachtige bibliotheek te snuisteren. Ook Arie Roelandt van de dienst META aan de VUB spaarde tijd noch moeite om ons te helpen bij onze opzoekingen in verband met het corrosieprobleem van de verbindingen van natuursteen aangegoten met lood.

Rolf de Bruyn van het WTCB, Wim Decavele en Bart Vanneste van de Groep Monument en Sander Peeters van Algemene Ondernemingen Verstraete & Van Hecke N.V. willen we bedanken voor de visies die ze baseerden op hun ervaringen in de dagdagelijkse praktijk van de restauratie.

Juliaan, Pieter, Paul, Marleen en het technisch personeel van het departement bouwkunde, willen we bedanken voor hun bijdrage in dit eindwerk.

Diegene aan wie we dit eindwerk willen opdragen, verdienen echter de meeste dank: onze ouders die onze studies mogelijk maakten en ons de kans boden te proeven van de geneugten van het kotleven.

Mama, papa, Nele, Dieter en Bram, bedankt voor jullie steun, voor jullie begrip, voor jullie hulp daar waar nodig: jullie waren ‘toujours prêts’. Herinner je je nog mijn woorden aan de achterkant van het station “Het komt allemaal wel in orde, mama”? Vijf jaar later is de eindmeet in zicht en ik denk wel dat we mogen stellen dat het -de stresserende blokdagen en vooral -nachten en wat dwaze liefdesperikelen niet te na gesproken- in orde is geweest Bedankt familie Klepkens, het is fijn in ons gezin thuis te komen!

Ma en pa, soms was ik misschien niet altijd even openhartig over wat ik allemaal meemaakte in Leuven. Toch bleven jullie mij steunen en in mij geloven. Misschien waren jullie soms wat te overbezorgd, maar ik kon wel altijd op jullie rekenen tijdens de voorbije vijf jaar. Bedankt hiervoor. Elke, de laatste twee jaar was jij een ongelooflijke steun voor mij. Je kon mij opmonteren in moeilijke tijden en ondanks de weinige momenten die we elkaar konden zien, groeiden we steeds dichterbij elkaar. Snot en Lotje, ‘thesis’ was dan wel een verboden woord tijdens onze scoutswerking dit jaar, maar toch hebben we uren ons hart zitten luchten tegen elkaar. Jullie waren allemaal een hart onder de riem!

Tot slot willen we ook nog elkaar bedanken. In de scouts leert men je dan wel samen te werken, op het niveau van een eindwerk is het toch niet altijd evident om gedurende een heel jaar samen te werken. Niettemin zijn we er in geslaagd een tandem te vormen waarin we elkaar aanvoelden, aanvulden en geapprecieerd wisten en waarin we, ondanks de vele discussies die we voerden, de betekenis van het woord vriendschap mochten ervaren.

Bram en Peter, Leuven 2002

1. Inleiding

Elk historisch gebouw, monument of historische site draagt een boodschap uit het verleden met zich mee. Meer dan ooit heerst het besef dat deze stille getuigen van eeuwen oude tradities moeten bewaard worden voor de toekomstige generaties. We moeten er voor zorgen dat ook het nageslacht kan genieten van de volle rijkdom van deze oude gebouwen, monumenten of sites. Hierbij is het belangrijk dat de principes voor de conservatie en restauratie van oude monumenten internationaal vastliggen. Daarom werd op ‘The Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments’, gehouden in Venetië in mei 1964, een tekst goedgekeurd die enkele algemene richtlijnen uitstippelt voor de conservatie en restauratie van monumenten. Deze tekst is beter bekend als het ‘Charter van Venetië’ en wordt tegenwoordig algemeen aanvaard en nagevolgd.

Specifiek in het hoofdstuk ‘Restoration’ zijn twee uittreksels uit deze tekst belangrijk om aan te halen. In artikel 9 van het Charter staat dat ‘... *The process of restoration is a highly specialised operation. Its aim is to preserve and reveal the aesthetic and historic value of the monument and is based on respect for **original material and authentic documents**. ...*’.

Artikel 10 luidt ‘*When traditional techniques prove inadequate, the restoration of a monument can be achieved by the use of any **modern technique** for conservation and construction, the efficacy of which has been shown by scientific data and proved by experience*’ (in ECONOMAKIS R., 1994: 86-87).

De tegenstelling die reeds in deze twee uittreksels naar voor komt, namelijk de oude ambachten versus de moderne technieken, krijgt in dit eindwerk de nodige aandacht. Ook in een recenter charter, namelijk het ‘Charter van Krakow 2000’ worden deze hoofdgedachten herhaald (artikel 3 en 10) (<http://www.ruraleurope.org/pdf/KRAKOW.pdf>).

Voor de verbindingen van natuurstenen die niet konden gerealiseerd worden met een mortel, werd vroeger soms geopteerd om een ankerstaaf te gebruiken die dan werd aangegoten met lood. Dit procédé van ‘het aangieten met lood’, bestond reeds ten tijde van de Grieken. Het procédé is sindsdien regelmatig toegepast geweest in onze bouwgeschiedenis, zij het in de ene periode al wat meer dan in de andere.

Ook heden ten dage wordt in restauratieprojecten deze traditionele methode nog vaak voorgeschreven in het lastenboek.

De vraag stelt zich nu echter of er vanuit technologisch en uitvoeringstechnisch standpunt geen alternatieven zijn voor dit aangieten met lood die evenwaardig zijn en bovendien nog het voordeel hebben dat ze bijvoorbeeld milieuvriendelijker en minder arbeidsintensief zijn. Zo worden er in bepaalde restauratieprojecten (bijvoorbeeld aan de Zavelkerk in Brussel) glasvezelstaven en epoxylijmen gebruikt. Ook de combinatie van titanium en cement werd reeds succesvol toegepast in restauratieprojecten.

Dit eindwerk wil een eerste aanzet vormen rond de vraag in hoeverre alternatieven voor het aangieten met lood zich opdringen en welke deze alternatieven dan eventueel zouden kunnen zijn. Het eindwerk beoogt een eerste beoordeling van de eigenschappen van vooral de verbinding door het aangieten van een ankerstaaf met lood, maar ook van enkele mogelijke alternatieven voor deze verbinding.

In een tweede hoofdstuk wordt het aangieten met lood gesitueerd in de bouw- en restauratiewereld. Er wordt een korte historische schets gegeven van het procédé, er wordt nagegaan waar zo'n verbindingen in praktijk voorkomen en de vereisten waaraan een verbinding in natuursteen moet voldoen, worden vastgelegd.

Het derde hoofdstuk omvat een uitgebreide literatuurstudie, aangevuld met eigen ervaringen afkomstig van werfbezoeken en gesprekken met experts op een welomschreven domein. Het hoofdstuk wil een duidelijk (historisch) beeld schetsen van de verbinding in natuursteen door het aangieten van een ankerstaaf met lood. Dit laat toe de verbinding kritisch te benaderen en na te gaan in welke mate een zoektocht naar (modernere) alternatieven voor de verbinding zich opdringt.

In hoofdstuk drie worden de gebruikte materialen toegelicht en wordt de werkwijze voor het aangieten met lood bekeken. Er wordt wat dieper ingegaan op twee negatieve eigenschappen van het procédé. Enerzijds is er de schadelijke invloed van het lood op mens en milieu. Daarnaast is er ook de mogelijke problematiek van corrosieaantasting.

Het vierde hoofdstuk vormt het sluitstuk rond de verbinding door aangieten van een ankerstaaf met lood en behandelt enkele proeven die in het kader van dit eindwerk werden uitgevoerd.

In een eerste proefopzet wordt, met behulp van drie loodmonsters (gedateerd 1600, 1900 en 2000), een eerste en zeer beperkt beeld opgehangen van de loodsamenstelling doorheen de tijd. De invloed van bepaalde sporenelementen op de mechanische en fysische eigenschappen van het lood wordt eveneens besproken.

De tweede proefopzet brengt de aanwezigheid van deze sporenelementen in relatie met de hardheid (en dus ook de sterkte) en geeft een beeld van de microstructuur van de verschillende loodmonsters.

In een derde en laatste proefopzet wordt nagegaan of men, met behulp van een eenvoudige en vrij korte zoutneveltest, corrosieproblemen kan verwachten. De proef vormt een aanzet naar verder onderzoek omtrent eventuele corrosieproblemen van verbindingen in natuursteen door aangieten in lood van ankers uit roestvast staal.

Het vijfde hoofdstuk belicht enkele alternatieven voor de verbinding door aangieten met lood en plaatst deze tegenover deze traditionele verbinding. Alternatieven worden, via een literatuurstudie, kort besproken en op de interessante combinaties wordt wat dieper ingegaan. Dit hoofdstuk biedt nog geen definitieve antwoorden qua mogelijke alternatieven, maar wil wel een aanzet vormen voor verder onderzoek en discussie.

In het algemeen besluit worden gegevens, gehaald uit de literatuurstudie, gesprekken, werfbezoeken en proeven, nog eens samengebracht.

2. Aangieten met lood: situering in de bouw- en restauratiewereld

2.1. Historische schets

In de oudheid werden heel wat belangrijke gebouwen opgetrokken uit natuursteenblokken die heel nauwkeurig en exact gehouwen werden uit blokken ontgonnen in een steengroeve. Deze blokken, gehouwen om perfect op elkaar aan te sluiten, werden horizontaal verbonden met krammen (E: clamps of cramps, F: crampon of agrafe, D: Klammer) en verticaal met behulp van pinnen (E: dowels, F: goujon, D: Bolzen) (ALBERTI L.B., 1450: par 11). Deze techniek, waarbij de verbindingen niet tot stand komen door een mortel, wordt “opus revinctum” of “Greek Technique” genoemd en werd al vermeld door Vitruvius in zijn boek “De Architectura” (Fig. 1)(ERCAN S. e.a., 1995: 3).

Ten tijde van de Grieken en Romeinen werden in talloze bouwwerken de steenblokken al verbonden met ijzeren pinnen en krammen, waarbij de holte waarin de pin of kram geplaatst werd, opgegoten werd met lood. Het lood vervulde voornamelijk de volgende functies: het lood werd in de holte gegoten om de krammen en pinnen op hun plaats te houden en om de ijzeren verbindingen te beschermen tegen corrosie. Het lood verschaftte de verbinding ook een bepaalde vervormbaarheid (YORULMAZ M. e.a., 1989: 455).

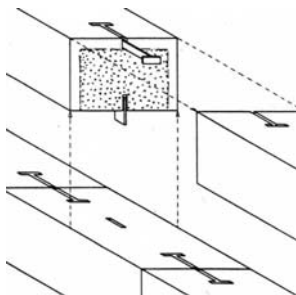


Fig. 1: “Opus revinctum” m.b.v. krammen en pinnen (ZAMBAS C., 1988: 1817).

Een voorbeeld van een Grieks monument waar de techniek van het aangieten met lood is gebruikt, is het Parthenon op de Acropolis in Athene. De verschillende, gehouwen natuurstenen rondsels van de zuilen zijn in het centrum verbonden met ijzeren of houten pennen. De stenen van de muren zijn op een gelijkaardige manier verbonden door zowel horizontale als verticale ankers. De ruimte tussen de bindingstaaf en de steenblok werd opgegoten met lood (ANGELIDES S., 1976: 19). Bij het Parthenon heeft het lood een bijkomende functie: het lood is plastisch genoeg om kleine vervormingen toe te laten zodat bij aardbevingen een energieabsorptie-capaciteit en damping ontstaan. We merken onmiddellijk op dat het lood door het zeeklimaat de ijzeren krammen en pinnen niet heeft kunnen vrijwaren van oxidatie. Ook gedurende de restauratie uitgevoerd van 1898 tot 1933 onder leiding van architect Balanos, werden opnieuw ijzeren ankers beschermd door lood of werd een cementmortel gebruikt met als gevolg dat opnieuw roestvorming van de ijzeren ankers optrad. Door de roestvorming expandeerde het ijzer wat leidde tot grote schade aan de

steenblokken (Fig. 2). Bij de recentste restauratie werden titanium ankers gebruikt, die een hoge weerstand bezitten tegen roestvorming (CASANAKI M. e.a., 1985: 58-59).

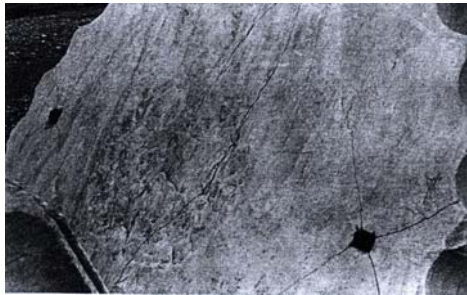


Fig. 2: Schade aan natuursteen door roestvorming van het ijzer (COWAN H.J., 1977: 47).

Bij de bouw van het Colosseum te Rome (70-80 A.C.) werd de techniek van het aangieten met lood ook gebruikt. Travertijnblokken, verbonden zonder mortel maar wel met ijzeren ankers, bedekken de gevel. De verbindingen bevinden zich nog altijd in goede staat (COWAN H.J., 1977: 69).

Meer in de buurt van onze contreien, bouwden de Romeinen in Trier een stadspoort, de Porta Nigra, met behulp van massieve blokken zandsteen. Deze stenen werden horizontaal met elkaar verbonden door ijzeren staven, aangegoten met lood (<http://www.trier.de/stadt/porta.htm>).

In hun boogstructuren gebruikten de Romeinen eveneens de techniek van het verbinden van natuursteen door aangieten van een ankerstaaf met lood (COWAN H.J., 1977: 72). Omdat het niet onmiddellijk voor de hand ligt dat dergelijke verbindingen voor boogstructuren werden gebruikt, wordt hier heel kort een reden voor hun gebruik naar voren geschoven.

De volgende aannamen worden gemaakt betreffende de materiaaleigenschappen van de natuursteen:

- a) steen bezit geen treksterkte (aannamen aan de veilige kant)
- b) het algemeen spanningsniveau is dermate laag dat men in de berekening mag aannemen dat de druksterkte van het steenmateriaal oneindig groot is (aannamen aan de onveilige zijde)
- c) glijding van één steen over een andere is onmogelijk.

Met deze veronderstellingen is scharniering aan de vrije rand, zoals Coulomb voorstelde, de enige mogelijke wijze van begeven in bijvoorbeeld een boogstructuur. De scharnieren worden gevormd waar de druklijn de intrados of extrados raakt (Fig.3a en b).

Drie scharnieren in de boogstructuur vormen een statisch bepaald systeem. Het ontstaan van een vierde scharnier maakt van de structuur een mechanisme en kan tot instorting leiden van de boogstructuur (Fig.4). De druklijn moet daarvoor wel volledig binnen de steenmassa liggen (VAN GEMERT D., 2001: II.3-II.9 en COWAN H.J., 1977: 71 en 198-201).

H.J. Cowan oppert dat de Romeinen zich door ervaring bewust waren van dit probleem en daarom metalen ankers, meestal van ijzer, soms van brons, in hun boogstructuren staken. H.J. Cowan vermeldt daarbij het voorbeeld van de Ponte Cestio over de Tiber in Rome waar alle stenen met elkaar verbonden zijn door twee metalen krammen (COWAN H.J., 1977: 69-70).

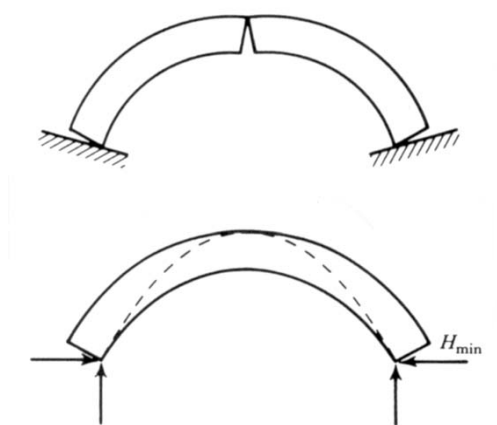


Fig. 3a: De druklijn raakt, onder een verticale belasting (eigengewicht inbegrepen), de extrados en vormt er een scharnier (COWAN H.J., 1977: 200).

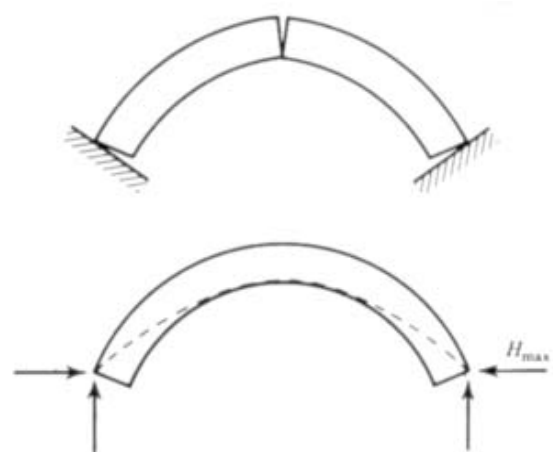


Fig. 3b: De druklijn raakt, door verplaatsing van de steunpunten, de intrados en vormt er een scharnier (COWAN H.J., 1977: 201)

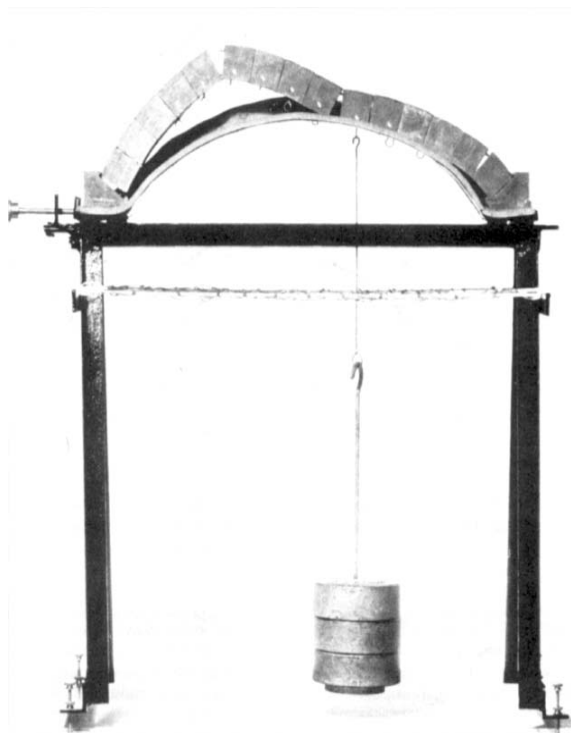


Fig. 4: De boog kan instorten als er voldoende scharnieren ontstaan om een mechanisme te vormen (COWAN H.J., 1977: 199).

Na de Romeinse periode (+/- 300 A.C.) tot circa 1300 A.C. (periode van de Hooggotiek) werd de techniek van het aangieten met lood in onze streken nog maar zelden gebruikt.

De splitsing van het Romeinse Rijk zorgde in het Oosten echter voor nieuwe stimulansen en onder keizer Justinianus werd de eerste – en tevens grootste – Byzantijnse dom gebouwd: de Hagia Sophia. De bouw van de Hagia Sophia eindigde in 537 en heeft slechts zes jaren in beslag genomen. De bouw van deze dom werd beschreven in een werk van de geschiedkundige Procopius rond 560. In een engelse vertaling van het werk van Procopius

vindt men een passage terug waarin de techniek van het aangieten met lood wordt vermeld. De tekst wordt hier weergegeven omdat hij aangeeft hoe het aangieten met lood een alternatief was voor de gebruikelijke technieken in het Oosten in die tijd. *‘The piers I have just mentioned are not constructed in the same way as other structures, but in the following manner. The courses of stone were laid down so as to form a four-corrnered shape, the stones being rough by nature, but worked smooth... . These were held together neither by lime, nor by asphalt, the material which was the pride of Semirmais in Babylon, nor by any other such thing but by lead poured into the interstices which flowed about everywhere in the spaces between stones, and hardened in the joints, binding them to each other’* (PROCOPIUS: Buildings (Griekse tekst met een Engelse vertaling door DEWING, H.B.), 1954: 23-25 in COWAN H.J., 1977: 96-98).

Het was pas tijdens de Hooggotiek (vanaf 1300) dat de techniek in onze contreien weer vaker werd toegepast. In de Hooggotische bouwkunst werden veel slanke elementen, zoals pinakels, gebouwd. Men opteerde er toen voor om de techniek van het aangieten met lood, zoals toegepast in het antieke Griekenland en Rome, te gebruiken om de slanke bouwelementen te verbinden.

Na de hooggotiek werd de techniek nog af en toe toegepast.

Vanaf de 19^e eeuw vinden we terug talrijke voorbeelden waar de techniek veelvuldig werd aangewend (KIESEWETTER A. & KIESOW G., 1997: 203).

Ook in Vlaanderen zijn talrijke voorbeelden van het gebruik van de techniek van het aangieten met lood aanwezig. In het kader van dit eindwerk bezochten we het stadhuis van Gent en de Zavelkerk in Brussel. Het stadhuis van Gent heeft een gotische middenvleugel die gebouwd werd van 1482 tot 1483. Het werd uitgebreid met een merkwaardige renaissancegevel (1580-1582) en tenslotte werd een schepenhuis in renaissancestijl opgetrokken van 1595-1618 (<http://www.gent.be>). De Zavelkerk werd gebouwd in de 13^e en in de 14^e-15^e eeuw en is laatgotisch. Er zijn ook nog twee barokkapellen uit de 17^e eeuw (<http://www.digitaalbrussel.vgc.be>).

Andere voorbeelden die werden aangehaald tijdens gesprekken in het kader van dit eindwerk zijn de Onze-Lieve-Vrouwekathedraal in Antwerpen en de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Laken. De kathedraal in Antwerpen is pure gotiek. Met de bouw werd begonnen in 1352 en de bouw duurde 170 jaar (http://www.topa.be/nl/antwerpen_onze-lieve-vrouwekathedraal_beschrijving.htm). De Onze-Lieve-Vrouwekerk in Laken werd ontworpen door Joseph Poelaert. Met de bouw werd begonnen in 1854 en hij eindigde in 1872. De stijl is neo-gotiek. De kerk is eigenlijk nooit voltooid geworden (<http://www.eurobru.com>). De monumenten die net werden aangehaald, werden talrijke keren gerestaureerd. Tijdens deze restauraties werden ankers aangetroffen die waren aangegoten met lood.

De aangehaalde voorbeelden tonen aan dat het aangieten met lood niet gekoppeld is aan een bepaalde stijl of een bepaalde periode in de bouwgeschiedenis, maar dat dit type verbinding

tijdens de restauratie van heel wat monumenten zal worden aangetroffen, zowel in Vlaanderen als in het buitenland.

In deze paragraaf werd enkel een korte historische schets van de verbinding van natuurstenen door middel van het aangieten van verbindingsstaven met lood, opgehangen. De eigenlijke procedure van het aangieten met lood, wordt behandeld in paragraaf 3.2..

2.2. Waar worden deze verbindingen teruggevonden in de praktijk?

In praktijk komen in onze contreien zowel horizontale als verticale verbindingen van natuursteen of metselwerk voor, gerealiseerd met een ijzeren verankeringsstaaf en aangegoten met lood. Van bepaalde verbindingen is hun functie duidelijk, van andere is niet op het eerste zicht te zeggen waarom er nu een dergelijke verbinding aanwezig is. Misschien is zo'n verbinding dan effectief niet nodig, maar dachten de architecten van die tijd, met hun beperkt inzicht in krachtswerking en materialenkennis, dat een verbinding met een ijzeren staaf, aangegoten met lood, wel degelijk nodig was om de stabiliteit tijdens of na de uitvoering te garanderen. De architecten zouden zeker nooit zonder reden beslist hebben om een verbinding te realiseren met een ijzeren staaf aangegoten met lood, aangezien zo'n verbinding in die tijd een dure aangelegenheid was. De horizontale en verticale verbindingen zoals ze worden aangetroffen bij de Grieken en Romeinen worden hier buiten beschouwing gelaten. Het gebruik van de verbinding door het aangieten van ankerstaven met lood kan voor onze streken als volgt ingedeeld worden:

1. Om uitkragende delen, zoals bijvoorbeeld spuwers, te verankeren aan het opgaand metselwerk. De functie is duidelijk. De verankering dient om het uitkragende deel een zekere stabiliteit te geven door het te verankeren met de achterliggende structuur. De verbinding wordt hierbij vooral op buiging belast door het eigengewicht van de uitkraging. Ook wind- en sneeuwlasten kunnen worden beschouwd, maar zijn verwaarloosbaar klein t.o.v. het eigengewicht (Fig. 5 en 6).



Fig. 5: Voorbeeld van uitkragend deel: spuwer van de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Laken (BREDA K., 2002, 286).

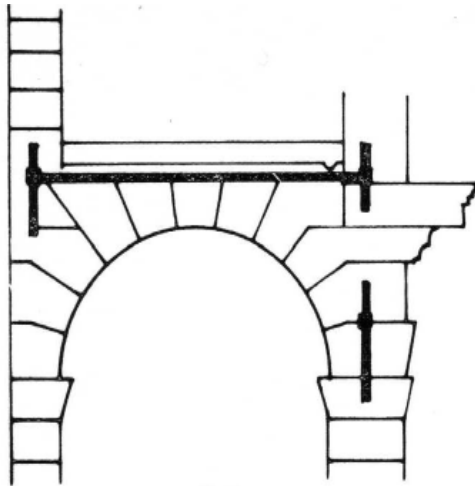


Fig. 6: Uitkragende delen kunnen op hun plaats gehouden worden door de bovenliggende massa, door een verankering naar achter toe of door een combinatie van beiden (NOEL P., 1965: 82)

2. Om een bekleding te verankeren met de structuur. Natuursteen is een duur materiaal. Daarom ontstond al gauw het idee om muren te construeren waarbij een voor- en achterparement in natuursteen werd gemaakt en de ruimte ertussen met baksteen of steenpuin werd opgevuld. In bepaalde gevallen werd een bakstenen muur met natuursteen bekleed aan de straatzijde om de muur zo een mooi uitzicht te geven (Fig. 7). Vooral vanaf de laatgotiek tot en met 18^e eeuw werden vele huizen opgericht waarbij alleen de voorgevel werd bekleed met natuursteen. De platen uit natuursteen moesten dan wel minstens zo dik zijn dat er een anker kon worden ingelaten (4-6 cm). Met behulp van krukankers wordt de natuursteenbekleding verankerd aan de metselwerkstructuur en met behulp van krammen worden de natuursteenplaten onderling verbonden (Fig. 7 en 8) (TEMMINCK G.C.L. & WARREMAN H.W., 1979: 10-16).

De krukankers die zorgen voor de verbinding met het achterliggende metswerk worden vooral op trek belast omdat de natuursteenbekleding en de muur uit metselwerk de neiging zullen vertonen om uit elkaar te gaan. Aangezien de loodprop, waarin het anker zich bevindt, weinig trekkracht kan opnemen, werden de ankers op het einde over negentig graden omgebogen om zo een betere verankering te bekomen (Fig. 8). Ook de krammen die de verschillende natuursteenplaten met elkaar verbinden worden vooral op trek belast. De krammen zijn op de uiteinden over negentig graden omgebogen om zo deze trekkracht te kunnen opnemen.

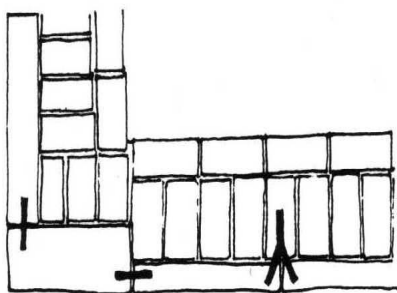


Fig. 7: Verankeringen van natuursteenbekleding (TEMMINCK G.C.L. & WARREMAN H.W., 1979:16).

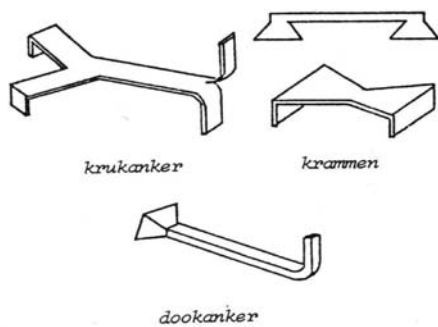


Fig. 8: Overzicht ankers gebruikt voor natuursteenbekleding (TEMMINCK G.C.L. & WARREMAN H.W., 1979:16).

3. Om het effect van ringbalken te creëren, bijvoorbeeld in het metselwerk van een toren, zonder uitwendige structurele elementen toe te voegen. Bij de restauratie van een aantal historisch belangrijke bouwwerken werden zo'n ringbalken ontdekt. Bij de St. Paul's Cathedral in Londen is een zeer ingenieus systeem toegepast zodat de onderstructuur de grote koepel met daarop een heel zware lantaarn kan dragen. Van binnen gezien, draagt de koepel enkel zijn eigen gewicht. Erboven draagt een kegelvormige metselstructuur, verankerd aan de basis met een ijzeren kettingstructuur, de 700 ton zware lantaarn.



Fig. 9: St. Paul's Cathedral in Londen: in de koepel treft men ijzeren ringbalken aan (schets bovenaan rechts) (<http://www.base24.com/cath.htm>)

Andere bekende voorbeelden waarbij ijzeren ringbalken voorkomen om de krachten van de koepel af te dragen zijn de Hagia Sofia in Istanbul, de Dom van Firenze en de Sint-Pietersbasiliek in Rome (COWAN H.J., 1977: 96-101 en 192-197). Ook in torens worden vaak ringbalken aangetroffen om de spatkrachten ten gevolge van een bovenliggende structuur op te vangen. De ijzeren ringbalken werden ingewerkt in het metselwerk of konden ook zichtbaar zijn. De ankers worden op trek belast (Fig. 10).

4. Om metselwerk een zeker trekcapaciteit te geven, bijvoorbeeld in gewelven of bogen die niet (meer) louter op druk zouden werken. Voor meer toelichting daaromtrent, wordt verwezen naar paragraaf 2.1. waar het gebruik van ijzeren ankerstaven in boogstructuren bij de Romeinen reeds behandeld werd.

5. Om dekstenen te bevestigen die niet vastliggen door een bovenliggende massa. Zonder verankering zou een deksteen bijvoorbeeld kunnen beginnen schuiven door zijn eigengewicht of door een accidentele belasting. De dekstenen worden meestal onderling en met de onderliggende structuur verankerd.
6. Om slanke elementen te verstevigen, bijvoorbeeld pinakels. Bij slanke elementen worden vaak de afzonderlijke delen verbonden door een ijzeren staaf, aangegoten met lood om zo het slanke element een weerstand te geven tegen horizontale krachten. In bepaalde gevallen loopt de ijzeren staaf door over de volledige lengte van het element (Fig. 11). Als het slanke element volledig verticaal staat wordt de verankeringsstaaf niet belast door het eigengewicht van de slanke structuur, zoals het geval bij een uitkraging, maar wordt de ankerstaaf wel op buiging belast door de wind.

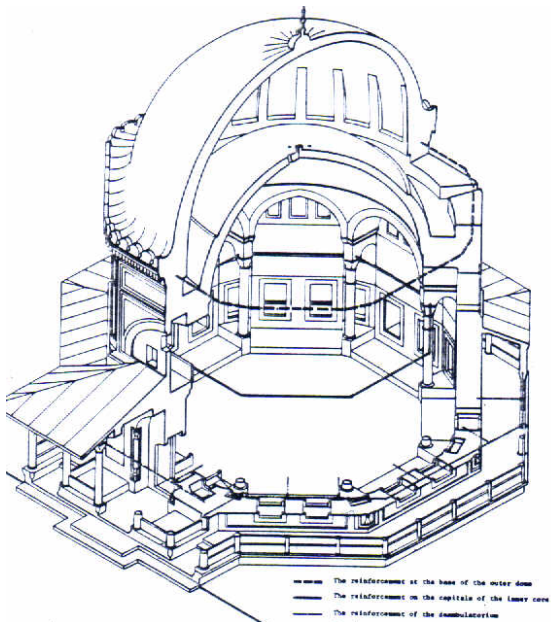


Fig. 10: Ijzeren ringbalk in de graftombe van Süleyman de Grote (TANYELI G. & U., 1989: 18).



Fig. 11: Pinakel met ankerstaaf (BREDA K., 2002, 288).

De ankers worden ook belast door thermische belastingen. Ten gevolge van variaties in de temperatuur kunnen, door de verschillende lineaire uitzettingscoëfficiënten van het anker en de natuursteen, spanningen ontstaan in de ankers.

Vaak werden ook ankers aangebracht die slechts nuttig en nodig waren tijdens de constructie. Zo werd een zuil, waarbij nog niet alle gewelven die aansluiten op die zuil voltooid waren, met ijzeren of houten trekstangen met andere zuilen verbonden om de stabiliteit van die zuil te waarborgen tijdens de constructie. Meestal werd die trekstang dan na de voltooiing verwijderd (VIOLLET-LE-DUC E.E., 1855: p. 402-403).

Naast deze structurele elementen wordt ook veel opgegoten met lood om kozijnstijlen, ijzeren zuilen, hekposten, balustrades, enz te bevestigen (VAN DER KLOES J.A., 1923: 109).

2.3. Richtlijnen bij restauratiewerken

Een van de grote charmes van het procédé van aangieten met lood in het kader van restauratieprojecten, is dat de verbinding op die manier in zijn oorspronkelijke toestand wordt hersteld. Traditionele methoden worden op deze manier gehandhaafd. Het Charter van Venetië werd in dit verband reeds vermeld in de inleiding. Algemener kunnen we de richtlijnen voor conservatie en restauratie in vier woorden samenvatten: ‘authenticity’, ‘reversibility’, ‘compatibility’ en ‘retreatability’ (VAN BALEN e.a., 1999: 108-109). Hierna lichten we deze begrippen wat nader toe en bekijken in hoeverre de verbinding met lood en ijzer aan deze voorwaarden voldoet.

De authenticiteit van een structuur ligt niet alleen op het vlak van de gebruikte materialen. Authenticiteit weerspiegelt zich ook op het vlak van de gebruikte structurele technieken, voor zover deze natuurlijk aan de stabiliteitsvereisten kunnen voldoen. Het structurele systeem van de originele constructie maakt integraal deel uit van zijn authenticiteit en verschaft inzicht in de visie van onze voorouders op het bouwen in die tijd. Authenticiteit houdt ook in dat oude bouwmethodes aan de volgende generaties worden overgedragen zodat geen kennis en ervaring verloren gaat. Het procédé van het aangieten met lood gebruikt originele materialen (in plaats van onbehandeld ijzer wordt tegenwoordig wel roestvrij staal gebruikt) en respecteert het structurele systeem. Het lood is vervormbaar en zorgt er voor dat de structuur in beperkte mate kan bewegen, hetgeen een groot voordeel is in bijvoorbeeld gebieden met veel seismische activiteit (zoals bijvoorbeeld het Nymphaeum in Sagalassos, Turkije). Daarnaast zorgt het aangieten met lood van ankerstaven uit roestvast staal ervoor dat de techniek niet verloren gaat voor de volgende generaties. Het is belangrijk dat er nog steeds vakmensen zijn die deze techniek kunnen toepassen en kunnen overdragen aan volgende generaties.

Reversibiliteit is een term die ontstaan is uit de tak van de restauratie van schilderijen. Het is er een belangrijk criterium voor een juiste keuze van behandeling. In de conservatie van gebouwen is deze reversibiliteit echter veel moeilijker te respecteren. Onlangs kwam een internationaal gezelschap van experts tot de conclusie dat: *“Along with the minimum intervention, the concept of reversibility has been considered to be one of the principal requirements of conservation treatments. However, in the case of treatment under discussion, reversibility is often not achievable and in some instances (as the case of cleaning treatments) not applicable. Prompted by the suggestion made by Sasse and Snethlage (chapter 12) as well as discussions which have long taken place in the field, it was proposed that the requirements of reversibility be replaced by the demand for compatibility and retreatability”* (TEUTONICO J.M. & CHAROLA A.E. e.a. , 1997: 293-313).

De interpretatie van deze richtlijn houdt zeker niet in dat reversibiliteit sowieso moet vervangen worden door compatibiliteit en herbehandelbaarheid. Er wordt enkel gewezen op het feit dat reversibiliteit niet altijd even toepasbaar is voor elke restauratieonderdeel en dat in het geval moeilijk kan voldaan worden aan de eis van reversibiliteit, overgeschakeld moet worden op eisen van compatibiliteit en herbehandelbaarheid. Bij ieder onderdeel van een restauratie moet echter nog altijd worden nagegaan of kan voldaan worden aan de eis van reversibiliteit.

Het procédé van aangieten met lood is vrij reversibel. De adhesie van het lood met de steen is niet erg groot. Ook de adhesie van lood met het ijzeren anker is klein. De ‘loodprop’ kan zonder veel schade weer uit de steen gehaald worden en het ijzeren anker kan gemakkelijk uit de loodprop verwijderd worden zodat het lood kan gerecupereerd worden.

Toch kan het aangieten met lood soms irreversibele handelingen met zich meebrengen. Zo moeten soms nieuwe gaten gemaakt worden omdat een anker uit roestvast staal bijvoorbeeld niet verkrijgbaar is in de geometrie die nodig is om twee oude gaten te gebruiken. In dit geval kan niet voldaan worden aan het criterium van de reversibiliteit en moet er overgeschakeld worden op de criteria van compatibiliteit en herbehandelbaarheid.

De compatibiliteit, waarvan sprake komt erop neer dat de gekozen behandeling geen negatieve gevolgen zal hebben.

Aan de eis van compatibiliteit wordt door het procédé van aangieten met lood voldaan voor zover er geen al te expansieve roestvorming optreedt. Het lood kan in beperkte mate de uitzetting van de ijzeren staaf door roestvorming opnemen, maar in bepaalde gevallen is de roestvorming zo groot (in bepaalde milieus zoals een zeeklimaat, een sterk vervuild stadsmilieu of bij gebruik van onbehandeld ijzer) dat er schade optreedt aan de steen. Er kunnen dan scheuren ontstaan of zelfs hele stukken steen afspringen.

In sommige gevallen kan het ook gebeuren dat de trekkrachten die optreden tussen twee verbonden stenen zo groot zijn dat het anker en de loodprop uit de steen worden gerukt en hierbij een wig steen mee uitrukken.

De herbehandelbaarheid betekent dat de huidige conservatiebehandeling geen toekomstige behandelingen uitsluit of belemmert. Zoals reeds deels vermeld bij de reversibiliteit, sluit het gebruik van het procédé van aangieten met lood geen toekomstige behandelingen uit omdat de loden prop perfect kan worden verwijderd zonder schade aan te richten aan de stenen. Toch wordt de herbehandelbaarheid in bepaalde gevallen belemmerd bij het gebruik van ankers uit roestvast staal die worden aangegoten met lood. In het geval van een aardbeving bijvoorbeeld, kan de verbinding in die mate sterk vervormen zonder te breken dat een restauratie zich opdringt. Doordat de verbinding echter sterk vervormd is kan een volgende restauratie belemmerd worden omdat het moeilijk is om de vervormde structuur te behandelen. Indien een brosse verbinding zou gerealiseerd worden, dan breekt de verbinding bij een overbelasting. Door de opgetreden breuk wordt een volgende behandeling niet gehinderd. Anderzijds moet wel aangestipt worden dat het ductiel gedrag van de ankers uit

roestvast staal wel voor een extra veiligheid zorgt doordat de verbinding vervormt en niet breekt.

2.4. Algemene eisen van de verbinding

Vooraleer de verbinding van natuursteen door middel van het aangieten met lood wat nader te bekijken, worden in deze paragraaf enkele eisen aangestipt waaraan een verbinding in natuursteen ons inziens zou moeten voldoen. Dit kan ons helpen om het procédé van het aangieten met lood en de mogelijke alternatieven daarvoor, met de benodigde kritische blik te bekijken.

Hierna wordt dus een overzicht gegeven van de eisen waaraan een droge verbinding tussen twee natuurstenen moet voldoen. Er wordt met andere woorden geen gebruik maken van mortel om de twee natuurstenen te verbinden.

1. Bij hevige sollicitaties moet de verbinding *zelf als eerste bezwijken* (sterkte verbinding moet kleiner zijn dan sterkte van de natuursteen). Er mag in geen geval breuk optreden in de natuursteen zelf. De verbinding moet met andere woorden zodanig gedimensioneerd zijn dat ze minder sterk is dan de natuursteen zelf.
2. De verbinding moet resistent zijn tegen *roestvorming*, zodat de verbinding niet expandeert door corrosie en zo schade veroorzaakt aan de natuursteen (zie paragraaf 3.4.).
3. Er moet een ankerstaaf worden aangebracht om te voorkomen dat de natuursteen breekt langsheen '*planes of weakness*' die dicht bij het scheidingsvlak tussen de twee natuurstenen gelegen kunnen zijn.
4. Het materiaal dat de ruimte tussen de ankerstaaf en de natuursteen opvult, moet de ruimte zo perfect mogelijk opvullen. De *viscositeit* van het materiaal moet dus voldoende laag zijn om die ruimte vrij gemakkelijk op te vullen (Merk op dat dit door de krimp van lood niet perfect gebeurt. Daarom is napriemen noodzakelijk.).
5. De verbinding moet op lange termijn haar eigenschappen behouden. Er moet met andere woorden een *duurzame* verbinding tot stand gebracht worden.
6. Bij het aanbrengen van de verbinding mag er niet teveel warmte vrijkomen omdat op die manier een *thermische schokbelasting* kan ontstaan die de natuurstenen zal doen barsten (Bij aangieten met lood moet daarom het lood voldoende langzaam in het gietkanaal gegoten worden. Dit kan er echter voor zorgen dat het gietkanaal dichtslibt (zie paragraaf 3.2.)).
7. De verbinding mag *niet schadelijk* zijn voor de *arbeiders* die de verbinding uitvoeren (zie paragraaf 3.3.)
8. De *kostprijs* moet zo laag mogelijk gehouden worden. Het aspect van de arbeidsintensiviteit mag hierbij zeker niet uit het oog verloren worden (zie paragraaf 3.6.) aangezien dit een groot aandeel kan vormen in de totale kostprijs van de verbinding. De verbinding moet dus zodanig zijn dat de som van arbeidskosten en de kosten voor de gebruikte materialen, minimaal is.

9. Ook het *historische* aspect van een verbinding moet in rekening gebracht worden. Er moet in een zo groot mogelijke mate voldaan worden aan de eisen van authenticiteit, reversibiliteit en compatibiliteit (zie paragraaf 2.3.).
10. Als de twee vlakken verlijmd worden, moet er voor gezorgd worden dat de *vochthuishouding* in de twee natuurstenen zo weinig mogelijk beïnvloed wordt. De lijm mag geen vochtscherm vormen tussen de twee natuurstenen.
11. De lineaire *uitzettingscoëfficiënt* van de gebruikte materialen mag niet te veel verschillen van de lineaire uitzettingscoëfficiënt van natuursteen. Deze vereiste moet toch gerelativeerd worden omdat de verbinding vaak in de steen aanwezig is en slechts in beperkte mate onderhevig is aan temperatuurswijzigingen.
12. De verbinding mag niet belastend zijn voor het *milieu* (zie paragraaf 3.3.).
13. De verbinding moet ook *esthetisch* verantwoord zijn. De vraag blijft natuurlijk: wanneer is iets esthetisch verantwoord?

3. Aangieten met lood: technologie

3.1. Historisch gebruikte materialen

3.1.1. Smeedijzer

3.1.1.1. Historische productiemethode

Het merendeel van de ankers dat aangetroffen worden in historische gebouwen is vervaardigd uit smeedijzer. Grieken en de Romeinen produceerden ijzer door het ijzererts in open ovens, renhaarden, te verhitten. Hierdoor ontstond een sponsachtige vaste massa, die voor circa 90% uit ijzer bestond. De rest waren verontreinigingen (slak). Dit productieproces wordt directe reductie genoemd. Ijzeroxide werd opgewarmd en in contact gebracht met koolstof, zodat de koolstof en de zuurstof van het ijzererts combineerden en er ijzer werd gevormd ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}$). Het materiaal kreeg de gewenste eigenschappen door het te verhitten en in deze warme toestand met hamers te bewerken, een bewerking die we nu smeden noemen. Door de hoge temperatuur en het hameren werd de bij die hoge temperatuur vloeibare slak uitgedreven, waardoor een relatief zuiver ijzer ontstond. Toch kon dit ijzer wat betreft sterkte niet tippen aan de werkstukken die toen gemaakt werden uit brons. De ontdekking dat de eigenschappen van ijzer verbeteren door het te verhitten in een koolstofafgevend milieu (bijvoorbeeld een houtskoolvuur) en het voortdurend te smeden, betekende een grote doorbraak voor de toepassing van ijzer. Er werd al snel ontdekt dat ijzer gehard kon worden door het te verhitten en vervolgens snel af te koelen (afschrikken).

Uiteraard stond de ontwikkeling niet stil. Waterkracht werd ingezet voor het aandrijven van zowel smeedhamers als blaasbalgen die voor het toevoeren van verbrandingslucht zorgden. Rond 1300 hadden de smeedhamers al een gewicht van 600 tot 1200 kilo. Schaalvergroting en de toepassing van geforceerde luchttoevoer leidden tot een hogere temperatuur in de ovens, waardoor het eindproduct geen sponsachtig vast ijzer meer was, maar vloeibaar ruwijzer. Tussen 1150 en 1350 werden geen verdere ontwikkelingen meer vastgesteld, maar vanaf het midden van de 15^e eeuw werd in West-Europa opnieuw ruwijzer in met houtskool gestookte ovens geproduceerd. Deze ovens kunnen als voorlopers van onze hoogovens beschouwd worden. Net als tegenwoordig bevatte het ruwijzer uit de middeleeuwse hoogoven zo'n 2 tot 3 % koolstof. Omdat het materiaal in vloeibare vorm beschikbaar was, kreeg het de naam "gietijzer". Gietijzer is weliswaar sterk, maar bevat een hoog percentage koolstof. Deze aanwezige koolstof zorgt voor grafietlamellen die het gietijzer bros maken. Gaandeweg leerden de gietmeesters om het gietijzer in te zetten voor eenvoudige huishoudelijke voorwerpen, en slaagden smeden erin het koolstofgehalte te verlagen (ontkolen) door het materiaal meerdere malen te verhitten en te smeden. Door dit ontkolen ontstaat smeedijzer. Dit proces waarbij het ijzererts eerst werd gesmolten in een primitieve hoogoven om zo 'pig iron', eigenlijk gietijzer, te produceren en waarbij dit 'pig iron' in een tweede fase werd

bewerkt tot smeedijzer door bij het smeden het 'pig iron' te decarboniseren, wordt indirecte reductie genoemd. Aangezien ankers meestal trekkrachten moesten opnemen, werden de ankers niet gemaakt uit gietijzer maar uit smeedijzer, aangezien gietijzer slechte eigenschappen in trek heeft.

Tot ongeveer 1750 was alle ijzerproductie gebaseerd op het gebruik van houtskool als brandstof voor de smeltovens. Het houtskool werd verkregen door hout te verhitten in afwezigheid van lucht. Ontbossing, veroorzaakt door de toenemende productie van ijzer, werd in Europa echter een serieus probleem. Er werd gezocht naar alternatieve brandstoffen. Steenkool voldeed niet, omdat bij het gebruik van steenkool het ijzer onder andere zwavel opneemt, waardoor de eigenschappen nadelig beïnvloed worden. Door steenkool echter onder uitsluiting van lucht te verhitten ontstaat er "cokes", dat evenals houtskool, uit nagenoeg zuiver koolstof bestaat. Cokes bleek daardoor een goed alternatief voor de steeds schaarser wordende houtskool en wordt tegenwoordig nog steeds gebruikt in hoogovens. In 1784 werd door Henry Cort een proces geïntroduceerd waarmee het mogelijk werd grotere hoeveelheden ruwijzer in één keer te ontkolen, het zogenaamde puddel-proces. In de puddeloven wordt het ruwijzer via een overstrijkende vlam omgezet in smeedijzer. In het puddelproces komt het ijzer niet tot smelten, maar ontstaat er een gloeiende deegachtige massa. Door het puddelijzer vervolgens te smeden wordt de slak uitgedreven. Vanaf het midden van de 19^e eeuw vonden een aantal ontwikkelingen plaats, die hebben geleid tot de ontwikkeling van de huidige ijzer- en staalindustrie. Maar ankers die worden aangetroffen in historische gebouwen bestaan voor het overgrote deel uit smeedijzer, houtskoolsmeedijzer of puddelsmeedijzer. Tegen het eind van de 19^e eeuw werd smeedijzer meer en meer vervangen door staal (<http://www.mcb.nl/nieuws/mcbnieuws15.html> en ASHURST J.& N., 1989: 15).

3.1.1.2. Eigenschappen

Smeedijzer is één van de zuiverste vormen van ijzer met minder dan 1 % koolstof. Het heeft een hoog gehalte ijzersilicaatslak, tussen de 1 % en 4 %. Er zijn ook sporen van fosfor en zwavel aanwezig in smeedijzer, maar andere legeringselementen ontbreken of zijn aanwezig in heel minimale percentages. Deze slak vindt men terug als puur fysische verbindingen, d.w.z. dat het niet gelegeerd is zoals bij staal. Smeedijzer heeft een vezelachtige structuur, waardoor het heel smeedbaar is. Smeedijzer smelt rond 1500 °C, maar beneden deze temperatuur is het een deegachtige massa die makkelijk kan bewerkt worden. Het is een zacht, ductiel en magnetisch materiaal. Smeedijzer heeft een hoge treksterkte en hoge rekbaarheid, maar bezit ook goede eigenschappen in druk en dat in tegenstelling met gietijzer dat enkel in druk goede eigenschappen bezit. Het is dus relatief zacht en buigzaam, maar is bovendien taai en bezit een goede weerstand tegen vermoeiing. Smeedijzer kan aanzienlijk vervormen zonder breukverschijnselen. Smeedijzer kan opgewarmd, heropgewarmd en bewerkt worden in verschillende vormen. Hoe meer het smeedijzer wordt opgewarmd en heropgewarmd, hoe beter zijn mechanische eigenschappen (ductiliteit en treksterkte) worden.

Het kan makkelijk bewerkt worden door te smeden, te walsen en te buigen. Het kan dus zowel koud als warm behandeld worden, waarbij het door zijn zacht karakter mogelijk is om scherpe details te bekomen zonder dat het materiaal scheurt. Smeedijzer kan gelast worden. Bij een brandbelasting zal blootgesteld smeedijzer dat onder spanning staat, plastisch worden, vervormen en tenslotte falen.

Smeedijzer heeft een relatief goede corrosieweerstand, wat door het talrijke onaangetaste historische smeedijzerwerk bewezen wordt. Het weerstaat bijna beter dan bepaalde moderne staalsoorten aan corrosieaantasting. Het oude, ruwe productieproces had als resultaat dat er niet-corrosieve silicaatslak in het ijzer aanwezig is. Het gietijzer waaruit het smeedijzer wordt bekomen heeft wel nog een grotere corrosieresistentie. Alhoewel smeedijzer een goede reputatie heeft wat betreft corrosieweerstand, treden hoe langer hoe meer problemen op waarschijnlijk door de toenemende luchtvervuiling(<http://w3.gsa.gov/web/p/hptp.nsf/035c614b995c0406852565d1006211b3/605b3c7e2a15edee852565c50054b3e9?OpenDocument>: U.S. General Services Administration Historic Preservation Technical Procedures; ASHURST J. & N., 1989: 20 en WEAVER M.E. & MATERO F.G., 1993: 181-182).

3.1.1.3. Roestvast staal als alternatief voor smeedijzer

Als bij restauraties smeedijzeren ankers worden vervangen omdat de originele ankers te sterk gecorrodeerd waren, wordt in het geval er een metaal moet gebruikt worden bijna altijd een roestvaste staalsoort gebruikt. Het is zo dat het smeedijzer zoals het vroeger werd geproduceerd, vandaag niet meer op de markt te verkrijgen is. De keuze voor een roestvaste staalsoort is dan ook vlug gemaakt omdat deze staalsoort algemeen gezien een goede weerstand heeft tegen corrosie. Dat hier echter ook corrosieproblemen kunnen optreden is door de meeste architecten en aannemers een onderschat gegeven. Het roestvast staal dat tegenwoordig wordt gebruikt voor ankers is meestal AISI 304 of AISI 316. Dit zijn staalsoorten die heel courant gebruikt worden en ook makkelijk verkrijgbaar zijn in allerlei vormen. AISI 316 is per kilogram wel ongeveer 10-25 % duurder dan AISI 304 (BEDDOES J. & PARR J.G., 1999: 128).

AISI 304 en AISI 316 zijn beide austenitische (ijzer heeft een kubisch vlakken gecentreerd rooster) roestvaste staalsoorten. Roestvaste staalsoorten zijn legeringen van ijzer, chroom (minimaal 10,5 %) en andere elementen die in oxiderende omgevingen een gepassiveerd oppervlak krijgen. Austenitische roestvaste staalsoorten zijn legeringen van tenminste vier belangrijke elementen: ijzer, chroom, koolstof en nikkel. Nikkel bevordert de vorming van een volledig austenitische structuur (BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 520-521).

De samenstellingen worden gegeven in tabel 1 (BEDDOES J. & PARR J.G., 1999: 129).

Soort	C %	Si %	Mn %	Cr %	Mo %	Ni %	P %	S%
AISI 304	0.08	1.0	2.0	18.0-20.0	-	8.0-10.5	0.045	0.03
AISI 316	0.08	1.0	2.0	16.0-18.0	2.0-3.0	10.0-14.0	0.045	0.03

Tabel 1: Samenstelling AISI 304 en AISI 316.

Ze hebben allebei een laag koolstofgehalte om precipitatie van carbiden te voorkomen. Er wordt molybdeen toegevoegd bij AISI 316 om de corrosieweerstand te verhogen.

De relevantste fysische eigenschappen worden gegeven in tabel 2 (BEDDOES J. & PARR J.G., 1999: 68), de relevantste mechanische eigenschappen in tabel 3 (BEDDOES J. & PARR J.G., 1999: 131-133).

Soort	Densiteit (g/cm ³)	Elasticiteitsmodulus (GPa)	Lin. Uitzettingscoëf. 100 °C (µm/m°C)	Smeltpunt (°C)
AISI 304	8.0	193	17.2	1400-1450
AISI 316	8.0	193	15.9	1375-1400

Tabel 2: Fysische eigenschappen AISI 304 en AISI 316.

Soort	Treksterkte (MPa)	0.2 % vloeigrens (MPa)	Verlenging (%)
AISI 304	515	205	30
AISI 316	515	205	30

Tabel 3: Mechanische eigenschappen AISI 304 en AISI 316.

De fysische en mechanische eigenschappen zijn bijna analoog, met uitzondering van de lineaire uitzettingscoëfficiënt en het smeltpunt. Ze hebben betere mechanische eigenschappen dan koolstofstaal, maar een iets lagere elasticiteitsmodulus. Ook de corrosie-eigenschappen verschillen, maar deze worden besproken in paragraaf 3.4.4.3..

3.1.2. Lood

3.1.2.1. Productiemethode: historisch en hedendaags

Lood is een materiaal dat al goed gekend was in de oudheid. Het is waarschijnlijk één van de eerste metalen die door de mens werden gebruikt. Het oudste restant van lood werd gevonden in Catal Hüyük in Turkije en is gedateerd op 6500 B.C.. Dit zachte, ductiele en makkelijk smeltend materiaal werd gebruikt door de Egyptenaren voor standbeelden, pijpleidingen, het glazuren van aardewerk en in de cosmetica. De Chinezen gebruikten in 2000 B.C. lood voor hun munten. De Romeinen produceerden 80000 ton per jaar en gebruikten lood vooral voor waterleidingen. In de middeleeuwen werd lood aangewend voor de glas-in-loodramen en dakdekkingen. Momenteel wordt lood vooral geproduceerd voor zijn gebruik in batterijen

(SMITH J.F., 2001: 4434-4436). In deze paragraaf wordt dieper ingegaan op zowel de historische als de moderne productiemethode, omdat dit zijn belang heeft in de verdere bespreking van de invloed van bepaalde sporenelementen op de eigenschappen van historisch en modern geproduceerd lood. Door de evolutie van het productieproces zijn de gehalten van bepaalde sporenelementen veranderd, waardoor de eigenschappen van lood zijn veranderd (zie paragraaf 4.1.).

De belangrijkste ertsen waaruit lood wordt gewonnen zijn galeniet (loodglans) (PbS), cerussiet (PbCO_3) en anglesiet (PbSO_4). Loodmineralen zijn frequent geassocieerd met waardevolle zink- en kopersulfides. Belangrijke sporenelementen die kunnen worden aangetroffen in loodsulphideconcentraties zijn zilver, goud, koper, antimoon, arsenicum, bismuth en tin. Minder belangrijke sporenelementen, maar die toch in significante hoeveelheden aanwezig kunnen zijn, zijn selenium, indium, thallium en kwik. De ertsen worden ontgonnen in open en ondergrondse mijnen. Het erts wordt eerst verbrijzeld, geplet en gemalen, gevolgd door een selectieve flotatie en tenslotte wordt het gescheiden op basis van het soortelijke gewicht van de verschillende fracties om gescheiden lood-, zink- en koperconcentraties te bekomen. Door de mineralogie van bepaalde ertsen is het soms maar mogelijk om zink-loodconcentratie te bekomen. Na deze behandelingen verschillen de bekomen producten sterk in samenstelling, afhankelijk van het behandelde erts. Het loodgehalte kan variëren van 32 % tot 78 % en het zinkgehalte van 1 % tot 14 % (GRANT R.M., 2001: 4439-4440).

Al vóór de Grieken en Romeinen werd lood geproduceerd. Door de ontwikkeling van het productieproces van lood en zilver ontstonden enkele algemene principes van metallurgie, namelijk het bewerken van sulfide-ertsen en het cupelleren van zilver. De Grieken en Romeinen roostten eerst het galenieterts totdat het gedeeltelijk ontwaveld was. Vervolgens reduceerden ze de bekomen producten. Het proces werd uitgevoerd in primitieve ovens, gebouwd in klei en bakstenen. De brandstof en het erts werden ofwel volledig gemengd ofwel in de oven in afwisselende lagen gelegd. De ovens werden vaak gebouwd tegen een helling, om zo de overheersende wind te gebruiken als luchttoevoer. Wanneer dit niet het geval was, was er een artificiële luchttoevoer. Een deel van de zwavel ontsnapte als SO_2 , maar een deel bleef ook achter in het erts als onaangetast PbS of als PbSO_4 . Wanneer het erts voldoende ontwaveld was, werd de temperatuur omhoog gedreven en de luchttoevoer beperkt. De bekomen loodoxide (PbO) en loodsulfaat (PbSO_4) reageerden met het overgebleven loodsulphide (PbS) tot de vorming van lood. Dit lood verzamelde zich op de bodem van de oven, terwijl de overblijvende zwavel ontsnapte als SO_2 . De toegevoegde brandstof, in de vorm van koolstof, bevorderde ook de reductie van het loodoxide en loodsulfaat door de reactie met koolstof en voorkwam ook zo re-oxidatie. Het bekomen lood was een legering van zilver en lood, dat harder was dan puur lood. Het bevatte ook nog veel andere onzuiverheden zoals antimoon, koper, tin en arsenicum. Dit oude proces combineerde twee moderne processen, roosten en reductie. Alhoewel de techniek redelijk simpel was, zijn de overeenkomstige chemische reacties complex en de oude metallurgist had dan ook te weinig

kennis om de reacties volledig te controleren. Het onvermijdelijke resultaat was een klein rendement en een lage opbrengst. Slak, het afval van het productieproces, dat gevonden wordt in de buurt van zo'n oude loodverwerkende fabrieken bevat nog aanzienlijke hoeveelheden lood en zilver. De chemische reacties zijn als volgt:

roosten: $2\text{PbS} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{PbO} + 2\text{SO}_2$ en $\text{PbS} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{PbSO}_4$

reductie: $\text{PbS} + 2\text{PbO} \rightarrow 3\text{Pb} + \text{SO}_2$ of $\text{PbS} + \text{PbSO}_4 \rightarrow 2\text{Pb} + 2\text{SO}_2$

en $2\text{PbO} + \text{C} \rightarrow 2\text{Pb} + \text{CO}_2$

(HABASHI F., 1994: 24-25 en 47).

De Grieken en Romeinen beseften maar al te goed dat er meestal nog behoorlijke hoeveelheden zilver in het geproduceerde lood zaten (tot 5 g per kg lood). Het was dan ook niet verwonderlijk dat ze technieken zochten om het percentage zilver te verlagen. Het lijkt erop dat de Grieken en Romeinen iets afwisten van het principe van het 19^e eeuwse Pattinson proces: indien lood met een gehalte zilver wordt gesmolten, dan bestaan de kristallen die het eerst gevormd worden bij afkoeling uit bijna zuiver lood. De vloeistof wordt dus rijker aan zilver en dit proces kan een aantal keren herhaald worden totdat het zilveragehalte tussen de 1 % en 2 % bedraagt. Deze legering kan dan gecupelleerd worden en het loodoxide dat gevormd wordt kan terug naar de smeltoven gebracht worden. Bij cupelleren smelt men onder toevoeging van veel lucht het lood in een oven waarvan de bodem poreus is. Het door oxidatie ontstane loodoxide smelt en wordt door de bodem van de cupella opgezogen, terwijl het niet-geoxideerde zilver als metaal achterblijft. Romeinen konden zo het lood ontzilveren tot 0,01 %. Alhoewel de antieke metallurgist heel efficiënt het lood kon ontzilveren, was het rendement niet zo hoog omdat er veel lood en zilver initieel verloren ging bij het roosten en smelten (HABASHI F., 1994: 47-50 en 144-145).

Na de ondergang van het Westromeinse rijk, stond de productie op een laag pitje met als gevolg dat er bijna geen ontwikkelingen waren. Vanaf de middeleeuwen steeg de productie terug en ging men op zoek naar productietechnieken om steeds meer rendement te halen uit het erts en om steeds grotere hoeveelheden erts tegelijkertijd te behandelen. Het principe van roosten en smelten om lood te bekomen en vervolgens het cupelleren om het zilver eruit te krijgen, bleef grotendeels bestaan tot in de industriële revolutie. In die periode werden verschillende soorten ovens ontwikkeld, elk met zijn voor- en nadelen: haardoven, reverbeeroven, cupola-oven, "Cornish flowing" oven, horizontaal hete-luchtkanaal, e.a.. Een hogere efficiëntie werd bekomen door efficiëntere brandstoffen, een gecontroleerdere luchttoevoer in de verschillende fases van het proces, hogere temperaturen e.a.. Vanaf de industriële revolutie is men, door de explosieve groei van kennis, gekomen tot het proces zoals het nu nog altijd in grote lijnen wordt toegepast. Dit proces spitste zich meer en meer toe op het verwijderen van onzuiverheden om zo tot heel zuiver lood te komen (DAY J. & TYLECOTE R.F., 1991: 93-119).

Lood wordt momenteel bereid door galeniet te roosten (op 100 °C) en het verkregen loodoxide in een hoogoven te reduceren met cokes. De basisbehandeling is dus dezelfde

gebleven, maar door betere infrastructuur liggen de rendementen wel veel hoger dan vroeger. Het verkregen vloeibare materiaal bevat diverse verontreinigingen, die door een aantal doelgerichte nabehandelingen tot veel kleinere hoeveelheden kunnen verwijderd worden dan vroeger, waar men door het smelten bij de hoge temperatuur de onzuiverheden hoopte te verzamelen in de slak. Koper wordt verwijderd door afkoelen tot net boven het smeltpunt (tot 370-400 °C), waardoor een vaste koek ontstaat die van de vloeistof kan worden gehaald. Het kopergehalte is dan kleiner dan 0,1 %. Door het toevoegen van zwavel kan het kopergehalte nog verder afnemen tot 0,003 % - 0,007 %. Tin, arseen en antimoon worden geoxideerd bij 650 °C, waarbij een slak van oxiden ontstaat. Bij het Harrisproces worden tin, arseen en antimoon verwijderd door bijtende soda toe te voegen. Zilver en bismuth zijn edeler dan lood en kunnen niet verwijderd worden door oxidatie. Zilver wordt verwijderd in het Parkesproces door het toevoegen van zink op 650 °C, gevolgd door langzaam afkoelen. Zink dat overblijft in het lood kan verwijderd worden door vacuümdestillatie. Door het toevoegen van calcium en magnesium op 405-420 °C aan het lood en het vervolgens te laten afkoelen, wordt CaMg_2Bi_2 gevormd zodat het bismuth wordt verwijderd (Kroll-Betterton proces). Zuiver lood kan worden verkregen door elektrolyse met ruw lood als anode en H_2SiF_6 als elektrolyt. Op de kathode wordt 99,99 % zuiver lood afgezet. De wereldproductie bedraagt ongeveer 6 miljoen ton per jaar (http://www.periodictableonline.org/elem_nl.cfm?IDE=Pb en GRANT R.M., 2001: 4441).

3.1.2.2. Mechanische eigenschappen en densiteit

De mechanische eigenschappen van verschillende soorten lood zijn afhankelijk van het percentage van de spoorelementen. De samenstelling van enkele soorten lood, met loodpercentage van 99.90 % of hoger staan vermeld in tabel 4, hun overeenkomstige mechanische eigenschappen in tabel 5 (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545 en 550 en <http://www.matweb.com>).

Soort	Pb	Ag	Bi	Cu	Fe	Zn	As+Sb+Sn
Puur lood	100	-	-	-	-	-	-
UNS L50042	99.94	0.0015	0.050	0.0015	0.002	0.001	0.002
UNS L51120	99.90	0.002-0.02	0.005	0.04-0.08	0.002	0.001	0.002

Tabel 4: Samenstelling van enkele loodsoorten.

Er kan opgemerkt worden dat de hardheid en de uiterste treksterkte variëren afhankelijk van de samenstelling. Het is duidelijk dat bepaalde spoorelementen een invloed hebben op de mechanische eigenschappen van lood. Deze invloeden op de hardheid worden besproken in paragraaf 4.2..

Eigenschap	Puur lood	UNS L50042 (sand cast)	UNS L51120
Densiteit 20 °C (kg/dm ³)	11.34	11.36	11.34
Brinellhardheid *	4.2	3.2-4.5	4-6
Uiterste treksterkte (MPa)	18	12-13	16-19
Verlenging bij breuk (%)	-	30	30-60
E-modulus (Gpa)	14	14	14

*Brinellhardheid: bal van 10mm, 100 kg belasting, gedurende 30 sec

Tabel 5: Mechanische eigenschappen en densiteit van enkele loodsoorten.

De densiteit varieert met de temperatuur. Zo heeft puur lood een densiteit van 11.34 kg/dm³ bij 20 °C. Bij zijn smeltpunt (327.4 °C) heeft lood een densiteit van 11.005 kg/dm³ in vaste toestand en een densiteit van 10.686 kg/dm³ in vloeibare toestand (SMITH J.F., 2001: 4437).

Lood is een zacht, glad en buigzaam materiaal, waardoor het goed verwerkbaar is in allerlei vormen. Zijn uiterste treksterkte is klein in vergelijking met andere constructiematerialen. Het hoofdbezwaar tegen het gebruik van lood als constructiemateriaal is niet zozeer zijn lage treksterkte, maar wel de gevoeligheid van lood voor kruipeffecten. Lood vervormt voortdurend, zelfs bij kleine spanningen en deze vervormingen resulteren tenslotte in falen, zelfs bij spanningen die veel kleiner zijn dan de uiterste treksterkte. UNS L51120 heeft een minimale kruipverhouding van $3.4 \cdot 10^{-4}$ %/uur bij een spanning van 2 MPa en bij 20 °C. Als gevolg van deze kruip heeft lood een kleine vermoeiingsweerstand. De vermoeiingssterkte van UNS L50042 bedraagt 3 MPa. Door legeringselementen toe te voegen kunnen deze eigenschappen gevoelig worden verbeterd (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545,547 en 550 en <http://www.matweb.com>).

3.1.2.3. Thermische eigenschappen

Puur lood heeft de volgende thermische eigenschappen (Tabel 6) (SMITH J.F., 2001: 4437).

Smeltpunt (T_m)	327.4°C
Lineaire uitzettingscoëfficiënt (20°C-100°C) (α)	29.1 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
Krimp bij stollen (ϵ_k)	3.85 %

Tabel 6: Thermische eigenschappen puur lood.

Lood heeft een vrij lage smelttemperatuur met als voordeel dat het gemakkelijk op de werf gesmolten kan worden door het lood op te warmen in een metalen recipiënt. Het lood wordt wel opgewarmd tot op een hogere temperatuur omdat anders bij het gieten het lood onmiddellijk stolt. De lineaire uitzettingscoëfficiënt (29.1 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) ligt hoger dan de lineaire

uitzettingscoëfficiënt van natuursteen (gemiddeld 4-12 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) en van gietijzer (+/- 10.5 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) of staal (12-13 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$) (VAN GEMERT, 1986: VI.4).

Wanneer het lood te vlug of in te grote hoeveelheden in de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat gegoten wordt, kan dit thermische spanningen veroorzaken die de natuursteen zwaar kunnen beschadigen.

We merken ook nog dat tijdens het smelten van het lood moet opgelet worden dat het warme lood niet in contact komt met waterdruppels omdat er dan een explosieve reactie (het water verdampt door de hoge temperatuur van het lood en de gasbellen doen het lood opspringen (cfr. blussen van een frietketel met water) kan ontstaan.

3.1.3. Historische alternatieven voor smeedijzer

Bij restauratieprojecten worden soms ook ankers aangetroffen in koper of brons i.p.v. smeedijzer. Zo zijn bronzen doken aangetroffen in de tempel van Poseidon te Soenion (VANHOVE D. e.a., 2001: 60).

In de Oudheid was koper een bekend en veel gebruikt metaal, vooral voor het maken van wapens. Het diende ook ter vervanging van goud vanwege zijn mooie "goud"glans. Koper komt voor in ertsen, maar kan ook bekomen worden uit gesteenten die metallisch koper bevatten door het gesteente te vergruizen en de brokjes koper te verzamelen. Daardoor is het één van de oudste constructiematerialen. Tegenwoordig wordt koper nog enkel gewonnen uit ertsen, die in het beste geval slechts 5 % koper bevatten. Het is dan ook tegenwoordig een duur materiaal omdat dure, ingewikkelde processen nodig zijn om het koper uit de ertsen te krijgen (BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 608).

Koper is een duurzaam en relatief goed corrosieresistent materiaal. Puur koper is een sterk, ductiel en buigzaam materiaal, waardoor het makkelijk te bewerken is. Initieel heeft koper een helder roodachtige bruine kleur. Er wordt al vlug een patina gevormd op het koper en deze patina beschermt het koper van verdere corrosieaantasting. Dus alhoewel het koper corrodeert, zorgt deze patina ervoor dat het koper behoorlijk corrosieresistent is (<http://w3.gsa.gov/web/p/hptp.nsf/a533f1f859737bc9852565cc0058d0b6/f0c205eec8a1107a852565c50054b3f8?OpenDocument>: U.S. General Services Administration Historic Preservation Technical Procedures).

De eigenschappen van hedendaags zuiver koper zijn samengevat in tabel 7 (BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 8 en 807). Het oude koper bevatte waarschijnlijk enkele onzuiverheden en daardoor zullen de eigenschappen licht verschillen van het hedendaagse zuivere koper.

Treksterkte (MPa)	Rekgrens (MPa)	Breukrek (%)	E-modulus (GPa)
380	345	4-8	117
Hardheid HV	Soortelijke massa (kg/m ³)	Lin. uitzettingcoëff. 10 ⁻⁶ (m/mK)	Smelttemperatuur (°C)
60	8940	17.7	1082

Tabel 7: Eigenschappen koper (99.9 %).

Over brons bestaat nogal wat verwarring, omdat brons een term is die een heel assortiment materialen omvat. Brons is volgens zijn definitie een legering van koper en tin. De eerste bronssoorten waren legeringen van koper en tin. In de loop der tijden zijn echter vele varianten gemaakt, die ook de naam brons bleven dragen. Het brons van de oude Griekse paarden op het San Marco in Venetië bevat 94.4 % tot 97.2 % koper en 1.2 % tot 3.6 % tin. Dit brons bevat ook 1.0 % tot 1.7 % lood en sporen van ijzer. Ander historisch brons en hedendaagse bronssoorten kunnen 80 % tot 90 % koper en 10 % tot 20 % tin bevatten. Waarschijnlijk ontdekte men in de oudheid toevallig dat het toevoegen van een kleine hoeveelheid lood de gieteigenschappen van het brons verbeterden. Er zijn vier andere groepen moderne legeringen die vaak ook brons worden genoemd: fosforbrons, aluminiumbrons, siliciumbrons en nikkelbrons. Messing wordt gedefinieerd als een legering van koper en zink, waarbij het zinkgehalte tussen de 10 % en 40 % ligt (WEAVER M.E. & MATERO F.G., 1993: 200-201).

Enkele eigenschappen van het moderne brons UNS C90700 (89 % koper, 11 % tin) worden gegeven in tabel 8 (BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 807).

Treksterkte (MPa)	Rekgrens (MPa)	Breukrek (%)	Hardheid HV
310	145	20	70
E-modulus (GPa)	Soortelijke massa (kg/m ³)	Lin. uitzettingscoëff. (10 ⁻⁶ m/mK)	
103	8780	18.4	

Tabel 8: Eigenschappen UNS C90700.

Brons is een zalm-goudkleurig metaal dat zelden wordt gezien zonder de kleur van een patina die zich ontwikkelt in een stedelijke, maritieme of industriële omgeving. In tegenstelling met koper is deze patina meestal niet corrosiebeschermend. Vocht, zwaveldioxide en stof zijn de belangrijkste corrosieve reagentia van koper. Deze atmosferische reagentia werken op basis van een combinatie van chemische en elektrochemische reacties (ASHURST J. & N., 1989: 80-81).

In de 19^e eeuw werden op vele plaatsen steenverbindingen gemaakt met stenen pinnen. Omdat de fysische eigenschappen van het werkstuk en de verbinding volledig gelijk zijn, lijkt deze verbinding op het eerste zicht ideaal. De verbinding is echter te weinig elastisch en dus niet belastbaar. Er treden dan ook vaak scheuren en barsten op en o.a. door vochtinsijpeling langs

deze barsten kan de structuur dan verder aangetast worden (KIESEWETTER A. & KIESOW G., 1997: 671-672).

3.1.4. Historische alternatieven voor lood

Wat betreft alternatieven voor lood vermeldde Van der Kloes een aantal interessante opmerkingen in zijn boek “Handleiding voor den Metselaar” uit 1923: “het bevestigen van de dook geschiedt het best door aangieten met lood. Dit krimpt bij het stollen, sluit zich dus vast om de dook, maar zit los in het gat. Als men erbij kan komen, drijft men het oppervlakkig aan door een houw met een beitel, maar wanneer het er werkelijk op aankomt, m.a.w. als het om weerstand tegen uittrekken te doen is, helpt dit niets. Enkelen laten hun doken met tin opgieten, omdat dat iets minder krimpt dan lood. Van aandrijven is dan geen sprake en dook en tin zullen nauw verbonden even beweegelijk in het gat zitten als bij het gebruik van lood. Zeer goed zijn doken aan te gieten met zwavel in de verhouding van 4 gewichtsdelen op vijf fijn zand. Zwavel zet uit bij het stollen. De dook komt dus als men hem weerhaken geeft tegen het schuiven in de zwavel uitermate vast te zitten. Doch zwavel heeft de nadelige eigenschap van als er vocht bijkomt het ijzer sterk in te vreten. Het best is instampen van portlandcement in de verhouding van 1 op 2,5 of 3 met fijn zand tot aardvochtige toestand aangemaakt, doch dit is alleen van toepassing als men erbij kan komen. Aangieten met portlandcement heeft tot teleurstelling geleid. De doken komen wel vast te zitten, doch na verloop van tijd krimpt het cement en dan is het met de vastheid uit” (VAN DER KLOES J.A., 1923: 110).

Verder vermeldt E.E. Viollet-le-Duc. in zijn “Dictionnaire raisonné de l’architecture française du XI^e au XVI^e siècle”, geschreven in 1855, de volgende opmerking: we hebben ankers gezien die aangegoten zijn met een vette mastiek, die samengesteld is uit fijngestampte zandsteen, menie, loodglit (loodoxide) en olie of die aangegoten zijn met een harsachtig materiaal. De ankers die met dit procédé zijn aangegoten, in gebouwen van het einde van de XIII^e eeuw, vertonen minder corrosieproblemen dan deze die zijn aangegoten met lood of mortel (VIOLLET-LE-DUC E.E., 1855: 403).

3.1.5. Conclusie

In deze paragraaf werden de materialen besproken die men in de loop der tijden heeft gebruikt om verankeringen te realiseren. Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat vanaf de Grieken tot nu zo’n verankeringen werden aangewend en dat men over die meer dan 2000 jaar volop experimenteerde met materialen en constructiewijzen. Nieuwe materialen werden ontdekt en bepaalde kregen andere eigenschappen door gewijzigde productiemethodes. Men kende problemen en net zoals de huidige restauratiewereld op zoek gaat naar oplossingen, probeerden ook zij andere systemen uit, zij het -door hun heel beperkte kennis van de

materialen- slechts op een beperkte schaal. Maar over die twee duizend jaar gezien, kan geconcludeerd worden dat de meest voorkomende verbindingen, waarbij geen mortel werd gebruikt, werden gemaakt door het aangieten met lood van de voeg al of niet voorzien van een smeedijzeren anker. Daarom wordt in de volgende paragrafen dieper ingegaan op bepaalde eigenschappen van zo'n verbinding, gerealiseerd met ijzer en lood.

3.2. Procedure van het aangieten met lood

3.2.1. Verticale verbindingen

In de literatuur werden twee mogelijke werkwijzen gevonden. Het eerste deel van de twee werkwijzen stemt overeen. In de twee werkstukken wordt een gat geboord of gekapt. Het gat is rond of rechthoekig naargelang geopteerd wordt voor een ronde of rechthoekige doorsnede van de ankerstaaf. Het gat moet groter zijn dan de dimensies van de ankerstaaf zodat de ankerstaaf nog voldoende bedekt kan worden met lood (+/- 1cm loodbedekking). De positie van de twee gaten moet zo zijn dat wanneer de twee werkstukken op elkaar geplaatst worden, de twee werkstukken mooi op elkaar passen. (ERCAN S. e.a., 1995: 80-81). Vanaf nu verschillen de twee werkwijzen.

Bij de eerste werkwijze wordt een gietkanaal gemaakt in de bovenste steen. De ankerstaaf wordt in het gat van de onderste werksteen geplaatst, waarna de bovenste werksteen op de onderste werksteen geplaatst wordt. De voeg tussen de twee werkstukken wordt opgevuld met een mortel, klei of met een of andere afdichtingskit. Na het positioneren van de verankeringstaaf, vroeger ijzer of hout, nu meestal roestvrij staal of titanium, wordt het lood, vloeibaar geworden door te smelten (smelttemperatuur lood 327.4 °C), door het gietkanaal gegoten. Het gietkanaal moet voldoende groot gedimensioneerd zijn (minstens 2.5 cm in diameter) zodat bij de afkoeling van het lood het gietkanaal niet verstopt. Het lood wordt nu in kleine hoeveelheden langzaam in het gietkanaal gegoten. Wanneer het lood te snel of in te grote hoeveelheden in het gietkanaal gegoten wordt, kan het werkstuk springen door het grote temperatuursverschil tussen het vloeibare lood en de werkstukken (Fig. 12)(KIESEWETTER A. & KIESOW G., 1997: 671-672).

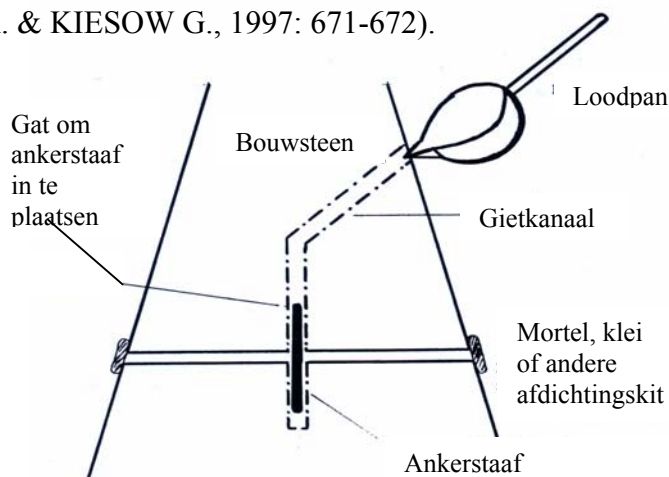


Fig. 12: Schematische voorstelling van procedure van het aangieten met lood: KIESEWETTER A. & KIESOW G., 1997: 672).

Een tweede werkwijze maakt geen gebruik van een gietkanaal in het bovenste werkstuk. In het onderste werkstuk wordt een gietkanaal gemaakt (Fig. 13). Nu wordt in het bovenste werkstuk omgekeerd gelegd en wordt de verankeringsstaaf in het gat geplaatst. De ruimte tussen de verankeringsstaaf en het gat in het werkstuk wordt opgevuld met lood (Fig. 14). Er wordt nu gewacht totdat het lood voldoende uitgehard is (Fig. 15). Daarna wordt het werkstuk omgedraaid en wordt het geplaatst op het onderste werkstuk (Fig. 16). Aan de ingang van het gietkanaal wordt een trechter bevestigd en wordt lood in het gietkanaal gegoten (Fig. 17). Eenmaal het lood uitgehard is, zijn de twee werkstukken verbonden.

In de Romeinse en Griekse tijd werd slecht één gietkanaal gemaakt. Doordat de twee werkstukken ruw gehouwen waren, waren er genoeg kleine kanaaltjes om de lucht naar buiten te krijgen, zodat het lood voldoende goed kon vloeien. Tegenwoordig worden steenblokken met diamantzagen op de goede afmetingen gebracht. Daardoor ontstaan heel effen vlakken en kan de lucht niet meer zo gemakkelijk ontsnappen wanneer het lood in het gietkanaal wordt gegoten. Het is daarom aangewezen om een tweede, kleiner kanaal te maken zodat de lucht gemakkelijk kan ontsnappen (Fig. 13). Het tweede kanaal kan ook gebruikt worden als controle: als het lood uit het tweede kanaal loopt, dan kan men concluderen dat het kanaal niet verstopt is geraakt tijdens het aangieten en dat het gat in de onderste werksteen voldoende is opgevuld met lood (Fig. 18) (ERCAN S. e.a., 1995: 80-86).

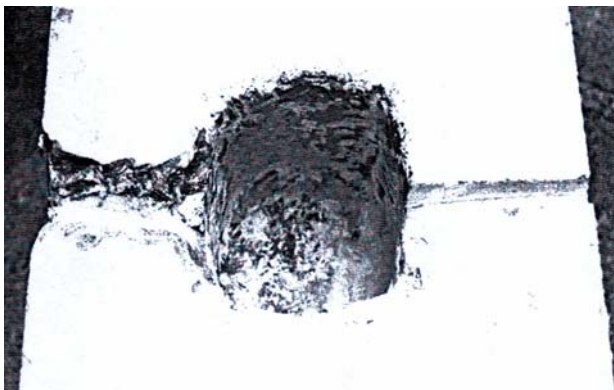


Fig. 13: Twee kanalen worden gekapt in het onderste werkstuk: het grootste kanaal is het gietkanaal, het kleinste is een ontluchtungskanaal (ERCAN S. e.a., 1995: 83).



Fig. 14: De ankerstaaf wordt gepositioneerd en gesmolten lood wordt in de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat gegoten (ERCAN S. e.a., 1995: 84).

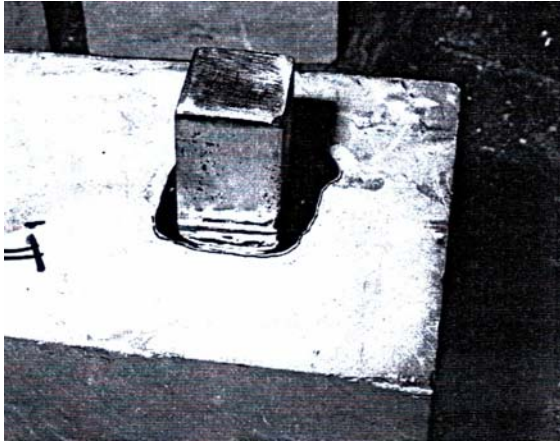


Fig. 15: Het bovenste werkstuk nadat het lood uitgehard is (ERCAN S. e.a., 1995: 85).

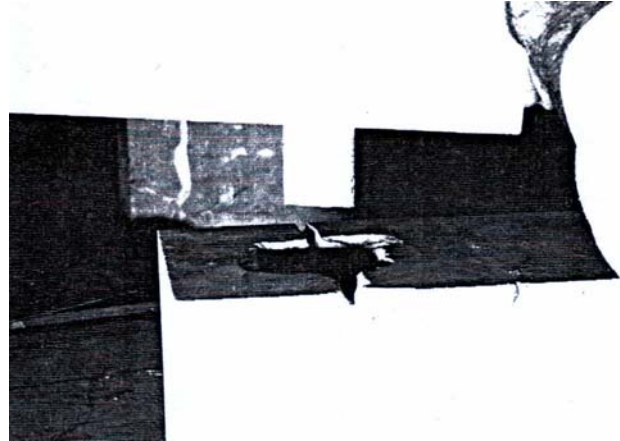


Fig. 16: Het bovenste werkstuk wordt omgedraaid en op het onderste werkstuk geplaatst (ERCAN S. e.a., 1995: 85) .

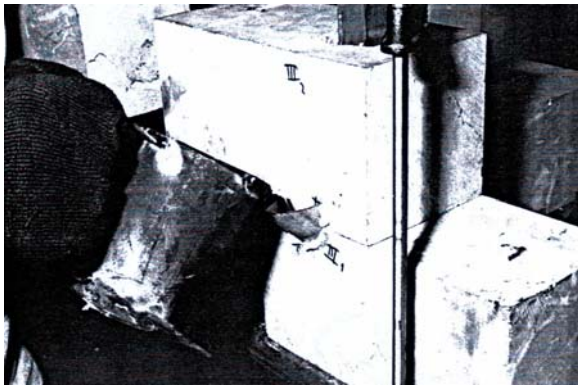


Fig. 17: Gesmolten lood wordt in het gietkanaal gegoten. Het lood vloeit door het gietkanaal om zo de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat van het onderste werkstuk te vullen (ERCAN S. e.a., 1995: 86).



Fig. 18: Als het lood uit het kleinere kanaal loopt, kan besloten worden dat het aangieten met lood goed uitgevoerd is (ERCAN S. e.a., 1995: 86).

3.2.2. Horizontale verbindingen

Om de techniek van het aangieten met lood te bespreken voor horizontale verbindingen, wordt de werkprocedure beschreven zoals die geobserveerd werd bij een werfbezoek aan het stadhuis van Gent. Het stadhuis van Gent heeft, zoals reeds vermeld, een laat-gotisch deel en een deel dat typische Renaissance eigenschappen vertoont. In het gebouw komen talrijke verbindingen voor tussen twee natuursteenblokken die verbonden werden met een ijzeren staaf en aangegoten werden met lood. Het ijzer is in de loop der tijd beginnen roesten en heeft aanzienlijke schade veroorzaakt aan het gebouw. Daarom koos de architect Philippe Depotter (Bureau Bressers, Hoogstraat 47 9000 Gent) ervoor om alle oude verbindingen te verwijderen en te vervangen door inoxstaven aangegoten met lood. De werken werden uitgevoerd door Algemene Ondernemingen Verstraete & Van Hecke N.V. (Fotografielaan 24 2610 Wilrijk).

In de twee werkstukken wordt een uitsparing gemaakt waar dan een inoxanker wordt ingelegd (Fig. 19 en Fig. 20). Het inoxanker heeft een rechthoekige doorsnede waarbij de twee randen omgeplooid zijn om een betere verankering met de natuursteen te verkrijgen (Fig. 19). Daarna wordt de ruimte tussen de natuursteen en het inoxanker opgevuld met lood waarbij heel voorzichtig tework moet gegaan worden (zie paragraaf 3.3.) (Fig. 21, Fig. 22 en Fig. 23). Het lood wordt gesmolten (smelttemperatuur lood 327.4 °C) in een recipiënt en dan met een pollepel in de ruimte gegoten. Het lood moet langzaam en met niet te grote hoeveelheden in de ruimte gegoten worden om schade aan de natuursteen door thermische spanningen te vermijden. Men laat dan het lood stollen. Tijdens het stollingsproces krimpt het lood (krimp bij stollen bedraagt 3.85 %) waarna nog een extra hoeveelheid lood in de ruimte wordt gegoten (Fig. 24). Alhoewel lood de eigenschap heeft om goed in de ruimte tussen de natuursteen en het inoxanker te vloeien, wordt het lood toch nog gepriemd om een betere verdichting van het lood te bekomen (Fig. 25 en Fig. 26).

We moeten nog opmerken dat de uitvoering die we gezien hebben twee demonstraties waren, waarbij de verbinding zichtbaar was na de uitvoering. Al de uitgevoerde verbindingen bevinden zich echter in de muur zelf zodat de verbinding na uitvoering bedekt is met een andere natuursteen.



Fig. 19: Geometrie van het gat in het werkstuk en van het inoxanker.



Fig. 20: Positionering van het inoxanker in het gat.



Fig. 21: Aangieten met lood.



Fig. 22: Aangieten met lood.



Fig. 23: Aangieten met lood en stollen van het lood.



Fig. 24: Gestold lood.



Fig. 25: Priemen van het lood om lood te verdichten.



Fig. 26: Gepriemd lood, eindtoestand verbinding.

3.3. Milieu en veiligheid

3.3.1. Invloed op het milieu

Lood is zoals de meeste zware metalen schadelijk voor de lucht, het water en de grond. De milieubelasting van het procédé van aangieten met lood is moeilijk te begroten, maar de impact zal waarschijnlijk zeer klein zijn. Tijdens het demonteren van oude verbindingen, om het oude lood te recuperen, komt loodstof vrij, dat op de bodem kan terecht komen, maar de impact hiervan zal te verwaarlozen zijn. De impact op de atmosfeer, door het vrijkomen van looddampen tijdens het smelten, is waarschijnlijk ook klein en eventuele vervuilingen van het grond- en oppervlaktewater zijn te verwaarlozen.

Wat betreft de milieuwetgeving gelden voor Vlaanderen de volgende wetten: Het K.B. 3/8/84 schrijft een immisiesnorm (omgevingslucht concentratie) voor van lood van $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als jaargemiddelde. Het Decreet omtrent Bodemsanering (Vlarebo; BS 27 maart 1997) vermeldt een achtergrondwaarde voor lood van $40 \text{ mg}/\text{kg}$ voor een standaardbodem, een

achtergrondwaarde voor lood van 5 mg/kg voor grondwater en bodemsaneringswaarden variërend van 200 tot 2500 mg/kg afhankelijk van de bestemming van de bodem. Vlarem II (1 juli 1995) schrijft dat het absolute loodgehalte kleiner moet zijn dan 50 µg/l in oppervlaktewater. (VANDECASTEELE C. & BLOCK C. , 1999: 15, 100 en 150).

3.3.2. Invloed op de gezondheid

Lood behoort tot de zware metalen en is toxisch voor het menselijk lichaam. Lood wordt door het lichaam op drie manieren opgenomen: via de huid, via de spijsvertering en via de ademhaling. Eenmaal in het lichaam wordt het lood getransporteerd in het bloed en grotendeels opgeslagen in het skelet. Te hoge loodconcentraties in het lichaam zijn schadelijk. Vooral de hersenen, het bloed, het beenmerg, de spieren en nieren zijn bijzonder gevoelig voor de giftige werking van lood. Teveel lood in het lichaam versterkt de afbraak van rode bloedcellen, verstoort de aanmaak van verse bloedcellen, tast het zenuwstelsel aan en werkt vruchtbaarheidsverminderend. (<http://www.toxnet.nlm.nih.gov> en <http://www.quantchem.kuleuven.ac.be/safety/Veiligheid/toxicologie.html>).

De opname van lood doorheen de huid is verwaarloosbaar klein ten opzichte van de opname via de spijsvertering en via de ademhaling. Lood onder de vorm van stof (opschuren van (oude) loodslabben) of onder de vorm van damp (bij solderen, opgieten van voegen, ...) kan gemakkelijk worden ingeademd. Een klein deel wordt niet terug uitgeademd en komt deels in de bloedbaan en deels in de slijmvliezen terecht. De slijmen komen bij het ophoesten veelal in de spijsvertering terecht. Door de hechting van het lood aan de huid (voornamelijk van de handen) kan het lood ook gemakkelijk ingenomen worden via de mond tijdens de maaltijd. Het loodstof blijft grotendeels kleven aan het brood en wordt zo mee opgegeten. De opname via de spijsvertering is de belangrijkste. Daarom is een strenge persoonlijke hygiëne noodzakelijk. (<http://www.regetox.med.ulg.ac.be> en GROEP MONUMENT, risico-analyse)

3.3.3. Regelgeving

Sinds 1 augustus 1999 is het KB van 3 mei 1999 van kracht. Dit KB schrijft voor dat op de bouwwerven die voldoen aan de criteria van het KB, een veiligheids- en gezondheidsplan, dat gecoördineerd wordt door een veiligheidscoördinator verplicht is. Dit veiligheids- en gezondheidsplan wordt opgesteld op basis van de voorschriften van het 'ARAB' (Algemeen Reglement voor de Arbeidsbescherming) en de voorschriften van de 'Codex over het Welzijn op het werk', die op termijn het ARAB zal vervangen. Het veiligheids- en gezondheidsplan is een werkinstrument voor risicopreventie.

3.3.4. Preventiemaatregelen

Gezien de schadelijke werking van lood op het menselijk lichaam, moet de inname zo sterk mogelijk worden beperkt, zelfs al wordt slechts 5 à 10 % van het ingenomen lood ook daadwerkelijk door het lichaam opgenomen. Die inname kan worden tegengegaan door het toepassen van de juiste werkmethode, het in acht nemen van bepaalde preventieve maatregelen, het correct gebruik van de juiste Persoonlijke Beschermings Middelen (PBM's) (Fig. 27) en het respecteren van een strenge persoonlijke hygiëne. Tabel 9 geeft een overzicht van bepaalde risico's die voorkomen bij het aangieten met lood en suggereert enkele mogelijke beschermingsmaatregelen (GROEP MONUMENT, risico-analyse).

Activiteit	Risico	Preventie/bescherming
Demontage lood	Gezondheidsrisico: inname gevaarlijke producten via huid, spijsvertering, ademhaling	PBM's : P3 stofmasker, ev. lichte, snijbestendige handschoenen. Gevaarlijke producten komen binnen via de mond → Persoonlijke hygiëne is uiterst belangrijk. Niet roken.
Smelten en verwerken van lood bij aangieten	Gezondheidsrisico: inname gevaarlijke producten via huid en spijsvertering	Dragen van PBM: ev. lichte, snijbestendige handschoen, ev. Tyvek-pak ipv gewone werkkledij. Persoonlijke hygiëne is uiterst belangrijk : 1. Verboden om te eten, te drinken en te roken op de werkplaats zelf. 2. Werkkledij niet aanhouden na de dagtaak. 3. Werkkledij niet binnenbrengen in refter. 4. Gezicht, handen en voorarmen goed wassen na het werk. 5. Nagelbed reinigen na het werk. 6. Stortbad nemen na de dagtaak. Na de dagtaak moet de bevuilde werkkledij apart gehouden worden van andere (werk)kledij. 7. Ververs regelmatig (2 à 3 maal per week) de handdoek en verwijder de verontreinigde handdoeken zodat ze niet per ongeluk opnieuw kunnen worden gebruikt

	Gezondheidsrisico: inname gevaarlijke producten via ademhaling	Stofafzuiging en/of gasafzuiging indien mogelijk rechtstreeks aan de bron. Meermaals per dag het stof verzamelen in afsluitbaar recipiënt. Dragen van een P3- stofmasker, dragen van lasrookmasker met P3 filter bij hinder van lood in afgassen (opgieten van naden met vloeibaar lood). Na werk de stoffige kledij verwijderen en verzamelen voor reiniging, vooraleer masker af te zetten. Verbod om te roken bij het werken met lood waarbij metallisch lood onder de vorm van fijn stof of onder de vorm van aërosolen wordt afgegeven. Eveneens goede handhygiëne na het werk vooraleer te roken.
	Risico's inherent aan gebruik van open vlam en smeltkroes	Brandblusapparaat ter beschikking houden. Enkel smeltkroes gebruiken in open lucht of goed geventileerde ruimtes. Persoon die smeltkroes gebruikt moet minstens een halfgelaatsmasker met P3-stoffilter en actieve filter tegen lasrook en metalen onder aërosolvorm. Persoonlijke bescherming tegen hitte (hittebestendige handschoenen en kledij). Zeker oogbescherming + ev. volledige gelaatsbescherming tegen spatten door middel van volledig aansluitende veiligheidsbril of gelaatsscherm Smelten gebeurt best in open lucht, de smeltkroes wordt best niet afgedekt, zodat de looddampen zich niet kunnen opstapelen. De smeltkroes wordt opgesteld benedenwinds van de werknemers.
	Algemene gezondheidsrisico's te wijten aan de schadelijke effecten van lood op het menselijk metabolisme	Medisch aangepast onderzoek met klinische en biologische opvolging of monitoring van de bloedwaarden van de relevante componenten van de personen die in contact komen met vloeibaar lood of lood onder de vorm van metallisch poeder of stof. Eventueel voorschrijven van de mogelijke alternatieve werkposten bij vaststelling van medische anomalieën.

Tabel 9: Risico's en bescherming (GROEP MOMUMENT, risico-analyse).



Fig. 27: PBM's, zoals een gezichtsbeschermer, handschoenen en stevige werkkledij. Ook het dragen van een stofmasker is aan te bevelen.

3.4. Corrosieaantasting

3.4.1. *Inleiding problematiek*

De meeste wetenschappelijke werken (TEMMINCK G.C.L. & WARREMAN H.W., 1979: 16; COWAN H.J., 1977: 80; ORLANDOS A.K., 1968:112 en 118; ZAMBAS C., 1988:1817; CASANAKI M. e.a., 1985:58 en NOEL P., 1965: 113) die melding maken van het procédé van aangieten met lood, verklaren het gebruik van dat lood voornamelijk als zijnde een middel om de corrosie van het ijzer tegen te gaan. Lood is inderdaad in het algemeen goed bestand tegen atmosferische corrosie.

In praktijk echter blijkt het ijzer wel degelijk te roesten. Bij huidige restauratieprojecten worden compleet verroeste ankers terug gevonden, die door hun expansieve roestvorming, de steen waarin ze ingebed lagen, hebben aangetast.

Een voorbeeld daarvan vinden we terug op de Acropolis te Athene. De Grieken gebruikten geen metselspecie en de verschillende trommels van een kolom werden enkel verbonden door houten of ijzeren (aangegoten met lood) pinnen die vooral weerstand moesten bieden tegen de horizontale krachtwerving bij een aardbeving. In de loop der tijd vergingen de houten pinnen (Fig. 28) en werden de ijzeren pinnen gestolen of roestten ze weg (COWAN H.J., 1977: 44-47) (Fig. 29). Door het roesten van de ankers zijn bepaalde delen van de monumenten op de Acropolis ingestort en andere delen zijn vernietigd om het kostbare ijzer te kunnen bemachtigen.

Tijdens de restauratiewerken in het begin van de twintigste eeuw op de Acropolis (restauratie onder leiding van architect Balanos) werd veelvuldig gebruik gemaakt van ijzer als verankering- en verbindingselement. De uitvoering van de restauratie gebeurde niet zo accuraat met als gevolg dat het ijzer maar bij toeval af en toe eens goed bedekt was met lood of cement. Zestig jaar later zijn de gevolgen daarvan merkbaar: door het zwellen van het geoxideerde ijzer is het marmer beginnen scheuren of soms zijn zelfs hele stukken steen kapot gesprongen. Door de aantasting van zowel de oude ankers als van de verstevigingen aangebracht tijdens de restauratie onder leiding van architect Balanos, kwam op bepaalde

momenten de stabiliteit van het geheel in gevaar (CASANAKI M. e.a., 1985: 53).



Fig. 28: Bij aardbeving ingestorte kolom doordat de houten pinnen weggerot waren (COWAN, 1977: 46).

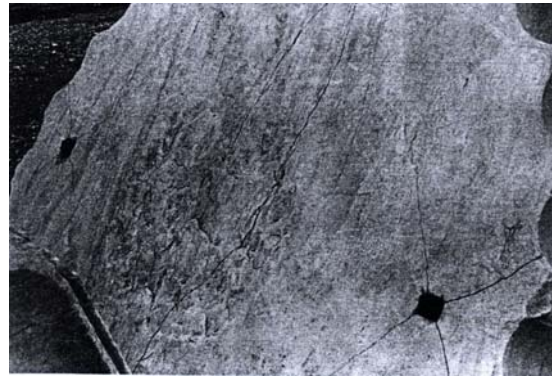


Fig. 29: Schade aan natuursteen door roestvorming van het ijzer (COWAN, 1977: 47).

Aan dit voorbeeld van de Acropolis kan een interessante vaststelling worden gekoppeld. De authentieke ankers hebben een veel langere levensduur gekend vooraleer ze de steen aantastten dan de ijzeren vervangers die werden ingebracht tijdens de restauratie in het begin van de twintigste eeuw. Andere materialen, andere atmosferische belastingen door de huidige luchtvervuiling en een slechtere uitvoering zijn belangrijke oorzaken van dit fenomeen.

Ook in Vlaanderen zijn al talrijke aangetaste ankers aangetroffen. De figuren 30 en 31 zijn twee schadegevallen. De twee ankers zijn afkomstig uit de Sint-Martinusbasiliek in Halle. De verdere bespreking van de corrosieaantasting van de ankers wordt gegeven in paragraaf 4.3..



Fig. 30: Corrosie van anker (Sint-Martinusbasiliek in Halle).



Fig. 31: Corrosie van anker (Sint-Martinusbasiliek in Halle).

Materialen en omgeving zijn twee factoren die een heel belangrijke rol spelen in het corrosieproces. Het doel van deze paragraaf 3.4. is dan ook om dieper in te gaan op de principes van corrosie, de belangrijkste vormen van corrosie en de corrosieaantasting van materialen die gebruikt werden en worden om de verbinding te realiseren.

3.4.2. Algemene corrosieprincipes

3.4.2.1. Fundamenten van corrosie: anodische en kathodische reactie

Corrosie van metaal is gewoonlijk een elektrochemisch proces. De atomen van het metaal worden geoxideerd tot ionen. Er stromen dan elektronen van de anode naar de kathode, waar ze deel kunnen nemen aan een reductieproces. Aangezien een corrosiereactie elektrochemisch is, kan de elektrochemische cel als model worden gebruikt (Fig. 32). In een elektrochemische cel is de anode altijd de plaats waar oxidatie (verlies van e^-) plaatsvindt, terwijl reductie (opname van e^-) plaatsvindt op de kathode.

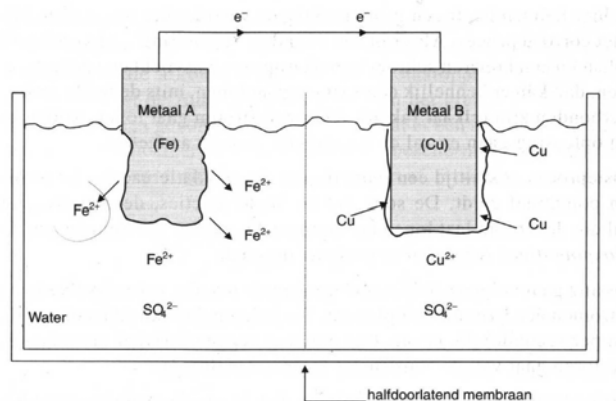


Fig. 32: Model voor elektrochemische corrosie van metalen (BUDINSKI K.G. & M.R.,1999: 473).

In een bak water hangen een blok koper en een blok ijzer, welke verbonden zijn met een elektrisch geleidende draad. In het water is aan de ijzerzijde ijzersulfaat opgelost tot Fe^{2+} en sulfaationen en aan de koperzijde kopersulfaat opgelost tot Cu^{2+} en sulfaationen. Tussen beide zijden is een membraan opgesteld dat geen koperionen doorlaat. Links wordt de blok ijzer aangetast door een reactie met de vloeistof: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ (oxidatiereactie). Uit een ijzeratoom worden twee elektronen vrijgemaakt, waarna het nu ontstane ion uit het ijzerrooster kan diffunderen en kan oplossen in de vloeistof. De twee vrijkomende elektronen gaan door de geleidende draad naar het koper en reageren daar met koperionen uit de vloeistof tot koper, dat neerslaat op de koperen staaf: $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$ (reductiereactie). De totale reactie is te schrijven als de som van de twee reacties: $Fe + CuSO_4 \rightarrow FeSO_4 + Cu$ (redoxreactie), waarbij het kopersulfaat en het ijzersulfaat in oplossing zijn. Er gaat kennelijk een stroom lopen door de geleidende draad. Dit betekent dat deze opstelling leidt tot een spanningsverschil tussen het koper en het ijzer. Dit wordt de potentiaal van de elektrochemische cel genoemd en dit is tevens de corrosiepotentiaal voor deze corrosiereactie. De stroom wordt mede mogelijk gemaakt doordat de vloeistof ionen bevat die de elektronen opneemt. Zo'n vloeistof wordt een elektrolyt genoemd.

Er zal in een corrosieproces altijd een reductie- en oxidatiereactie plaatsvinden, waarvoor een potentiaal geldt. De som van beide reacties, de redoxreactie, levert de potentiaal die de stroom laat lopen en daarmee de reactie in stand houdt. Aan de hand van de redoxpotentiaal kan gezegd worden of er corrosie optreedt. Er kan ook aan de hand van de stroom (elektronen per

seconde) die er ontstaat gezegd worden hoeveel materiaal er per tijdseenheid zal verloren gaan. Het model zegt verder dat de corrosiesnelheid afhankelijk is van de mate waarmee het ijzer in oplossing kan gaan, van de mate waarin de koperionen bij het koper kunnen komen en van het gemak waarmee de elektronenoverdracht naar de koperionen plaatsvindt. Het lijkt erop, dat het model niet geldig is voor een corrosiereactie waarbij maar één metaal betrokken is, bijvoorbeeld het verroesten van een stuk ijzer in een vochtige omgeving. Toch is ook hier sprake van een redoxpotentiaal, een reductie- en oxydatiereactie en een goed contact tussen metaal en vocht. De oxydatie is dezelfde als hierboven: ijzer gaat in oplossing. De reductiereactie kan afhankelijk van het atmosferische omstandigheden bestaan uit: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. De totale redoxreactie wordt dan: $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2$. Dit corrosieproduct is een poreuze bruine roestlaag, waardoor contact met het corrosieve milieu (water en zuurstof) mogelijk blijft en het corrosieproces doorgaat (actieve corrosie) (Fig. 33).

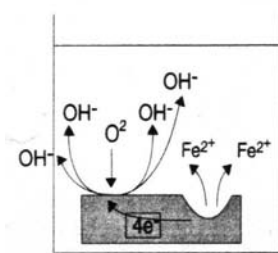


Fig. 33: Schematische voorstelling van de corrosiereactie voor ijzer – neutrale, beluchte elektrolyt (HUBRECHT J., 2000: 34).

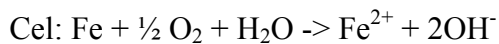
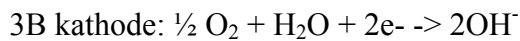
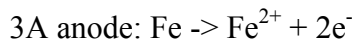
Bij sommige metalen zoals roestvast staal, aluminium en titanium is het corrosieproduct een hechte dichte oxydehuid, die het onderliggende materiaal beschermt tegen verder oxyderen (passieve corrosie)(BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 472-474).

Algemeen kan het fenomeen als volgt worden samengevat: in iedere corrosiereactie is de anodische reactie de oxidatie van een metaal tot zijn ion: $M \rightarrow M^{+n} + ne^-$. Er zijn verschillende kathodische reacties mogelijk. De frequentst voorkomende kathodische reacties bij de corrosie van metalen zijn de volgende:

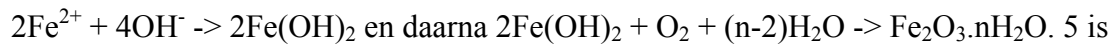
- Reductie van protonen in een zure omgeving tot waterstofgas: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- Reductie van water in neutrale of alkalische omgeving: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$
- Zuurstofreductie in zure oplossingen: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$
- Zuurstofreductie in neutrale of basische oplossingen: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
- Reductie van een metaalion: $M^{3+} + e^- \rightarrow M^{2+}$
- Metaalvorming: $M^+ + e^- \rightarrow M$

(FONTONA M.G., 1986: 14-19)

Het globale corrosieproces kan schematisch worden onderverdeeld in een aantal vereenvoudigde stappen. Elk van deze kan snelheidsbepalend worden onder geschikte voorwaarden, wat de mogelijke complexiteit van het corrosieproces helpt ondersteunen. Figuur 34 beschouwt de corrosie van ijzer via zuurstofreductie in een alkalisch medium als voorbeeld. Verklaring gebruikte cijfers: 1 stelt het massatransport voor van reagens O_2 naar het oppervlak via convectie en diffusie, 2 stelt de adsorptie van de reagentia O_2 en H_2O voor en 3 de volgende elektrochemische reacties:



4 stelt de desorptie van producten (Fe^{2+} en OH^-) voor of de reactie tussen producten:



5 is tenslotte het massatransport van producten Fe^{2+} en OH^- weg van het oppervlak door migratie en convectieve diffusie (HUBRECHT J., 2000: 40-41).

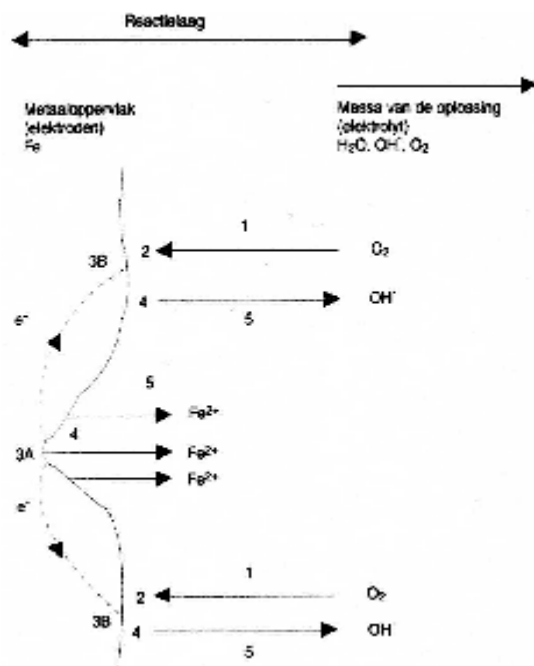


Fig. 34: Vereenvoudigde voorstelling van het corrosieproces (HUBRECHT J., 2000: 41).

3.4.2.2. Thermodynamica van corrosie: elektrodepotentialen en potentiaalreeksen

Een bespreking van de thermodynamica van corrosie is belangrijk voor het begrijpen van het corrosiefenomeen, maar ook om de vraag te kunnen beantwoorden of corrosie in bepaalde omstandigheden kan optreden of niet. Hier moet echter onmiddellijk aan worden toegevoegd dat een thermodynamische behandeling alleen uiterst beperkt is en dat de conclusies ervan dikwijls verkeerd worden uitgelegd. Een reden hiervoor is in hoofdzaak de strikte, geïdealiseerde voorwaarden verbonden aan de meeste thermodynamische gegevens. Een tweede reden is het feit dat geen rekening wordt gehouden met reactiesnelheden of de fysische en mechanische stabiliteit en ionaire eigenschappen van de oxiden aan grensvlakken gevormd. Bovendien zijn corrosiereacties essentieel heterogeen en zijn het geen evenwichtsreacties.

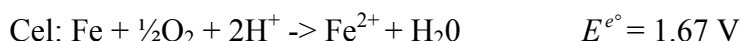
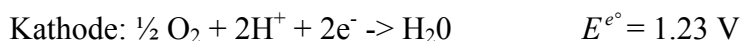
Opdat een corrosiereactie spontaan zou zijn, moet de Gibbs-vrije-energie $\Delta G_{\text{cel}} < 0$ zijn. Een zeer belangrijk gevolg van het corrosiemodel, zoals hiervoor beschreven, is dat het grensvlak van het metaal in een elektrolyt geëlektrificeerd is, dat wil zeggen dat er een potentiaalverschil over bestaat. Gezien corrosie op atomaire schaal de verwijdering met zich

meebrengt van elektronen uit een metaalatom, is het ook duidelijk dat het potentiaalverschil over het grensvlak metaal-oplossing verbonden is met de neiging tot corrosie van dat metaal. De vrije-energieveranderingen kunnen in verband gebracht worden met de daarbij horende evenwichtspotentialen van de celreactie: $\Delta G_{\text{cel}} = -nF E_{\text{cel}}^e < 0$, met n het aantal overgedragen elektronen in de reactie en F de Faraday-constante (96485 C/mol). Bijgevolg moet $E_{\text{cel}}^e > 0$ en $E_K^e - E_A^e > 0$ zijn. Voor een metaal M , in een oplossing van zijn eigen ion, M^{n+} , met activiteit gelijk aan één, bij 25°C en atmosferische druk, is deze potentiaal goed gedefinieerd en wordt hij standaardevenwichtspotentiaal $E_{M/M^{n+}}^{e^\circ}$ genoemd. Waarden van standaardevenwichtspotentialen worden gerangschikt in een zogenaamde elektrochemische reeks (Tabel 10).

Elektrode reactie		E^{e° (V ten opzichte van de standaard-waterstofelektrode)
$\text{Au}^{3+} + 3 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Au}$	1,50
$2 \text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 e^-$	$\rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$	1,23
$\text{Pt}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Pt}$	1,20
$\text{Ag}^+ + e^-$	$\rightleftharpoons \text{Ag}$	0,80
$1/2 \text{Hg}_2^{2+} + e^-$	$\rightleftharpoons \text{Hg}$	0,79
$\text{Fe}^{3+} + e^-$	$\rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	0,77
$\text{Cu}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Cu}$	0,34
$\text{H}^+ + e^-$	$\rightleftharpoons 1/2 \text{H}_2$	0
$\text{Pb}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,13
$\text{Sn}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Sn}$	-0,14
$\text{Ni}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,23
$\text{Co}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Co}$	-0,28
$\text{Cd}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Cd}$	-0,40
$\text{Fe}^{2+} + 2 e^-$	$\rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,44

Tabel 10: Verkorte elektrochemische reeks (25°C, 1 atm, H_2O , activiteit gelijk aan één, metalen in standaardtoestand) (HUBRECHT J.,

Uit deze reeks kan dan bvb. het volgende gehaald worden:



en $\Delta G = -322 \text{ kJ/mol Fe}$. Ijzer zal dus corroderen in een zure elektrolyt verzadigd met zuurstof. De belangrijkste beperkingen in verband met de elektrochemische reeks zijn de zeer selectieve veronderstellingen van sterk geïdealiseerde voorwaarden. Wanneer in eerder eenvoudige situaties concentraties (activiteiten) van bestanddelen afwijken van de standaardvoorwaarden, dan wordt de standaardevenwichtspotentiaal vervangen door de evenwichtselektrodepotentiaal. Berekening gebeurt via de Nernst-vergelijking:

$$E_M^e = E_M^{e^\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{M^{n+}}}{a_M} \quad (\text{met } F = 96485 \text{ C/mol})$$

De informatie die beschikbaar is in een reeks van standaardelektrodepotentialen zal dus bijna nooit rechtstreeks toepasbaar zijn op praktische situaties. Met volgende elementen wordt geen rekening gehouden: films van corrosieproducten, die aan het oppervlak kunnen worden gevormd, complexe reacties die optreden en H^+ en OH^- ionen vormen (en dus pH-afhankelijk zijn), alle factoren die tot niet idealiteit leiden, zoals activiteitscoëfficiënten verschillend van één of de aanwezigheid van een complex vormend agens voor M^{n+} , e.a.. Aluminium heeft bvb een zeer negatieve standaardpotentiaal, en toch vertoont het een bijzonder goede

corrosieweerstand in veel omgevingen. De reden is dat de elektrochemische reeks alleen aluminiummetaal en het Al^{3+} -ion in aanmerking neemt, terwijl in praktijk Al_2O_3 -films de eigenschappen van het systeem bepalen. Vandaar dat een meer ingewikkelde thermodynamische behandeling nodig is om het gedrag van veel materialen te voorspellen. Een meer praktische verzameling van elektrodepotentialen wordt gegeven door een galvanische reeks van metalen en legeringen op basis van praktische waarnemingen in een specifiek elektrolyt onder gekende voorwaarden (Tabel 11).

Kleinste corrosietendens

↑

Platina
Goud
Grafiët
Titaan
Zilver
Chlorimet 3 (62 % Ni, 18 % Cr, 18 % Mo) (passief)
Hastelloy C (passief)
18 % Cr – 8 % Ni – 3 % Mo staal (passief)
18 % Cr – 8 % Ni, staal (passief)
13 % Cr-Fe (passief)
Inconel (passief)
Nikkel (passief)
Zilver solder
Monel
Koper-nikkel
Bronsoorten (Cu-Sn)
Koper
Messingsoorten (Cu-Zn)
Chlorimet 2 (66 % Ni, 32 % Mo, 1 % Fe)
Hastelloy B (65 % Ni, 30 % Mo, 5 % Fe)
Hastelloy A (60 % Ni, 20 % Mo, 20 % Fe)
Inconel (80 % Ni, 13 % Cr, 7 % Fe) (actief)
Nikkel (actief)
Tin
Lood
Lood-tinsoldeersoorten
Hastelloy C (62 % Ni, 18 % Cr, 15 % Mo) (actief)
18 % Cr – 8 % Ni – 3 % Mo staal (actief)
18 % Cr – 8 % Ni staal (actief)
13 % Cr-ijzer (actief)
Gietijzer
Staal of Fe
Aluminium 24S-T
Cadmium
Aluminium 2S
Zink
Magnesiumlegeringen
Magnesium

↓ Grootste corrosietendens

In tegenstelling tot de elektrochemische reeks, kan een metaal hier meer dan één elektrodepotentiaal hebben indien het verschillende onzuiverheden bevat of wanneer het onderworpen is aan verschillende voorbehandelingen of oplosvoorwaarden. Zo vertonen de roestvast staalsoorten AISI 304 en AISI 316 hoge positieve potentialen in belucht zeewater bij 25 °C dankzij hun beschermende passieve film. In ontluchte voorwaarden worden deze legeringen zeer actief. De passieve film is onstabiel, wat resulteert in een sterk negatieve potentiaal. Ondanks haar praktische afleiding houdt de galvanische reeks slechts rekening met die elektrochemische evenwichten die verband houden met metalen en hun eenvoudige kationen ($\text{M} \leftrightarrow \text{M}^{n+} + n\text{e}^-$). Deze reactie is enkel potentiaalafhankelijk en er wordt nog steeds geen rekening gehouden met de aard van de corrosieproducten en de beperkingen qua oplosbaarheid.

Tabel 11: Galvanische reeks van enkele commerciële metalen en legeringen in zeewater bij 25°C en 1 atm (HUBRECHT J., 2000: 48).

Om een meer complete en dus bruikbare corrosietheorie te ontwikkelen is het daarom nodig rekening te houden met aanzienlijk meer data dan deze van de elektrochemische reeks alleen. Op basis van de noodzaak om nog andere evenwichten in rekening te brengen, is een zeer nuttige voorstellingsvorm van zowel potentiaalafhankelijke als pH-afhankelijke evenwichten ontwikkeld door Pourbaix.

Het gaat om de E-pH-diagrammen, dikwijls Pourbaix-diagrammen genoemd. Het Pourbaix-diagram is een grafiek van de redoxpotentiaal als functie van de pH voor de verschillende evenwichten van een gegeven metaal en zijn verbindingen onder standaardthermodynamische voorwaarden (gewoonlijk in water bij 25 °C). Het diagram houdt rekening met chemische en elektrochemische evenwichten en definieert het stabiliteitsdomein voor de elektrolyt (gewoonlijk water), het metaal en geselecteerde verbindingen, zoals oxiden, hydroxiden en hybriden. Gezien de massa gegevens kunnen hierin geen complexe systemen worden voorgesteld, wel één metaal in een eenvoudige waterige oplossing. De volgende zones kunnen

onderscheiden worden in een Pourbaix-diagramma: immuniteit verwijst naar het metaal als een thermodynamisch stabiele fase. Corrosie treedt op indien een verbinding van het metaal in thermodynamisch stabiele toestand is, behalve indien passivatie optreedt. Passiviteit doet zich voor wanneer een slecht oplosbare metaalverbinding een dunne beschermende film (gewoonlijk een oxide of een hydroxide) vormt op het oppervlak, wat resulteert in een verwaarloosbaar kleine corrosiesnelheid. De beschermende eigenschappen van een oppervlaktefilm worden het best bepaald door praktische ervaring in combinatie met de kennis van reactiekinetiek.

Pourbaix-diagrammen wijzen de meest stabiele bestanddelen aan bij een bepaalde pH en potentiaal, alsook de voorwaarden waarbij een spontane verandering thermodynamisch gunstig wordt. Het is zeer belangrijk voorzichtig te zijn bij het gebruik van Pourbaix-diagrammen om de waarschijnlijkheid van corrosie te voorspellen, om de volgende redenen: eerst en vooral wordt er geen informatie over of zelfs maar een indicatie gegeven van de corrosiesnelheid en over de fysische stabiliteit, de porositeit of de adhesie van passieve films. Verder wordt zelfs geen rekening gehouden met lage niveau's van vreemde ionen. SO_4^{2-} bijvoorbeeld kan passiviteit bevorderen door de vorming van onoplosbare sulfaten, Cl^- kan passiviteit afbreken of complexen vormen, enz.. Een volgende reden tot voorzichtigheid is dat de diagrammen gewoonlijk verwijzen naar 25 °C en atmosferische druk, wat vaak verschilt van de echte werkingsomstandigheden. Daarnaast worden alleen zuivere metalen beschouwd. In praktijk zijn alle metalen ofwel onzuiver ofwel worden ze gebruikt in gelegeerde vorm. De diagrammen kunnen best gebruikt worden als een inleidende gids en als middel om corrosieprocessen te verklaren. De conclusies getrokken uit een Pourbaix-diagram kunnen soms nogal onjuist blijken wanneer de kinetiek van de reacties bepalend is (HUBRECHT J., 2000: 49-58).

3.4.2.3. Kinetiek van de corrosiereacties

Per definitie is het onmogelijk om met behulp van de thermodynamica inzicht te krijgen in de snelheden van een corrosiereactie. Zelfs als een reactie thermodynamisch mogelijk is, kan de snelheid daarvan zo laag zijn dat zij in praktijk eigenlijk in het geheel niet verloopt. Ook de vorm van de reactieproducten, zoals reeds aangehaald bij passivatie, heeft een invloed op het verloop van de reacties. Ook dit is een kwestie van kinetiek en niet van thermodynamica (GELLINGS P.J., 1997: 40).

Er bestaat een direct verband tussen de snelheid van een elektrochemische reactie en de stroom of de stroomdichtheid aan de elektrode waaraan die reactie verloopt. Wanneer er een stroom loopt dan verschilt de potentiaal van de elektrode van de evenwichtspotentiaal: dit wordt polarisatie genoemd. Het gedrag van de elektrode wordt beschreven met een relatie tussen de potentiaalverandering of overspanning enerzijds en de stroomdichtheid anderzijds. Dit wordt vaak grafisch weergegeven in een polarisatiekromme. Voor anodische reacties zijn overspanning en stroom positief, voor kathodische reacties negatief. De vorm van de

polarisatiekromme wordt bepaald door de snelheidsbepalende stap van het elektrodeproces. Wanneer de ladingsoverdracht aan de elektrode snelheidsbepalend is, wordt dit ladingspolarisatie genoemd. Wanneer de ladingsoverdrachtreactie snel is (grote stroomdichtheid) kan het transport van reactanten of producten naar of van het elektrodeoppervlak snelheidsbepalend worden en dit wordt diffusiepolarisatie genoemd. De laatste vorm van polarisatie, IR-verval, is eenvoudig het spanningsverval in de elektrochemische cel dat een gevolg is van de weerstand van de elektrolyt. Ook passivatie kan voorgesteld worden door een polarisatiegrafiek (GEILINGS P.J., 1997: 54-55).

3.4.3. *Vormen van corrosie*

3.4.3.1. Uniforme (algemene) corrosie

Het essentiële kenmerk van uniforme of algemene corrosie is dat een metaal over het hele oppervlak min of meer gelijkmatig in dikte afneemt. De anodische en kathodische reactie verlopen gelijkmatig over het oppervlak, in tegenstelling tot lokale corrosievormen. Ondanks het veelvuldig voorkomen is uniforme corrosie technologisch gezien niet zo schadelijk, omdat de snelheid van het corrosieproces in het algemeen redelijk gekend en beheersbaar is. Een belangrijke vorm van uniforme corrosie is de atmosferische corrosie (BOGAERTS W.F.L., 1999: 51).

Metalen en legeringen kunnen in contact met de atmosfeer corrosie ondergaan. Daarom zal men ze eventueel moeten conserveren, beschermen, herstellen of vervangen opdat zij en de structuur waarvan zij deel uitmaken volgens de vooropgestelde voorwaarden kunnen functioneren (ASHURST J. & N., 1989: 8).

Atmosferische corrosie is een gevolg van de interactie tussen een materiaal en een milieu waarbij het materiaal degradeert en zijn functionaliteit en/of esthetiek verliest. Het materiaal kan een metaal of legering zijn, doch evengoed hout, steen, glas of een kunststof. Het milieu is de omringende atmosferische belasting die gevormd wordt door vocht, zuurstof, contaminanten of pollutanten zoals SO_2 , stikstofoxides, KWS ..., erosieve partikels, temperatuur, wind, straling en dergelijke. De belangrijkste corrosiva zijn zuurstof en water (luchtvochtigheid). Bij een relatieve vochtigheid lager dan 60 % is er met staal vrijwel geen sprake van atmosferische corrosie. Atmosferische corrosie kan ingedeeld worden in binnen- en buitenatmosfeer. Atmosferische corrosie varieert sterk onder invloed van een aantal factoren zoals de geografische ligging op de aarde, klimatologische omstandigheden, de seizoenen, lokale omstandigheden zoals de nabijheid van zee, industrie of stad. In een droge en niet gepollueerde omgeving kan de corrosiesnelheid verscheidene ordes van grootte kleiner zijn dan in een vochtig, maritiem en industrieel gebied. De aanwezigheid van vocht, zout en SO_2 in combinatie met stofdeeltjes vormt een zware belasting voor vele materialen, zowel metalen als niet-metalen zoals steen of beton (WRANGLER G., 1985: 89). Daar indelingen

zoals woestijn, tropisch, stad, industrieel,... vaag en weinig kwantificeerbaar waren, werd in de jaren 70 een classificatiesysteem beschreven om de agressiviteit van de atmosfeer te bepalen. In de ISO-standaards ISO 9223-9226 wordt een classificatie beschreven op basis van TOW (time of wetness), SO₂- en Cl⁻-afzettingssnelheden en of massaverlies voor een aantal metalen, blootgesteld aan de omgeving. Op basis van deze waarden worden dan corrosiviteitscategorieën bepaald. Ook de corrosiviteit van de atmosfeer in gebouwen kan met de ISO-standaards geclassificeerd worden (<http://corrosion-doctors.org>).

3.4.3.2. Putvormige corrosie

Putcorrosie is een vorm van uiterst plaatselijke corrosie die resulteert in gaatjes in het metaal, gaatjes met een diameter die algemeen gesproken gelijk of kleiner is dan de diepte. Het is één van de meest destructieve en meest verraderlijke vormen van corrosie: een metalen onderdeel zal vrij plots falen omdat het is doorboord op een plaats. Ondanks de beperktheid van de aantasting zal het gehele onderdeel moeten worden vervangen. Het verschijnsel is ook moeilijk te detecteren omdat de putjes meestal klein zijn en meestal ook nog bedekt zijn met corrosieproducten. Het is ook vrij moeilijk om op basis van laboratoriumtesten het verschijnsel te voorspellen.

Wegens de toenemende vervuiling dient men rekening te houden met het stijgend belang van de putcorrosie als gevolg van zwavelbevattende producten. Deze stoffen hebben een zeer lage oppervlaktespanning en ‘kleven’ daarom goed op het metaaloppervlak. De aantasting zet zich voort langs de korrelgrenzen, tot de korrels geïsoleerd zijn. Vooral nikkelrijke legeringen zijn gevoelig voor deze vorm van aantasting. De meest typische vorm van putcorrosie is echter deze veroorzaakt door chloriden. Het is een autokatalytisch proces. Niet enkel chloriden veroorzaken een dergelijke corrosie, ook de andere haliden (bromide, fluoride,...) hebben een gelijkaardig effect.

Algemeen gaat men ervan uit dat chloriden-geïnduceerde putcorrosie kan worden opgedeeld in twee deelprocessen: putinitiatie en putgroei. De initiatie van de putten houdt verband met de lokale doorbraak van de passieve film op het metaaloppervlak en is daarom erg gevoelig voor structurele of compositionele defecten in de passieve film. Het bestaan van deze defecten kan van institutionele aard zijn, of voortspruiten uit de adsorptie van chloride-ionen. Nagenoeg alle theorieën over putinitiatie gaan uit van een chlorideadsorptie-stap op energierijke plaatsen van het metaaloppervlak (dislocatiekluwens, insluitels, krassen,...). De putgroei gebeurt door het versneld anodisch oplossen van het metaal uit de put en vereist de concentratie van agressieve ionen, zoals chloride- en waterstofionen in de put. Karakteristiek hierbij is dat de put groeit via een autokatalytisch mechanisme: het is de oplossing van het metaal zelf, die in een soort viscieuze cirkel zorgt voor de creatie en het onderhouden van de agressieve putelektrolyt en van de voorwaarden van macroscopische inhomogeniteit die nodig zijn voor een stabiele, voortschrijdende putgroei. Het metaal in de

put gaat in deze fase snel in oplossing ($M \rightarrow M^{n+} + ne^-$). De snelle oplossing van het metaal in de put zorgt namelijk voor de productie van een overmaat aan positieve lading in het gebied. Hierdoor zullen chloride-ionen naar de corrosieput migreren, met als gevolg een hoge concentratie aan $M^{n+}Cl^{-n}$ in de put. Dit zal hydrolyseren tot oxiden of hydroxiden en HCl en aldus resulteren in een hoge concentratie aan H^+ -ionen (pH daling in de put) ($M^{n+}Cl^{-n} + nH_2O \leftrightarrow M(OH)_n \downarrow + nH^+Cl^-$). Zowel waterstof als chloride-ionen hebben de neiging de oplossing of aantasting van de meeste metalen en legeringen te stimuleren (Fig. 35). Aldus zal het hele proces in de loop van de tijd voortdurend versnellen. Merk op dat er in het reactieproces ook waterstof wordt gevormd ($H^+ + e^- \rightarrow H$). De diffusie van waterstof veroorzaakt mogelijk het vastpinnen van oorspronkelijk mobiele dislocaties, waardoor nieuwe potentiële initiatieplaatsen ontstaan (BOGAERTS W.F.L., 1999: 83-84).

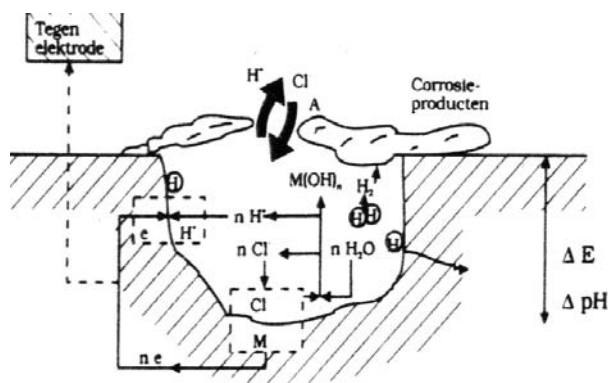


Fig. 35: Het stadium van de stabiele putgroei (BOGAERTS W.F.L., 1999:

3.4.3.3. Spleetcorrosie

Ook spleetcorrosie is een vorm van plaatselijke aantasting. Bij spleetcorrosie concentreert de aantasting zich op spleten tussen een metaaloppervlak en een ander (metallisch of niet-metallisch) oppervlak (BUDINSKI K.G & M.R., 1999: 485). Het mechanisme is analoog aan het autokatalytisch proces bij putcorrosie. Veronderstel een metalen voorwerp of constructie waaraan een gewone algemene corrosie optreedt volgens de volgende reacties: $M \rightarrow M^{n+} + ne^-$ en $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Ook in eventuele spleten treden de beide reacties op. In de spleten echter zal na een tijdje de zuurstof voor de reductiereactie uitgeput zijn. De globale corrosie van de gehele constructie zal echter gewoon doorgaan. Er worden dus continu positieve metaalionen gevormd. In de spleten zullen ze, na uitputting van de zuurstof, niet meer door hydroxylionen worden geneutraliseerd. Na een tijdje zal er dus, onder invloed van de positieve lading, een migratie optreden van negatieve ionen naar de spleet. Vooral de beweeglijke chloride-ionen zullen zich, indien aanwezig, naar daar begeven. Het verder verloop van de aantasting is identiek aan dat van putcorrosie. Zowel bij put- als bij spleetcorrosie kan het milieu in de put of de spleet uiteindelijk meer chloride-ionen of andere agressieve speciën bevatten en zuurder zijn dan de omgeving. Dit verklaart het agressieve karakter van deze corrosievormen, wanneer het proces eenmaal op gang is gekomen. Ook

corrosie die optreedt in afzettingen van vuil, slib en dergelijke wordt soms bestempeld als een variant op de spleetcorrosie (Fig. 36) (BOGAERTS W.F.L., 1999: 85-86).

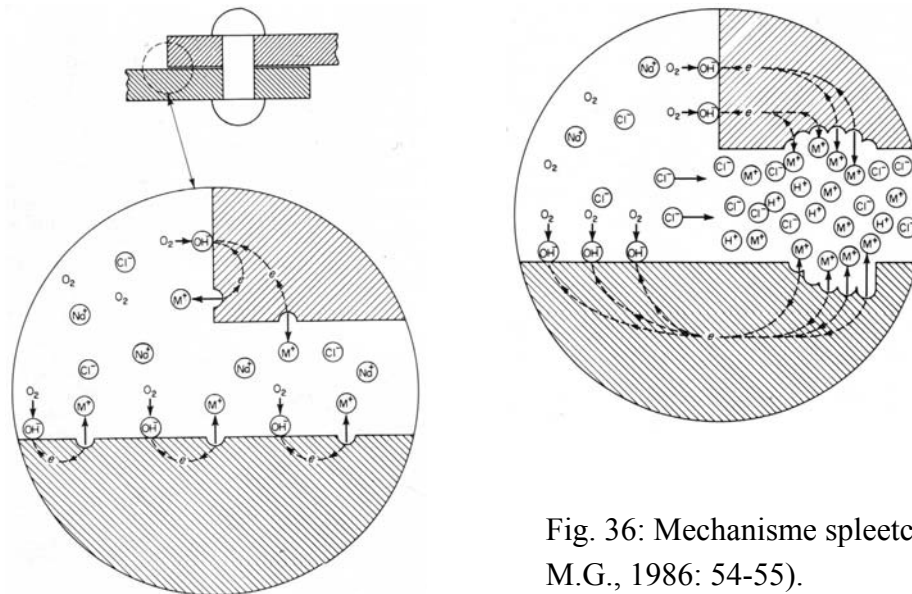


Fig. 36: Mechanisme spleetcorrosie (FONTANA M.G., 1986: 54-55).

3.4.3.4. Galvanische corrosie

De meest gekende vorm van ‘galvanische corrosie’ is een versnelde corrosie die kan optreden als men twee verschillende metalen aan elkaar koppelt en in een elektrolyt brengt. Daarbij gaat het ‘minst edele’ metaal in oplossing. Dit is een gevolg van het verschil in elektrodepotentialen van beide metalen en het ontstaan van een galvanische cel bij koppelen van beide. Verschillen in elektrodepotentiaal kunnen echter door velerlei oorzaken ontstaan, zodanig dat galvanische corrosie niet enkel optreedt bij koppeling van twee verschillende metalen.

Een potentiaalverschil tussen twee zones van éénzelfde metaal krijgt men ook als er zich een concentratieverschil in het milieu voordoet. Een bijzonder geval van een concentratiecel is de zuurstofcel. Men krijgt hier corrosie door een zogenaamde differentiële aëratie van eenzelfde materiaal. Het metaal in medium 2 zal worden aangetast, juist onder de scheidingsgrens van beide milieus (Fig. 37). Veelal spelen bij deze corrosie ook nog specifieke spleetcorrosie-effecten een rol, zoals de opconcentratie van agressieve speciën uit het milieu.

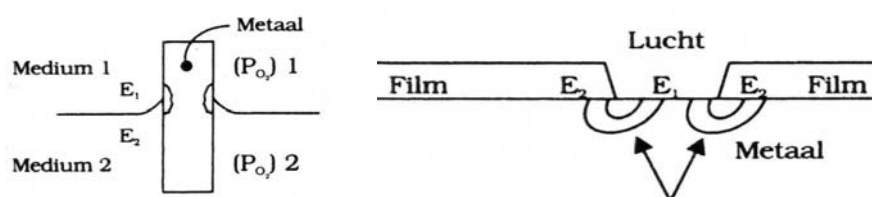


Fig. 37: Voorbeelden van corrosieaantasting door zuurstofcellen ($E_1 > E_2$) (BOGAERTS W.F.L., 1999: 57).

Het volgt onmiddellijk uit de wet van Nernst dat een temperatuursverschil aanleiding kan geven tot een potentiaalverschil in eenzelfde materiaal. Ook hierdoor kan versnelde corrosie ontstaan.

De belangrijkste vorm, is zoals reeds aangehaald, echter bimetallische of contactcorrosie. Het treedt op als er elektrisch contact is tussen de verschillende metalen, die op hun beurt in contact staan met hetzelfde milieu. Hierbij zal het meest elektronegatieve metaal (meest onedele) als anode fungeren en in oplossing gaan, terwijl het meest elektropositieve (meest edele) metaal daarentegen door een kathodische stroom zal worden beschermd. Wanneer de evenwichtspotentialen van de metalen verschillen, zal de combinatie van beide immers een potentiaal aannemen die ergens tussen de afzonderlijke waarden ligt. Dit betekent voor het onedele metaal een potentiaalverhoging, waardoor de corrosiesnelheid zal toenemen. Bij het edele metaal is het omgekeerde het geval.

Afhankelijk van factoren zoals geometrie en elektrische geleidbaarheid van het milieu, zal de aantasting dicht bij het oppervlak optreden of zich meer uitspreiden over het oppervlak. De oppervlakterverhouding van beide metalen zal sterk de aantasting beïnvloeden. Een klein onedel oppervlak is nadelig, terwijl het omgekeerde mogelijk minder nefaste gevolgen zal hebben. In praktijk zal men gebruik maken van spanningsreeksen om uit te maken welk materiaal in een bepaald milieu als kathode fungeert en welk als anode. Een voorbeeld van zo'n spanningsreeks in zeewater is gegeven in tabel 11. De spanningsreeks voor verschillende metalen in de atmosfeer is gegeven in tabel 12. Metalen of legeringen behorend tot dezelfde groep kunnen normaliter samen worden gebruikt. Deze indeling is gebaseerd op atmosferische corrosietesten in maritieme, industriële en corrosieve tropische milieus (BOGAERTS W.F.L., 1999: 55-65).

Groep	Metaal
I	Magnesium
II	Aluminium Zink Cadmium
III	IJzer en koolstofstaal Lood Tin
IV	AISI 430 roestvast staal AISI 302 roestvast staal AISI 304 roestvast staal AISI 316 roestvast staal
V	Koper-nikkel- en koper-zink-legeringen Koper Zilver Goud

Tabel 12: Spanningsreeks in de atmosfeer
(BOGAERTS W.F.L., 1999: 65).

3.4.3.5. Spanningscorrosie

Spanningscorrosie is het scheuren van een materiaal als gevolg van een gecombineerde actie van corrosieprocessen en mechanische spanning. Het gaat hierbij dus om een interactie tussen metaal, het milieu en een mechanische belasting in de vorm van een aan het oppervlak werkzame trekspanning. Deze spanning kan ofwel het resultaat zijn van een externe mechanische belasting of kan bestaan uit residuele spanningen in het materiaal, bvb. als gevolg van een mechanische of thermische bewerking. Beneden een bepaalde spanning treedt het fenomeen dus niet op. Spanningscorrosie is bijzonder verraderlijk en gevaarlijk omwille van redenen, analoog als deze aangehaald bij putcorrosie. Het kan aanleiding geven tot plotse breuk van een component (BOGAERTS W.F.L., 1999: 94-96).

Het mechanisme achter dit verschijnsel wordt helaas niet goed begrepen. Spanningscorrosie kan in zeer uiteenlopende materialen optreden. De corrosieve stoffen en de omgevingsomstandigheden die tot scheurvorming leiden, verschillen per materiaal (BUDINSKI K.G. & M.R., 1999: 489). Eén van de meest bekende voorbeelden is spanningscorrosie van (austenitische) roestvaste staalsoorten in chloridenhoudende media. Een ander belangrijk geval is spanningscorrosie van koolstofstaal in zwavelwaterstof en in alkalische middelen (BOGAERTS W.F.L., 1999: 98).

3.4.3.6. Interkristallijne corrosie

Interkristallijne corrosie is een vorm van corrosie die bij voorkeur optreedt langs de korrelgrenzen. Meestal wordt de interkristallijne corrosie veroorzaakt door samenstellingsverschillen in het materiaal, bijvoorbeeld door uitscheiding van legeringselementen. De korrelgrenzen hebben dan een andere samenstelling dan het inwendige van de korrel. Hierdoor zullen de korrelgrenzen zich ten opzichte van de rest van de korrel als anode gedragen. Korrelgrenzen zijn gebieden van een iets hogere energie dan de korrels zelf doordat de atomen in de grensorde meer wanorde vertonen, met als gevolg dat korrelgrenzen bij een gelijkmatige corrosie soms in lichte mate anodisch zijn ten opzichte van de rest van de korrel. Het is een buitengewoon ondermijnende vorm van corrosie, want als het proces erg ver voortschrijdt, kunnen korrelgrenzen door de hele doorsnede van een dik materiaal worden weggecorrodeerd, met als resultaat dat men een zwak, sponsachtig materiaal overhoudt. Het meest voorkomend voorbeeld ervan treedt op na de sensitizatie van roestvaste staalsoorten omdat er dan aan de korrelgrenzen chroomcarbiden worden gevormd (BUDINSKI K.G & M.R., 1999: 492).

3.4.3.7. Selectieve corrosie

Het selectief uitloggen is de verwijdering van een element uit een vaste oplossing door een corrosieproces. Hierbij gaat het meest onedele bestanddeel of de meest onedele fase van een

legering selectief in oplossing, terwijl de rest als een poreuze, mechanisch zeer verzwakte, massa achterblijft. Het meest gekende voorbeeld is het ontzinken van messing en koperlegeringen in corrosieve media. Ook grafitisatie, het oplossen van het ijzer uit gietijzer waarbij grafiet overblijft is een gekend voorbeeld (BOGAERTS W.F.L., 1999: 60-61).

3.4.3.8. Erosiecorrosie

De gelijktijdige werking van corrosie en erosie door bvb een snelstromende vloeistof heeft meestal een grotere aantasting dan de som van de aantasting door beide afzonderlijke mechanismen (GELLINGS P.J., 1993: 105). Voorbeelden zijn waterslagerosie, vloeistoferosie, vloeistofabrasie, cavitatie en wrijvingscorrosie (BUDINSKI K.G M.R., 1999: 494-496).

3.4.4. *De corrosiegevoeligheid van gebruikte materialen*

3.4.4.1. Smeedijzer

Zoals reeds vermeld heeft smeedijzer algemeen gezien een betrekkelijk goede corrosieweerstand. Er bestaan nog talrijke onaangetaste smeedijzeren voorwerpen, decoratief of structureel, die al enkele honderden jaren oud zijn. Andere smeedijzeren creaties zijn zwaar aangetast door corrosie. In het algemeen dragen twee factoren bij tot de levensduur van smeedijzer, en antiek ijzer in het algemeen. Ten eerste is er het materiaal met bepaalde onzuiverheden die een invloed hebben op de corrosieweerstand en ten tweede de atmosfeer waarin het materiaal zich bevindt (referentie nog checken). Als gietijzer, smeedijzer en zacht staal, de drie oudste ijzersoorten, vergeleken worden wat betreft corrosiegevoeligheid dan heeft gietijzer de beste resistentie, smeedijzer komt op de tweede plaats en zacht staal wordt het gemakkelijkst aangetast (WEAVER M.E., 1993 : 182).

Smeedijzer corrodeert als het wordt blootgesteld aan zuurstof en vocht uit de atmosfeer. Net zoals ijzer en ijzerlegeringen, die onbeschermd zijn, begint de corrosie van onbeschermd smeedijzer bij een relatieve vochtigheid van 65 %, maar door toedoen van luchtvervuiling, zouten, zuren, e.a. kan een relatieve vochtigheid van 20 % al volstaan om de corrosie te initiëren. CO₂, zwavelbevattende producten, chloridenbevattende producten, roet en vliegassen, en nog vele andere stoffen, bevorderen in sterke mate de corrosie van smeedijzer (WEAVER M.E. & MATERO F.G., 1993: 182-183).

Wanneer smeedijzer in verdund zuur wordt geplaatst, wordt het oppervlak aangetast op een aantal plaatsen. De aantasting van het oppervlak zal heel beperkt zijn. Het zuur zal eerder het smeedijzer juist onder het oppervlak aantasten. Er ontstaat een aantastingspatroon waarbij de aantasting aan het oppervlak beperkt is, maar waarbij de aantasting zich voortzet onder het oppervlak in zuurgevoelige zones, evenwijdig aan het oppervlak. In het geval van

blootstelling aan de atmosfeer, wordt een analoog aantastingspatroon verkregen. Dit aantastingspatroon is een gevolg van de aanwezige silicaatslakken en de vezelachtige structuur. Maar nu wordt een vast corrosieproduct gevormd waarvan het volume groter is dan het volume van het onaangetaste smeedijzer, met als gevolg dat het materiaal begint te zwellen. Aangezien de zuurstof maar in beperkte mate aanwezig is in de inwendig aangetaste zones, wordt er eerder 'zwarte roest' (magnetiet) gevormd dan 'rode roest' (hematiet) (EVANS U.R., 1961: 508 - 511).

Het hoog gehalte ijzersilicaatslak, tussen de 1 % en 4 %, vertraagt het corrosieproces van smeedijzer en dus zal smeedijzer minder sterk aangetast worden in dezelfde omgeving dan zacht staal. Smeedijzer kan zo sterk corroderen dat het uiteenvalt in een reeks van dunne lagen die worden bepaald door de slaklijnen. Gietijzer vormt gewoonlijk eerst een schilferig gecorrodeerd oppervlak, maar is dan vrijwel corrosieresistent. Al het antieke ijzer is heel gevoelig voor corrosie in de volgende milieus : zeewater, lucht met zeezouten, zuren, gronden, zeker diegene die chloriden en sulfaten bevatten, gipsplaaster en zwavelbevattende milieus (WEAVER M.E. & MATERO F.G., 1993 : 183-185).

Door het smeden kunnen er nog restspanningen in het smeedijzer aanwezig zijn, waardoor smeedijzer in bepaalde gevallen ook gevoelig kan zijn aan spanningscorrosie. Wanneer het smeedijzer niet homogeen is kan er selectieve corrosie optreden. Galvanische corrosie kan optreden wanneer smeedijzer in contact staat met een edeler metaal en ook putcorrosie is niet uit te sluiten (<http://w3.gsa.gov/web/p/hptp.nsf/035c614b995c0406852565d1006211b3/605b3c7e2a15edee852565c50054b3e9?OpenDocument> : U.S. General Services Administration Historic Preservation Technical Procedures).

3.4.4.2. Koper en brons

Koper is één van de corrosieresistentste metalen die worden toegepast in de bouw. Het wordt niettemin aangetast door alkalische oplossingen, ammoniak en verschillende zwavelbevattende stoffen, die kunnen reageren met water om zwavelzuur te vormen. Koper wordt aangetast door regenwater dat zuur is geworden door contact met mossen en algen. Koper wordt niet vaak aangetast door galvanische corrosie omdat koper meestal edeler is dan andere bouwmetalen. Daarom is het niet aan te raden om koper in contact te plaatsen met ijzer, staal, zink, aluminium of lood, omdat deze materialen door het contact met koper corroderen.

De ontwikkeling van een patina op koper hangt af van de onzuiverheden in de atmosfeer, en deze zijn sterk plaatsafhankelijk, en afhankelijk van de blootstelling aan wind en regen. Als koper blootgesteld wordt aan een relatief onvervuilde omgeving, zal het eerst koperig rood worden om dan vervolgens een donkerbruine kleur te krijgen. In een licht corrosief milieu krijgt koper een patina die vooral bestaat uit groen kopercarbonaat, wat het koper beschermt van verder corrosie. In kustgebieden kan een dof groene laag van koperchloride verwacht worden. In zwaar vervuilde gebieden kan koper een kleur verkrijgen die kan variëren van

verschillende groentinten tot blauw, bruin of zwart. Dit zijn de kleuren van de corrosieproducten die worden gevormd door de elektrochemische reactie van koper en de verschillende agressieve polluenten, voornamelijk SO_2 en Cl^- , van een stedelijk of industrieel gebied. Los van de verschillende kleuren die kunnen voorkomen, kan het uiteindelijke effect van de patina op het koper sterk verschillen. In bepaalde gevallen is de film beschermend en in andere gevallen zorgt de film ervoor dat het koper nog meer corrodeert (ASHURST J. & N., 1989 : 46-47).

Net zoals bij koper vormt er zich op brons een patina. De drie voornaamste corrosieve reagentia voor brons zijn vocht, zwavelbevattende stoffen en stof. Deze reageren samen met andere gasvormige polluenten en zuurstof tot de vorming van een patina op het bronsoppervlak op basis van chemische en elektrochemische reacties. Tabel 13 geeft een overzicht van de corrosieve reagentia, de producten, die worden gevormd wanneer brons wordt aangetast bij aanwezigheid van vocht, en hun kleur.

Zuurstof	Oxides	Rood-bruin tot donkerbruin en zwart
Zuurstof en Cl^-	Chloriden of oxychloriden	Heel lichtgroen
Koolzuur	Carbonaten	Groen of blauw
Zwavelzuur	Sulfaten	Diepblauw of groen
Salpeterzuur	Nitraten	Blauw-groen tot blauw
Zwavel	Sulfiden	Donkerbruin tot zwart

Tabel 13: Overzicht van het effect van corrosieve reagentia op brons (ASHURST J. & N., 1989: 81).

In tegenstelling met koper beschermt deze patina het brons meestal niet tegen verdere corrosie. Brons is heel gevoelig voor stofdeeltjes. Deze deeltjes kunnen de corrosie katalyseren. In een stedelijk vervuild milieu zal corrosie sneller het brons aantasten dan in een meer landelijke omgeving. In zwaar vervuilde omgevingen zal de corrosie vlug optreden in de vorm van diepe, gelokaliseerde putten, onder invloed van stofdeeltjes en chloriden, en onder de vorm van groene en zwarte corrosieproducten. Gelokaliseerde elektrochemische corrosiecellen zullen zich vlug ontwikkelen. Gebieden bedekt met zwarte corrosieproducten zullen zich gedragen als kathodes en de gebieden bedekt met groene corrosieproducten als anodes.

Brons kan ook aangetast worden door ontzinking, een typische vorm van selectieve corrosie van brons- of messingsoorten met een zinkgehalte hoger dan 15%. Het treedt op bij de aanwezigheid van zuren en andere oplossingen die goed geleidbaar zijn. De koper-zink legering lost op en het brons wordt poreus, geput, of zelfs volledig verweerd (ASHURST J. & N., 1989: 81-83).

3.4.4.3. Roestvast staal AISI 304 en AISI 316

Door het legeren van ijzer met ten minste 12 % - 14 % chroom ontstaan legeringen met de verzamelnaam roestvast staal, die in vele milieus een goede corrosieweerstand vertonen door de vorming van een gesloten, chroomrijke oxidelaag. Dat wil dus zeggen dat het materiaal zich passief gedraagt. Met nadruk dient gesteld te worden dat dit gunstig gedrag alleen bereikt wordt bij een oppervlak dat volledig met zo'n oxidelaag bedekt is, met andere woorden volledig gepassiveerd. Roestvaste staalsoorten zijn, afhankelijk van het milieu, gevoelig voor lokale corrosievormen, als putvormige-, spleet-, interkristallijne- en spanningscorrosie. Wanneer deze verschijnselen optreden, is dit te wijten aan het zeer lokaal doorbreken van de passieve laag. De corrosiebestendigheid van austenitische roestvaste staalsoorten is in vele gevallen beter dan die van de ferritische en de martensitische soorten, vooral in de atmosfeer en in organische zuren. (GELLINGS P.J., 1997: 130-132).

AISI 316 heeft een molybdeengehalte van 2 % tot 3 % waardoor de corrosieweerstand hoger is dan van AISI 304. Een landelijke omgeving is extreem mild voor de corrosie van roestvast staal. Maritieme of industriële omgevingen zijn veel agressiever. In bijvoorbeeld de industriële omgeving van de Niagara Falls, in de buurt van fabrieken die HCl produceren, was AISI 304 na 6 jaar bedekt met roestvlekken en waren er ook duidelijk sporen van putcorrosie. Bij AISI 316 waren er slechts lichte roestvlekjes en was de putcorrosie minder ver gevorderd dan bij AISI 304. Toch kan gezegd worden dat AISI 304 en AISI 316 een goede weerstand hebben tegen atmosferisch corrosie (BEDDOES J. & PARR J.G., 1999: 223). AISI 304 en AISI 316 zijn heel gevoelig voor put- en spleetcorrosie in milieus die een hoog chloridengehalte bevatten. In chloridenhoudend milieu kan spanningscorrosie optreden, een verschijnsel dat de ferritische en de martensitische soorten in veel mindere mate vertonen (GELLINGS P.J., 1997: 132).

3.4.4.4. Lood

Lood is in het algemeen goed bestand tegen atmosferische corrosie in zowel landelijke, stedelijk als industriële omgeving en zelfs in de nabijheid van de zee. Onder 'normale' omstandigheden vormt zich op het oppervlak van lood, door de aanwezigheid van zuurstof, CO₂ en waterdamp uit de lucht, een onoplosbare en goed hechtende laag. Deze laag is een mengsel van diverse loodverbindingen, dat op de lange duur, zeker in industriële omgeving, voor het grootste deel uit loodsulfaat zal bestaan. Dit proces heeft de volgende volgorde: lood – loodoxide (PbO (geel), PbO₂ (bruin) en Pb₃O₄ (loodmenie, rood)) – basisch loodcarbonaat (2Pb(CO₃)₂.Pb(OH)₂, loodwit) – loodcarbonaat (Pb(CO₃)₂) – loodsulfiet (PbSO₃) – loodsulfaat (PbSO₄). De tijd die nodig is voor de vorming van een patina, bestaande uit een mengsel van loodcarbonaat, loodsulfiet en loodsulfaat, hangt sterk af van de omstandigheden, maar zal in het algemeen ten minste een jaar bedragen. In deze reeks is alleen basisch loodcarbonaat slecht hechtend. Door de regen kan het afgewassen worden en andere onderdelen

verontreinigen. De verkleuring door loodwit is kenmerkend voor nieuw lood. Op den duur gaat dit vlekkelig uiterlijk over in een zilvergrijze patinalaag. Lood is dus uitstekend bestand tegen zwavelzuurbestanden, zoals voorkomend in zure regen, omdat zich dan juist snel het zeer goed hechtende loodsulfaat kan vormen (LOOD EN LOODTOEPASSINGEN IN DE RESTAURATIE, 1987: 12).

In het algemeen is lood corrosieresistent in lucht, grond en natuurlijke waters, en daarom wordt het vaak gebruikt voor dakbedekkingen, bescherming van ingegraven kabels, waterleidingen,... (CARMAN P.C., 1949: 237). In harde natuurlijke waters kan lood succesvol worden gebruikt, maar in zachte waters, zoals regenwater, of stilstaande waters die nitraten of andere agressieve polluenten bevatten, zal lood corroderen. In de grond kan lood aangetast worden door zwerfstroombcorrosie of door elektrochemische corrosie veroorzaakt door verschillende grondcondities (KRUGER J., 2001: 4439).

Lood kan in het algemeen zonder bezwaar worden toegepast in contact met andere materialen. Het hanteren van de elektrochemische spanningsreeks kan in dit verband verwarrend werken. In atmosferische omstandigheden wordt lood bijna niet aangetast door contact met andere materialen. Onder water wordt lood licht aangetast door chroom, goud, koolstof, koper, messing, nikkel, roestvast staal, en zilver. Let wel, dit betreft eventuele corrosie van lood, niet die van het andere metaal (LOOD EN LOODTOEPASSINGEN IN DE RESTAURATIE, 1987: 12-13).

Direct contact van lood met hout moet worden vermeden wanneer het daarbij mogelijk is dat vocht kan toetreden tussen het hout en het lood. Bepaalde houtsoorten bevatten namelijk behoorlijk wat azijnzuur en dit kan leiden tot de aanmaak van aanzienlijke hoeveelheden basisch loodcarbonaat met het gevolg dat reeds na korte tijd het loodwit naar buiten barst. Contact tussen lood en beton heeft geen bezwaar. Vers beton echter, vooral dat op basis van Portlandcement, bevat enige tijd vrije kalk. In een vochtige omgeving leidt dit tot de vorming van calciumhydroxide en wederom basisch loodcarbonaat, met hetzelfde effect als bij contact met hout. Lood heeft een uitstekende weerstand tegen zwavelzuur, fosforzuur en chroomzuur en iets minder goede weerstand tegen salpeterzuur, halogenen, organische zuren en alkalische oplossingen (LOOD EN LOODTOEPASSINGEN IN DE RESTAURATIE, 1987: 12-13).

3.4.5. *Vocht in de natuursteen*

Om corrosieproblemen te kunnen krijgen met zo'n verbinding moet er sowieso een elektrolyt aanwezig zijn. Aan deze vereiste is voldaan omdat in elk gebouw vocht en andere stoffen aanwezig zijn in de stenen en dus ook in de directe omgeving van verbindingen aangegoten met lood. Vocht in de stenen kan verschillende oorzaken hebben:

- Vocht afkomstig van de bouw- of renovatiewerken. *Bouwvocht* is vocht dat in het gebouw of in een deel ervan achterblijft, na de voltooiing van de werken. Het is afkomstig van

water, dat door bouwmaterialen werd opgenomen tijdens de opslag, de aanmaak, de verwerking of ten gevolge van een gebrekkige bescherming op de bouwplaats.

- Vocht veroorzaakt door verschijnselen van inwendige *condensatie* en oppervlaktecondensatie. Lucht bevat een zekere hoeveelheid waterdamp. De maximale hoeveelheid waterdamp (verzadiging) die lucht kan bevatten, is afhankelijk van de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer waterdamp lucht kan opnemen. De relatieve vochtigheid van de lucht is de verhouding tussen de partiële dampdruk en de verzadigingsdampdruk van water bij dezelfde temperatuur. Wanneer lucht met een bepaalde relatieve vochtigheid afkoelt, ontstaat er bij een gegeven temperatuur condensatie van water. Deze temperatuur wordt het dauwpunt genoemd. Het dauwpunt van de lucht is hoger naarmate de relatieve vochtigheid van de lucht toeneemt. Wanneer vochtige lucht in contact komt met een oppervlak waarvan de temperatuur lager is dan het dauwpunt, ontstaat oppervlaktecondensatie. Onder invloed van dampdrukverschillen tussen de binnen- en buitenomgeving is er dampdiffusie doorheen de constructie. Tijdens het diffusieproces kan een zekere hoeveelheid damp in de constructie condenseren. Men spreekt dan van inwendige condensatie.
- Vocht dat het gevolg is van de *hygroscopiciteit* van de bouwmaterialen of van zouten die erin aanwezig zijn. Alle poreuze materialen zijn in beperkte mate hygroscopisch. Ze nemen vocht op uit de lucht. Er ontstaat een evenwichtssituatie, waarbij het evenwichtsvochtgehalte van het materiaal afhangt van de relatieve vochtigheid van de omgevingslucht en van de temperatuur. Vooral de zeer fijne poriën ($< 0.1 \mu\text{m}$) beïnvloeden het hygroscopisch gedrag. Hydraulisch gebonden materialen zijn doorgaans hygroscopischer dan baksteen of natuursteen. Vochtopname door hygroscopiciteit vertoont gelijkenis met oppervlaktecondensatie. Beide verschijnselen komen op gelijkaardige plaatsen voor als de relatieve luchtvochtigheid in het gebouw hoog is. In de loop der jaren kunnen bijvoorbeeld nitraten of chloriden terecht gekomen zijn in het metselwerk van oude gebouwen. Bepaalde nitraten en chloriden zijn veel hygroscopischer dan sulfaten of carbonaten. Dit wil zeggen dat zij zelfs bij een normale relatieve vochtigheid reeds vocht uit de lucht opnemen, waardoor het vochtgehalte van het metselwerk stijgt. Meestal is de invloed van hygroscopische zouten op het vochtgehalte veel groter dan de hygroscopiciteit van de materialen zelf. Daardoor drogen de muren moeilijker en het vochtgehalte blijft gedurende langere periodes hoog.
- Vocht afkomstig van infiltratie doorheen daken, gevels en schrijnwerk. Er is sprake van *regendoorslag* als het regenwater doorheen het metselwerk van de buitenmuren dringt en zo de binnenafwerking bevochtigt. Vooral gevels die naar het zuiden, zuidwesten en westen gericht zijn, worden sterk belast door regenwater. Scheuren en beschadigd of verweerd metselwerk verhogen de regendoorslag. Gehelde bouwelementen zijn gevoeliger dan verticale.
- Vocht dat de bouwmaterialen absorberen door *capillariteit*, zoals opstijgend grondvocht. Optrekkend vocht wordt meestal opgemerkt in muren boven het maaiveld. Bouwmaterialen die in contact staan met water of met vochtige grond nemen vocht op door capillariteit. Opstijgend grondvocht gaat ook vaak gepaard met migratie en

concentratie van talrijke zouten afkomstig uit de grond, de bouwmaterialen of van toevallige contacten met verontreinigde elementen. De ernst van het verschijnsel hangt af van de porositeit, de poriënverdeling, de drogingsmogelijkheden van de vochtige oppervlakken en het zoutgehalte. Meer nog dan andere vochtbronnen veroorzaakt opstijgend grondvocht grote schade aan de binnen- en gevelafwerkingen, omdat bij de directe gevolgen van het vocht nog de schade komt die het gevolg is van de migratie en kristallisatie van zouten afkomstig uit de bodem en uit de materialen.

- Vocht afkomstig van toevallige vochttoorzaken zoals lekkende leidingen, spatwater tegen de onderzijde van de muren, verkeerd hellende voetpaden en terrassen waardoor waterplassen ontstaan tegen muren,

(WTCB, 2002: procedure 40 –51).

Het is duidelijk dat vochtinfiltratie in de steen door allerlei omstandigheden kan voorkomen. Het is niet enkel vocht dat in de steen dringt, maar het vocht brengt ook allerlei vervuilingen met zich mee. De meest voorkomende zouten in metselwerk zijn sulfaten, chloriden, nitraten en fosfaten. Sulfaten en chloriden zijn vaak het gevolg van zuurprecipitatie en luchtvervuiling. Nitraten zijn ook afkomstig van luchtvervuiling, maar deze zijn gemakkelijk wateroplosbaar en worden dan ook makkelijker verwijderd door vocht dat in het metselwerk dringt en dit weer verlaat. Sporen van nitraten worden bijgevolg niet vaak terug gevonden in metselwerk, maar ze kunnen toch aanwezig geweest zijn en schade veroorzaakt hebben. Als er nitraten worden aangetroffen, is dat meestal in industriële omgevingen of in landelijke omgevingen door de vervuiling van oppervlakte- en grondwater door de landbouw (WEAVER M.E., 1993: 64). Zeker chloriden zijn heel nadelig voor de corrosie van onbeschermde metalen. De chloridenconcentraties zullen merkkelijk hoger zijn in kustgebieden. Maar ook in andere gebieden kunnen chloriden voorkomen bvb. door de verdamping van dooizouten. Er kan sowieso geconcludeerd worden dat afhankelijk van de omgeving en afhankelijk van het omhullende metselwerk bepaalde schadelijke polluenten in kleine of grotere concentraties zullen aanwezig zijn in de buurt van een verbinding aangegoten met lood.

3.4.6 De corrosieproblematiek van de met lood aangegoten ankerstaaf in natuursteen

Op basis van gesprekken met enkele corrosiespecialisten zoals J. Hubrecht, Prof. M. De Bonte (KULeuven, MTM) en A. Roelandt (VUB, META) en op basis van eigen inzichten verworven na de grondige literatuurstudie, kunnen de volgende opmerkingen gemaakt worden i.v.m. de corrosiegevoeligheid van verbindingen aangegoten met lood.

Zolang het lood het anker, in welk metallisch materiaal het ook mag uitgevoerd zijn, volledig omhult, zal het anker niet corroderen. Corrosie zal slechts optreden als er vocht, een elektrolyt, aanwezig is tussen het lood en het anker. Als het lood het anker volledig omsluit, zal dit niet het geval zijn. Er zijn twee mogelijkheden waardoor vocht toch tussen het lood en

het anker kan geraken. Ten eerste zou er diffusie van vocht doorheen het lood kunnen optreden of ten tweede zou er initieel vocht kunnen aanwezig zijn.

De eerste oorzaak lijkt onwaarschijnlijk omdat lood een heel gesloten structuur heeft. Wel zouden door het gietproces slinkholtes kunnen voorkomen in het lood. Als de loodomslog echter dik genoeg is zullen er nooit holtes voorkomen die ervoor kunnen zorgen dat er vocht tot aan het anker komt. Om hier volledig uitsluitel over te krijgen, moet verder onderzocht worden hoe dik de loodmantel moet zijn, zodat diffusie van vocht niet mogelijk is.

De tweede reden lijkt ook heel onwaarschijnlijk omdat bij het gieten van het lood, het vocht dat in of op het lood aanwezig zou zijn, zal verdampen bij het smelten en het vocht dat aanwezig zou zijn op het anker zal verdampen bij het aangieten met het warme lood.

Het lood zal in de tijd ook niet aangetast worden door atmosferische corrosie. De reden daarvoor is de vorming van een stabiele patina op het lood.

Het volgende kan dus besloten worden: indien de verbinding goed uitgevoerd is door ervaren vakmensen en er bijgevolg gegarandeerd kan worden dat het anker volledig omhuld is met een loodomslog van voldoende dikte, dan zal de verbinding niet corroderen tenzij er in de tijd fenomenen optreden waardoor de omhullende loodlaag niet meer perfect afdichtend is en waardoor er vocht tot bij het anker kan geraken.

Door mechanische of thermische belastingen zouden er in de loop der tijd scheuren kunnen optreden in het lood.

Ook kan het gietproces niet goed uitgevoerd zijn. In het geval van een verticale verbinding, bijvoorbeeld een pinakel (zie paragraaf 3.2.1.), is het perfect mogelijk dat de onderkant van de ankerstaaf rust op de steen voordat het lood wordt gegoten. Alhoewel het lood een grotere densiteit heeft dan het materiaal van de ankerstaaf, lijkt het heel onwaarschijnlijk dat er lood onder de staaf zal terecht komen omdat het lood veel te snel stolt. Bij horizontale verbindingen lijkt dit nog moeilijker. Het anker steunt ofwel op de twee omgebogen uiteinden of op het middenvlak, met als gevolg dat waar het anker steun neemt op de steen, het anker niet zal omhuld worden met lood (Fig. 38).



Fig. 38: Horizontale verbinding

Naast deze problemen die inherent zijn aan de geometrie van het anker en de verbinding, zijn bij werkbezoeken ook ankers aangetroffen die sowieso niet helemaal met lood aangegoten waren. Horizontale ankers waarbij enkel de uiteinden aangegoten zijn, verticale ankers die

niet over de volledige lengte zijn aangegoten of ankers waar trekkers zijn aan verbonden en die dus noodzakelijker wijze voor een deel uit de steen steken. Waarschijnlijk hechtten de bouwmeesters van toen alleen aandacht aan de vervormbaarheid van de verbinding en haar mogelijkheid tot krachtsoverdracht en waren ze zich niet ten volle bewust van de corrosieproblematiek of wou men de hoeveelheid lood beperken omdat dit toen een duur materiaal was.

Zowel het optreden van scheuren als een niet volledige omhulling van lood, hebben als gevolg dat er versnelde corrosiefenomenen zullen optreden. Zoals hiervoor reeds duidelijk aangestipt, beschermt het lood de ijzeren staaf tegen corrosie zolang het lood een volledig gesloten barrière vormt. Er treden echter problemen op van zodra zich ergens een scheurtje in het lood voordoet. Op dat moment treedt niet alleen corrosie van het anker op zoals het onbeschermd zou aangetast worden. De corrosie wordt ook nog eens versneld door het feit dat lood edeler is dan ijzer. Dit fenomeen kan het best vergeleken worden met de vroegere stalen bumpers van auto's. Deze waren beschermd met een chroomlaagje. Zolang er geen schade was aan het chroomlaagje, werd de bumper niet aangetast. Maar eens er een beschadiging was, werd de bumper versneld aangetast omdat het staal minder edel was dan de chroom.

Smeedijzer, in combinatie met een niet volledig omhullende loodlaag, zal aangetast worden door atmosferische corrosie en galvanische corrosie. Smeedijzer heeft een betrekkelijk goede weerstand tegen atmosferische corrosie, maar zeker in sterk vervuilde gebieden, zal het smeedijzer op lange termijn toch worden aangetast. De aantasting zal niet zo snel zijn als bijvoorbeeld de atmosferische aantasting van niet-roestvaste staalsoorten, maar onaantast zal het smeedijzer in ieder geval niet blijven. De atmosferische corrosie zal optreden op plaatsen die niet beschermd worden door lood.

Een kritische aantasting is galvanische corrosie. Zowel door differentiële beluchting als door het contact van twee metalen zal galvanische corrosie optreden. Figuur 37 toont exact wat er gebeurt. De film uit figuur 37 is in het geval van de verbinding de loodbedekking en het metaal is smeedijzer. Het smeedijzer zal aangetast worden juist onder de scheidingsgrens van beide milieus, waarbij de aangetaste zone zich zal uitbreiden onder het loodoppervlak. Lood is in atmosferische condities edeler dan smeedijzer en bijgevolg zal smeedijzer worden aangetast. Afhankelijk van het potentiaalverschil tussen de twee materialen in de elektrolyt waarin beide materialen zich bevinden en afhankelijk van de verhouding van beide oppervlakken, zal de corrosie snel of traag gebeuren.

Zowel atmosferische als galvanische corrosie vormen expansieve corrosieproducten.

Ten dele als antwoord op de corrosieproblemen met de smeedijzeren ankers werden deze smeedijzeren ankers vervangen door ankers uit roestvast staal.

Roestvast staal, AISI 304 of AISI 316, zal niet worden aangetast door atmosferische corrosie. Kleine ijzerdeeltjes, bijvoorbeeld afkomstig van het zandstralen of zelfs simpelweg van het zanderig en stofferig milieu op de werf, kunnen echter wel de passieve laag van het roestvast

staal doorbreken. Daardoor zal het roestvast staal corroderen op de plaatsen waar ijzerdeeltjes aanwezig zijn. Het is dan ook belangrijk het roestvast staal goed te beschermen op de werf. De roestvaste staalsoorten zullen eerder aangetast worden door lokale corrosieverschijnselen. Door differentiële beluchting zal roestvast staal worden aangetast in de overgangszone, net zoals smeedijzer. De roestvaste staalsoorten AISI 304 en AISI 316 zijn in gepassiveerde toestand edeler dan lood. Het gedrag van het lood, dat als anode optreedt in contact met roestvast staal, is moeilijk te voorspellen. Daarom is zeker bijkomend onderzoek nodig. In een chloriderijke omgeving kan putcorrosie optreden bij AISI 304 en AISI 316. AISI 316 is wel minder gevoelig dan AISI 304 door de toevoeging van 2 % tot 3 % molybdeen. Ook in zwavelhoudende milieus kan putcorrosie optreden. De corrosieproducten zullen echter beperkt in omvang zijn en zullen, gezien het erg lokale karakter van het fenomeen, in ieder geval niet in staat kunnen zijn om de steen te doen barsten. Zolang de putcorrosie niet het ganse anker aantast, is de optredende putcorrosie niet zorgwekkend. In chloridenbevattende milieus zal ook spanningscorrosie kunnen optreden als het anker onderhevig is aan spanningen ten gevolge van trek of temperatuursvariaties. Putcorrosie en spanningscorrosie zullen vooral een sectie- en dus sterktevermindering met zich meebrengen. Een laatste mogelijke aantasting van roestvast staal AISI 304 en AISI 316 is spleetcorrosie in chloridenbevattende milieus. Deze vorm van corrosie kan wel gepaard gaan met zekere expansieve corrosieproducten, voornamelijk gelokaliseerd in de spleet. De eerste vereiste voor spleetcorrosie in de verbinding van het roestvast staal aangegoten met lood, is natuurlijk het bestaan van een spleet tussen het lood en het anker. Het vermoeden is groot dat deze aanwezig zal zijn. Het lood krimpt immers sterk bij het stollen en er is een slechte adhesie tussen het lood en het roestvast staal. Dit is echter enkel een vermoeden dat verder onderzocht moet worden.

Het is duidelijk dat deze beschrijving slechts een eerste aanzet vormt om het corrosiefenomeen van oude ankers te verklaren en om te zien of nieuwere systemen (roestvast staal) wel een goed gekozen oplossing zijn op lange termijn. Vooral in milieus met voldoende hoge concentraties aan chloriden, zouden de ankers uit roestvast staal wel eens een slechte vervanger kunnen zijn voor de smeedijzeren ankers. Om de fenomenen echt grondig te kunnen begrijpen is uitgebreid onderzoek vereist. In hoofdstuk vier wordt hiertoe een eerste aanzet gegeven, maar het is zeker niet mogelijk om met deze eerste proefnemingen alle fenomenen te achterhalen en volledig te verklaren. Om het corrosieprobleem van de smeedijzeren en roestvast stalen ankers volledig te begrijpen zijn proeven nodig waarbij de omstandigheden uit de praktijk heel nauwkeurig worden nagebootst. De atmosferische condities en milieus die effectief gelden en het aangieten van de verbindingen met lood, zoals het gebeurt in de praktijk, spelen hierin een belangrijke rol.

3.5. Vervormbaarheid

Om de vervormbaarheid van de verbinding te bespreken, wordt ingegaan op een proef die uitgevoerd werd door S. Ercan aan de KU Leuven, departement bouwkunde.

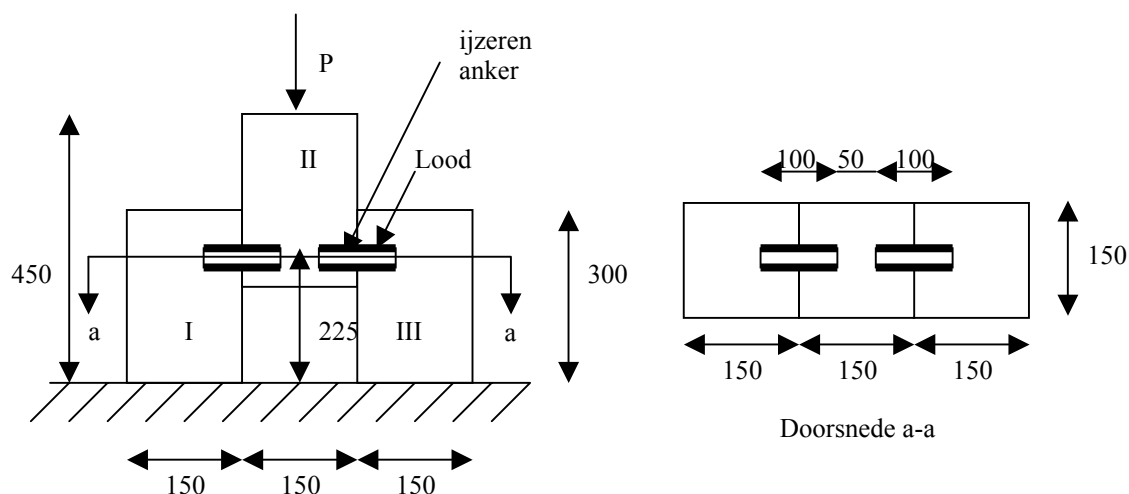


Fig. 39: Proefopstelling (ERCAN S. e.a., 1995: 81).

De proefstukken werden gemaakt volgens het procédé beschreven in paragraaf 3.3.1.. De natuursteen die gebruikt werd, was de kalksteen ‘Gris de Soulme’ en het ijzeren anker had een doorsnede van 3x3 cm en een lengte van 10 cm. De kracht P stelt bijvoorbeeld de kracht voor die een verticale verbinding zou kunnen opnemen ten gevolge van een horizontale belasting (windbelasting, aardbeving)(Fig. 39). De resultaten van deze proef zijn weergegeven in tabel 14.

Proefstuk	Belasting (kN)	Vervorming van de verbinding (mm)	Faalttype
1	98.1	9.75	Steenbreuk
2	80.44	6.1	Steenbreuk
3	118.7	9.4	Steenbreuk
Gemiddelde	99.08	8.42	

Tabel 14: Resultaten (ERCAN e.a., 1995: 82).

Uit de resultaten van deze proef kon niet bepaald worden welke kracht een verbinding effectief kan opnemen. De ankerstaven waren overgedimensioneerd waardoor de breuk optrad in de steen, een situatie die niet wenselijk is vanuit conservatieoogpunt. Dat deze proefopstelling toch representatief is voor de werkelijkheid, kan afgeleid worden uit het feit dat veel oude ankers terug gevonden zijn, die niet gebroken waren. De ankers in de monumenten waren dus wellicht ook vaak overgedimensioneerd.

Op het moment dat de treksterkte van de zwakste laag in de steen wordt overschreden, breekt de steen en vervormt de verbinding niet verder. De verbindingen vervormden tijdens de proef één kleine cm en deze vervorming werd grotendeels opgenomen door het loodmehulsel dat plastisch vervormde. Figuur 40 illustreert dat het lood zo goed als alle vervormingen opnam (ERCAN e.a., 1995: 81-83).

Er kan geconcludeerd worden dat de vervormbaarheid van de verbinding functie is van de dikte van het lood gegoten in de ruimte tussen de ankerstaaf en de natuursteen. Door de grote vervormbaarheid van het lood, kan de verbinding heel wat energie absorberen. Hierdoor is een verbinding met lood een pluspunt in aardbevingsgevoelige gebieden.

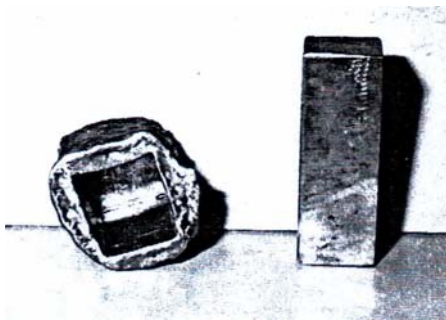


Fig. 40: Vervormbaarheid van lood. De loodprop kan ook gemakkelijk verwijderd worden (ERCAN e.a. 1995: 91).

3.6. Kostprijs

Het aangieten met lood is een arbeidsintensief werk. Het eventuele slijpen van een nieuw gat in de steen, het smelten van het lood, het gieten en de nabehandeling (priemen om het lood te verdichten) zijn handelingen die vele manuren in beslag nemen.

De exacte kostprijs van een verbinding door aangieten met lood is moeilijk te begroten omdat het niet mogelijk is één type verbinding als model voor alle andere naar voor te schuiven. De verbindingen verschillen van elkaar qua vorm van uitvoering (horizontale versus verticale verbindingen), qua functie (zie paragraaf 2.2.), qua plaats van voorkomen (al dan niet voldoende werkplatform voorhanden),

Om toch een idee te krijgen van de kostprijs, werd -in samenwerking met Algemene Ondernemingen Verstraete & Van Hecke N.V.- het volgende rekensommetje gemaakt. Er wordt uitgegaan van een horizontale verbinding waarbij een kram van roestvast staal wordt aangegoten met lood. De werkwijze hiertoe werd reeds uitgebreid beschreven in paragraaf 3.2.2.. Er wordt verondersteld dat er reeds een uitsparing in de natuursteen aanwezig is en dat de berekende prijs gebaseerd is op het aangieten van meerdere ankers in één keer zodat het opwarmen van het lood niet als kost dient ingerekend te worden en alle bewerkingen elkaar mooi kunnen opvolgen over de verschillende ankers.

Materiaalkosten:

- | | |
|--|----------------------|
| - AISI 304: 1 kram weegt 100 g aan 3 euro/kg: | 0,3 euro/verbinding |
| - lood: per kram 0,50 kg nodig aan 1,25 euro/kg: | 0,62 euro/verbinding |
| - gas, brander, potten, enz.: | 1 euro/verbinding |

Loonkosten:

- uitkuisen en drogen natuursteen
- afsnijden en plooien roestvast staal
- plaatsen ankers en gieten lood
- priemen lood

→ Totale tijd: 15 min. = 0,25 uur x 28,50 euro:	<u>7,13 euro/verbinding</u>
<i>Totale kostprijs:</i>	<i>9,05 euro/verbinding</i>

Dit voorbeeld illustreert het hoge aandeel van de loonkosten in de globale kostprijs van een verbinding, gerealiseerd met behulp van het arbeidsintensieve procédé van het aangieten met lood.

Omdat de kostprijs vooral vanuit het oogpunt van de aannemers erg belangrijk is, moet met deze kostprijs rekening gehouden worden bij het vergelijken van het procédé van het aangieten met lood en haar alternatieven. Mocht er in de toekomst nog verder onderzoek gebeuren omtrent dit onderwerp, dan zou het wellicht interessant zijn om op zoek te gaan naar soortgelijke types verbindingen die respectievelijk werden uitgevoerd door het aangieten met lood en door het gebruik van alternatieven zoals glasvezelstaven en epoxy of titanium en mortel. Dit zou toelaten om ook de kostprijs met duidelijke cijfergegevens als parameter in te voeren in de bespreking van het aangieten met lood en haar mogelijke alternatieven.

3.7. Problemen en onderzoeksprocedure

In het derde hoofdstuk van dit eindwerk worden de gebruikte materialen, de werkwijzen voor het aangieten en de eigenschappen van de verbinding beschreven. Dit laat toe een kritisch beeld op te hangen van de verbinding door het aangieten met lood en laat ook toe na te gaan in welke mate en in welke richting een zoektocht naar alternatieven zich opdringt. Dit zoeken naar alternatieven kan overigens maar op een adequate manier gebeuren als de nadelen van de verbinding door aangieten met lood voldoende gekend zijn.

De verbinding door aangieten met lood bleek in het verleden een vrij goede verbinding te zijn. Toch moet aangestipt worden dat het gebruik van ijzeren ankerstaven de steen (zeker in corrosieve milieus als zeegebieden en sterk vervuilde gebieden) kon beschadigen door expansieve roestvorming als gevolg van atmosferische en galvanische corrosie. Het gebruik van roestvast staal biedt een oplossing voor deze atmosferische en galvanische corrosie maar kampt dan met meer lokale corrosieproblemen. In chloridenrijke, vervuilde milieus kan de verbinding spannings- en spleetcorrosie vertonen. Putcorrosie is binnen het kader van dit eindwerk van minder belang wegens zijn puntvormig en dus zeer lokaal karakter.

Het corrosieprobleem kan dus, samen met de gezondheidsrisico's die het gesmolten lood met zich meebrengt en het vrij arbeidsintensief karakter van het procédé, aangestipt worden als mogelijks één van de grote nadelen van de verbinding door het aangieten met lood van een roestvaste anker. Om een adequaat antwoord te kunnen bieden op dit corrosieprobleem, is het belangrijk dat het probleem volledig begrepen wordt. Pas als duidelijk kan aangestipt worden waar en op welke schaal er problemen kunnen verwacht worden en welke de precieze oorzaken van dit probleem zijn, kan eventueel een volwaardig alternatief voorgesteld worden.

In hoofdstuk vier wordt een eerste aanzet gegeven in het begroten en begrijpen van het corrosieprobleem.

Elk corrosieproces heeft een elektrolyt, vocht, nodig. Het is echter niet duidelijk hoe dit vocht precies tot bij de ankerstaaf geraakt. Is het vocht afkomstig van de steen zelf (zie paragraaf 3.4.5.) en kan het vocht tot bij de ankerstaaf geraken omdat die staaf -als gevolg van een slechte uitvoering- niet volledig omhuld wordt met lood? Komen er scheurtjes in het lood als gevolg van krachtswerkingen en thermische belastingen, waarlangs het vocht de ankerstaaf kan bereiken? Veroorzaakt het gebruik van nieuw lood (met een laag gehalte aan sporenelementen) krimpscheuren waarlangs het vocht kan penetreren tot aan de ankerstaaf? Een samenstellingsanalyse, besproken in paragraaf 4.1., poogt een antwoord te bieden op deze laatste vraag. Een klein gehalte aan sporenelementen heeft een grote invloed op de eigenschappen van lood. Door loodmonsters met een verschillende datering te analyseren op de aanwezigheid van sporenelementen kan worden nagegaan of de eigenschappen van het gebruikte lood merkbaar veranderd zijn doorheen de tijd.

Een van die eigenschappen die afhangt van het gehalte aan sporenelementen is de sterkte van het lood. De loodmonsters die gebruikt werden voor de samenstellingsanalyse kunnen ook onderworpen worden aan een micro-hardheidsmeting (zie paragraaf 4.2.). De onderlinge opgemeten hardheden en hun spreiding geven een idee van de relatieve sterktes van de verschillend gedateerde loodmonsters.

Lichtmicroscopie laat toe om de resultaten, gevonden in de samenstellingsanalyse en in de hardheidsmeting, te controleren en verder te verklaren (zie paragraaf 4.2.).

De hierboven beschreven proefopstellingen moeten uiteindelijk toelaten een eerste voorspelling te maken over het feit of de menging van hedendaags lood met oud lood de loodverbinding in natuursteen eerder positief, niet of eerder negatief beïnvloedt. Zoals reeds eerder vermeld, wordt bij de restauratieprojecten een deel van het lood gerecupereerd uit oude verbindingen die aangegoten werden met lood. Het tekort aan lood wordt dan opgevangen door hedendaags lood (bijvoorbeeld bladlood afkomstig van de restauratiewerken aan het dak van het gebouw) mee te smelten en zo te mengen met het gerecupereerde oude lood.

Hoewel nog niet volledig achterhaald is op welke manier het vocht de met lood aangegoten ankerstaaf bereikt, moet toch ontegensprekelijk vastgesteld worden dat vocht tot bij de ankerstaaf geraakt. De zwaar gecorrodeerde ijzeren ankers die teruggevonden worden bij meer recente restauratieprojecten zijn daar een bewijs van.

De vraag dient nu gesteld te worden in welke mate dit vocht problemen van spannings- en spleetcorrosie kan veroorzaken bij het met lood aangegoten anker van roestvast staal. Aan de hand van een zoutneveltest, besproken in paragraaf 4.3., wordt gepoogd na te gaan of er een spleet aanwezig is tussen het lood en de ankerstaaf. Er wordt getest of binnen een beperkte tijd en met een eenvoudige proefopstelling, spleetcorrosie kan gesimuleerd worden. Met behulp van een aantal configuraties wordt nagegaan welke zaken een doorslaggevende invloed zouden kunnen hebben op het corrosiegedrag van de combinatie lood-ankerstaaf-natuursteen.

4. Proefprogramma

4.1. Fysische samenstelling

4.1.1. Doel van de proef

De mechanische en fysische eigenschappen van lood kunnen nogal sterk variëren naargelang het gehalte aan sporenelementen wijzigt. Een miniem verschil in gewichtspercentage van een bepaald element kan het gedrag van het lood aanzienlijk veranderen. Lood zoals het vroeger, maar ook tegenwoordig nog, geproduceerd wordt, bevat een klein gehalte aan elementen zoals tin (Sn), antimoon (Sb), zilver (Ag), bismut (Bi), koper (Cu), arseen (As), zink (Zn), cadmium (Cd), ijzer (Fe), nikkel (Ni) enz..

De aanwezigheid van bvb. zilver in lood zou de krimp van het lood verminderen. Dit zou dan een van de redenen kunnen zijn dat er in sommige hedendaagse loodtoepassingen krimpscheuren voorkomen, terwijl deze problemen zelden worden aangetroffen bij de oude loodtoepassingen. Zoals reeds eerder vermeld, haalt het raffinageproces van heden ten dage bijna al het zilver uit de loodertsen (gewoon bladlood bvb., geproduceerd door Umicore, heeft een gewichtspercentage aan Ag dat zeker minder dan 0,0015 % en meestal zelfs minder dan 0,0004 % bedraagt, bijlage 1). Het overgebleven percentage aan zilver in lood was vroeger echter een stuk hoger omdat er toen nog geen sprake was van de moderne technieken en procédés bij loodraffinage zoals we die nu kennen.

Een interessante illustratie hiervan is een schadegeval aan de Lakenhallen van Ieper, waar de hernieuwde loodbekleding van de dakgoten barsten vertoonde waar het water door kon sijpelen (gesprek met R. de Bruyn, WTCB). Mevrouw M. Goossens van Monumenten en Landschappen West-Vlaanderen bevestigde dat de barsten in de loodbekleding van goten een typisch probleem zijn waar vele historische gebouwen mee te kampen hebben. De precieze, achterliggende redenen voor het probleem zijn echter niet bekend. Mevrouw Goossens kon enkel zeggen dat tegenwoordig bij de restauratie van historische gebouwen, bijna al het lood in dakgoten vervangen wordt door koper.

Dit voorbeeld illustreert dat het gedrag van lood en de invloed van de aanwezigheid van bepaalde sporenelementen tot op heden nog niet helemaal begrepen wordt.

Door de samenstelling te bepalen van enkele oude en recente loodmonsters, kan nagegaan worden of er merkbare verschillen in de gewichtspercentages van de sporenelementen zijn. Indien er merkbare verschillen zijn in samenstelling, kan worden nagaan wat de eventuele gevolgen van deze samenstellingsverschillen zijn op de mechanische en fysische eigenschappen van beide loodsoorten.

Tenslotte kan met deze proef misschien ook een eerste, voorzichtige voorspelling gemaakt worden over het feit of de menging van hedendaags lood met oud lood de loodverbinding in natuursteen eerder positief, niet of eerder negatief beïnvloedt. Zoals reeds eerder vermeld,

wordt bij de restauratieprojecten een deel van het lood gerecupereerd uit oude verbindingen die aangegoten werden met lood. Het tekort aan lood wordt dan opgevangen door hedendaags lood (bijvoorbeeld bladlood afkomstig van de restauratiewerken aan het dak van het gebouw) mee te smelten en zo te mengen met het gerecupereerde oude lood.

4.1.2. Proefstukken

Voor deze proef werden vier 4 monsters lood met een verschillende datering gebruikt. De afmetingen die nodig zijn om de samenstelling van het lood te kunnen bepalen, zijn klein (1 à 4 cm² en een dikte van 2 mm à 10 mm). Vooral eer de samenstelling werd geanalyseerd van de 4 monsters, werden deze eerst gepolijst (Fig. 41). Vervolgens werden de monsters geanalyseerd onder een Leitz-lichtmicroscop en aan een hardheidsmeting onderworpen (zie paragraaf 4.2.).

Het eerste proefstuk is afkomstig uit het stadhuis van Gent en dateert van 1610. Het werd ontnomen uit een verbinding in een balustrade, aangegoten met lood maar zonder verankering. Dit monster wordt verder ‘proefstuk 1600’ genoemd.

Het tweede proefstuk is afkomstig van de Zavelkerk te Brussel en maakte eveneens deel uit van een verbinding van een balustrade, aangegoten met lood maar eveneens zonder ankerstaaf. Het is niet exact gedateerd. Wel is het zo dat de laatste restauratie van de Zavelkerk plaatsvond in 1908, zodat het monster minstens zo oud is en wellicht zelfs einde 19^e eeuw gesitueerd moet worden. In de verdere tekst wordt er naar dit monster verwezen als ‘proefstuk 1900’.

Voor het derde proefstuk - ‘proefstuk 2000’ - werd oorspronkelijk voorzien in een stuk bladlood waarvan reeds de gegarandeerde zuiverheid en een typische samenstellingsanalyse gekend waren (bijlage 1). Het lood voor dit proefstuk werd echter niet gesmolten en gegoten zoals dit wel het geval was geweest bij de twee andere proefstukken. Aangezien de microstructuur van een ongesmolten en een gesmolten proefstuk verschillen en aangezien ook de hardheid beïnvloed wordt door de microstructuur, werd een vierde proefstuk gemaakt. Na het maken van de proefstukken voor de zoutneveltest (paragraaf 4.3.), bleef nog een hoeveelheid gesmolten bladlood over die in een groot conservenblik werd gegoten. Uit deze loodprop werd een kern gezaagd en dit wordt verder ‘proefstuk 2000-gegoten’ genoemd. ‘Proefstuk 2000-gegoten’ heeft dezelfde samenstelling als ‘proefstuk 2000’ maar zijn microstructuur laat toe om op een meer correcte wijze de hardheid van de verschillende gedateerde loodstukjes met elkaar te vergelijken.



Fig. 41: Gepolijste monsters 'proefstuk 1600', 'proefstuk 1900' en 'proefstuk 2000-gegoten'.

4.1.3. Proef

De samenstelling van drie proefstukken (1600, 1900 en 2000-gegoten) werd op het departement MTM van de KULeuven en onder leiding van professor L. Froyen bepaald. Hiervoor werd gebruik gemaakt van een Philips SEM (scanning electron microscope) XL 30 FEG (field emission gun). Vooraleer de 3 monsters onder de SEM werden geplaatst, werd er eerst een dun geleidend koolstoflaagje op de proefstukken aangebracht.

De FEG bestaat uit een puntvormig filament dat als kathode fungeert. Door het aanleggen van een potentiaalverschil tussen dit filament en de anode die zich ook in de microscoop bevindt, worden de elektronen uit het filamentmateriaal versneld naar de anode. Het gebruik van een puntvormig filament i.p.v. een W-filament, verlaagt de potentiaalbarrière die de elektronen moeten overwinnen om uit het materiaal te ontsnappen. Er is hier dus geen bijkomende energie vereist. Andere microscopen werken vaak via het principe van thermische emissie: een filament wordt verwarmd, de elektronen krijgen genoeg energie om uit de kathode te ontsnappen, versnellen eveneens naar de anode en komen op het proefmonster terecht. Het voordeel van een FEG bestaat erin dat deze nauwer en beter focusseerbaar is. Het focuseren gebeurt met elektromagnetische lenzen (Fig. 42).

De beeldvorming van het onderzochte monster gebeurt in een analyse via BSE-beeldvorming (back scattered electrons). Als de elektronen op het materiaal komen, worden deze teruggekaatst. Afhankelijk van het atoomnummer van het element waartegen het elektron botst, varieert de energie van het teruggekaatste elektron: hoe zwaarder het element, hoe meer energie het teruggekaatste elektron nog heeft. Als dan een beeld gevormd wordt met behulp van de teruggekaatste (vandaar 'back scattered') elektronen, zullen de gebieden waar zich een zwaar element bevindt, licht van kleur zijn. Er dient nog opgemerkt te worden dat bij BSE-beeldvorming, de detector een negatieve potentiaal heeft omdat de elektronen hier nog voldoende energie hebben om niet afgestoten te worden. Dit in tegenstelling tot een andere manier van beeldvorming, SE (secundaire elektronen), waar de detector een positieve potentiaal moet hebben.

De elementenanalyse gebeurt door middel van de detectie van Röntgenstralen die een materiaal uitzendt na interactie met de elektronen. Deze X-stralen zijn karakteristiek voor het materiaal en ontstaan als volgt: een elektron valt in op het monster, daardoor wordt een

elektron uit het monster gezonden (het heeft nu immers genoeg energie gekregen) en er ontstaat op een bepaalde schil een lege plaats. Omdat de plaatsen dicht bij de kern, vanuit energetisch oogpunt, de gunstigste zijn, zal een elektron uit een schil daarboven de lege plaats innemen. Aangezien het energieniveau van de schil dicht bij de kern lager is, zal er bij deze opvulling energie vrijkomen onder de vorm van X-stralen. Deze energie is afhankelijk van het energieverval tussen de schillen, hetgeen voor elk element anders is. Op die manier ontstaan er voor één element verschillende X-stralen met elk hun eigen energiewaarde: een elektron kan uit de K-, L- of M-schil vrijkomen en deze lege plaats kan dan nog eens opgevuld worden door een elektron uit de verschillende mogelijke schillen (die elk op hun beurt ook nog uit meerdere niveaus zijn samengesteld).

Het uiteindelijk resultaat van zo'n analyse is een grafiek met de energieschaal (keV) op de x-as en de intensiteit (hoeveel elektronen, die de detector bereiken, bezitten deze energie) op de y-as. Men kan uit de intensiteit op de y-as een waarde berekenen voor de procentuele samenstelling (=kwantitatief), terwijl de x-as gebruikt wordt om kwalitatief te zien welke elementen aanwezig zijn.

De uiteenzetting hierboven is gebaseerd op het boek 'Introduction to microscopy by means of light, electrons, X rays or acoustics', 1994, 2nd edition door T.G. Rochow en P.A. Tucker, Plenum Press. Geïnteresseerden vinden hierin een uitgebreidere uitleg gegeven omtrent de werking van de SEM XL FEG en omtrent de weergave van de resultaten.

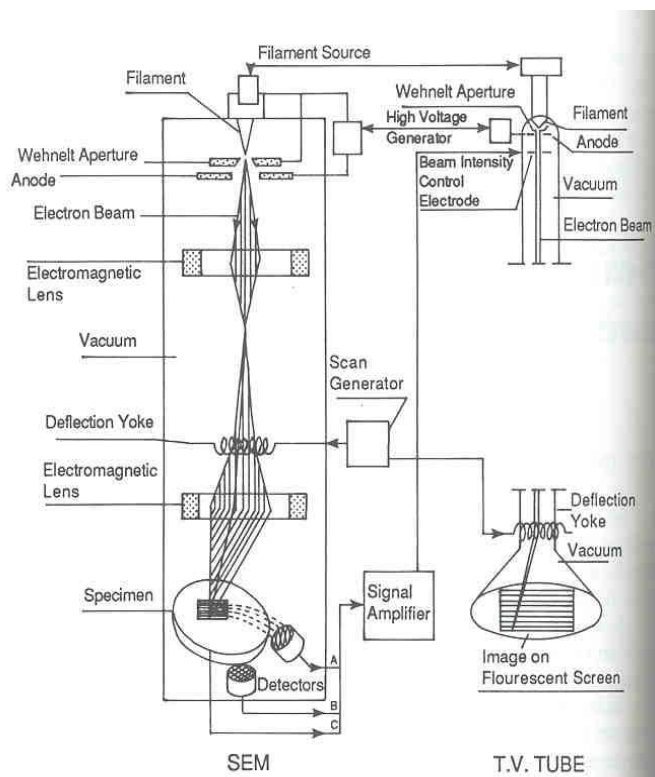


Fig. 42: Principeschets
Scanning Electron Microscope
(ROCHOW T.G. & TUCKER
P.A., 1994: 298)

4.1.4. Resultaten

Vooraleer de resultaten weer te geven, is het belangrijk om te weten dat de bepaling van de samenstelling kan gebeuren op ‘full scale’ of op ‘point scale’. Bij een ‘point scale’ wordt de samenstelling bepaald in een welbepaald punt, terwijl bij ‘full scale’ de gemiddelde samenstelling bepaald wordt over een bepaald gebied. De hierna gegeven tabellen 3X en 4X en de bijhorende microscoopfoto’s (Fig. 43 tot Fig. 45) zullen dit onderscheid verder verduidelijken.

Verder is het ook belangrijk om te weten dat de samenstellingsbepaling van de drie monsters moest gebeuren binnen het strakke tijdsbestek van een voormiddag. De elektronenmicroscop is immers een apparaat dat veelvuldig wordt gebruikt voor expertises en onderzoek, waardoor thesisonderzoek pas op een secundaire plaats komt. Bovendien was de vaste verantwoordelijke van het toestel afwezig wegens ziekte. De bekomen resultaten kunnen allerminst een volledig beeld kunnen van de samenstelling, maar moeten eerder gezien worden als een eerste aanzet.

De resultaten worden samengevat in tabel 15 tot tabel 19. Voor de output zoals verkregen tijdens de analyses, zie bijlage 2.

De tabellen 15 en 16 geven de analyse weer van ‘proefstuk 1600’. Beide analyses werden uitgevoerd in een insluitsel dat te zien was op het beeld van de elektronenmicroscop, ‘point scale’ dus. De letter tussen haakjes bij elk element, verwijst naar het energieniveau van de respectievelijke schil van het element.

Element	Gewichts%	Atomair%
<i>Pb (M)</i>	91,71	86,50
<i>Ag (L)</i>	0,90	1,63
<i>Sb (L)</i>	7,40	11,87

Tabel 15: ‘Proefstuk 1600’, point scale.

Element	Gewichts%	Atomair%
<i>Pb (M)</i>	93,14	81,50
<i>Ag (L)</i>	0,92	1,55
<i>Cu (K)</i>	5,94	16,95

Tabel 16: ‘Proefstuk 1600’, point scale.

De tabellen 17 en 18 vormen een analyse van het ‘proefstuk 1900’, met dat onderscheid dat tabel 17 een ‘point scale’ analyse weergeeft, daar waar in tabel 18 de samenstelling ‘full scale’ bepaald werd. De figuur 44 hoort bij de tabel 17, daar waar figuur 43 de samenstellingsbepaling van tabel 18 voorstelt. De ‘point scale’ analyse gebeurde eerst in een insluitsel te midden van het loodmateriaal (Fig. 44) en leverde de tabel 17 op. Daarna werd ook de samenstelling bekeken in een punt langs de korrelgrens (Fig. 45). Dit leverde een bijna

identiek resultaat op als bekomen in tabel 17 en om deze reden is het resultaat van deze samenstellingsbepaling achterwege gelaten.

Element	Gewichts%	Atomair%
<i>Pb (M)</i>	7,60	4,50
<i>Sn (L)</i>	92,40	95,50

Tabel 17: 'Proefstuk 1900', point scale.

Element	Gewichts%	Atomair%
<i>Pb (M)</i>	97,58	98,85
<i>Sn (L)</i>	2,42	4,15

Tabel 18: 'Proefstuk 1900', full scale.

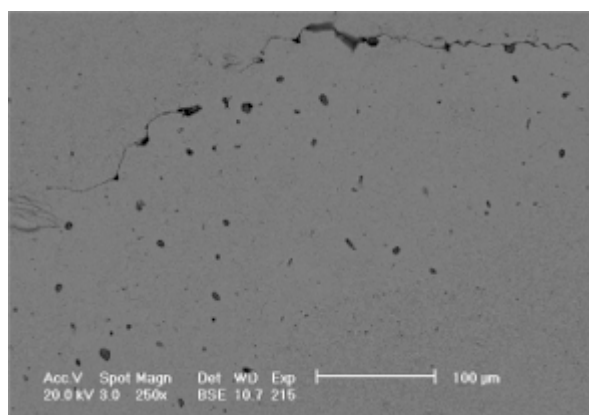


Fig. 43: Full scale analyse (schaal 1/250).

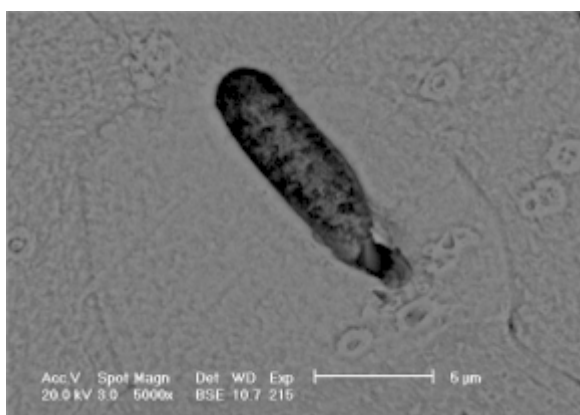


Fig. 44: Point scale analyse in een insluitel in het loodmateriaal (schaal 1/5000).

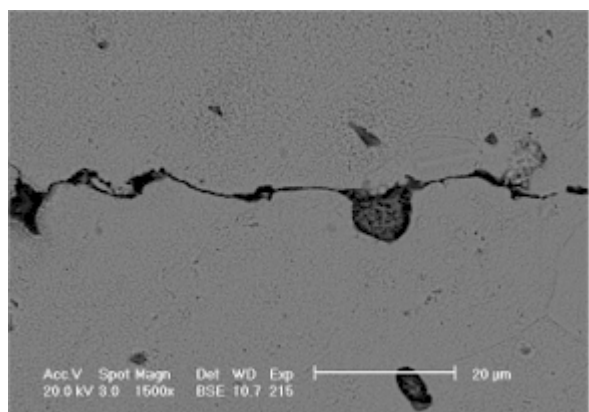


Fig. 45: Point scale analyse in een insluitstel langs de korrelgrens (schaal 1/1250).

De tabel 19 tenslotte, geeft aan dat in ‘proefstuk 2000-gegoten’ geen andere elementen dan Pb konden teruggevonden worden met de elektronenmicroscop, zelfs niet bij een ‘point scale’ analyse in insluitsels.

Element	Gewichts%	Atomair%
<i>Pb (M)</i>	100	100

Tabel 19: ‘Proefstuk 2000-gegoten’, full scale.

4.1.5. Literatuur: de eigenschappen van sporenelementen in lood

Vooraleer de resultaten van de samenstellingsbepaling te bespreken, is het interessant om enkele literatuurgegevens met betrekking tot de aanwezigheid van andere elementen naast lood samen te vatten.

De aanwezigheid van Cu verbetert aanzienlijk de corrosieweerstand en de mechanische eigenschappen (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 544). Dit laatste reflecteert zich niet zozeer in de treksterkte en de breukrek maar wel in de buigtest (Amsler buigtest: aantal keren dat monster over 180° gebogen kan worden, zonder te scheuren; bepaald volgens de Duitse norm DIN 50153) en vooral in de weerstand tegen kruip (LOOD EN LOODTOEPASSINGEN IN DE RESTAURATIE, restauratievademecum, bijdrage 06, verder afgekort tot RV 06, 1987: 12). Koperhoudend lood (0,04 % Cu) is beter bestand tegen chemicaliën dan zuiver lood (99,97 % Pb)(RV 06, 1987: 14). Verder is het bekend dat kleine hoeveelheden Cu de duurzaamheid, bij vroegere loodkwaliteiten aanwezig door het hoger gehalte aan ‘verontreinigingen’, herstellen en zelfs verbeteren (RV 06, 1987: 14). Tot slot kunnen kleine hoeveelheden Cu de hardheid van het lood verhogen (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 544).

De toevoeging van kleine hoeveelheden Sb maakt het lood sterker en minder gevoelig aan slijtage, verlaagt de smelttemperatuur en verkleint de krimp van het lood (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545 en 549). Naast betere sterkte-eigenschappen, zorgt de toevoeging van Sb ook voor hogere hardheidswaarden (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545 en RV 06, 1987: 12). Antimoonhoudend lood (4 % Sb) heeft een bijna twee keer zo hoge hardheid als zuiver lood (99,97 % Pb) (RV 06, 1987: 14) en in de Engelstalige literatuur wordt het verwijderen van Sb (samen met Sn en As) in het raffinageproces dan ook ‘softening-step’ genoemd (NEFF D.V., 1988: 475). Sb maakt het lood echter ook brosser (RV 06, 1987: 12).

De toevoeging van Sn verbetert de hardheid en de sterkte van het lood (NEFF D.V., 1988: 475 en WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545). Tinpercentages van 0,3 tot 1 % hebben een gunstig effect op zowel het kruipgedrag als de verweringssterkte (RV 06, 1987:

12). Grotere hoeveelheden (2 tot 50 %) Sn halen de smelttemperatuur van lood naar beneden, vandaar de typische tin-lood-legeringen die gebruikt worden bij het solderen (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545 en 553). Tot slot worden tin-lood-legeringen ook gebruikt als corrosiebestendige coatings op staal of koper (PRENGAMAN D.R., 1996: 86).

De raffinagetechniek, waarmee het mogelijk is om zeer zuiver lood te maken, zou oorspronkelijk zo verbeterd zijn om zilver af te kunnen scheiden uit lood (RV 06, 1987: 5 en paragraaf 3.1.2.1.).

Over de invloed van Ag op de eigenschappen van lood is in de literatuur echter weinig terug te vinden, behalve dat het de corrosiebestendigheid zou verbeteren in sommige toepassingen (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545). Over het krimpgedrag van het lood met betrekking tot Ag kan op basis van een gesprek met R. De Bruyn van het WTCB het volgende gezegd worden: Ag vermindert waarschijnlijk de krimp van lood. Bij tin-lood-legeringen voor solderingen, wordt Ag toegevoegd om de kruipweerstand te verbeteren en om de treksterkte te verhogen. Lood met 1 % Sn en 1,5 % Ag wordt gebruikt voor solderingen in cryogene condities omdat het niet verbrost bij lage temperaturen (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 553).

Betere resultaten bij de buigtest en een betere kruipweerstand worden verkregen door de aanwezigheid van As, die dan toelaten het lood eventueel te gebruiken voor toepassingen die aan sterke trillingen onderhevig zijn (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545). Bovendien verbetert de aanwezigheid van As de hardheid van het lood (NEFF D.V., 1988: 475 en WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545).

Ca wordt vaak gebruikt om de sterkte van legeringen te verbeteren (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 545). Ca zou ook een alternatief zijn voor As in toepassingen die aan sterke trillingen onderhevig zijn (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 556).

De gevaarlijkste verontreiniging is wellicht Bi dat het lood bros maakt. Als richtwaarde wordt gesteld dat de beste loodkwaliteiten niet meer dan 0,05 % Bi mogen bevatten (BERG K. e.a., 1963: 322).

Verder is er nog Fe dat enkel de zuiverheid van het lood naar beneden haalt maar dat niet aanzien wordt als een verontreiniging die invloed heeft op de eigenschappen van lood.

Over de invloed van de elementen Ni en Cd kon niets gevonden worden in de geraadpleegde literatuur.

Bij het overlopen van al deze eigenschappen, is het toch gepast een kritische noot te formuleren. Bij het opsommen van de verschillende invloeden van een element op het lood staan bijna nooit richtpercentages opgegeven. Zo kan bijvoorbeeld in het Metals Handbook (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990 en NEFF D.V., 1988) gelezen worden dat de

aanwezigheid van Cu de corrosieweerstand verbetert. Allereerst staat niet vermeld wat precies moet verstaan worden onder een verbetering van de corrosieweerstand. Daarenboven worden ook geen minimale waarden van het benodigd Cu gegeven opdat die corrosieweerstand aanzienlijk zou verbeterd worden. Ook over een eventuele bovengrens voor de aanwezigheid van een bepaald element, wordt weinig gezegd in de literatuur. Het is perfect mogelijk dat een te hoog percentage van een bepaald element de eigenschappen van het lood negatief kan beïnvloeden, maar ook daar is er dus weinig literatuur over terug te vinden.

Tot slot van deze paragraaf moet nog vermeld worden dat noch in de Belgische, noch in om het even welke buitenlandse norm eisen worden gesteld ten aanzien van de eigenschappen van lood voor bepaalde toepassingen. In de normen worden er enkel samenstellingseisen voor het lood geformuleerd.

4.1.6. Bespreking van de resultaten

Op het eerste zicht voldoen de resultaten in die zin aan de verwachtingen, dat meer sporenelementen teruggevonden werden in de analyses naarmate het monster ouder gedateerd is.

Wat het 'proefstuk 1600' betreft werden in insluitsels de elementen Ag, Cu en Sb teruggevonden. Het valt onmiddellijk op dat, hoewel de analyses hier 'point scale' gebeurden in insluitsels, het gewichtspercentage Ag lager is dan verwacht. Omwille van de beperkte tijd, konden geen gemiddelde 'full scale' waarden worden bepaald, maar het percentage aan Ag dat we dan zouden gevonden hebben, zou wellicht vrij laag geweest zijn: ergens in de buurt van 0,01 % tot 0,04 %. Deze cijfers zijn gebaseerd op een vergelijking tussen 'point scale' en 'full scale' waarden, gevonden bij 'proefstuk 1900'. Zo'n extrapolatie is niet helemaal correct gezien de microstructuur en de samenstellende elementen van beide monsters verschillend zijn, maar anderzijds is de extrapolatie ruim genomen zodat een percentage van 0,04 % toch met voldoende zekerheid als bovengrens kan aangeduid worden. Dit zou dus ook willen zeggen dat anno 1600 de raffinagetechnieken al een stuk meer verfijnd waren dan ten tijde van de Romeinen, die –zoals reeds vermeld in paragraaf 3.1.2.1.- het gehalte aan Ag tot 0,1 % reduceerden. In de literatuur konden jammer genoeg geen cijfers gevonden worden die de verbeteringen van het raffinage-procédé doorheen de geschiedenis kunnen begroten. Wat geweten is, is dat door de eeuwen heen voortdurend werd gezocht naar technieken om het zilveragehalte in lood te verlagen. De echte doorbraak kwam er maar met het Pattinson-proces (gepatenteerd in 1833) en het Parkes-proces (gepatenteerd in 1850). Dit laatste proces wordt tegenwoordig nog altijd toegepast waarbij echter nog verbeteringen zijn aangebracht (DAY J. & TYLECOTE R.F., 1991: 96).

In ieder geval is het nodig om meerdere gedateerde stalen van verschillende locaties te verzamelen indien een algemeen beeld wil geschetst worden over de zuiverheid van het lood (en dan vooral het gehalte aan zilver aangezien dit toch als een van de belangrijkste drijfveren

moet gezien worden voor de optimalisatie van de raffinage-procédés) doorheen onze geschiedenis. Bovendien moet dan nog eens rekening gehouden worden met het feit dat een bepaalde datering (bijvoorbeeld van een verbinding in een balustrade) nooit met volledige zekerheid kan gegeven worden op basis van geschriften. Zo kan het goed zijn dat er in de loop der jaren eens een bepaalde loodverbinding werd vernieuwd zonder dat daar iets van terug te vinden is in geschriften. Een exacte datering via wetenschappelijke technieken is dus een bijkomende vereiste voor optimaal onderzoek.

Verder werd in het lood van de 17^e eeuw nog Cu en Sb gevonden. Belangrijk hierbij is te zien dat deze twee elementen aanwezig zijn als een 2^{de} fase (voor Cu en ook voor Ag) of als vaste oplossing (voor Sb) en niet als een precipitaat zoals het Sn in lood van 1900. Het onderscheid tussen deze verschillende vormen van voorkomen wordt in de paragraaf 4.2. behandeld.

Mits extrapolatie (met opnieuw dezelfde bedenking zoals hierboven reeds werd geformuleerd) wordt een gehalte van 0,1 % à 0,25 % Cu en een gehalte van 0,15 % à 0,25 % Sb bekomen.

Deze waarden verschillen met een factor 200 voor Cu en een factor 1000 voor Sb ten opzichte van de waarden die worden aangetroffen bij hedendaags bladlood (zie bijlage 1). Gezien deze grote verschillen lijkt het onvoorzichtig om de eigenschappen die werden geformuleerd in de literatuurstudie (zie paragraaf 4.1.5.) zomaar door te trekken naar het 'proefstuk 1600'. De literatuur bespreekt de invloed van de elementen immers vanuit het oogpunt van het (zeer lage) gehalte aan sporenelement aanwezig in courant gebruikt lood. Hogere percentages leidden tot de legeringen. Zo kan voor lood-antimoonlegeringen gekozen worden uit een gehalte van 2 % tot 25 % Sb (WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., 1990: 544). Over de zone waar het monster 1600 zich bevindt, tussen het lood en de lood-legeringen, wordt echter weinig teruggevonden in de literatuur.

Wel kan verondersteld worden dat het Sb (en ook Cu en Ag in een beperkte mate?) het lood harder maakt (zie paragraaf 4.2.) en kan ook de aanwezigheid van Sb (en Ag?) gelinkt worden aan een verminderde krimp van het oude lood ten opzichte van het hedendaags lood. Het percentage Sb is te klein om enige invloed te kunnen hebben op een verlaging van de smelttemperatuur van het lood (zie fasendiagram paragraaf 4.2.5.3.).

In het 'proefstuk 1900' werd al geen zilver meer aangetroffen. Bij het gebruik van de SEM, worden theoretisch elementen teruggevonden die minimaal 0,1 % van het gewicht uitmaken (HEINRICH K.F.J & NEWBURY D.E., 1986: 516). In praktijk ligt dit percentage soms hoger. In ieder geval is het moeilijk om een absoluut getal te plakken op de nauwkeurigheid van de SEM. Zo zal een piek in de intensiteit-schaal van een bepaald te herkennen element moeilijker te onderscheiden zijn wanneer er vlakbij (op de energieschaal) een grotere piek is van een ander element dan wanneer er in de buurt van de piek van het te herkennen element geen pieken van andere elementen zijn.

Het mag dus duidelijk zijn dat het moeilijk is om een waarde naar voor te schuiven van het maximale percentage aan Ag dat in het proefstuk 1900 zou kunnen aanwezig zijn.

Tabel 17 geeft duidelijk de aanwezigheid weer van insluitsels met bijna zuiver Sn. De aanwezigheid van dergelijke tinprecipitaten en hun invloed op de hardheid wordt in paragraaf

4.2.5 uiteengezet. Full scale geeft tabel 18 een Sn percentage aan van 2,42%. Uit het fasendiagram van Sn-Pb (zie paragraaf 4.2.5.3.) kan worden opgemaakt dat deze hoeveelheid tin te klein is om het smeltpunt merkelijk te verlagen.

In het ‘proefstuk 2000-gegoten’ werden geen sporenelementen aangetroffen met de SEM. Dit is ook logisch als de percentages in bijlage 1 vergeleken worden met het minimaal benodigde gewichtspercentage (0,1% in HEINRICH K.F.J & NEWBURY D.E., 1986: 516) voor een element opdat het nog door de SEM kan teruggevonden worden.

4.2. Lichtmicroscopie en hardheidsmeting

4.2.1. Doel van de proef

In dit deel van het proefprogramma werd met een gewone lichtmicroscop een eerste beeld van de microstructuur van de vier monsters gevormd. Vervolgens werden deze vier proefstukken aan een hardheidsmeting onderworpen. Dit deel van het proefprogramma kwam chronologisch gezien voor de samenstellingsanalyse, maar wordt in dit eindwerk om inhoudelijke redenen pas na de paragraaf over die analyse behandeld.

Een lichtmicroscop laat toe te bepalen of het een gietstructuur dan wel een gerekristalliseerde structuur betreft en laat ook toe de monsters onderling wat te vergelijken. Het was dankzij een dergelijke - gemakkelijk uit te voeren - lichtmicroscopie dat bvb. beslist werd om nog een vierde monster, ‘proefstuk 2000-gegoten’, bij te maken waarop dan ook een hardheidsmeting werd uitgevoerd.

Het belangrijkste deel van deze paragraaf heeft betrekking op de bepaling van de hardheid van de vier loodmonsters. De bedoeling van deze hardheidsmeting is om de aanwezigheid van bepaalde sporenelementen, zoals bepaald in de vorige paragraaf 4.1., in relatie te brengen met de gevonden hardheidswaarden. De hardheidsmetingen leveren bovendien een eerste beeld van de relatieve sterktes van de vier monsters.

4.2.2. Proefstukken

De vier proefstukken die reeds werden besproken in paragraaf 4.1.2., werden ook gebruikt voor de lichtmicroscopie en de hardheidsmetingen. Daar waar voor de samenstellingsbepaling in paragraaf 4.1. geen onderscheid tussen het ‘proefstuk 2000’ en ‘proefstuk 2000-gegoten’ moest worden gemaakt, heeft het verschil in microstructuur tussen beide proefstukken hier wel degelijk een invloed op de hardheid. Op alle vier de monsters werd dus een hardheidsmeting uitgevoerd.

4.2.3. Proef

4.2.3.1. Lichtmicroscopie

De microstructuur van de vier monsters werd bekeken met behulp van een stereo-licht-microscop, type Leitz-METALLOPLAN. Deze microscoop beschikt over een ingebouwde camera die toelaat foto's van de microstructuur te nemen en deze digitaal op te nemen.

Het werkingsprincipe van zo'n lichtmicroscop kan het best begrepen worden aan de hand van figuur 46. Een lichtstraal wordt via een half-doorlatende spiegel en door het objectief geleid naar het ondoorschijnend monster. De lichtstraal wordt gereflecteerd door het monster, gaat opnieuw door het objectief en bereikt via de half-doorlatende spiegel het oogstuk. Door dit oogstuk kan het menselijk oog of een camera het monster vergroot bestuderen. De half-doorlatende spiegel laat slechts een deel van de lichtstralen door en reflecteert het andere deel. Aangezien de lichtstraal tweemaal door de half-doorlatende spiegel moet passeren, gaat dit gepaard met een serieus verlies aan intensiteit van de lichtstralen. Het gebruik van een heldere en goed-focusseerbare lichtbron is dus absoluut noodzakelijk voor een duidelijk beeld van het ondoorschijnend (metalen) monster (GRAHAM C.D. & MC MAHON C.J., 1992: 46).

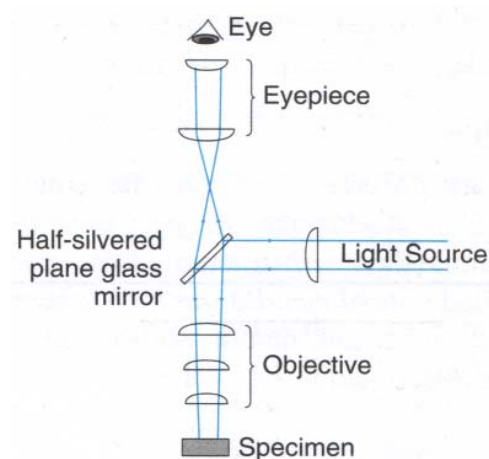


Fig. 46: Werkingsprincipe lichtmicroscop
(GRAHAM C.D. & MC MAHON C.J., 1992: 46).

4.2.3.2. Hardheidsmeting

De hardheidsmetingen werden uitgevoerd met een microvickershardheids-toestel, type Durimet2.

De meeste methodes die tegenwoordig toegepast worden voor het opmeten van de hardheid, beogen het bepalen van de weerstand die een materiaal biedt tegen blijvende vervorming door indrukking. Een kleine blijvende indruk wijst op een grote hardheid. Bij een hardheidsmeting volgens deze definitie, moet het indruklichaam, de grootte van de belasting en de belastingstijd worden gekozen.

Bij de vickershardheidsmeter wordt als indruklichaam een regelmatige vierzijdige diamanten piramide met een tophoek van 136° gebruikt. De basis van de piramidevormige indruk is dus, mits zich geen onregelmatigheden voordoen, een vierkant. De oppervlakte van de indrukking kan uit de diagonalen – welke worden opgemeten – worden berekend. De hardheid volgens Vickers is gelijk aan de belasting in kg gedeeld door de oppervlakte van de indrukking in mm^2 :

$$H_v = \frac{2P \sin(136^\circ / 2)}{d^2} = \frac{1,85P}{d^2} \text{ kg} / \text{mm}^2$$

(WOLLANTS P. e.a., 1998: 2.22 en
JONGENBURGER P., 1966: 67)

waarbij d het gemiddelde is van de diagonalen x en y . De configuratie van het indruklichaam wordt schematisch aangegeven in figuur 47.

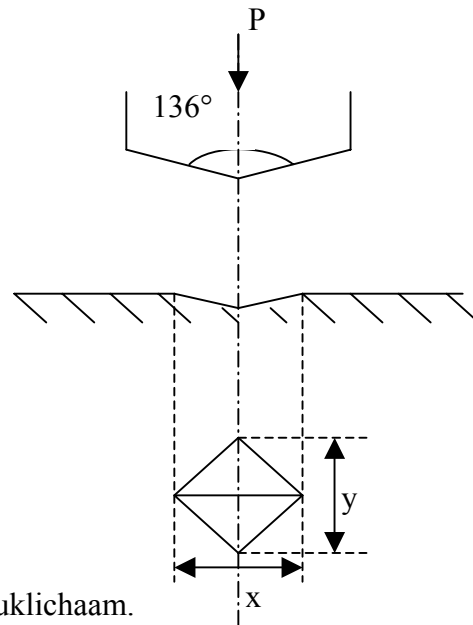


Fig. 47: Vickers indruklichaam.

De grootte van de belasting hangt af van de aard van het materiaal, van de dikte van het werkstuk en van de fijnheid van de structuur. Een grove structuur met harde en zachte bestanddelen eist een grote indruk dus een hoge belasting, althans indien de hardheid van het proefstuk en niet die van de bestanddelen moet worden bepaald. De belasting dient te duren totdat het vervormen tot stilstand is gekomen. Bij zachtere materialen of materialen die een plastische nawerking vertonen, zoals lood, moeten langere belastingstijden, soms enige minuten, worden gekozen.

Bij materialen als lood is de belasting erg klein (enkele tot enkele honderden grammen) en spreekt men van een microhardheidsmeting. De vickershardheid is de meest aangewezen hardheidsmeting voor kleine aandrukkrachten.

Een microvickershardheidstoestel werkt met een zeer fijn afgewerkt vickersdiamantje, en is zo ingericht dat het druklichaam voorzichtig en met een hoge precisie op de uitgezochte plaats neergezet kan worden. Het monster moet glad gepolijst worden om de diagonalen nauwkeurig te kunnen meten. Het polijsten moet erg voorzichtig gebeuren zodat er in het oppervlak geen versteviging - en dus verhoging van de hardheid - optreedt.

Zoals reeds gezegd bedraagt de aandrukkraft enkele tot honderden grammen. De hardheidsmetingen op de vier monsters werden uitgevoerd met een aandrukkraft van 5 gram. De hierdoor ontstane indrukking werd daarna met behulp van een speciale meetmicroscop opgemeten. De diagonaallengte bedraagt slechts enkele tientallen μm . Door

tenslotte nog de formule voor H_v toe te passen, werd de vickershardheid bekomen JONGENBURGER P., 1966: 58-68).

4.2.4. Resultaten

4.2.4.1. Lichtmicroscopie

Hierna worden foto's ingelast die ons een idee kunnen geven van de microstructuur van de vier loodmonsters. De figuren 48 tot 54 worden uitgebreid besproken in paragraaf 4.2.5.1.. Aan de hand van dergelijke microscoopfoto's kan nagegaan worden of het een gietstructuur dan wel gerekristalliseerde structuur betreft. Bepaalde sporenelementen die werden gevonden in de samenstellingsanalyse (paragraaf 4.1.) kunnen eveneens teruggevonden worden op de microscoopfoto's als insluitsels (tweede fase of precipitaten, paragraaf 4.2.5.). De gemiddelde korrelgroottes van de verschillende monsters kunnen in verband gebracht worden met de relatieve verschillen in de opgemeten hardheidswaarden van paragraaf 4.2.4.2.. De spreiding van de korrelgrootte binnen éénzelfde proefstuk, kan in relatie gebracht worden met de spreiding van de gemeten hardheidswaarden.

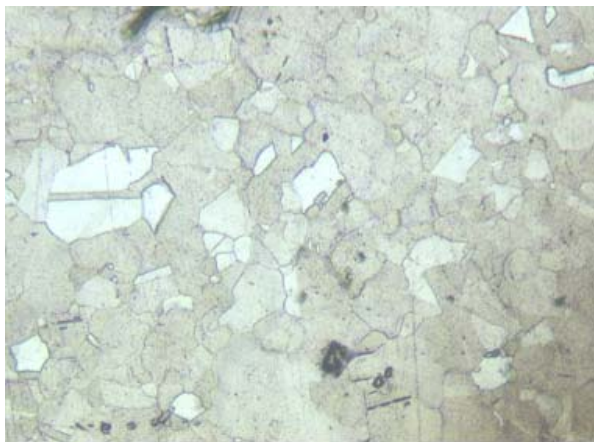


Fig. 48: Proefstuk 1600 – schaal 1/240.

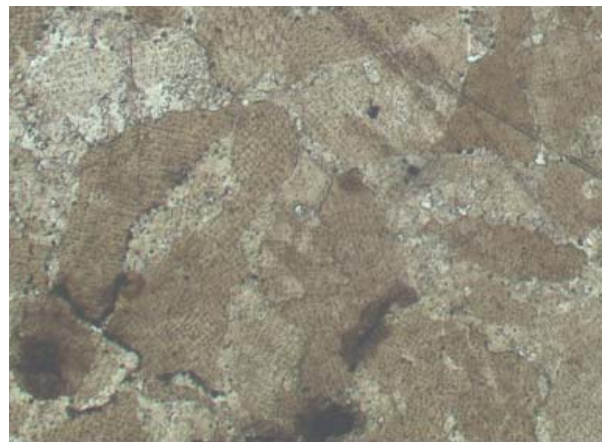


Fig. 49: Proefstuk 1900 – schaal 1/50.

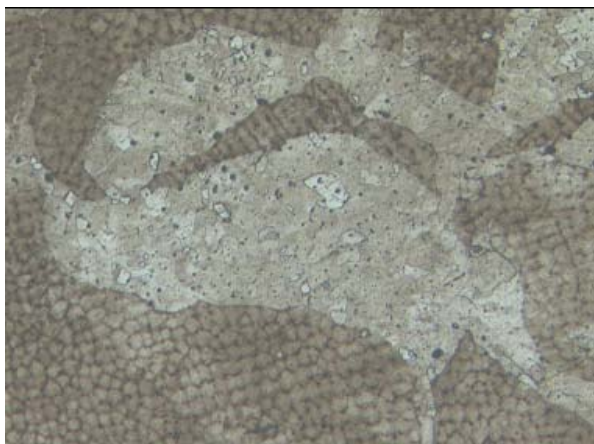


Fig. 50: 'Proefstuk 1900' – schaal 1/125

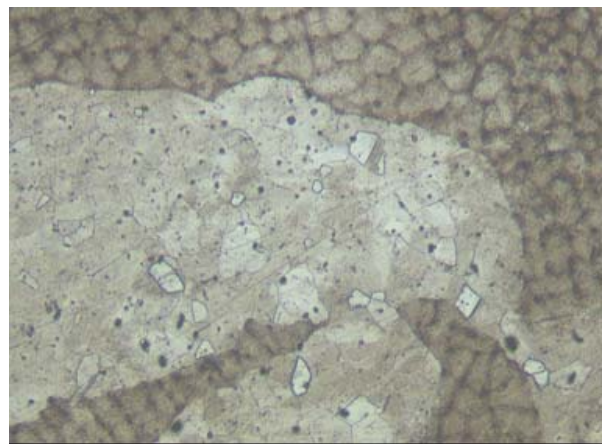


Fig. 51: 'Proefstuk 1900' – schaal 1/240

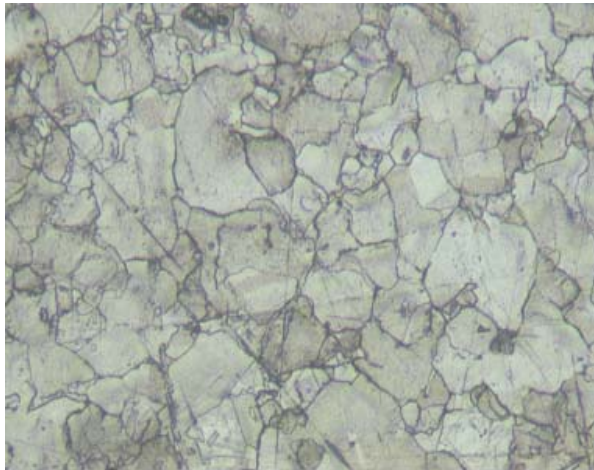


Fig. 52: 'Proefstuk 2000' – schaal 1/240

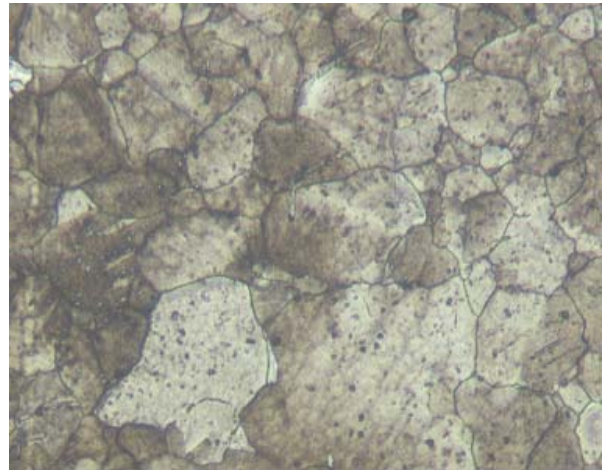


Fig. 53: 'Proefstuk 2000-gegoten' – schaal 1/240.

4.2.4.2. Hardheidsmeting

Voor elk monster werd vijf maal de hardheid gemeten bij een aandrukkkracht van 0,05 N. Daaruit werd dan een gemiddelde waarde en een bijhorende spreiding berekend (Tabel 20 tot 23).

Meting	X (μm)	Y (μm)	H _V (kg/mm ²)
1	34,6	36,2	7,4
2	35,6	36,8	7,1
3	40,4	40,2	5,7
4	41,4	41,8	5,4
5	39,2	39,6	6,0
→ H _V = 6,3 ± 1,1 kg/mm ²			

Tabel 20: 'Proefstuk 1600'.

Meting	X (μm)	Y (μm)	H _V (kg/mm ²)
1	33,3	33,3	8,4
2	28,7	30,5	10,6
3	27,3	28,0	12,1
4	30,9	32,3	9,3
5	33,3	32,4	8,6
→ H _V = 9,8 ± 1,9 kg/mm ²			

Tabel 21: 'Proefstuk 1900'.

Meting	X (μm)	Y (μm)	H _V (kg/mm ²)
1	36,3	35,6	7,2
2	35,8	35,3	7,3
3	35,3	36,0	7,3
4	35,0	34,2	7,8
5	35,3	35,4	7,4
→ H _V = 7,4 ± 0,3 kg/mm ²			

Tabel 22: 'Proefstuk 2000'.

Meting	X (μm)	Y (μm)	H _V (kg/mm ²)
1	40,9	39,6	5,7
2	37,9	37,7	6,5
3	37,9	37,9	6,5
4	40,5	39,3	5,8
5	40,5	39,2	5,8
→ H _V = 6,1 ± 0,5 kg/mm ²			

Tabel 23: 'Proefstuk 2000-gegoten'.

Om de bespreking van de resultaten hierna overzichtelijker te maken, worden de gevonden hardheden en de gevonden onzuiverheden van de samenstellingsanalyse, samengevat in de tabel 24.

Proefstuk	Vickershardheid	Spreiding	Teruggevonden onzuiverheden met de SEM
1600	6,3	1,1	Ag, Sb en Cu
1900	9,8	1,9	Sn
2000	7,4	0,3	/
2000-gegoten	6,1	0,5	/

Tabel 24: Samenvatting resultaten van de proeven uitgevoerd op de vier loodmonsters.

4.2.5. Bespreking van de resultaten

4.2.5.1. Lichtmicroscopie

'Proefstuk 1600' en 'proefstuk 2000' (figuren 48 en 52) bezitten een gerekristalliseerde structuur, terwijl 'proefstuk 1900' en 'proefstuk 2000-gegoten' (figuren 49 tot 51 en figuur 53) een duidelijke gietstructuur vertonen. Dit onderscheid wordt gemaakt doordat een gietstructuur op basis van de volgende elementen kan worden herkend:

- onregelmatige korrelstructuur, de korrels hebben geen rechte korrelgrenzen

- de typische wafelstructuur die zeer duidelijk te zien is op figuur 60. Het lood dat niet 100 % zuiver is, vertoont samenstellingsverschillen bij de stolling en deze zorgen voor het ontstaan van de dendriten die aan de basis van zo'n wafelstructuur liggen.

'Proefstuk 1600' is lood dat in het verleden wel gesmolten werd, maar dat door een trage afkoeling en door het lange tijdsverloop, gerekristalliseerd is. Op figuur 48 kan men enkele insluitsels opmerken. De samenstellingsanalyse leert ons dat dit een tweede fase is van Ag en Cu. Uit de fasendiagrammen van Ag (Fig. 54) en Cu (Fig. 55) kan men inderdaad opmaken dat deze twee elementen niet oplosbaar zijn in het Pb. Niettegenstaande de tweede fase ook een versteviging inhoudt van het materiaal door als barrière te fungeren voor de dislocatieverplaatsingen (zie ook paragraaf 4.2.5.2.2), mag deze tweede fase niet verward worden met de precipitaten zoals men die terugvindt in het proefstuk 1900.

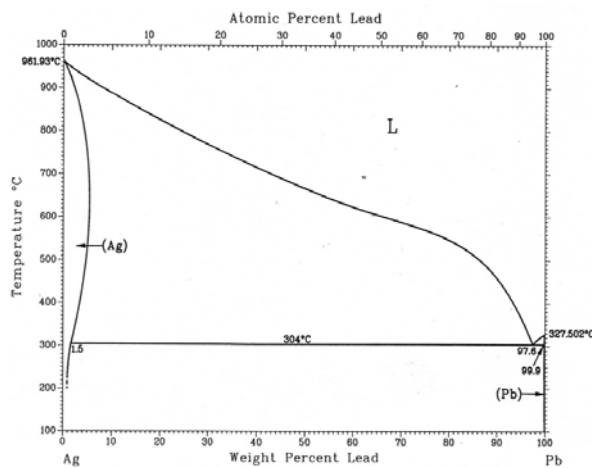


Fig. 54: Fasendiagram Ag-Pb (MASSALSKI T.B.; 1990: 7).

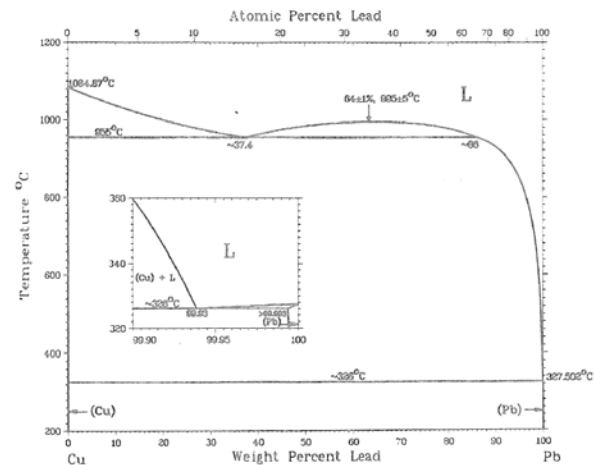


Fig. 55: Fasendiagram Cu-Pb (MASSALSKI T.B.; 1990: 1453).

'Proefstuk 1900' vertoont een veel grovere korrelstructuur en bevat niet opgeloste onzuiverheden. De korrelstructuur is tweefasig maar de witte insluitsels die men ziet op figuur 49 zijn hier geen tweede fase. Deze insluitsels zijn de Sn-precipitaten waarvan sprake in paragraaf 4.1.6 en waarop hierna nog verder wordt ingegaan. Op figuur 49 wordt een sterk wisselende korrelgrootte onderscheiden, hetgeen een grote spreiding van de hardheidswaarden met zich meebrengt. Figuur 51 laat toe om de korrelgrootte van proefstuk 1900 te vergelijken met de korrelgroottes van de andere monsters.

'Proefstuk 2000' vertoont een gelijkaardige korrelstructuur als 'proefstuk 1600'. De korrels zijn wel gelijkmatiger van grootte bij het 'proefstuk 2000', hetgeen de kleinere spreiding van de hardheid verklaart (Fig. 52). De korrelstructuur is eenfasig; het kleine gehalte aan onzuiverheden is volledig opgelost in het loodmateriaal.

'Proefstuk 2000-gegoten', met zijn gietstructuur, is eenfasig. Ook hier is het gehalte aan onzuiverheden zo klein dat de sporenelementen volledig opgelost zijn. Wat de korrelgrootte

van ‘proefstuk 2000-gegoten’ betreft, kan de volgende bedenking gemaakt worden: het monster werd ontnomen uit het midden van een grote prop gestold lood. De korrelgrootte zal waarschijnlijk groter zijn in het midden van de massa lood, dan aan de buitenkant. De reden hiervoor is dat de buitenkant sneller afkoelt waardoor er zich meer kiemen vormen en waardoor de korrelstructuur aan de rand van de loodprop fijner zal zijn dan in het midden van die prop. In dit opzicht zou het dus incorrect zijn om de korrelgrootte van ‘proefstuk 2000-gegoten’ te vergelijken met de drie andere monsters die uit een dunne loodlaag werden ontnomen.

4.2.5.2. Vaste-oplossingsharding en precipitatieharding

Zoals in de volgende paragraaf zal aangetoond worden, verhogen de onzuiverheden Sb en Sn de hardheid. Het mechanisme achter deze toenemende hardheden, is echter voor beide elementen verschillend. In deze paragraaf wordt beknopt de achterliggende theorie van de vaste-oplossingsharding en van de precipitatieharding weergegeven, omdat deze het mogelijk maken de gevonden waarden van paragraaf 4.2.4.2. beter te begrijpen.

4.2.5.2.1. Kristaldefecten

Ideale kristallen veronderstellen een volmaakt periodische opbouw. In werkelijkheid verstoren een groot aantal roosterfouten of defecten echter de kristalstructuur. Het relatief volume, ingenomen door deze defecten, is zeer klein. Nochtans is hun invloed op de eigenschappen van het materiaal zeer groot. Vooral mechanische eigenschappen zoals vervormbaarheid en sterkte, maar ook scheikundige eigenschappen zoals corrosiegedrag en fysische eigenschappen zoals elektrische geleidbaarheid worden beïnvloed. Naar hun dimensies kunnen deze defecten ingedeeld worden in puntdefecten, lijn-defecten en oppervlaktedefecten.

Een puntdefect kan gedefinieerd worden als een fout op het niveau van de bezetting van de atoomposities in de kristalstructuur. Puntdefecten zijn de enige roosterfouten die de vrije energie van de betrokken fase verlagen. In metallische structuren komen vooral vacaturen en opgeloste vreemde atomen (interstitieel of substitutioneel) voor als type puntdefecten. Vooral de substitutionele atomen die groter zijn dan de atomen van het moederrooster (Pb-rooster) zullen voor de verdere bespreking belangrijk zijn (WOLLANTS P. e.a., 1998: 5.1 – 5.5).

Lijn-defecten of dislocaties zijn eendimensionale roosterfouten (WOLLANTS P. e.a., 1998: 5.6). Er wordt onderscheid gemaakt tussen randdislocaties en schroefdislocaties, maar de verschillen tussen beide types zijn niet van belang voor dit eindwerk. Voor meer informatie omtrent dit onderscheid wordt verwezen naar de in deze paragraaf vermelde werken.

Dislocaties kunnen ontstaan door fouten bij de kristallisatie, dus tijdens het stollen. Verder kunnen zich dislocaties vormen wanneer er een fase-transformatie optreedt en ook als gevolg van de roosterfouten die kunnen ontstaan door toevoeging van legeringselementen. Ze kunnen echter ook achteraf ontstaan onder invloed van opgelegde spanningen, bijvoorbeeld bij plastische deformatie (BUDINSKI K.G. & M.R., 2001: 14).

Bij de oppervlakte-defecten wordt onderscheid gemaakt tussen stapelfouten en korrelgrenzen. Een stapelfout is een vlakke roosterfout die het gevolg is van een foutieve stapeling van een atoomvlak op een ander.

Metalen zijn meestal polykristallijn, dit wil zeggen dat ze bestaan uit een groot aantal kristallen. Alle kristallen die tot eenzelfde fase behoren, bezitten wel dezelfde kristalstructuur, maar niet dezelfde oriëntatie van kristalstructuur. Aangezien de kristallen in metallische materialen meestal een onregelmatige vorm hebben, worden ze korrels genoemd. De oppervlakken die de verschillend georiënteerde korrels van elkaar scheiden, worden dan korrelgrenzen genoemd (WOLLANTS P. e.a., 1998: 5.18 – 5.21).

4.2.5.2.2. Verstevigingsmechanismen

Vervormingen van een materiaal vereisen de beweging van een zeer groot aantal dislocaties. Het gemak waarmee dislocaties verglijden in een metallische structuur hangt af van twee factoren:

- de grootte van de interatomaire bindingskrachten
- het soort en de dichtheid van de voorkomende kristaldefecten

(GRAHAM C.D. & MC MAHON C.J., 1992: 65 en WOLLANTS P. e.a., 1998: 7.10). Vooral de tweede factor is van belang in deze paragraaf. Er kan immers gesteld worden dat een metaal, dat door middel van dislocatieverplaatsingen vervormt, verstevigd wordt naarmate de dislocaties meer barrières ontmoeten.

In de literatuur onderscheidt men traditioneel vier methoden voor de vervormingsversteviging van metalen: vaste-oplossingsharding, precipitatieharding, mechanische vervorming en afschrikharden (BUDINSKI K.G. & M.R., 2001: 15).

a) Vaste-oplossingsharding

Vaste oplossingen ontstaan door aan een zuiver metaal vreemde atomen (onzuiverheden) toe te voegen (BUDINSKI K.G. & M.R., 2001: 14). Deze vaste oplossingen zijn sterker dan het zuivere moedermetaal. Bekijkt men bijvoorbeeld substitutionele atomen (groter of kleiner dan de atomen van het moederrooster), dan ziet men dat deze de glijvlakken waarlangs de dislocaties glijden, ruwer maken. Er bestaat een interactie tussen de dislocaties en de vreemde substitutionele atomen. Het ruwheidseffect van de substitutionele atomen komt neer op een meerkracht, nodig om de interactieweerstand te overwinnen, en dus op een verhoging van de kritische schuifspanning van het materiaal (WOLLANTS P. e.a., 1998: 7.15 – 7.16). Het ligt

buiten het bestek van dit eindwerk om dieper in te gaan op deze kritische schuifspanning, maar vereenvoudigd kan men stellen dat de kritische schuifspanning de kracht weergeeft, nodig om een dislocatie te bewegen en dus het materiaal te vervormen (WOLLANTS P. e.a., 1998:

7.6 -7.13).

Belangrijk voor het onderscheid met de precipitatieharding, is in te zien dat er bij vaste oplossingen nog steeds sprake is van een enkele fase.

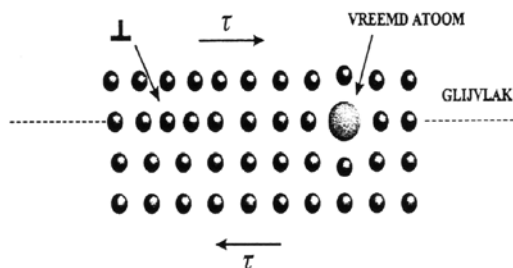


Fig. 56: Principeschets substitutioneel atoom in een moederrooster van kleinere atomen (WOLLANTS P. e.a., 1998: 7.16).

b) Precipitatieharding

Precipitaten zijn kleine agglomeraten met onzuiverheden (bijvoorbeeld Sn in het lood). Deze precipitaten vormen hindernissen voor de dislocatiebeweging. Men kan aantonen dat de precipitaten een verhoging van de kritische schuifspanning, nodig om de dislocaties tussen deze kleine agglomeraten door te trekken, veroorzaken. Deze verhoging is des te hoger naarmate de precipitaten dichter bij elkaar liggen (WOLLANTS P. e.a., 1998: 7.17-7.18).

Het ontstaan van dergelijke precipitaten kan het best geïllustreerd worden met het voorbeeld van de tin-loodlegering.

Het fasendiagram is onontbeerlijk om het verschijnsel van de precipitaten te begrijpen en wordt hieronder weergegeven (Fig. 57).

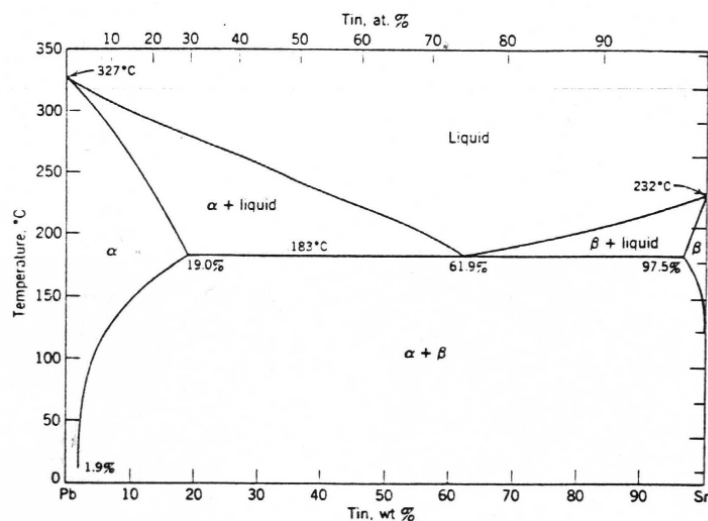


Fig. 57: Fasendiagram Sn-Pb legering (PRENGAMAN D.R., 1996: 86).

Nemen we nu bijvoorbeeld een 10% Sn-Pb-legering (Fig. 58) en volgen we de stollingslijn, dan krijgen we opeenvolgend de volgende fasen:

- boven een temperatuur van +/- 300 °C vindt men een volledig gesmolten Sn-Pb legering terug
- tussen 300 en 265 °C krijgt men een gesmolten Sn-Pb legering in combinatie met de vorming van een vaste fase Pb door de vorming van dendriten (eerste schets figuur 58)
- op 265 °C zijn de dendriten zodanig uitgegroeid dat we een volledig vast fase Pb krijgen waarin Sn zit opgelost (tweede schets figuur 58)
- tussen 265 en 150 °C beginnen kleine precipitaten Sn zich uit te scheiden uit de vaste fase Pb
- op 150 °C heeft het laatste atoom Sn zich uitgescheiden uit de vaste fase Pb
- bij verder afkoelen blijven de twee vaste fasen naast elkaar bestaan: kleine precipitaten Sn in een vaste fase Pb (derde schets figuur 58).

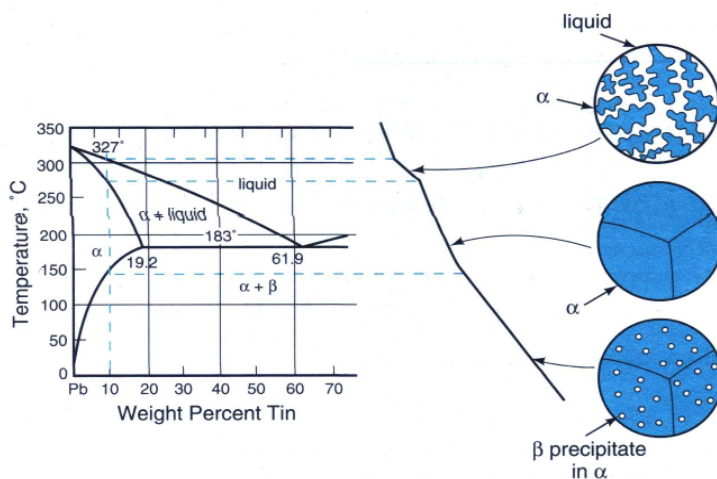


Fig. 58: Precipitatievorming in een Sn-Pb legering (GRAHAM C.D. & MC MAHON C.J., 1992: 144).

c) Vervormingsverstevinging en afschrikharden

Op deze twee verstevigingsmechanismen wordt maar zeer beperkt ingegaan omdat ze van minder belang zijn voor de verdere besprekingen van paragraaf 4.2.5..

Tijdens het proces van de plastische vervorming van het lood worden golven nieuwe dislocaties gegenereerd. Er zijn verscheidene mechanismen die deze dislocatievermenigvuldiging mogelijk maken. De meeste bekende is wellicht de Frank-Read bron, maar voor meer uitleg hieromtrent wordt verwezen naar 'WOLLANTS P. & VAN DER BIEST O. & AERNOUDT E., Materiaalkunde voor ingenieurs, 3^e uitgave, Leuven, Acco, (1998)'. De dislocatiedichtheid in het lood zal dus bij vervorming voortdurend toenemen. Aangezien een toename van de dislocatiedichtheid ook een toename van de kritische schuifspanning impliceert, kan gesproken worden van vervormingsverstevinging (WOLLANTS P. e.a., 1998: 7-10-7.14).

Afschrikharden is een belangrijk verstevigingsmethode in de staalindustrie. Afschrikharden is een behandeling waarmee beoogd wordt spanningsvelden op te wekken in de roosters van de kristallen. De spanningen ontstaan doordat er bij zeer snelle afkoeling vreemde atomen in het rooster van de zich vormende kristallen worden ingevangen. De ingevangen atomen vervormen het rooster en veranderen de afstanden tussen de atomen. De roostervervorming en de beweging van de ingevangen (vreemde) atomen bemoeilijken de verplaatsing van dislocaties en verstevigen aldus het metaal (BUDINSKI K.G. & M.R., 2001: 14).

4.2.5.3. Hardheidsmeting

De gemeten micro-vickershardheidswaarden en de spreiding van deze waarden zijn samengevat in tabel 24. Vooraleer deze gegevens verklaard worden op basis van de gevonden sporenelementen in samenstellingsanalyse en op basis van de foto's van de lichtmicroscopie, wordt nog het volgende aangestipt met betrekking tot micro-hardheidsmetingen..

In een micro-hardheidsmeting worden de gevonden hardheidswaarden systematisch overschat ten opzichte van een hardheidsmeting op macro-schaal. Op macro-schaal is de gevonden hardheidswaarde onafhankelijk van de aangelegde belasting. Bij zeer lage belastingen speelt echter de elastische terugvering van het materiaal bij indrukking een relatief grotere rol dan bij een normale hardheidsmeting.

Zoals reeds aangestipt, verstevigen Ag en Cu het 'proefstuk 1600' door als onoplosbare tweede fase een barrière te vormen voor de dislocatieverplaatsingen.

Sb, eveneens aanwezig in 'proefstuk 1600', zorgt voor een vaste-oplossingsharding. Zoals reeds vermeld, moet deze vaste-oplossingsharding onderscheiden worden van de precipitatieharding omdat er bij een vaste oplossing slechts sprake is van één fase. Dit onderscheid kan het best begrepen worden door het fasendiagram van Sb-Pb te bekijken (Fig. 59) en rekening te houden met het gevonden gehalte aan Sb in de samenstellingsanalyse. In paragraaf 4.1.6. werd, mits enige extrapolatie, een gehalte aan Sb vooropgesteld van 0.15 à 0.25% in het 'proefstuk 1600'. Bekijken we het fasendiagram Sb-Pb voor een dergelijk gewichtsprocent bij kamertemperatuur, dan zien we dat het Sb volledig is opgelost in het Pb-moederrooster als substitutioneel (groter) atoom. Er is dus slechts sprake van één fase.

In paragraaf 4.2.5.2.2. werd uitgebreid de precipitatieharding behandeld aan de hand van een 10% Sn-Pb legering. In paragraaf 4.1.6. werd een Sn percentage van 2.42% gevonden bij de samenstellingsanalyse van het 'proefstuk 1900'. Bekijkt men nogmaals het fasendiagram voor Sn-Pb (figuur 57), dan kan geconcludeerd worden dat, wat gezegd werd in verband met de precipitatieharding voor 10% Sn, ook geldig is voor een gehalte van 2.42% aan Sn op kamertemperatuur.

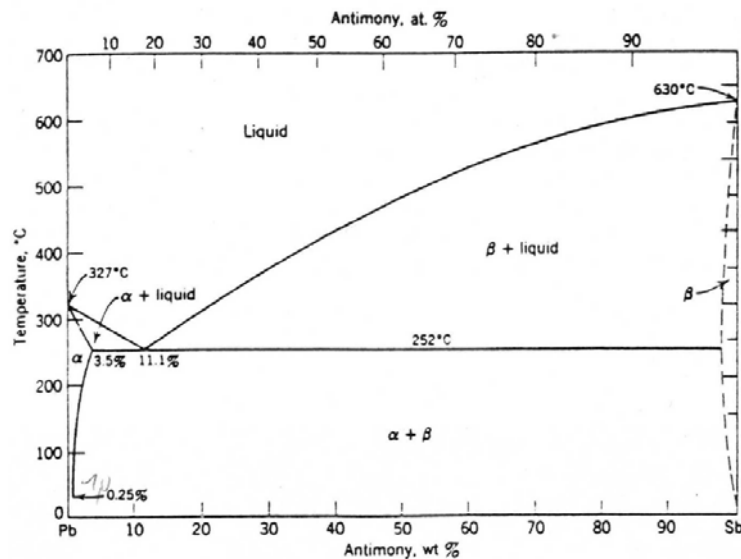


Fig. 59: Fasendiagram Sb-Pb legering (PRENGAMAN D.R., 1996: 84).

Naast de tweede fase, de vaste-oplossingsharding of de precipitatieharding van de sporenelementen, heeft ook de korreldiameter een belangrijke invloed op de hardheid van een materiaal. De formule van Hall-Petch luidt dat:

$$\sigma_v = \sigma_i + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (\text{WOLLANTS P. e.a., 1998: 7.21})$$

waarbij

σ_v : vloeispanning in een trekproef voor een oneindig grote korrel

σ_i : algemene wrijvingsweerstand voor dislocatiebeweging (experimenteel te bepalen constante)

k_y : inherente sterkte van de korrelgrens (experimenteel te bepalen constante)

d : gemiddelde diameter van de korrels.

Aangezien de hardheid nu evenredig is met de sterkte (zie ook hierna), kan uit deze formule van Hall-Petch ook gehaald worden dat de hardheid kwadratisch omgekeerd evenredig varieert met de korreldiameter.

Al het voorgaande kan nu worden samengebracht om de gemiddelde hardheid en de spreiding van de hardheden van de monsters te verklaren. Door de hardheden van de verschillende proefstukken met elkaar te vergelijken, kan ook iets gezegd worden over de sterkte van de verschillende proefstukken. Een algemeen gehanteerde vuistregel zegt immers dat de 'Vickershardheid x 3 = Treksterkte (N/mm²)'. Hoewel deze simpele vuistregel eigenlijk maar mag toegepast worden bij materialen met een hardheidswaarde boven de 15 à 20, kunnen de hardheidswaarden van de proefstukken toch een eerste idee geven van de relatieve sterktes van de verschillend gedateerde loodmonsters.

De proefstukken '1600' en '2000' hebben ongeveer dezelfde korrelgrootte. Ondanks de aanwezigheid van een tweede fase en een vaste oplossing is de hardheid van het proefstuk '1600' toch kleiner dan die van '2000'. Gezien de erg kleine hardheidswaarden mag men zich echter niet blind staren op dit verschil dat op het eerste zicht niet onmiddellijk te verklaren is. Het verschil van één eenheid op de hardheidsschaal van Vickers is immers op zich vrij klein maar overschaduwde bij dergelijke kleine waarden onmiddellijk het hele resultaat. Zeker als ook de spreiding van de vickershardheden in rekening gebracht wordt, moet het verschil tussen de hardheden van proefstuk '1600' en '2000' sterk gerelativeerd worden.

Het hedendaags lood ('2000' en '2000-gegoten') is veel homogener van structuur dan het oude lood ('1600' en '1900') (Fig. 48 – Fig. 53). Het oude lood bevat veel meer onzuiverheden en de wisselende korrelgrootte reflecteert zich dan ook in een vrij grote spreiding: 1,1 en 1,9 voor het oude lood versus 0,3 en 0,5 voor het hedendaags lood. Vooral als 'proefstuk 1900' bekeken wordt, valt het verband tussen een wisselende korrelgrootte (Fig. 49) en een grote spreiding in hardheidswaarden op.

Ondanks het feit dat de korrels van 'proefstuk 1900' (Fig. 49) een stuk groter zijn dan die van de andere monsters, heeft 'proefstuk 1900' de hoogste hardheidswaarde. Blijkbaar is de invloed van de tinprecipitaten op de hardheid vrij groot. Toch moet de hogere hardheidswaarde van 'proefstuk 1900' opnieuw sterk gerelativeerd worden als de erg hoge spreiding van de hardheidswaarden in dit proefstuk mee in rekening wordt gebracht.

De invloed van de korrelgrootte is het best zichtbaar als de proefstukken '2000' en '2000-gegoten' (Fig. 52 en Fig. 53) worden vergeleken. Beide proefstukken hebben ongeveer dezelfde spreiding. De grotere korrelgrootte van 'proefstuk 2000-gegoten' reflecteert zich in een lagere hardheidswaarde dan deze van 'proefstuk 2000'.

Tot besluit kunnen de resultaten van de hardheidsmeting als volgt samengevat worden. Rekening houdend met de spreiding, vertonen de vier proefstukken ongeveer gelijke, lage hardheidswaarden. De aanwezigheid van sporenelementen heeft geen doorslaggevende invloed op de hardheidswaarden van de oude proefstukken '1600' en '1900'. De (soms sterk) wisselende korrelgrootte van de oude loodmonsters zorgt wel voor een merkbaar hogere spreiding van de hardheidswaarden dan bij de proefstukken '2000' en '2000-gegoten' die veel homogener zijn van structuur.

Er mag gesteld worden dat de aanwezigheid van de sporenelementen niet voor een merkbare verbetering van de sterkte-eigenschappen van de oude proefstukken '1600' en '1900' kan zorgen in vergelijking met de sterkte-eigenschappen van het hedendaags lood.

4.3. Zoutneveltest

4.3.1 Doel van de proef

In restauratieprojecten worden soms zwaar gecorrodeerde ankers uit de natuursteen gehaald. De oorzaak daarvan is meestal atmosferische corrosie. Deze expansieve vorm van corrosie kan na verloop van vele jaren de oorzaak zijn van het splijten of afspringen van stukken natuursteen.

Tegenwoordig worden ankers van roestvast staal gebruikt in plaats van de vroegere smeedijzeren of niet-roestvaste stalen exemplaren. Zoals aangestipt in paragraaf 3.4.6., zal dit roestvast staal slechts weinig worden aangetast door atmosferische corrosie. Vooral in chloriderijke milieus zal het roestvast staal echter wel onderhevig zijn aan lokale corrosieverschijnselen.

Ten aanzien van de mogelijke corrosieproblemen van de verbinding van natuursteen door het aangieten met lood van roestvaste ankers, kan putcorrosie verwaarloosd worden. Gezien het erg lokale karakter van het fenomeen zullen de corrosieproducten afkomstig van putcorrosie in elk geval niet in staat zijn de steen te doen barsten.

Spanningscorrosie en vooral spleetcorrosie zouden wel problemen kunnen geven voor de verbinding. In de omgeving van de ankers kan gemakkelijk een hoog gehalte aan chloriden aanwezig zijn. In de eerste plaats wordt gedacht aan zouten afkomstig van de steen zelf. Verder kan een voldoende hoge concentratie aanwezig zijn door de ligging van het monument in de buurt van de zee of van belangrijke wegen (bijvoorbeeld dooizouten) of door opconcentratie (cycli van neerslag en verdampen van het water waarbij de zouten uit de vervuilde atmosfeer telkens achterblijven). Spanningscorrosie kan optreden als er spanningen tengevolge van de krachtswerking aanwezig zijn in het anker of tengevolge van temperatuurvariaties in het anker. Spleetcorrosie kan gepaard gaan met zekere expansieve corrosieproducten, voornamelijk gelokaliseerd ter hoogte van de spleet.

De hierna beschreven proefopstelling wil een eerste verkennend onderzoek uitvoeren naar de aanwezigheid van een spleet tussen het lood en de ankerstaaf waarlangs vocht kan circuleren en de mogelijke problemen van spleetcorrosie die daaruit zouden kunnen voortvloeien. Er wordt nagegaan of binnen een beperkte tijd en met een eenvoudige proefopstelling spleetcorrosie kan gesimuleerd worden. Met behulp van een aantal configuraties wordt nagegaan welke factoren een doorslaggevende invloed zouden kunnen hebben op het corrosiegedrag van de combinatie lood-ankerstaaf-natuursteen.

4.3.2. Proefstukken

4.3.2.1. Materialen en de verschillende configuraties

De proefstukken bestaan uit staven van 100 mm die voor de helft zijn omgeven door een cilindrische loodprop met diameter 55 of 65 mm. Het lood omgeeft de staaf overal minstens met een dikte van 15 mm zodat de onderste helft zeker nergens rechtstreeks wordt blootgesteld aan het corrosieve milieu (Fig. 62 en 63).

Voor deze zoutneveltest worden zowel staven van roestvast staal als van getrokken staal gebruikt.

De staven van roestvast staal worden gebruikt om de restauratiepraktijk te simuleren waarbij ankers van roestvast staal worden aangegoten met lood. Voor de proefopstelling wordt gebruik gemaakt van inox AISI 304.

De niet-roestvaste staven van getrokken staal zijn gevoelig voor atmosferische corrosie. Wanneer vocht en zouten de staaf bereiken zal deze oxideren met expansieve roestvorming tot gevolg. Door gebruik te maken van deze ‘eigenschap’ van getrokken staal kan nagegaan worden in hoeverre er zich een spleet bevindt tussen de staaf en het lood. Immers, indien er zich een spleet bevindt, zal niet alleen de bovenste helft, die niet in de loodprop zit, corroderen, maar ook de onderste helft. Aangezien de onderste helft nergens rechtstreeks met de corrosieve atmosfeer in contact staat (de proefstukken zijn zodanig gegoten dat de helft van de staaf volledig en met een voldoende dikte is omringd met lood), moet de eventuele corrosie van die onderste helft verklaard worden door vocht met een hoge concentratie aan chloriden dat via de spleet circuleert. Voor de staven van getrokken staal in de proefopstelling wordt gebruik gemaakt van étiré, diameter 16 mm st. 37.

Om na te gaan welke elementen eventueel een belangrijke invloed hebben op het corrosiegedrag van de ankers, worden de proefstukken in een aantal configuraties aangemaakt.

De helft van de ankers wordt aangegoten met oud lood. Dit oude lood is afkomstig van de restauratiewerken aan de Zavelkerk in Brussel en dateert van einde 19^e, begin 20^e eeuw. De andere helft van de ankers wordt aangegoten met nieuw lood. Dit nieuwe lood wordt geproduceerd bij Umicore en de samenstelling van dit lood wordt gegeven in bijlage 1. Bedoeling van dit onderscheid tussen oud en nieuw lood is na te gaan of één van beide types (bijvoorbeeld het oude lood door zijn hoger gehalte aan sporenelementen dan het nieuwe lood) meer gunstige eigenschappen bezit met betrekking tot het corrosiegedrag van de ankerstaven.

De helft van de ankerstaven wordt gezandstraald, de andere helft niet (samenstelling straalmiddel zie bijlage 3). Het achterliggende idee voor dit onderscheid is dat het zandstralen de hechting tussen het lood en de staven zou kunnen verbeteren en daardoor de kans op een

spleet zou kunnen verkleinen. Indien er een spleet aanwezig is tussen het lood en de staaf, zou het gezandstraalde en dus erg oneffen oppervlak kunnen zorgen voor een verminderde watercirculatie doorheen de spleet. De af te leggen weg voor een waterdruppel wordt immers groter. Aan dit laatste kan onmiddellijk de bedenking gekoppeld worden dat het vergroten van de afgelegde weg enkel de waterdruppel vertraagt. Over een voldoende lange termijn zal dit vergroten van de af te leggen weg voor een waterdruppel wellicht geen effect hebben op de hoeveelheid vocht aanwezig in de spleet.

Aan dit zandstralen kan bovendien nog een kritische bedenking gekoppeld worden. De roestvaste stalen danken hun corrosiebestendigheid aan de passieve film van chroomoxide. Dit oxidelaagje wordt door het zandstralen doorbroken. Hierdoor zou het roestvaste staal nog bezwaarlijk corrosiebestendig genoemd kunnen worden. Uit een gesprek met professor M. De Bonte bleek deze vrees ongegrond. Door blootstelling aan de atmosfeer wordt de gezandstraalde staaf vrij vlug opnieuw geoxideerd en wordt de passieve film hersteld.

De helft van de ankers wordt in natte toestand aangegoten met lood. Deze natte staven werden 24 uur in een beker met water geplaatst en pas uit de beker gehaald nét voor het aangieten (Fig. 60). Links op de figuur 60 kan opgemerkt worden hoe de staven van getrokken staal na 24 uur al een lichte roestkleur vertoonden. De droge staven worden voor het gieten een tiental seconden in de vlam van de gasbrander gehouden (Fig. 61).



Fig. 60: De natte staven worden pas uit de beker gehaald nét voor het aangieten.



Fig. 61: De helft van de staven wordt gedroogd in de vlam van de gasbrander.

De achterliggende gedachte voor dit onderscheid tussen natte en droge staven is dat het fijne waterlaagje op de natte staven door het aangieten verdampt en de ontwikkelde waterdamp misschien het ontstaan van een dunne spleet bevordert.

Specifiek voor de inoxen ankers wordt een onderscheid gemaakt in ronde en rechthoekige staven. Hiermee wordt nagegaan of de vorm van de staaf enige invloed heeft op het corrosiegedrag van de met lood aangegoten staaf. Bij de rechthoekige sectie zouden hoekeffecten er bijvoorbeeld voor kunnen zorgen dat het lood aan de hoeken minder goed aansluit aan de staaf. De ronde staven hebben een diameter 16 mm, de rechthoekige staven hebben een sectie van 5 x 25 mm.

Worden al deze verschillende combinaties samengebracht, dan wordt tabel 25 verkregen. Hierin staat [] voor de inoxen staven met een rechthoekige sectie en O voor de ronde inoxen staven. Naast deze 24 proefstukken werden nog vijf controleproefstukken gegoten. Deze controleproefstukken kunnen gebruikt worden om na te gaan of de proefstukken, na 266 uren in de zoutneveltest te hebben verbleven, nog in de klimaatkast moeten gestopt worden voor verder inwerking van de vernevelde zouten (verder meer hierover)(Tabel 26).

1. Etiré, nieuw lood, droog, glad	13. Inox O, oud lood, droog, glad
2. Etiré, nieuw lood, droog, gezandstraald	14. Inox O, oud lood, droog, gezandstraald
3. Etiré, nieuw lood, nat, glad	15. Inox O, oud lood, nat, glad
4. Etiré, nieuw lood, nat, gezandstraald	16. Inox O, oud lood, nat, gezandstraald
5. Etiré, oud lood, droog, glad	17. Inox [], nieuw lood, droog, glad
6. Etiré, oud lood, droog, gezandstraald	18. Inox [], nieuw lood, droog, gezandstraald
7. Etiré, oud lood, nat, glad	19. Inox [], nieuw lood, nat, glad
8. Etiré, oud lood, nat, gezandstraald	20. Inox [], nieuw lood, nat, gezandstraald
9. Inox O, nieuw lood, droog, glad	21. Inox [], oud lood, droog, glad
10. Inox O, nieuw lood, droog, gezandstraald	22. Inox [], oud lood, droog, gezandstraald
11. Inox O, nieuw lood, nat, glad	23. Inox [], oud lood, nat, glad
12. Inox O, nieuw lood, nat, gezandstraald	24. Inox [], nieuw lood, nat, gezandstraald => te weinig oud lood

Tabel 25: Overzicht van de proefstukken.

A. Etiré, nieuw lood, droog, gezandstraald
B. Etiré, nieuw lood, nat, glad
C. Etiré, nieuw lood, nat, gezandstraald
D. Inox O, nieuw lood, nat, glad
E. Inox O, nieuw lood, nat, gezandstraald

Tabel 26: Overzicht van de controleproefstukken.

4.3.2.2. Aanmaak proefstukken

Voor de aanmaak van de proefstukken wordt als volgt te werk gegaan. De cilindrische loodprop wordt verkregen door het lood aan te gieten in conservenblikjes voor geconcentreerd tomatensap (Ø 55 mm) en conservenblikjes voor erwten (Ø 65 mm). De conservenblikken met kleinste diameter worden gebruikt om de ronde staven met een loodprop te omhullen, die met de grootste diameter worden gebruikt voor de rechthoekige staven. De positionering van staven in de conservenblikken is weergegeven in de figuren 62 en 63.

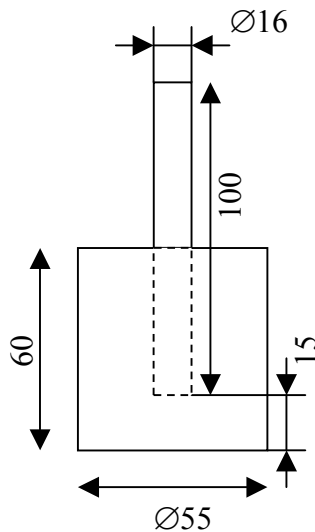


Fig. 62: Positionering van de ronde staven

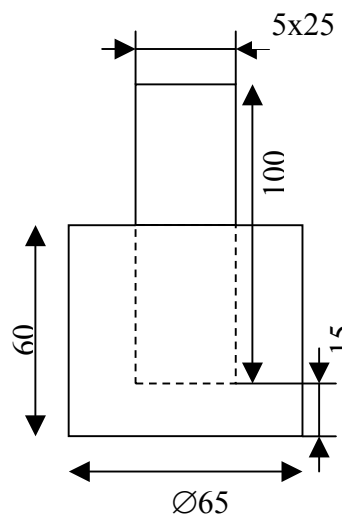


Fig. 63: Positionering van de rechthoekige staven.

De staaf wordt met een klem vastgemaakt aan een verbingsstaaf tussen twee statieven. Vervolgens wordt de staaf precies in het midden en 15 mm boven de bodem van het lege conservenblikje gepositioneerd (Fig. 64). Op die manier is men zeker dat de staven overal minstens met een laag lood van 15 mm dik omhuld worden. Het zand dat zich rond de conservenblikjes bevindt op figuur 64, moet enkel het tafelblad schoon houden voor looddruppels die eventueel gemorst worden tijdens het aangieten met lood.



Fig. 64: Positionering van de staven in de lege conservenblikken.

Voor het smelten van het lood wordt met losse bakstenen een U-vormig muurtje opgetrokken. Dit muurtje moet de inoxen pot -geplaatst op een metalen staketsel- waarin het lood gesmolten wordt en de propaanvlam van de gasbrander beschermen tegen wind en eventuele lichte inslaande regen (Fig. 65). De blokken lood worden in de pot boven de brander gelegd en gesmolten. Bij dit smelten komt nogal wat afval bovendrijven dat tijdens het opwarmen regelmatig verwijderd moet worden (Fig. 66). Om te kijken of het lood een voldoende hoge temperatuur heeft boven het smeltpunt, wordt in de praktijk een stukje papier in het gesmolten lood gestoken. Wanneer het papier spontaan ontbrandt, is het lood voldoende opgewarmd om gegoten te worden (Fig. 67).



Fig. 65: Opstelling voor het smelten van lood.



Fig. 66: Bovendrijven van afval tijdens het smelten.



Fig. 67: Testen of het lood reeds gegoten kan worden.

De proefstukken worden per vier aangegoten met lood (Fig. 64 en 68). Terwijl er lood wordt toegevoegd in de pot, stolt het lood. Na een tiental minuten zijn de proefstukken reeds voldoende afgekoeld om ze van de werktafel te verwijderen om zo nieuwe conservenblikken en staven te kunnen positioneren.

Voor het smelten en aangieten worden de nodige PBM's gebruikt: een stofmasker, hittebestendige handschoenen, een gelaatsbeschermer en stevige werkkledij (Fig. 69).



Fig. 68: Aangieten met lood van een ronde staaf.



Fig. 69: Persoonlijke beschermingsmiddelen.

Nadat de proefstukken aangegoten zijn (Fig. 70), moet de loodprop met daarin de staaf nog verwijderd worden uit het conservenblik. Op voorhand werd gedacht dat dit, door de krimp van het lood, vlot ging kunnen gebeuren. De conservenblikken -vooral die waarin geconcentreerd tomatensap had gezeten- bleken echter aan het lood te 'plakken' (Fig. 71). De verklaring voor dit verschijnsel moet gezocht worden in het feit dat de binnenkant van het blik met een dun laagje tin of chroom wordt bedekt. Het tin wordt vooral gebruikt voor blikken die agressieve stoffen bevatten zoals tomatensap waar de pH erg laag is en er

complexvorming optreedt. De chroombedekking op de binnenkant van het blik kan dan weer gebruikt worden voor een meer neutrale inhoud zoals bijvoorbeeld erwten. Wanneer het hete lood in het conservenblik wordt gegoten zal het tin- of chroombeschermingslaagje smelten en een soort van legering vormen met het lood. De legering tin-lood wordt gemakkelijker gevormd dan de legering chroom-lood hetgeen verklaart waarom het blik van het geconcentreerde tomatensap harder ‘plakt’ aan de loodprop dan het blik waar erwten hebben ingezeten.

Het blik werd zoveel mogelijk van de loodprop afgetrokken met behulp van een tang . De delen van het blik die niet op die manier konden verwijderd worden, werden afgeschuurd (Fig. 72).



Fig. 70: De aangegoten en afgekoelde monsters.



Fig. 71: Het blik blijft ‘plakken’ aan het lood.



Fig. 72: Afschuren van het gesmolten vertinde of verchromde blik.

De proefstukken zijn nu klaar om aan een zoutneveltest onderworpen te worden. Het uitvoeren van deze proef wordt hierna beschreven.

4.3.3. Proef

De proefstukken werden door een zoutneveltest aan een versnelde corrosieproef onderworpen. Deze zoutneveltest werd uitgevoerd aan de KULeuven, departement MTM, onder leiding van professor M. De Bonte. Het doel van deze zoutneveltest is tweevoudig. Enerzijds wordt gepoogd om spleetcorrosie van de staven uit roestvast staal te simuleren. Anderzijds wordt nagegaan of er wel een spleet bestaat tussen de staaf en het lood. Dit laatste kan gecontroleerd worden door te kijken of de onderste helft van de staaf van getrokken staal die in het lood zit, corrodeert.

De zoutneveltest wordt uitgevoerd volgens de norm ASTM B117. De DIN 50021 en de ISO 9227:1990 zijn vergelijkbare normen. Het toestel dat gebruikt wordt voor de zoutneveltest is een Weiss S 400 (Fig. 75). Het bestaat uit een nevelkamer, een reservoir voor de aanmaak van

de zoutoplossing, een toevoer van geconditioneerde perslucht, een spuitkop voor het vernevelen van de zoutoplossing, hulpstukken voor het positioneren van de proefstukken, twee opvangtrechters ter controle van de zoutnevel en controle- en meettoestellen (Fig 73 en 74)

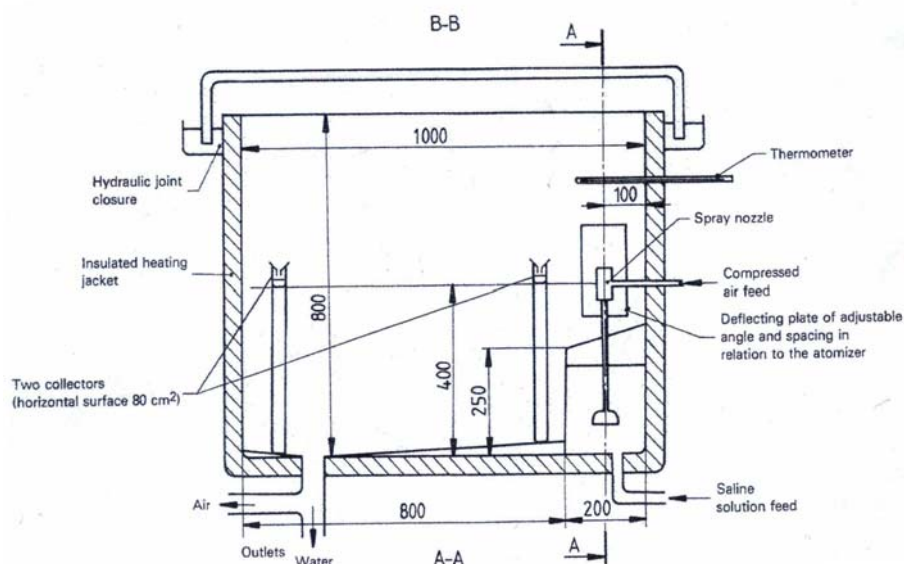


Fig.73: Doorsnede van een toestel voor het uitvoeren van een zoutneveltest (ASTM-norm B117).

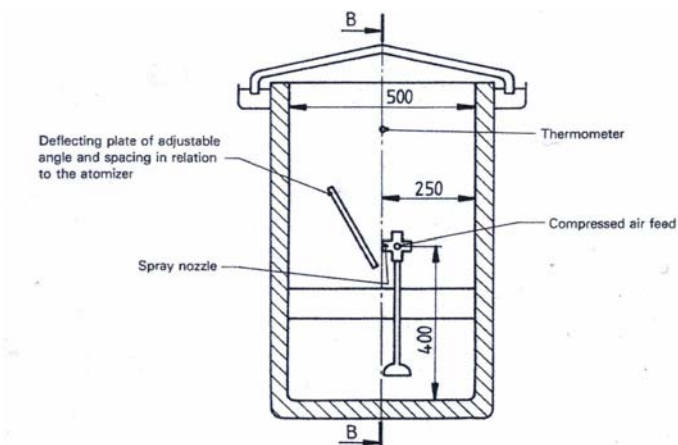


Fig. 74: Doorsnede van een toestel voor het uitvoeren van een zoutneveltest (ASTM-norm B117).



Fig. 75: Zoutneveltoestel aan de KULeuven, departement MTM.

Het toestel is zo gebouwd dat het voldoet aan de volgende drie eisen:

- de druppels zoutoplossing die gevormd worden op het dak of op de wanden van de nevelkamer mogen niet op de proefstukken vallen
- de druppels die gevormd worden op de proefstukken mogen niet afgevoerd worden naar het reservoir om opnieuw gebruikt te worden
- de constructiematerialen van het apparaat mogen de corrosiviteit van de nevel niet beïnvloeden.

De proefstukken worden op een zodanige manier geplaatst dat wordt voldaan aan de voorwaarde dat ze onder een hoek van 15 à 30 graden gepositioneerd staan. Hiertoe worden plasticen hulpstukken gebruikt die zorgen voor de scheefstand van de proefstukken. De proefstukken mogen niet in contact staan met elkaar of met een metallisch materiaal. Ieder proefstuk is zo opgesteld dat er een bevochtiging is met zoutnevel, onafhankelijk van de andere proefstukken. Tot slot is er nog de voorwaarde dat er geen druppels van het ene proefstuk op het andere mogen vallen (Fig. 76).



Fig. 76: Positionering van de proefmonsters. Deze foto werd genomen nadat de proefmonsters 266 uur aan de zoutneveltest waren onderworpen.

Als zoutoplossing wordt NaCl 5% gebruikt. Deze oplossing moet vrij zijn van Ni en Cu en mag niet meer dan 0.1% NaI bevatten. De zoutoplossing moet in totaal minder dan 0.3% onzuiverheden bevatten. Sommige zouten bevatten immers additieven die mogelijk optreden als corrosieremmers.

In de membraampomp wordt het zout in de juiste hoeveelheden gemengd met water. Voordat de oplossing wordt verneveld moet de oplossing vrij zijn van suspensiedeeltjes. Dit gebeurt door de oplossing te filteren in een polypropyleenfilter in de membraampomp. De pH-waarde wordt gemeten met een glaselectrode en moet tussen 6,5 en 7,2 liggen wanneer de oplossing wordt verneveld bij 35°C. De pH kan worden bijgesteld door toevoegen van HCl of NaOH.

De perslucht, toegevoegd aan de spuitkoppen om de zoutoplossing te vernevelen, moet vrij zijn van olie en vuil en moet een druk hebben tussen 69 en 172 kPa/m². De lucht wordt gezuiverd in een filter.

De nevelkamer wordt op 35 °C +1.1 °C –1.7 °C gehouden. De nevelkamer is goed geïsoleerd tegen warmteverliezen. De temperatuur wordt tweemaal per dag opgemeten, met uitzondering van de weekends en feestdagen. De temperatuur wordt gemeten met een thermometer die zich in de nevelkamer bevindt en kan afgelezen worden zonder de nevelkamer te openen.

In de nevelkamer bevinden zich twee trechters waarin zoutnevel wordt opgevangen. Eén trechter bevindt zich in de buurt van de sproeikop en de andere bevindt zich in een hoek. De trechters hebben een horizontaal oppervlakte van 80 cm². De zoutoplossing wordt zo verneveld dat er gemiddeld in elke trechter 1.0 tot 2.0 ml zoutoplossing per uur wordt

opgevangen. De zoutneveltest kan pas opgestart worden nadat er gedurende ten minste 16 uren een debiet wordt gemeten van 1.0 tot 2.0 ml per uur. De debiet moet met andere worden voldoende stabiel zijn. Het debiet kan geregeld worden door in te spelen op de druk en de temperatuur van de zoutnevel in de pomp. De zoutnevel in de pomp heeft een temperatuur tussen de 46 en 49 °C waardoor een temperatuur kan bekomen worden in de zoutnevelkamer van 35 °C (tabel 27).

Luchtdruk (kPa)	83	96	110	124
Luchtdruk (psi)	12	14	16	18
Luchtdruk (bar)	0.83	0.96	1.10	1.24
Temperatuur (°C)	46	47	48	49

Tabel 27 : T- en p- voorwaarden voor een temperatuur van 35 °C in nevelkamer.

Tot slot wordt nog aangestipt dat de NaCl-concentratie van de opgevangen oplossing 5 ± 1 massaprocent moet zijn. Omdat de meting moeilijk is wordt deze concentratie in de praktijk echter niet gecontroleerd.

De duur van een zoutneveltest is niet genormeerd. In het kader van de verkennende proeven binnen dit eindwerk, werden de proefstukken gedurende 266 uur aan de zoutneveltest onderworpen. De verschillende parameters die werden opgemeten tijdens deze zoutneveltest worden weergegeven in bijlage 4.

Na deze periode van 266 uur werden de proefstukken uit het zoutneveltoestel gehaald en proper gemaakt door ze eerst te reinigen onder stromend kraanwater, vervolgens te reinigen met gedestilleerd water en ze uiteindelijk eventueel te drogen met ethanol.

4.3.4. Resultaten

Het gebruik van staven van getrokken staal had tot doel na te gaan of er zich een spleet bevindt tussen de staaf en het lood (zie paragraaf 4.3.2.1.). Bij het aanmaken van de proefstukken kon echter reeds het bestaan van deze spleet vastgesteld worden.

Nadat de met lood aangegoten staven voldoende afgekoeld waren, werd met de hand een lichte trekkracht uitgeoefend op een aantal proefstukken. De meeste staven hadden een zekere bewegingsvrijheid en sommige staven konden zeer gemakkelijk uit het monster getrokken worden. Een andere aanwijzing voor het bestaan van een spleet tussen de staaf en het lood heeft te maken met het afschuren van het vertinde blik dat aan het lood bleef ‘plakken’ (Fig. 72). Bij het afschuren werden bepaalde staven gewoonweg uit de loodprop getrild.

Nadat de proefstukken een zoutneveltest van 266 uur hadden ondergaan, werden de vijf controleproefstukken nader bestudeerd. De functie van deze controleproefstukken was te

kijken of de zoutnevel reeds merkbare corrosieve schade had aangericht. Indien dit niet het geval zou zijn, kon dan beslist worden om de 24 originele en onaangeroerde proefstukken nog verder in de klimaatkast te steken. In de klimaatkast kunnen de zouten dan verder inwerken op de staven bij een constante temperatuur van 40°C en een luchtvochtigheid van 100%.

Bij het uithalen van de proefstukken uit het zoutneveltoestel kon vastgesteld worden dat het bovenste deel van de staven van getrokken staal dat niet in de loodprop zat, reeds zwaar gecorrodeerd was. Het bovenste deel van de staven uit roestvast staal was zo goed als onaangetast.

De vijf staven van de controleproefstukken werden uit de loodprop getrokken. De delen van zowel de staven van getrokken staal als van roestvast staal die in de loodprop zaten, bleken onaangetast.

Het feit dat het onderste deel van de staaf van getrokken staal onaangetast is, kan vreemd klinken aangezien bij het aanmaken van de proefstukken duidelijk kon vastgesteld worden dat er zich een spleet bevindt tussen de staven en het lood. Logischerwijze zouden de zouten langs deze spleet, net als bij het bovenste deel, ook het onderste deel moeten aangetast hebben met expansieve corrosieproducten als gevolg. De verklaring waarom dit toch niet gebeurd is, volgt uit de opstelling van de proefstukken in de zoutnevelkast. Doordat de proefstukken slechts onder een lichte hoek staan opgesteld, blijven de corrosieproducten die van de staaf van getrokken staal lopen grotendeels liggen op de bovenkant de loodprop. Deze corrosieproducten vormen al gauw een afsluitende mantel waardoor geen vocht met een hoge concentratie aan zouten meer in de spleet kan geraken (Fig. 77).



Fig. 77: De corrosieproducten die van de staaf van getrokken staal lopen, sluiten de spleet vrij vlug af waardoor geen verder vocht met een hoge concentratie aan zouten in de spleet kan penetreren.

Er werd beslist de 24 proefstukken nog twee weken in de klimaatkast te plaatsen om de zouten verder te laten inwerken.

Na deze twee weken werden de proefstukken uit de klimaatkast gehaald en werden de staven uit hun loodprop getrokken met behulp van een tang. De gezandstraalde staven konden er over het algemeen moeilijker uit getrokken worden dan hun gladde tegenversies, met uitzondering van de proefstukken 12 en 14 die ook erg gemakkelijk uit de loodprop waren te verwijderen. Dit doet vermoeden dat gezandstraalde staven een iets beter hechting vertonen dan gladde staven. Gezien het erg subjectieve criterium (trekken aan de staven met een tang) waarop dit vermoeden is gebaseerd, moet er binnen eventueel verder onderzoek zeker op zoek

worden gegaan naar een meer eenduidige methode om de verankering van de staaf in de loodprop te testen.



Fig. 78: De 24 proefstukken na hun verblijf van 266 uur in het zoutnevelkast en twee weken in de klimaatkast.

De bovenste helften van de staven van getrokken staal vertoonden na hun verblijf in het zoutneveltoestel en de klimaatkast, expansieve roestvorming. De onderste helften die in de loodprop hadden gezeten vertoonden ook na hun verblijf in de klimaatkast nog steeds geen tekenen van expansieve roestvorming (Fig. 79). De reden daarvoor is –zoals hierboven al aangegeven- niet de afwezigheid van een spleet maar wel de vorming van een afdeklaag door corrosieproducten boven de ingang van de spleet.



Fig. 79: Staaf van getrokken staal.

De staven van roestvast staal vertoonden omzeggens geen tekenen van corrosie. Alleen ter hoogte van de plaats waar de staaf in het lood dringt, werd een materiaalophoping vastgesteld (Fig. 80 en 81). Omdat het niet duidelijk was of het hier om een zoutneerslag ging, dan wel om de corrosieproducten van een beginnende spleetcorrosie, werden enkele staven in een oplossing gebracht van 50% HCl, 50% gedestilleerd water en 0,2% hexamethyleentertraminedinhibitor. Deze oplossing lost de corrosieproducten op. Vervolgens werden de staven onder de microscoop gelegd om te kijken of er op de plaats waar de staaf in het lood dringt, een sectievermindering van de staaf kon worden opgemerkt. Het microscooponderzoek bracht niet de minste sectievermindering aan het licht bij eender welke staaf. Er kon dus met andere woorden geen spleetcorrosie van de ankers worden vastgesteld.



Fig. 80: Ronde, inoxen staaf.
Materiaalophoping ter hoogte van het scheidingsvlak bovenste en onderste helft van de staaf.



Fig. 81: Inoxen staaf met rechthoekige sectie.
Materiaalophoping ter hoogte van het scheidingsvlak bovenste en onderste helft van de staaf.

4.3.5. *Bespreking van de resultaten.*

Er werd vastgesteld dat er zich wel degelijk een spleet bevindt tussen de staven en de loodprop. Deze vaststelling werd echter gemaakt op basis van vrij subjectieve waarnemingen: het trekken aan de staven met de hand en het uitgetrild worden van de staaf bij het afschuren van het vertinde en verchroomde blik van het lood. De vaststelling kon niet gemaakt worden op basis van een meer wetenschappelijke benadering: roestvorming van de onderste helft van de staven uit getrokken staal. Doordat de proefstukken slechts onder een lichte hoek stonden opgesteld in de zoutneveltest, bleven de corrosieproducten die van de staaf van getrokken staal liepen grotendeels liggen op de bovenkant de loodprop. Deze corrosieproducten vormden al gauw een afsluitende mantel boven de spleet waardoor geen vocht met een hoge concentratie aan zouten meer in de spleet kon geraken.

In het licht van eventueel verder onderzoek, zou het interessant zijn dat de vorming van zo'n afsluitende mantel vermeden kan worden. Dit zou bijvoorbeeld gerealiseerd kunnen worden door de proefstukken onder een veel grotere hoek te plaatsen of door de configuratie van de zoutneveltest zodanig aan te passen dat de proefstukken bijvoorbeeld ondersteboven zouden kunnen opgehangen worden met de loodprop bovenaan en de uitstekende staaf naar de beneden gericht.

Met de uitgevoerde zoutneveltest van 266 uur en het verder laten inwerken gedurende twee weken van de zouten in de gecontroleerde omgeving van de klimaatkast, kon geen spleetcorrosie van de staven van roestvast staal gesimuleerd worden. Het is erg belangrijk te beseffen dat dit niet wil zeggen dat het daarmee uitgesloten is dat er in de toekomst problemen te verwachten zijn met spleetcorrosie van met lood aangegoten ankers van roestvast staal in de verbinding van de natuursteen. Dit eindwerk stelt enkel vast dat binnen een in tijd beperkt en eenvoudig proefprogramma geen spleetcorrosie kon gesimuleerd worden.

In het licht van verder onderzoek zouden volgende voorstellen gemaakt kunnen worden:

- betere simulatie van de omgevingscondities voor de verbinding in de praktijk. Hierbij zou gedacht kunnen worden aan wisselende pH-waarden en aan temperatuurbelastingen door de temperatuur in het zoutneveltoestel cyclisch te laten variëren in plaats van een constante pH-waarde en temperatuur.
- de duurzaamheid op lange termijn van de voorgestelde oplossingen voor de restauratie van monumenten moeten gewaarborgd worden. Gezien men hier spreekt over periodes van honderd jaar en liefst nog veel langer, dringt een meer uitgebreide zoutneveltest zich op. De termijn van 266 uur was in dit opzicht waarschijnlijk veel te kort om de restauratiepraktijk te simuleren.
- er kan aan gedacht worden om een zekere kracht aan te leggen op de staven gedurende hun verblijf in de zoutneveltest. Op die manier zou ook de invloed van spanningscorrosie kunnen gesimuleerd worden en benadert de proefopstelling opnieuw meer de praktijk waar de ankers in verbindingen vaak onderhevig zijn aan bepaalde krachtswerkingen.

Aangezien er binnen de proeven uitgevoerd in het kader van dit eindwerk, geen spleetcorrosie van de staven van roestvast staal kon gesimuleerd worden, is het onmogelijk een uitspraak te doen over welke configuraties (nieuw versus oud lood, het al dan niet zandstralen van de staaf, natte versus droge staven en ronde versus rechthoekige staven) de corrosiebestendigheid van de staaf positief, niet of negatief beïnvloeden.

5. Alternatieven voor het aangieten met lood: hedendaagse ontwikkelingen

Door de problemen die optraden bij het gebruik van een smeedijzeren anker aangegoten met lood, is binnen een aantal restauratieprojecten onderzocht geweest of het niet mogelijk was om andere materialen te gebruiken om de verbinding te realiseren. Deze alternatieven worden hierna kort belicht. Voor elk alternatief is het nodig om na te gaan in welke mate dit alternatief voldoet aan de eisen die gesteld werden in paragraaf 2.4.. Telkens is het een afwegen van positieve en negatieve eigenschappen. In dit hoofdstuk is het zeer belangrijk om in het achterhoofd te houden dat elk restauratieproject zijn eigen specifieke eisen stelt aan de verbinding. Het is dan ook onmogelijk om één type verbinding naar voor te schuiven als dé ideale oplossing vanuit restauratietechnisch oogpunt.

5.1. Alternatieven voor smeedijzeren ankers

Door de opkomst van het roestvaste staal, werden de smeedijzeren staven in de restauratieprojecten vervangen door staven in roestvast staal (zie paragraaf 3.1.1.3.). Ook koperen en bronzen ankers werden al aangehaald als historische alternatieven, zelfs het gebruik van natuurstenen ankers werd overwogen (zie paragraaf 3.1.3.). Door de huidige ontwikkelingen van de materialen werden bij bepaalde restauratieprojecten alternatieve materialen aangewend voor de ankers: vooral glasvezelstaven en ankers van titanium zijn populair.

5.1.1. Glasvezelstaven

Een glasvezelstaaf is een polymeermatrixcomposiet. Glasvezelstaven zijn corrosievrij en vergeleken met andere corrosievrije materialen zijn ze tamelijk goedkoop. Ze hebben een hoge treksterkte en buigsterkte. De lineaire uitzettingscoëfficiënt van glasvezelstaven ligt in de buurt van die van natuursteen. Het is een licht materiaal waardoor er bijna geen extra gewichtsbelasting is bij het gebruik in structuren. De dichtheid bedraagt 2.0 kg/dm^3 , terwijl staal een dichtheid heeft van 7.85 kg/dm^3 . Het materiaal is resistent tegen omgevingsinvloeden en chemische aantastingen. Glasvezelstaven zijn bros. De verlenging bij breuk bedraagt slechts ongeveer 2 % en er treedt geen plastische vervorming op zoals bij staal. De duurzaamheid op lange termijn is een onbekend gegeven omdat het een vrij recent materiaal is (ASHURST J. & N., 1989: 78).

Eigenschappen van de glasvezelstaven die werden gebruikt bij proeven uitgevoerd door S. Ercan aan de KULeuven, departement bouwkunde, zijn weergegeven in tabel 28 (ERCAN S.

e.a., 1995: 44-45). De glasvezelstaven bestaan voor 65% uit glasvezels in een matrixhars van polyester. De vezels liggen longitudinaal.

E-mod (trek) (GPa)	Treksterkte (MPa)	Rek bij breuk (%)	E-mod (buiging) (GPa)
40	530-1000	2	35-45
Buigsterkte (MPa)	E-mod (druk) (Gpa)	Druksterkte (MPa)	Schuifsterkte (MPa)
600-1000	15-30	200-450	25-30
Impactweerstand (J/m)	Dichtheid (g/cm ³)	Barcolhardheid	Lin. uitzettings- coëff. (10 ⁻⁶ m/m°C)
1800-2000	2.00	45	12

Tabel 28: Eigenschappen glasvezelstaaf (65 % glasvezel, Bekaert Composites).

De mechanische eigenschappen zijn sterk afhankelijk van de diameter van de staaf. De treksterkte verlaagt wanneer de diameter van de glasvezelstaaf groter is. De treksterkte (bij breuk) bedraagt voor staven met diameter 7, 12 en 16 mm, respectievelijk 700, 550 en 400 MPa. Dit gedrag is volledig verschillend van staal waar de treksterkte onafhankelijk is van de beschouwde sectie. Glasvezelstaven hebben een slechte weerstand tegen afschuiving en tegen druk uitgeoefend in de richting loodrecht op de vezels. De elasticiteitsmodulus (trek) is zo'n vijf keer lager dan die van roestvast staal. Glasvezelstaven zijn dus eerder bros. Breuk begint met het breken van de buitenste vezels en bij verder belasting breekt de staaf na enkele seconden volledig door (ERCAN S. e.a., 1995: 65).

De gladde staven worden voor toepassing in de restauratiewereld ruw gemaakt door op te schuren met schuurpapier, om de hechting te verbeteren. Er bestaan ook staven waar parels op gekleefd zijn die voor een betere hechting zorgen. Door de hechting te verbeteren vermindert ook de slip van glasvezelstaven in de epoxymortel.

In de handel zijn enkel rechte glasvezelstaven met een bepaalde diameter verkrijgbaar. Krammen zijn niet verkrijgbaar in de handel. Tijdens de proeven uitgevoerd door S. Ercan werd geopteerd om krammen te maken door glasvezelmatten op te rollen en te drenken in een epoxymengsel. Er kunnen twee werkwijzen gevolgd worden. Enerzijds kan de glasvezelmat eerst opgerold worden, in de sleuf van de natuurstenen gelegd worden en dan tenslotte met epoxy opgegoten worden; anderzijds kan de glasvezelmat opgerold worden, in een bad van epoxy gedrenkt worden en dan voor het epoxy uitgehard is in de sleuf gelegd worden. De eerste werkwijze leverde de beste resultaten omdat bij breuk de stenen toch nog verbonden bleven door de draadachtige structuur van de uiteengerukte glasvezelmat (ERCAN S. e.a., 1995: 99-101).

5.1.2. Titanium

Tabel 29 geeft de belangrijkste mechanische en fysische eigenschappen van zuiver titanium en een titaniumlegering (MOENS T., 2001: 5-7).

	Samenstelling	Dichtheid (kg/dm ³)	Lineaire uitzettings- coëff. (10 ⁻⁶ m/m°C)	Treksterkte (MPa)
ASTM Grade 2	Zuiver titanium	4.51	8.35	345
ASTM Grade 5	Ti-6Al-4V	4.42	8.90	895
	Elasticiteits- grens (MPa)	Verlenging (%)	E-modulus (GPa)	Hardheid
ASTM Grade 2	275	20	103	80 HRB
ASTM Grade 5	825	10	110	36 HRC

Tabel 29: Mechanische en fysische eigenschappen van zuiver titanium en een legering.

De lineaire uitzettingscoëfficiënt van titanium is klein voor een metaal: ongeveer de helft van die van staal, koper en brons en bijna gelijk aan die van glas en natuursteen. Dit is een gunstige eigenschap voor de verbinding van twee natuurstenen.

De dichtheid van titanium is ongeveer de helft van die van roestvast staal, koper en brons. De treksterkte van zuiver titanium is wel zo'n 30 % lager dan die van roestvast staal. Wanneer titanium gelegeerd wordt, kunnen hoge sterktes bereikt worden. Treksterktes van meer dan 1300 MPa kunnen gehaald worden en gedeeld door de dichtheid is dit één van de hoogste specifieke treksterktes van een metaal of een legering. Hierdoor kunnen heel lichte structuren gebouwd worden. De E-modulus van zuiver titanium en ook van zijn legeringen is ongeveer de helft van de E-modulus van roestvast staal. Door zijn lage E-modulus zal titanium gemakkelijker vervormen dan andere metalen (MOENS T., 2001: 5-7).

Een titaniumlegering kan een treksterkte bezitten die dubbel zo hoog is als die van roestvast staal, terwijl de E-modulus slechts de helft bedraagt. Als sterkte de belangrijkste eis voor de verbinding is, is dus slechts de helft zoveel titanium nodig dan staal. Als het beperken van de vervormingen de doorslaggevende eis is, is dubbel zoveel titanium nodig als staal (ANGELIDES S., 1976: 95).

Titanium en titaniumlegeringen worden niet alleen gebruikt omwille van hun hoge sterkte-gewichtsverhouding, maar eveneens voor hun uitstekende corrosieweerstand. Ze worden ingezet in de luchtvaart, maritieme en chemische toepassingen en ze worden in vele omstandigheden niet aangetast door corrosie.

Titanium dankt zijn hoge corrosieweerstand aan een stabiele, sterk adherente beschermende oxidelaag. Omdat titanium zeer reactief is en een grote affiniteit heeft voor zuurstof, wordt deze oxidelaag spontaan gevormd wanneer het metaal blootgesteld wordt aan de lucht of aan vocht. Bovendien herstelt de oxidefilm zich meteen wanneer hij beschadigd wordt, zelfs als er

zich slechts sporen van zuurstof of water in het omgevende milieu bevinden (MOENS T., 2001: 8).

Onder invloed van de atmosfeer ontstaan er soms lichtbruine, grijze of gele vlekken. Deze vlekken zouden kunnen worden verklaard door de kleurveranderingen die kunnen optreden wanneer de oxidefilm verder aangroeit.

Wanneer titanium wordt verankerd door middel van beton of mortel, bezit titanium in deze basische omgeving ook een goede corrosieweerstand.

Titanium is zeer edel en zal bijgevolg als kathode fungeren. Bij contact met een ander metaal zal deze laatste corroderen, terwijl het titanium onaangetast zal blijven.

Putcorrosie komt bij titanium zelden voor en titanium is één van de metalen die het best bestand is tegen spleetcorrosie, vooral wanneer er sprake is van differentiële beluchting.

Zuiver titanium biedt een grote weerstand tegen spanningscorrosie in waterige omgevingen waarin andere metalen wel deze vorm van corrosie vertonen.

Ook interkristallijne corrosie vormt geen probleem.

Er kan besloten worden, dat titanium en zijn legeringen een uitstekende weerstand bezitten tegen de vormen van corrosie die normaliter optreden in de bouwwereld (MOENS T., 2001: 8-18).

De aankoop prijs van titanium is veel hoger dan die van andere materialen (tabel 30).

	Prijs per kg (Euro)
ASTM Grade 2	20
ASTM Grade 5	40-50
AISI 304	1.85
AISI 316	2.35
Koper	3.2

Tabel 30: Prijs per kg (Euro) voor enkele constructiematerialen (MOENS T., 2001: 31).

Anderzijds kunnen de lage densiteit en de hoge sterkte van het titanium de initiële kostprijs aan materiaal drukken. De duurzaamheid en de zeer goede corrosieweerstand van het titanium drukken dan weer de globale kostprijs. De globale kostprijs van een gebouw dient immers berekend te worden op basis van zijn gehele levensduur.

Voor het aspect van de duurzaamheid is van belang in de restauratiewereld. Gezien de goede corrosieweerstand garanderen sommige bedrijven dat er binnen de honderd jaar geen corrosie met perforatie zal optreden bij zuiver titanium in atmosferische omstandigheden.

Sommige producenten rekenen er zelf op dat geen zware corrosie zal optreden binnen de 300 jaar (MOENS T., 2001: 31-32).

5.2. Alternatieven voor lood

5.2.1. Mortel

Mortel werd in het verleden vaak toegepast bij gebrek aan even goedkope alternatieven. Mortels werden gebruikt om natuurstenen te verbinden en ze werden ook gebruikt om ijzeren ankerstaven aan te gieten. Mortel heeft het voordeel van goedkoop en gemakkelijk in gebruik te zijn. Nadelig is dat mortel meestal oplosbare zouten bevat die naar de steen en het anker kunnen migreren. In vergelijking met de moderne ontwikkelingen op gebied van polymeer- en composiettechnologie, komt daar nog bij dat de adhesie van cementmortels veel lager is dan die van de polymeerharsen en dat cementmortels krimpproblemen kennen tijdens de uitdroging (ERCAN S. e.a., 1995: 18).

Mortels bestaan uit een mix van fijne granulaten, water en bindmiddelen. Naast cement kunnen de hedendaagse mortels gebluste vette kalk of kunstmatige hydraulische kalk als bindmiddel bevatten. Cement staat in voor de sterkte maar ligt ook aan de basis van de krimpverschijnselen. Gebluste vette kalk, een uiterst fijn en zacht poeder, functioneert in verse mortel als een plastificeermiddel, als een watervasthoudende middel, als een stabilisator en als een kleefmiddel. In verharde mortel dient het als een soepelmakend middel, dat scharnierende verbindingen in het stijve gehydrateerde cementnet tot stand brengt en aldus de vervormbaarheid verhoogt. Kunstmatige hydraulische kalk is een cement met een samenstelling die een geringere sterkte oplevert, maar in verse mortel beter water vasthoudt en in de verharde mortel voor een grotere vervormbaarheid zorgt (HUBERTY J.-M., 1997: 20).

5.2.2. Epoxymortels

Epoxyharsen zijn condensatiepolymeren die getransformeerd worden in een thermohardend materiaal door de toevoeging van een hardingsmiddel. Epoxyharsen worden frequent gebruikt in de conservatie van metselwerk en natuurstenen. Verschillende producten worden bekomen door toevoeging van minerale vulstoffen, additieven en solventen (AMOROSO G.G. & FASSINA V., 1983: 375-376).

In tegenstelling tot de meeste andere polymeren, hebben epoxy's -voordat er cross-links ontstaan- betrekkelijk korte moleculen, ketens van niet meer dan zo'n tien monomeren lang. Gedurende het harden vormen zich cross-links tussen de ketenmoleculen, met als gevolg dat er een driedimensionaal netwerk ontstaat, waarbij het verhardingsmiddel deel wordt van de structuur (BUDINSKI K.G & M.R., 1999: 162).

De reactie met het verhardingsmiddel kan opgesplitst worden in twee reacties: tijdens de conversie worden epoxyringen gevormd door de reactie met het verhardingsmiddel en tijdens de cross-linking fase wordt een driedimensioneel thermohardend netwerk gevormd. Het is een

exotherme reactie waarbij geen andere producten worden gevormd en geconsumeerd. Er dient voldoende aandacht geschonken te worden aan de verhouding van epoxy en verhardingsmiddel omdat anders een hars wordt bekomen van inferieure kwaliteit. De voorschriften van de fabrikant i.v.m. de mengverhouding moeten strikt gevolgd worden. Het is ook aanbevolen om geen te grote hoeveelheden in één keer aan te maken (AMOROSO G.G. & FASSINA V., 1983: 380).

Bij het doorharden speelt de omgevingstemperatuur ook een belangrijke invloed op de eigenschappen die finaal worden bekomen. Hoge temperaturen zorgen ervoor dat de reacties vlugger verlopen, omdat hoge temperaturen optreden als katalysator. De minimumtemperatuur ligt voor de meeste epoxyharsen tussen de 5 °C en 10 °C (VAN GEMERT D., 1986: VI 10).

Door de keuze van de verharder, van het type minerale vulstof, van de verhouding kunsthars-vulstof, kunnen sterk wisselende eigenschappen verkregen worden, die deze van beton ver kunnen overtreffen. De prijs van deze mortels is echter ook vele malen duurder dan deze van beton, zodat de epoxyharsen voorbehouden moeten blijven voor speciale toepassingen (VAN GEMERT D., 1986: VI 10).

De krimp van epoxymortels is klein en ze hebben een goede adhesie met natuursteen. Ze zijn waterondoorlatend en worden niet aangetast door een groot aantal chemicaliën (ASHURST J. & DIMES F.G., 1990: 68) Bij hoge temperaturen verdwijnen een aantal goede eigenschappen van epoxyharsen doordat bepaalde verbindingen worden verbroken. Onder UV-straling verkleuren ze snel. De duurzaamheid op lange termijn is niet exact gekend omdat het -net zoals glasvezelstaven- een recent materiaal is (TORRACA G., 1982: 127).

Minerale vulstoffen zoals zand, kwartsmeel, enz., worden toegevoegd omdat het mogelijk is om de eigenschappen van puur epoxy zo te wijzigen. De vulstof moet droog zijn, mag niet reageren met het hars en het verhardingsmiddel en de korrelgrootteverdeling moeten zo gekozen worden dat er een minimum aan holtes ontstaat in het uitgeharde materiaal. De vulstof kan toegevoegd worden met verschillende doelen: om de viscositeit en consistentie te wijzigen, om de lineaire uitzettingscoëfficiënt te verminderen, om de kosten te drukken, om het mengsel speciale eigenschappen te geven (bvb. thixotropie), om de krimp en exothermiciteit van de reactie verder te verminderen of om de buig- en treksterkte te verlagen en de druksterkte te verhogen.

Tabel 31 vergelijkt de eigenschappen van een epoxyhars zonder en met vulmiddel (kwartspoeder). Door het toevoegen van het vulmiddel verkrijgt het epoxyhars eigenschappen die dichter aanleunen bij die van natuursteen (AMOROSO G.G. & FASSINA V., 1983: 390).

	Zonder vulstof	Met vulstof
Epoxy (gewichts %)	100	100
Verharder (gewichts %)	30	30
Vulmiddel (gewichts %)	0	300
Dichtheid (kg/dm ³)	1.2	1.9
Buigsterkte (MPa)	90-120	50-60
Treksterkte (MPa)	60-70	30-40
Druksterkte (MPa)	120	200-250
Elasticiteitsmodulus (GPa)	3-4	15-18

Tabel 31: Vergelijking eigenschappen epoxymortels (zonder en met vulstof).

De lineaire uitzettingscoëfficiënt is veel hoger dan die van natuursteen en metalen. De lineaire uitzettingscoëfficiënt bereikt al vlug waarden van $30 - 40 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}^\circ\text{C}$ (VAN GEMERT D., 1986: VI 10).

5.2.3. Polyesterharsen

Polyesterharsen hebben net als epoxymortels goede adhesie-eigenschappen met natuursteen en behoren ook tot de familie van de thermoharders. Polyesters zijn goedkoper dan epoxy maar daartegenover staan wel enkele belangrijke nadelen. Zo kan in open lucht oxidatie optreden van het polyester zodat een goede duurzaamheid niet kan gegarandeerd worden. Oxidatie van het polyester, in het bijzonder onder invloed van licht, veroorzaakt een verlies in treksterkte doordat de moleculen splitsen in kleinere, geoxideerde moleculen (TORRACA G., 1982: 127). Verder is de volumeverandering bij uitharden van polyesterharsen groter dan bij epoxy, met als gevolg dat er meer kans is op krimpscheuren (ASHURST J. & DIMES F.G., 1990: 68).

Het is duidelijk dat er een hele reeks materialen zijn die in aanmerking komen als alternatief voor lood en smeedijzer. In dit eindwerk zijn inox, brons, koper, natuursteen, glasvezelstaven en titanium aangehaald als alternatief voor de smeedijzeren ankerstaven. Tin, zwavel, cement, epoxyharsen en polyesterharsen zijn aangehaald als alternatief voor het lood. In de volgende paragraaf wordt aan de hand van enkele voorbeelden een aantal combinaties verder uitgediept. Het is duidelijk dat elke combinatie zoveel mogelijk moet voldoen aan de eisen die werden gesteld in paragraaf 2.4., waardoor a-priori al enkele combinaties uitgesloten zijn.

5.3. Hedendaagse restauraties

5.3.1. *Verbindingen gerealiseerd zonder ankerstaaf*

Bepaalde verbindingen kunnen perfect gerealiseerd worden zonder ankerstaaf. In de Zavelkerk werden verbindingen in de balustrade aangetroffen waarbij enkel lood werd gebruikt. De verbinding ziet er uit als een platte schijf met twee uitsteeksels door het gieten van het lood in de voeg en in uitsparingen van de natuursteen (Fig. 82). De uitsteeksels zorgen ervoor dat de verbinding beperkte krachten kan opnemen. De techniek van dit opgieten is vergelijkbaar met het procédé voor verticale verbindingen beschreven door A. Kiesewetter en G. Kiesow in paragraaf 3.2.1.. De voeg wordt afgedicht met klei en vervolgens opgegoten met lood (Fig. 83).



Fig. 82: Verbinding van natuursteen met lood zonder ankerstaaf.



Fig. 83.: Opgieten met lood van een verbinding zonder ankerstaaf.

Met epoxymortels is het ook mogelijk om de vlakken van beide natuurstenen aan elkaar te verlijmen zonder anker. Soms is het echter gevaarlijk om geen ankerstaven te gebruiken. Reden daarvoor kan het gewicht, de vorm of de structurele functie van de blokken zijn. Wanneer twee stenen verbonden worden en belast worden op trek, zal lood of mortel zonder ankerstaaf niet in staat zijn deze belasting op te nemen. Ook de heterogeniteit van de steen kan een reden zijn om verbindingstaven te gebruiken. Door een gebrek aan homogeniteit in de steen kunnen ‘planes of weakness’ aanwezig zijn. Verschillende van deze ‘planes of weakness’ kunnen zich dicht bij het te verbinden oppervlak bevinden. In dat geval zijn staven nodig die voldoende diep in de steen zitten zodat een overbrugging kan gemaakt worden tot in het gezonde materiaal (ERCAN S. e.a., 1997: 424).

Bij de proeven die uitgevoerd zijn in het kader van de restauratie van het Nymphaeum te Sagalassos (Turkije), werd men geconfronteerd met zo’n ‘planes of weakness’ in de natuursteen. Om het type steen te bepalen dat voor de bouw van het Nymphaeum gebruikt werd, werd in eerste instantie een geologische studie uitgevoerd. Ook was het belangrijk om nauwkeurig de mechanische eigenschappen te kennen van de stenen. Daartoe werden enkele laboratoriumtesten uitgevoerd op stenen uit een nabijgelegen groeve. Uit de testen bleek dat

de steen veel zwakker was dan de geologische studie deed vermoeden. De reden van deze verschillende waarden, ligt in de gevolgde methode. De geologen gebruikten niet-destructieve proeven op basis van geluid om de steen te karakteriseren en daaruit de mechanische eigenschappen te bepalen. Deze manier van werken laat echter niet toe om onregelmatigheden in de steen op te sporen. Specifiek in het geval van het Nymphaeum te Sagalassos, waren er lagen van calciëtgerekristalliseerd spariet aanwezig in de steen. Op die manier verkreeg het labo een druksterkte van 38 MPa, daar waar de geologische studie 100 MPa voorop had gezet. De gerekristalliseerde vlakken vormden bij een belasting preferentiële breukvlakken waarlangs de steen brak bij te grote interne spanningen (VAN BALEN K. & PATRICIO T., 1995: 165-166).

Dit voorbeeld illustreert dus dat een lijm -die op zichzelf voldoende sterk is- soms toch nog moet aangevuld worden met ankerstaven. Het is belangrijk om de aandacht van de ontwerper te vestigen op het feit dat de structuur en de gebruikte natuursteen volledig gekarakteriseerd moeten worden. Pas dan kan beslist worden of ankerstaven al dan niet nodig zijn.

In de volgende alinea's worden voorbeelden gegeven van restauraties waarbij ankerstaven werden gebruikt. Bij al deze restauraties werden hevige discussies gevoerd over de materiaalkeuze om de verbindingen te realiseren.

5.3.2. Enkele voorbeelden van hedendaagse restauraties

Omwille van zware structurele schade werd een grote gedeelte van de monumenten van de Acropolis in Athene gedurende de laatste twintig jaar ontmanteld. Het groot aantal kostbare Oudgriekse monumenten en de zware atmosferische vervuiling van de stedelijke omgeving van Athene hebben het onderzoek naar de restauratie van de monumenten op de Acropolis beïnvloed. Het onderzoek heeft geleid tot een herziening van alle methoden en materialen die toegepast werden voor de conservatie en restauratie van deze monumenten.

De Oudgriekse marmeren stenen werden gerestaureerd en sommige delen werden opnieuw opgetrokken. De ontmanteling begon in 1979. De oude en nieuwe verbindingen werden uitgevoerd in titanium. In het Parthenon werd dit metaal voor de eerste keer gebruikt voor de restauratie van een monument (SKOULIDIS T. & VASSILIOU P., 1999: 295-332).

De gebroken marmeren blokken op de Acropolis werden terug aan elkaar verbonden door middel van titaniumstaven in combinatie met een mortel op basis van portlandcement. De oppervlakken van de delen die met elkaar verbonden moesten worden, werden schoongemaakt. Hierbij werd een laag met een dikte van 1mm verwijderd. De oppervlakken die op deze manier behandeld werden, konden tegen elkaar gecementeerd worden zonder de algemene dimensies van de elementen te veranderen.

Voor de marmeren balken werd geopteerd voor een versteviging die bestond uit titaniumstaven die doorliepen over de gehele lengte. Deze staven werden in sleuven gebracht

die in de marmeren elementen geslepen waren. De overgebleven ruimte werd opgevuld met een mortel van witte portlandcement en silicaatzand.

Er werd nieuw marmer gebruikt voor de vervollediging van de architecturale elementen of voor de vervanging van de oude herstellingen in beton. Soms werden marmeren blokken volledig vernieuwd als ze zeer grote schade vertoonden.

Voor de verbinding van de verschillende marmeren blokken van de kolommen en de wanden, werden bij eerdere restauraties bepaalde smeedijzeren ankerstaven vervangen door stalen exemplaren. Deze stalen verbindingsstaven werden –samen met de nog aanwezige smeedijzeren exemplaren- vervangen door dezelfde elementen in zuiver titanium (ECONOMAKIS R., 1994: 224 en ZAMBAS C., 1988 : 1815).

De gebruikte portlandcement is een witte cement met een laag gehalte aan oplosbare zouten (ZAMBAS C., 1988: 1815). Wit cement wordt op dezelfde manier vervaardigd als normale portlandcement. Er worden echter grondstoffen gebruikt die een minimum aan ijzeroxide of andere kleurende oxiden bevatten. Daarbij gebeurt het malen in de cementmolens met niet-metalen maallichamen (VAN GEMERT D., 1986: 6.25).

Bij de restauratie van de Celsus bibliotheek in Ephese (Turkije), die gebeurde tussen 1970 en 1978, werd Araldiet-epoxy gebruikt om de gebroken marmeren stenen aan elkaar te lijmen. Araldiet werd ook gebruikt om ijzeren staven te verankeren bij het herstellen van het gebroken marmer. Er werd marmer- en grindpoeder toegevoegd aan de epoxy die nu dienst deed als opvulling van de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat (AMOROSO G.G. & FASSINA V., 1983: 401-405).

Bij het anastylosisproject van de Apollo tempel in Side (Turkey), werd roestvast staal gebruikt in combinatie met Araldiet-epoxy om gebroken stenen opnieuw te verbinden. Bij dit project traden nogal wat discussies op omdat tegenstanders beweerden dat het roestvast staal van mindere kwaliteit was, waardoor zij vreesden voor corrosieproblemen (YORULMAZ M. e.a., 1989: 455-456).

Brons werd gebruikt bij de restauratie van een Romeins aquaduct te Segovia (Spanje). De zwaar aangetaste granietblokken werden geconsolideerd door het verankeren van bronzen staven van 30mm diameter in geboorde gaten van 36mm. Vervolgens werd de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat opgevuld met een heel vloeibare epoxylijm. Toch was men er niet zeker van of het brons niet zou worden aangetast door corrosie. De restauratie was voltooid in 1974 (AMOROSO G.G. & FASSINA V., 1983: 401).

De combinatie van glasvezelstaven en epoxymortels wordt het laatste decennium veelvuldig toegepast. Bij de Zavelkerk werden glasvezelstaven gebruikt om bepaalde verankeringen te realiseren, net zoals bij de Sint Michielskerk te Leuven. Ook in het buitenland wordt de techniek veel gebruikt. Bij de Mazaeus- en Mithridatespoort te Ephese (Turkije) werden de gebroken natuurstenen met deze combinatie hersteld.

Voor de restauratie van het Nymphaeum in Sagalassos (Turkije) werd voorgesteld om glasvezelstaven te gebruiken die ingebed worden in een epoxymortel. Dit voorstel werd o.a. verder onderzocht aan de KULeuven, departement bouwkunde onder leiding van Prof. K. Van Balen. Glasvezelstaven ingebed in een epoxymortel werden zowel toegepast om de gebroken stenen te herstellen als om de stenen onderling te verbinden.

5.3.3. *Besluit*

In de loop van de tijd werden dus al talrijke systemen toegepast.

Voor het verbinden van twee natuurstenen worden zowel het oude systeem van het aangieten met lood van ankerstaven als de nieuwere combinaties, zoals titanium in combinatie met mortel op basis van cement en glasvezelstaven in combinatie met epoxymortels, toegepast. Bij het hedendaags aangieten met lood worden geen smeedijzeren ankers meer gebruikt maar wel ankers uit roestvast staal.

Daarnaast worden ook verankeringssystemen toegepast om gebroken stenen te herstellen. Tijdens de ontwerpfase van een restauratieproject moeten deze twee toepassingen duidelijk onderscheiden worden en het systeem dat gekozen wordt voor het verbinden van natuurstenen kan niet zomaar worden toegepast voor het herstellen van stenen en omgekeerd. Zo zal binnen eenzelfde restauratieproject bijvoorbeeld geopteerd worden om gebroken stenen terug te herstellen met een brosse verbinding zodat de steen bij hevige sollicitaties opnieuw op dezelfde plaats breekt. Voor de verbinding van twee (eventueel herstellende) natuurstenen zal dan misschien voor een vervormbare oplossing gekozen worden.

In de volgende twee paragrafen worden twee modernere systemen voor het verbinden van natuurstenen getoetst aan de eisen die werden opgesteld in paragraaf 2.4..

5.4. Titanium in combinatie met mortel

Bij de restauratie van de monumenten van de Acropolis werd niet voor roestvast staal gekozen omdat het onderhevig is aan put-, spleet- en spanningscorrosie. Zeker in het milieu van de Acropolis, een zeeklimaat en veel atmosferische vervuiling door de stedelijke omgeving van Athene, is het risico groot dat roestvast staal wordt aangetast door de chloriden aanwezig in de omgeving. Titanium daarentegen vertoont een zeer goede weerstand tegen corrosie in zo'n zwaar belastende omgeving. Ook in industriële, stedelijke en maritieme milieus op andere plaatsen in de wereld is de hoge corrosieweerstand van titanium vaak een doorslaggevend argument voor zijn toepassing.

Wat betreft het opvulmiddel kan opgemerkt worden, dat de krimp van cementmortels een niet te onderschatten gegeven is. Er kan dus beter gekozen worden voor een krimpvrije mortel die een voldoende lage viscositeit heeft zodat de overgebleven ruimte tussen anker en steen goed

opgevuld wordt. Door het toevoegen van bepaalde hulpstoffen kan ook een mortel worden verkregen die esthetisch gezien niet storend is. Bij de Acropolis werd bvb. witte cement gebruikt omdat de uitgeharde mortel zo een kleur verkrijgt die in de buurt komt van de natuursteen.

Titanium heeft een lineaire uitzettingscoëfficiënt in de buurt van die van de meeste natuurstenen. Daardoor zullen geen extra spanningen worden opgewekt door thermische belastingen. In tegenstelling tot het aangieten met lood bestaat er, bij het opvullen met mortel, ook geen gevaar dat de natuursteen kapot springt omwille van thermische schokbelastingen. De hydratiewarmte die vrijkomt zal geen schadelijk effect hebben op de natuursteen.

De verbinding is niet schadelijk voor de arbeiders en het milieu. Het procédé is ook heel wat minder arbeidsintensief dan het aangieten met lood. Wel moet er rekening gehouden worden met de trage uitharding van de mortel in vergelijking met de stollingstijd van gesmolten lood.

Bij de restauratie van de monumenten op de Acropolis werden de titaniumverankeringen zo gedimensioneerd dat de ankerstaven sneller zullen breken dan het marmer errond wanneer een zeer grote supplementaire belasting -bijvoorbeeld een aardbeving- zou optreden. Een overdimensionering moet dus vermeden worden om aan deze eis van compatibiliteit te voldoen.

C. Zambas beschrijft het effect van het herstellen van een gebroken natuursteen met een specifiek gedimensioneerde titaniumverankering. Op figuur 84. wordt het verloop van de vervormingen gegeven in functie van het moment. Links in de grafiek wordt het gedrag van de oorspronkelijk, niet gebroken marmeren steen geschetst; rechts het gedrag van de herstelde marmeren steen. Het punt (M_w, Δ_w) geeft de toestand weer onder normale belasting en is voor beide stenen gelijk. De titaniumverankering is in deze figuur zodanig gedimensioneerd dat het breukmoment M_u , voor beide stenen gelijk is. Voor de tussenliggende momenten treden veel grotere vervormingen op in het geval van de herstelde steen.

Door de verankering met een iets kleinere sectie te dimensioneren dan hierboven beschreven, wordt bekomen dat de steen opnieuw breekt op de plaats waar hij hersteld werd.

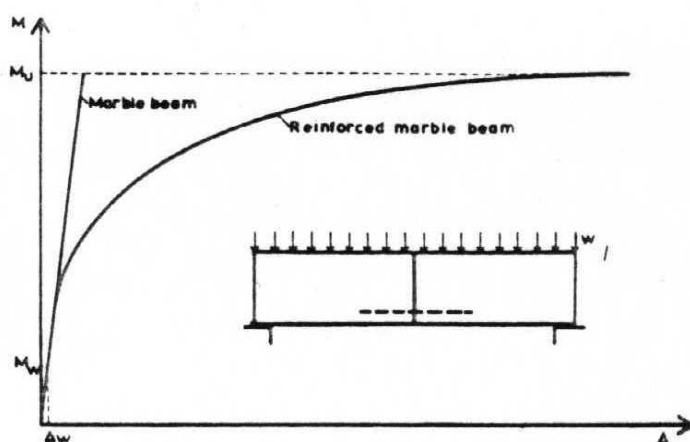


Fig. 84: Gedrag van een marmeren balk en een versterkte marmeren balk op buiging belast (ZAMBAS C., 1988: 1816).

Ook de verbindingen van de stenen die oorspronkelijk uitgevoerd waren door een smeedijzeren anker aan te gieten met lood, werden vervangen door titanium ankerstaven ingebed in witte cement. Opnieuw werd er voor gezorgd dat door een goede dimensionering van de titanium ankers de sterkte van de verbinding kleiner is dan de sterkte van het omringende marmer. Bij een overbelasting breekt de verbinding en treedt geen schade op aan de steen zelf (ZAMBAS C., 1988: 1815-1817).

Titanium en cement zijn geen authentieke materialen voor de verbinding van natuursteen. Om aan de eis van reversibiliteit te voldoen moet de verbinding verwijderd kunnen worden zonder schade te berokken aan de natuursteen. Mits enig vakmanschap is het mogelijk om de verbinding uit de steen te kappen en zo te voldoen aan de eis.

Het feit dat titanium niet in alle geometrische vormen en afmetingen verkrijgbaar is en het feit dat de vormgeving van titanium moeilijk realiseerbaar is op de werf, zorgen ervoor dat er soms nieuwe gaten moeten worden gemaakt. Dit is geen reversibele handeling. In dit geval wordt overgestapt op de eisen van compatibiliteit en herbehandelbaarheid.

Het systeem is compatibel aangezien geen negatieve gevolgen te verwachten zijn zoals bijvoorbeeld expansieve roestvorming.

Wat betreft de herbehandelbaarheid, zal de verbinding kunnen verwijderd worden als de overbelasting voldoende groot is zodat de ankerstaaf effectief breekt. Wanneer het anker echter niet breekt maar sterk vervormt, dan wordt niet goed voldaan aan de eis van herbehandelbaarheid omdat een nieuwe interventie zal bemoeilijkt worden.

De aankoop prijs van titanium is hoog in vergelijking met andere materialen. Als tabel 30 bekeken wordt, dan is titanium ongeveer 10 keer duurder dan roestvast staal. De verbinding zal dus wellicht duurder uitvallen dan het aangieten met lood van roestvast staal omdat de besparingen in loonkosten de enorme verhoging van de materiaalkosten niet zullen kunnen compenseren. De vraag kan gesteld worden of de hoge investeringskost opweegt tegen de duurzaamheid van de oplossing. Velen zijn de mening toegedaan dat het aanvaardbaar is om een hoger bedrag te investeren in de restauratie als daarmee de levensduur op lange termijn gegarandeerd is.

5.5. Glasvezelstaven in combinatie met een epoxymortel

Door een goed ontwerp is het -net zoals bij titanium in combinatie met cement- mogelijk om een verbinding te realiseren met glasvezelstaven in combinatie met een epoxymortel, die sterk genoeg is, maar die bij overbelastingen zoals aardbevingen breekt op de plaats van de verbinding. Het systeem is bros en zal dus weinig vervormen bij belastingen onder de breukgrens.

Het systeem is ook corrosievrij en resistent tegen vele chemicaliën. Het gebruik van glasvezelstaven in combinatie met epoxy houdt wel risico's op lange termijn in aangezien beide materialen vrij recent zijn en hun duurzaamheid op lange termijn nog niet gekend is.

Om de ruimte tussen het anker en de natuursteen gemakkelijk te kunnen opvullen moet de epoxymortel voldoende vloeibaar zijn. Dit is mogelijk door aangepaste mengverhoudingen. De krimp van de meeste epoxymortels is te verwaarlozen en de adhesie van de epoxymortel met de natuursteen is groot.

De uithardingsreactie van epoxymortels is exotherm. Dit zal voor thermische spanningen zorgen in de steen, maar tot op heden zijn er nog geen gevallen bekend waar, zoals bij het aangieten met lood, de natuursteen kapot springt.

De lineaire uitzettingscoëfficiënt van epoxymortels is hoger dan die van natuursteen, waardoor dus spanningen kunnen ontstaan. Hierbij dient echter onmiddellijk opgemerkt te worden dat de verbindingen in de praktijk meestal in de natuursteen zijn ingewerkt waardoor ze slechts in beperkte mate onderhevig zijn aan temperatuurschommelingen.

Bij navraag bleken de arbeiders het werken met epoxymortels als een onaangenaam werk te ervaren. Contact met de huid en ogen moet zeker vermeden worden. Epoxy kan zorgen voor allergische reacties. Een extra nadeel is ook dat de uithardingstijd van het epoxy groot is. Het uitharden kan al vlug 12 uur duren, dit in tegenstelling met lood dat bijna onmiddellijk stolt. Wanneer gemorst wordt met epoxy op andere natuurstenen moet dit onmiddellijk worden verwijderd met een solvent omdat, eenmaal uitgehard, dit niet meer te verwijderen is zonder schade aan te richten.

Dit alternatief vormt een brosse verbinding. Dit is in tegenstelling met de authentieke vervormbare verbinding van lood met een smeedijzeren ankerstaaf.

Door de sterke adhesie van de epoxymortel met de natuursteen wordt niet voldaan aan de eis van reversibiliteit. Het toevoegen van minerale vulstoffen kan deze adhesie met de natuursteen verminderen. Hierdoor kan de epoxymortel eventueel worden weggekap waardoor al beter wordt voldaan aan de reversibiliteits-eis. Bij het gebruik van glasvezelstaven, gemaakt in een fabriek en dus slechts in enkele standaardmaten voorradig, is het soms onmogelijk om de bestaande gaten van de verbinding te gebruiken. In dit geval moet nieuwe gaten gekapt worden in de natuursteen, hetgeen weerom een irreversibele handeling is. Als oplossing voor dit geometrie-probleem, kunnen glasvezelmatten gebruikt worden die na positionering in de gaten gedrenkt worden in een epoxy.

Wat betreft compatibiliteit kunnen twee opmerkingen aangestipt worden. Ten eerste beschouwen veel tegenstanders van epoxymortels de sterke adhesie van epoxymortels aan de natuursteen als incompatibel. Zoals reeds vermeld, kan door het toevoegen van minerale vulstoffen tegemoet gekomen worden aan deze verzuchting. Ten tweede verstoort het gebruik van epoxymortels de vochthuishouding van de natuursteen. Dit is echter niet problematisch als de natuursteen slechts een kleine porositeit heeft.

Door de brosse verbinding wordt wel de herbehandelbaarheid gegarandeerd. Bij een overbelasting zal de verbinding breken en kan gemakkelijk een nieuwe verbinding op dezelfde plaats worden gerealiseerd (VAN BALEN K., 1999: 108-110).

Een glasvezelstaaf is iets duurder dan een gelijkaardige staaf van roestvast staal. Epoxy kost ongeveer 7.5 euro per liter. Om de epoxymortel aan te maken worden twee componenten bij elkaar gemengd. Aangezien het belangrijk is dat de juiste mengverhoudingen worden gerespecteerd omdat anders de eigenschappen van de epoxymortel wijzigen, wordt meestal de volledige inhoud van de twee potten bij elkaar gegoten. Het is wel mogelijk om bijvoorbeeld slechts twee halve potten bij elkaar te gieten maar dan moeten deze inhouden nauwkeurig afgemeten worden en aannemers aanzien dit meestal als tijdsverlies. Als er dus slechts weinig verbindingen gerealiseerd moeten worden, kan de prijs per verbinding behoorlijk oplopen. Verder neemt de arbeidskost ook nog een aanzienlijk deel in van de totale kost. De verhouding materiaal – arbeid is wel hoger dan bij het aangieten met lood van een ankerstaaf van roestvast staal.

6. Besluit

Het procédé van het aangieten met lood van een ankerstaaf voor de verbinding van twee natuurstenen, kent een zeer lange geschiedenis. Naar aanleiding van de moderne technieken en materialen die tegenwoordig voorhanden zijn in restauratieprojecten, rijst de vraag of men deze oude techniek van verbinden moet blijven toepassen.

Zoals reeds aangestipt in de inleiding, wil dit eindwerk een eerste aanzet tot antwoord vormen op de vraag in hoeverre alternatieven voor het aangieten met lood zich opdringen en welke deze alternatieven dan eventueel zouden kunnen zijn.

De techniek van het aangieten met lood van een ankerstaaf werd vanaf de Griekse bouwkunst veelvuldig toegepast. De verbinding komt voor op tal van plaatsen en onder verschillende vormen. Er kan een onderscheid gemaakt worden tussen deze verschillende vormen naargelang het horizontale dan wel verticale ankerstaven betreft, naargelang het belastingsgeval en naargelang de omgevingscondities. Het is dan ook moeilijk om één type voorkomende verbinding naar voor te schuiven als referentieverbinding. Indien er in de toekomst verder onderzoek gebeurt, zal uit deze parameters gekozen moeten worden en zullen steeds bepaalde andere, eveneens vaak voorkomende, types moeten verwaarloosd worden.

Als de -soms vrij oude- literatuur bekeken wordt die kan gevonden worden met betrekking tot het aangieten met lood, kan geconcludeerd worden dat het lood voornamelijk werd toegepast om twee redenen. Enerzijds zorgt het lood ervoor dat de verbinding plastisch kan vervormen. Anderzijds zou de loden mantel in staat zijn om het anker te beschermen tegen corrosie. Corrosie van het anker moet vermeden worden omdat het gevaar anders bestaat dat de omhullende natuursteen scheurt of kapot springt.

Tegenover deze voordelen staan echter ook enkele nadelen van de techniek van het aangieten met lood. Als voornaamste nadelen kunnen de schadelijke impact op mens en milieu, mogelijke corrosieproblemen en de arbeidsintensiviteit worden aangestipt.

Wat betreft de gezondheid van de werknemer moeten een gelaatsbeschermer, een stofmasker, hittebestendige handschoenen en stevige werkkledij enerzijds en een strenge persoonlijke hygiëne anderzijds, voldoende veiligheid verschaffen aan de arbeider.

Wat betreft het corrosieprobleem waren de ankerstaven vroeger van smeedijzer en vertoonden deze in sommige gevallen verregaande expansieve corrosie. Hieruit kan afgeleid worden dat het lood niet steeds een sluitende mantel vormt rond de ankerstaaf, maar dat water en lucht tot bij die staaf kunnen komen en zo corrosie kunnen veroorzaken. In verder onderzoek moet zeker nagegaan worden op welke manier water tot bij het anker kan geraken.

Als antwoord op het probleem van atmosferische corrosie worden nu staven van roestvast staal gebruikt. Indien het water dat tot bij de ankerstaven geraakt echter chloriden bevat, kunnen problemen optreden van put-, spleet- en spanningscorrosie. Putcorrosie is binnen het

kader van dit eindwerk van minder belang wegens zijn puntvormig en zeer lokaal karakter. Spanningscorrosie zal enkel van belang zijn als het anker onder spanning staat, maar zal geen expansieve roestvorming veroorzaken die de steen kan beschadigen. Vooral spleetcorrosie lijkt een gevaarlijk fenomeen te zijn voor de verbinding omdat hierbij wel expansieve corrosieproducten gevormd worden ter hoogte van een eventuele aanwezige spleet.

Het uurloon van de arbeiders neemt het leeuwendeel van de kostprijs in beslag. De voorbereidingswerken, het smelten van het lood en het gieten en nabehandelen van de verbindingen nemen veel arbeidsuren in beslag terwijl de materiaalkosten gering zijn. Een case-studie in eventueel verder onderzoek zou toelaten om de kostprijs als een duidelijke gegeven waarde in te voeren in de bespreking van de loodverbinding ten opzichte van zijn mogelijke alternatieven.

De samenstellingsanalyse bevestigde dat het gehalte aan sporenelementen daalde doorheen de geschiedenis. De gevonden waarden zijn wel lager dan deze die verwacht werden uit de literatuurstudie over de raffinage van loodertsen.

Bij restauratieprojecten wordt het oude lood gerecupereerd en voor een deel aangevuld met hedendaags lood (bijvoorbeeld afkomstig van de nieuwe dak- en gootbedekking). De resultaten uit de samenstellingsanalyse en de hardheidsmetingen laten vermoeden dat het toevoegen van dit hedendaags lood (met slechts een minimaal gehalte aan sporenelementen) geen merkbare invloed zal hebben op de mechanische en fysische eigenschappen van de verbinding. De aanwezigheid van zilver dat de krimp zou verkleinen, moet in dit kader echter nog verder onderzocht worden.

Met een zoutneveltest werd gepoogd om de mogelijk optredende spleetcorrosie te simuleren. Na het ondergaan van een zoutneveltest van 266 uren en een verblijf van twee weken in de klimaatkast, vertoonden de staven van roestvast staal nog geen tekenen van spleetcorrosie. Dit wil niet zeggen dat het uitgesloten is dat er in de toekomst problemen te verwachten zijn met spleetcorrosie van met lood aangegoten ankers van roestvast staal in de verbinding van twee natuurstenen. Dit eindwerk stelt enkel vast dat binnen een in tijd beperkt en eenvoudig proefprogramma geen spleetcorrosie kon gesimuleerd worden.

Bij het aanmaken van de proefstukken voor de zoutneveltest werd wel het bestaan van een spleet tussen de staaf en de cilindrische loodprop vastgesteld.

Bij eventueel verder onderzoek zou een langere testperiode, een schommelend temperatuurverloop tijdens de proef, wisselende pH-waarden tijdens de proef en een andere opstelling van de monsters in de testruimte kunnen toegepast worden en zou ook rekening kunnen gehouden worden met de soms onzorgvuldige uitvoeringen op de werf.

Worden de gegevens die hierboven werden aangestipt samengebracht, dan kan besloten worden dat het aangieten met lood -eventueel een menging van gerecupereerd en hedendaags lood- van roestvaste ankerstaven voldoet aan de meeste eisen voor een verbinding in natuursteen. Spleetcorrosie zou in sommige gevallen voor problemen kunnen zorgen.

Het zoeken naar alternatieven kan slechts op een adequate manier gebeuren als de nadelen van de verbinding door het aangieten lood van een anker uit roestvast staal voldoende gekend en begrepen zijn. Toch werden reeds een aantal alternatieven naar voor geschoven in dit eindwerk. Op basis van literatuurgegevens worden twee alternatieven beschreven.

Titanium ankers in combinatie met een krimpvrije mortel en glasvezelstaven in combinatie met een epoxymortel zijn alternatieven voor het aangieten met lood van ankers van roestvast staal die tegenwoordig regelmatig worden toegepast in de restauratie.

De combinatie van titanium en mortel wordt gebruikt omdat de titanium ankers een heel hoge weerstand tegen corrosie bezitten waardoor een verbinding kan gerealiseerd worden waarvan de duurzaamheid op lange termijn gegarandeerd kan worden. Ook het gezondheidsaspect voor de werknemers en de beperkte arbeidsintensiviteit bieden voordelen in vergelijking met het aangieten met lood. Het grote nadeel van titanium is zijn hoge kostprijs.

Bij het gebruik van glasvezelstaven en een epoxymortel is het gevaar op corrosie onbestaand. De duurzaamheid op lange termijn is echter een onbekende factor. De verbinding die gerealiseerd wordt is bros, dit in tegenstelling tot verbindingen waar metallische ankers worden gebruikt. Epoxymortels kunnen allergische reacties veroorzaken bij de arbeiders. Het werken met glasvezelstaven en een epoxymortel is minder arbeidsintensief dan het aangieten met lood, maar de materiaalkost ligt wel iets hoger.

7. Lijst van figuren

Fig. 1: “Opus revinctum” m.b.v. krammen en pinnen.	p. 4
Fig. 2: Schade aan natuursteen door roestvorming van het ijzer.	p. 5
Fig. 3a: De druklijn raakt, onder een verticale belasting (eigengewicht inbegrepen), de extrados en vormt er een scharnier.	p. 6
Fig. 3b: De druklijn raakt, door verplaatsing van de steunpunten, de intrados en vormt er een scharnier.	p. 6
Fig. 4: De boog kan instorten als er voldoende scharnieren ontstaan om een mechanisme te vormen.	p. 6
Fig. 5: Voorbeeld van uitkragend deel: spuer van de Onze-Lieve-Vrouwekerk in Laken.	p. 8
Fig. 6: Uitkragende delen kunnen op hun plaats gehouden worden door de bovenliggende massa, door een verankering naar achter toe of door een combinatie van beiden.	p. 9
Fig. 7: Verankeringen van natuursteenbekleding.	p. 9
Fig. 8: Overzicht ankers gebruikt voor natuursteenbekleding.	p. 10
Fig. 9: St. Pauls’s Cathedral in Londen: in de koepel treft men ijzeren ringbalken aan	p. 10
Fig. 10: Ijzeren ringbalk in de graftombe van Süleyman de Grote.	p. 11
Fig. 11: Pinakel met ankerstaaf.	p. 11
Fig. 12: Schematische voorstelling procedure van het aangieten met lood.	p. 27
Fig. 13: Twee kanalen worden gekapt in het onderste werkstuk: het grootste kanaal is het gietkanaal, het kleinste is een ontluichtingskanaal.	p. 28
Fig. 14: De ankerstaaf wordt gepositioneerd en gesmolten lood wordt in de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat gegoten.	p. 28
Fig. 15: Het bovenste werkstuk nadat het lood uitgehard is.	p. 29
Fig. 16: Het bovenste werkstuk wordt omgedraaid en op het onderste werkstuk geplaatst.	p. 29
Fig. 17: Gesmolten lood wordt in het gietkanaal gegoten. Het lood vloeit door het gietkanaal om zo de ruimte tussen de ankerstaaf en het gat van het onderste werkstuk te vullen.	p. 29
Fig. 18: Als het lood uit het kleinere kanaal loopt, kan besloten worden dat het aangieten met lood goed uitgevoerd is.	p. 29
Fig. 19: Geometrie van het gat in het werkstuk en van het inoxanker.	p. 30
Fig. 20: Positionering van het inoxanker in het gat.	p. 30
Fig. 21: Aangieten met lood.	p. 30
Fig. 22: Aangieten met lood .	p. 30
Fig. 23: Aangieten met lood en stollen van het lood.	p. 31
Fig. 24: Gestold lood.	p. 31
Fig. 25: Priemen van het lood om lood te verdichten.	p. 31
Fig. 26: Gepriemd lood, eindtoestand verbinding.	p. 31

Fig. 27: PBM's, zoals een gezichtbeschermer, handschoenen en stevige werkkledij. Ook het dragen van een stofmasker is aan te bevelen.	p. 35
Fig. 28: Bij aardbeving ingestorte kolom doordat de houten pinnen weggerot zijn.	p. 36
Fig. 29: Schade aan natuursteen door roestvorming van het ijzer.	p. 36
Fig. 30: Corrosie van anker.	p. 36
Fig. 31: Corrosie van anker.	p. 36
Fig. 32: Model voor elektrochemische corrosie van metalen.	p. 37
Fig. 33: Schematische voorstelling van corrosiereactie voor ijzer – neutrale, beluchte elektrolyt.	p. 38
Fig. 34: Vereenvoudigde voorstelling van het corrosieproces.	p. 39
Fig. 35: Het stadium van de stabiele putgroei.	p. 45
Fig. 36: Mechanisme spleetcorrosie.	p. 46
Fig. 37: Voorbeelden van corrosieaantasting door zuurstofcellen ($E_1 > E_2$).	p. 46
Fig. 38: Horizontale verbinding.	p. 56
Fig. 39: Proefopstelling.	p. 59
Fig. 40: Vervormbaarheid van lood. De loodprop kan ook gemakkelijk verwijderd worden.	p. 60
Fig. 41: Gepolijste monsters 'proefstuk 1600', 'proefstuk 1900' en 'proefstuk 2000-gegoten'.	p. 66
Fig. 42: Principeschets Scanning Electron Microscope.	p. 67
Fig. 43: Full scale analyse (schaal 1/250).	p. 69
Fig. 44: Point scale analyse in een insluitel in het loodmateriaal (schaal 1/5000).	p. 69
Fig. 45: Point scale analyse in een insluitel langs de korrelgrens (schaal 1/1250).	p. 69
Fig. 46: Werkingsprincipe lichtmicroscop.	p. 75
Fig. 47: Vickers indruklichaam.	p. 76
Fig. 48: 'Proefstuk 1600' (schaal 1/240).	p. 77
Fig. 49: 'Proefstuk 1900' (schaal 1/50).	p. 77
Fig. 50: 'Proefstuk 1900' (schaal 1/125).	p. 77
Fig. 51: 'Proefstuk 1900' (schaal 1/240).	p. 77
Fig. 52: 'Proefstuk 2000' (schaal 1/240).	p. 78
Fig. 53: 'Proefstuk 2000-gegoten' (schaal 1/240).	p. 78
Fig. 54: Fasendiagram Ag-Pb.	p. 80
Fig. 55: Fasendiagram Cu-Pb.	P. 80
Fig. 56: Principeschets substitutioneel atoom in een moederrooster van kleinere atomen.	p. 83
Fig. 57: Fasendiagram Pb-Sn.	p. 83
Fig. 58: Precipitatievorming in een tin-loodlegering.	p. 84
Fig. 59: Fasendiagram Sb-Pb legering.	p. 86
Fig. 60: De natte staven worden pas uit de beker gehaald nét voor het aangieten.	p. 90
Fig. 61: De helft van de staven wordt gedroogd in de vlam van de gasbrander.	p. 90
Fig. 62: Positionering van de ronde staven.	p. 92
Fig. 63: Positionering van de rechthoekige staven.	p. 92

Fig. 64: Positionering van de staven in de lege conservenblikken.	p. 92
Fig. 65: Opstelling voor het smelten van lood.	p. 93
Fig. 66: Bovendrijven van afval tijdens het smelten.	p. 93
Fig. 67: Testen of het lood reeds gegoten kan worden.	p. 93
Fig. 68: Aangieten met lood van een ronde staaf.	p. 93
Fig. 69: Persoonlijke beschermingsmiddelen.	p. 93
Fig. 70: De aangegoten en afgekoelde monsters.	p. 94
Fig. 71: Het blik blijft 'plakken' aan het lood.	p. 94
Fig. 72: Afschuren van het gesmolten vertinde of verchroomde blik.	p. 94
Fig. 73: Doorsnede van een toestel voor het uitvoeren van een zoutneveltest (ASTM-norm B117).	p. 95
Fig. 74: Doorsnede van een toestel voor het uitvoeren van een zoutneveltest (ASTM-norm B117).	p. 95
Fig. 75: Zoutneveltoestel aan de KULeuven, departement MTM.	p. 95
Fig. 76: Positionering van de proefmonsters. Deze foto werd genomen nadat de proefmonsters 266 uur aan de zoutneveltest waren onderworpen.	p. 96
Fig. 77: De corrosieproducten die van de staaf van getrokken staal lopen, sluiten de spleet vrij vlug af waardoor geen verder vocht met een hoge concentratie aan zouten in de spleet kan penetreren.	p. 98
Fig. 78: De 24 proefstukken na hun verblijf van 266 uur in het zoutnevelkast en twee weken in de klimaatkast.	p. 99
Fig. 79: Staaf van getrokken staal.	p. 99
Fig. 80: Ronde, inoxen staaf. Materiaalophoging ter hoogte van het scheidingsvlak bovenste en onderste helft van de staaf.	p. 100
Fig. 81: Inoxen staaf met rechthoekige sectie. Materiaalophoging ter hoogte van het scheidingsvlak bovenste en onderste helft van de staaf.	p. 100
Fig. 82: Verbinding van natuursteen met lood zonder ankerstaaf.	p. 109
Fig. 83: Opgieten met lood van een verbinding zonder ankerstaaf.	p. 109
Fig. 84: Gedrag van een marmeren balk en een versterkte marmeren balk op buiging belast.	p. 113

8. Lijst van tabellen

Tabel 1: Samenstelling AISI 304 en AISI 316.	p. 19
Tabel 2: Fysische eigenschappen AISI 304 en AISI 316.	p. 19
Tabel 3: Mechanische eigenschappen AISI 304 en AISI 316.	p. 19
Tabel 4: Samenstelling van enkele loodsoorten.	p. 22
Tabel 5: Mechanische eigenschappen en densiteit van enkele loodsoorten.	p. 23
Tabel 6: Thermische eigenschappen puur lood.	p. 23
Tabel 7: Eigenschappen koper (99.9 %).	p. 25
Tabel 8: Eigenschappen UNS C90700.	p. 25
Tabel 9: Risico's en bescherming.	p. 34
Tabel 10: Verkorte elektrochemische reeks (25 °C, 1 atm, H ₂ O, activiteit gelijk aan één, metalen in standaardtoestand).	p. 40
Tabel 11: Galvanische reeks van enkele commerciële metalen legeringen in zee-water bij 25 °C en 1 atm.	p. 41
Tabel 12: Spanningsreeks in de atmosfeer.	p. 47
Tabel 13: Overzicht van het effect van corrosieve reagentia op brons.	p. 51
Tabel 14: Resultaten.	p. 59
Tabel 15: 'Proefstuk 1600', point scale.	p. 68
Tabel 16: 'Proefstuk 1600', point scale.	p. 68
Tabel 17: 'Proefstuk 1900', point scale.	p. 69
Tabel 18: 'Proefstuk 1900', full scale.	p. 69
Tabel 19: 'Proefstuk 2000-gegoten', full scale.	p. 70
Tabel 20: 'Proefstuk 1600'.	p. 78
Tabel 21: 'Proefstuk 1900'.	p. 78
Tabel 22: 'Proefstuk 2000'.	p. 79
Tabel 23: 'Proefstuk 2000-gegoten'.	p. 79
Tabel 24: Samenvatting resultaten van de proeven uitgevoerd op de vier loodmonsters.	p. 79
Tabel 25: Overzicht van de proefstukken.	p. 91
Tabel 26: Overzicht van de controleproefstukken.	p. 91
Tabel 27: T- en p-voorwaarden voor een temperatuur van 35 °C in nevelkamer.	p. 97
Tabel 28: Eigenschappen glasvezelstaaf (65 % glasvezel, Bekaert Composites).	p. 103
Tabel 29: Mechanische en fysische eigenschappen van zuiver titanium en een legering.	p. 104
Tabel 30: Prijs per kg (Euro) voor enkele constructiematerialen.	p. 105
Tabel 31: Vergelijking eigenschappen epoxymortels (zonder en met vulstof).	p. 108

9. Bibliografie

1. ALBERTI L.B., De re aedificatoria, Derde boek: over constructie, (1450), par. 11.
2. AMOROSO G.G. & FASSINA V., Stone decay and conservation, Amsterdam, Elsevier Science Publishers, (1983).
3. ANGELIDES S., Structural analysis of monuments, In: *The Acropolis: problems-measurements-studies-measures to be taken, 2nd International symposium on the deterioration of building stones*, Athens, 27 Sept.-1 Oct., (1976), p. 19-22.
4. ANGELIDES S., Replacement of steel connections by titanium alloys, In: *The Acropolis: problems-measurements-studies-measures to be taken, 2nd International symposium on the deterioration of building stones*, Athens, 27 Sept.-1 Oct., (1976), p. 95-96.
5. ASHURST J. & N., Practical building conservation, English heritage technical handbook, volume 4: Metals, England (Aldershot), Gover Technical Press, (1989).
6. ASHURST J. & N., Practical building conservation, English heritage technical handbook, volume 5: Wood, glass and resins and technical bibliography, England (Aldershot), Gover Technical Press, (1989).
7. ASHURST J. & DIMES F.G., Conservation of buildings and decorative stone, volume 2, London, Butterworth-Heinemann, (1990).
8. BEDDOES J. & PARR J.G., Introduction to stainless steels, third edition, Ohio, ASM International Materials Park, (1999).
9. BERG K. & BOES, G. & VANDERLINDE J., Encyclopedie van de materialenkennis, Tweede deel, Amsterdam, Agon Elsevier, (1963).
10. BOGAERTS W.F.L., Corrosietypes, algemeen overzicht, beschrijving, herkenning, In: BOGAERTS W., *Handboek constructiematerialen, corrosie en corrosiebescherming: leidraad en naslagwerk*, Diegem, Wolters Kluwer, (1999), p. 51-103.
11. BRED A K., Bijdrage tot de kennis van de geschiedenis, de constructiewijze en de restauratie van de Onze-Lieve-Vrouwekerk te Laken, Brussel, Breda K., (2002).
12. BUDINSKI K.G. & M.R., Materiaalkunde voor technici, 2^e druk, Schoonhoven, Acaemic Service, (1999).

13. CARMAN P.C., Chemical constitution and properties of engineering materials, London, Edward Arnold, (1949).
14. CASANAKI M. e.a, The Acropolis at Athens: conservation, restoration and research 1975-1983, Athens, Committee for the presentation of Acropolis monument, (1985).
15. COWAN H. J., The master builders: a history of structural and environmental design from ancient Egypt to the nineteenth century, New York, Wiley New York, (1977).
16. DAY J. & TYLECOTE R.F., The industrial revolution in metals, London, The Institute of Metals, (1991).
17. ECONOMAKIS R., Acropolis Restoration: the CCAM interventions, London, Academy Editions, (1994).
18. ERCAN S. e.a., The use fibre glass-epoxy system in anastylosis (Solution of the specific technical problems of joining, connecting and integrating of the stone elements), Leuven, (1995).
19. ERCAN S. & PATRICIO T. & VAN BALEN K., The structural restoration of the late Hellenistic Nymphaeum: principles, laboratory test and field applications, In: WAELKENS M. & POBLOME J. (Ed.), *Sagalassos IV (Acta Archeologica Lovaniensia Monographiae 9)*, Leuven, University Press, (1997), p. 423-437.
20. EVANS U.R., The corrosion and oxidation of metals: scientific principles and practical applications, London, Edward Arnold, (1961).
21. FONTANA M.G., Corrosion engineering, New York, Mac Graw-Hill Book Compagny, (1986).
22. GELLINGS P.J., Inleiding tot corrosie en corrosiebestrijding, Twente, Univerity Press, (1997).
23. GRAHAM C.D. & MC MAHON C.J., Introduction to engineering materials, the bicycle and the walkman, Philadelphia, Merionbooks, (1992).
24. GRANT R.M., Lead production, In: BUSCHOW K.H.J., *Encyclopedia of materials: science and technology*, volume 5, Amsterdam, Elsevier, (2001), p. 4439-4442.
25. GROEP MONUMENT, risico-analyse van het aangieten met lood.
26. HABASHI F., A history of metallurgy, Oxford University Press, (1994).

27. HEINRICH K.F.J. & NEWBURY D.E., Electron probe X-ray micro analysis, In: WHAN R.E., *Metals handbook*, volume 10, 9^e editie, Ohio, ASM International Metals Park, (1986), p. 516-535.
28. HUBERTY J.-M., Memento cement en beton, 2^e uitgave, Brussel, Febelcem, (1997)
29. HUBRECHT J., Elektrochemie en corrosie van metalen, In: BOGAERTS W., *Handboek constructiematerialen, corrosie en corrosiebescherming: leidraad en naslagwerk*, Diegem, Wolters Kluwer, (2000), p. 27-58.
30. JONGENBURGER P., Kennis der materialen, deel 1: Mechanische en technologische eigenschappen kristalstructuur, 8^e druk, Delft, Delftsche uitgeversmaatschappij, (1966).
31. KIESEWETTER A. & KIESOW G., Naturwerkstein und umweltschutz in der denkmalpflege, Ulm, Ebner Verlag, (1997).
32. KRUGER J., Lead alloys: corrosion, In: BUSCHOW K.H.J., *Encyclopedia of materials: science and technology*, volume 5, Amsterdam, Elsevier, (2001), p. 4438-4439.
33. LOOD en LOODTOEPASSINGEN IN DE RESTAURATIE, Restauratievademecum, bijdrage 06, Rijksdienst voor de monumentenzorg Zeist, (1987).
34. MASSALSKI T.B., Binary alloy phase diagrams, volume 1, 2nd edition, Ohio, American Society for Metals Park, (1990).
35. MASSALSKI T.B., Binary alloy phase diagrams, volume 2, 2nd edition, Ohio, American Society for Metals Park, (1990).
36. MOENS T, e.a., Het gebruik van titaan en titaanlegeringen in de restauratie, Brussel, VUB, (2001).
37. NEFF D.V., Melting of lead alloys, In: TAYLOR & LYMAN, *Metals handbook, nonferrous molten metal process*, volume 15, 9^e editie, Ohio, ASM International Metals Park, (1988), p. 474-476.
38. NOEL P., Technologie de la pierre de taille: dictionnaire des terme couramment employés dans l'extraction, l'emploi et la conservation de la pierre de taille, Paris, Société de diffusion des techniques du bâtiment et des travaux publics Paris, (1965).
39. ORLANDOS A. K., Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens Grecs, première partie, Paris, E. De Boccard, (1968).

40. PRENGAMAN D.R., Lead Alloys, In: MATUCHA K.H., *Materials science and technology: a comprehensive treatment*, volume 8, Weinheim, VCH, (1996), p. 72-87.
41. PROCOPIUS, Buildings (Griekse tekst met een Engelse vertaling door DEWING, H.B.), London, Heinemann, (1954).
42. ROCHOW T.G. & TUCKER P.A., Introduction to microscopy by means of light, electrons, X-rays or acoustics, 2e editie, New York, Plenum Press, (1994).
43. SMITH J.F., Lead alloys: alloying, properties, and applications, In: BUSCHOW K.H.J., *Encyclopedia of materials: science and technology*, volume 5, Amsterdam, Elsevier, (2001), p. 4434-4438.
44. SKOULIKIDIS T & VASSILIOU P, Corrosion and conservation of building materials of monuments; the Acropolis case, In: SCHORR M., *Corrosion reviews*, volume 17, nr 5-6, London, Freund Publishing House Ltd., (1999), p. 295-332.
45. TANYELI C. & TANYELI U., Structural use of iron in Ottoman Architecture (from the 15th to the early 19th century), In: BREBBIA C. A, *Structural repair and maintenance of historical buildings*, Southampton, Computational Mechanics Publications, (1989), p. 13-22.
46. TEMMINCK G.C.L & WARREMAN H.W., Constructieve aspecten van historische gebouwen, 2^e druk, Delft, Technisch hogeschool Delft, Afdeling bouwkunde, Werkgroep restauratie, (1979).
47. TEUTONICO J.M. & CHAROLA A.E., e.a., Group report: how can we ensure the responsible and effective use of treatments (cleaning, consolidation, protection)?, In: BAER N.S. & SNETHLAGE R., *Dahlem workshop on saving our architectural heritage: conservation of historic stone structures*, Chichester, John Wiley & Sons, (1997), p. 293-313.
48. TORRACA G., Porous building materials, Rome, ICCROM, (1982).
49. VAN BALEN K. & PATRICIO T., Preparative tests for the structural consolidation of the Hellenistic Nymphaeum at Sagalassos, In: WAELEKENS M. & POBLOME J. (Ed.), *Sagalassos III (Acta Archeologica Lovaniensia Monographiae 7)*, Leuven, University Press, (1995), p.165-174.
50. VAN BALEN K. & ERCAN S. & PATRICIO T.C., Compatibility and retreatability versus reversibility: a case study at the late Hellenistic Nymphaeum of Sagalassos

- (Turkey), In: SICKELS L.B. & TAVES, *The use of and need for preservation standards in architectural conservation*, volume ASTM STP 1355, West Conshohocken (PA), American Society for Testing and Materials, (1999), p. 105-118.
51. VANDECASTEELE C. & BLOCK C., Milieuproblemen en –technieken, Leuven, L. Wouters, (1999).
52. VAN DER KLOES J.A., Handleiding voor den metselaar, Leiden, Brill, (1923).
53. VAN GEMERT D., Technologie van de bouwmaterialen, deel 1, Leuven, (1986).
54. VAN GEMERT D., Technologie van de bouwmaterialen, deel 2, Leuven, (1986).
55. VAN GEMERT D., Vernieuwbouw van structuren, Leuven, (2001).
56. VANHOVE D. & DEMEYER L. & DE PAEPE P., Marmer in Hellas, van steengroeve tot kunstwerk, Brussel, Gemeentekrediet van België, (1987).
57. VIOLLET-LE-DUC E.E., Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle, Tome huitième, Paris, B Bance, (1855), restauration.
58. VIOLLET-LE-DUC E.E., Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle, Tome deuxième, Paris, B Bance, (1855).
59. WEAVER M. E. & MATERO F. G., Conserving buildings: guide to techniques and materials, New York, John Wiley & Sons, (1993).
60. WOLLANTS P. & VAN DER BIEST O. & AERNOUDT E., Materiaalkunde voor ingenieurs, 3^e uitgave, Leuven, Acco, (1998).
61. WORCESTER A.W. & O'REILLY J.T., Lead and lead alloys, In: DAVIS J.R. & ALLEN P., *Metals handbook*, volume 2, Ohio, ASM International Metals Park, (1990), p. 543-556.
62. WRANGLER G., An introduction to corrosion and protection of metals, London, Chapman Hall, (1985).
63. WTCB, procedures voor de restauratie van buitenmuren (niet gepubliceerd verslag), (2002).

64. YORULMAZ M. & CILI F. & AHUNBAY Z, Anastylosis of the Apollo Temple in Side/Antalya, Turkey, In: BREBBIA (Ed.), *Structural repair and maintenance of historic buildings*, Southampton, Computational Mechanics Publications, (1989), p. 447-456.
65. ZAMBAS C., Principles for the structural restoration of the Acropolis monuments, In: MARINOS P. G. & KOUKIS C. (Eds.), *Engineering geology of ancient works, monuments and historical sites*, volume 4, Rotterdam, Balkema, (1988), p. 1813-1818.

10. Geraadpleegde internetadressen

1. <http://www.ruraleurope.org/pdf/KRAKOW.pdf>
2. <http://www.trier.de/stadt/porta.htm>
3. <http://www.gent.be>
4. <http://www.digitaalbrussel.vgc.be>
5. http://www.topa.be/nl/antwerpen_onze-lieve-vrouwekathedraal_beschrijving.htm
6. <http://www.eurobru.com/monumo15.htm>
7. <http://www.base24.com/cath.htm>
8. <http://www.mcb.nl/nieuws/mcbnieuws15.html>
9. <http://w3.gsa.gov/web/p/hftp.nsf/035c614b995c0406852565d1006211b3/605b3c7e2a15e dee852565c50054b3e9?OpenDocument>
10. http://www.periodictableonline.org/elem_nl.cfm?IDE=Pb
11. <http://www.matweb.com>
12. <http://w3.gsa.gov/web/p/hftp.nsf/a533f1f859737bc9852565cc0058d0b6/f0c205eec8a1107 a852565c50054b3f8?OpenDocument>
13. <http://www.toxnet.nlm.nih.gov>
14. <http://www.quantchem.kuleuven.ac.be/safety/Veiligheid/toxicologie.html>
15. <http://www.regetox.med.ulg.ac.be>
16. <http://corrosion-doctors.org>

Bijlage 1

* Gegarandeerde analyse (certificaat)

Element	HER * (%) (bladlood)
Pb	99,97
Bi	< 0,025
Ag	< 0,0015
Cu	< 0,0010
As	< 0,0005
Sb	< 0,0003
Sn	< 0,0003
As+Sb+Sn	< 0,0008
Zn	< 0,0005
Fe	< 0,0003
Cd	< 0,0010
Ni	< 0,0003

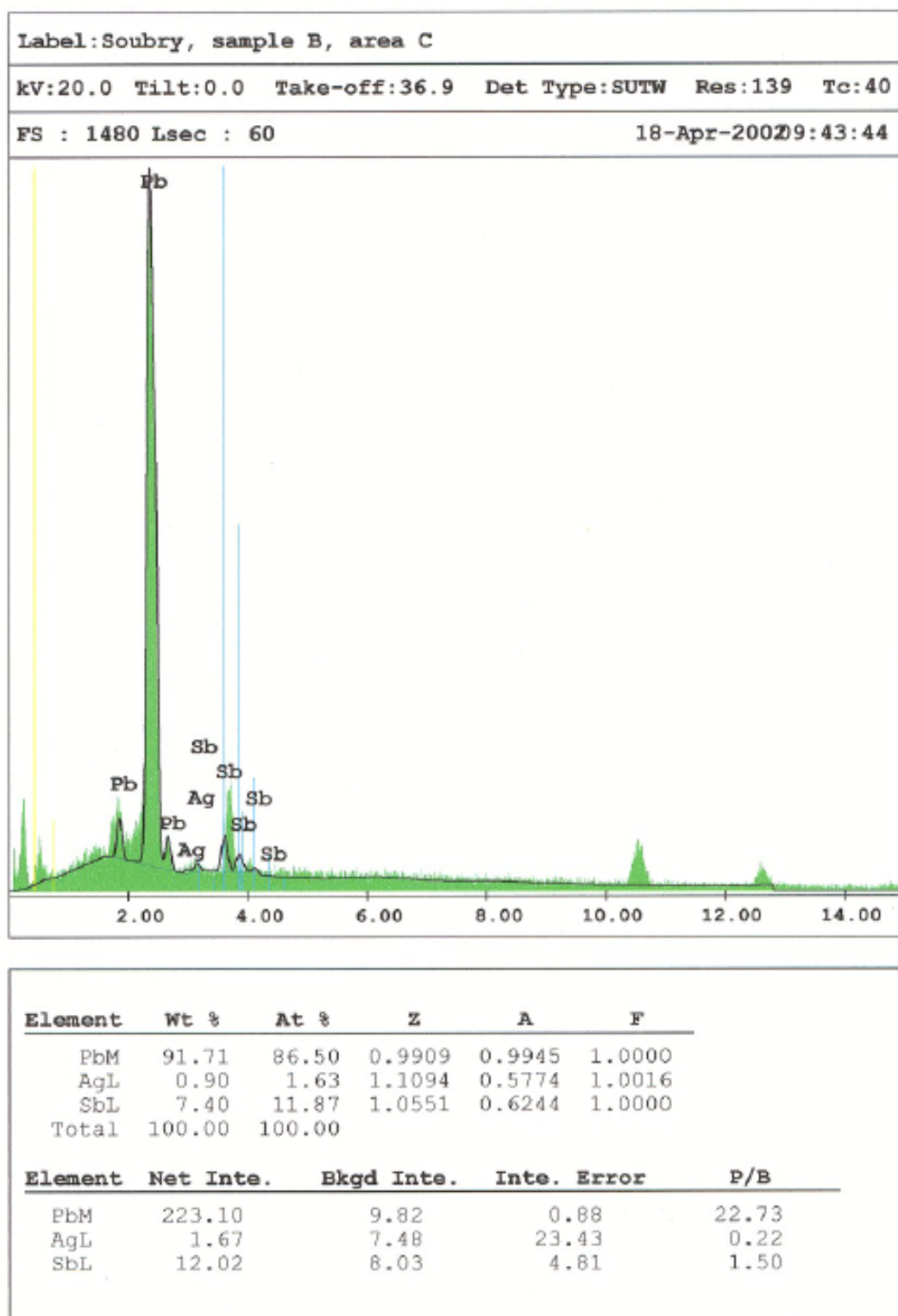
* Typische analyse

Element	HER * (%) (bladlood)
Pb	99,98
Bi	< 0,0230
Ag	< 0,0004
Cu	< 0,0002
As	< 0,0003
Sb	< 0,0002
Sn	< 0,0002
Zn	< 0,0002
Fe	< 0,0001
Cd	< 0,0002
Ni	< 0,0001
Te	< 0,0002
Co	0
In	0

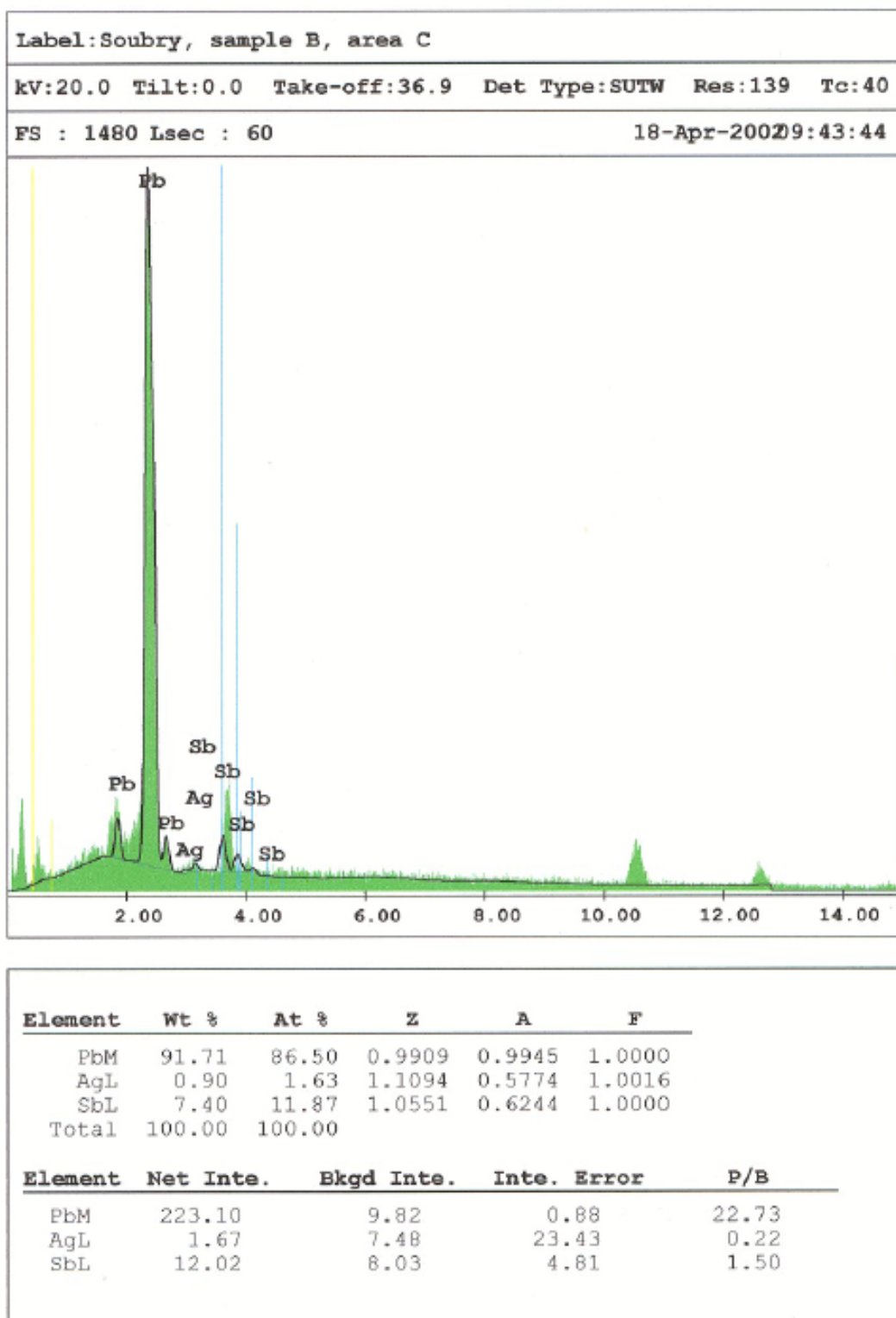
* HER = Hoboken Extra Raffiné 99,97 %

Tabel bijlage 1: Samenstelling hedendaags bladlood (Umicore, A. Greinerstraat 14, B-2660 Hoboken)(paragraaf 4.1.2.).

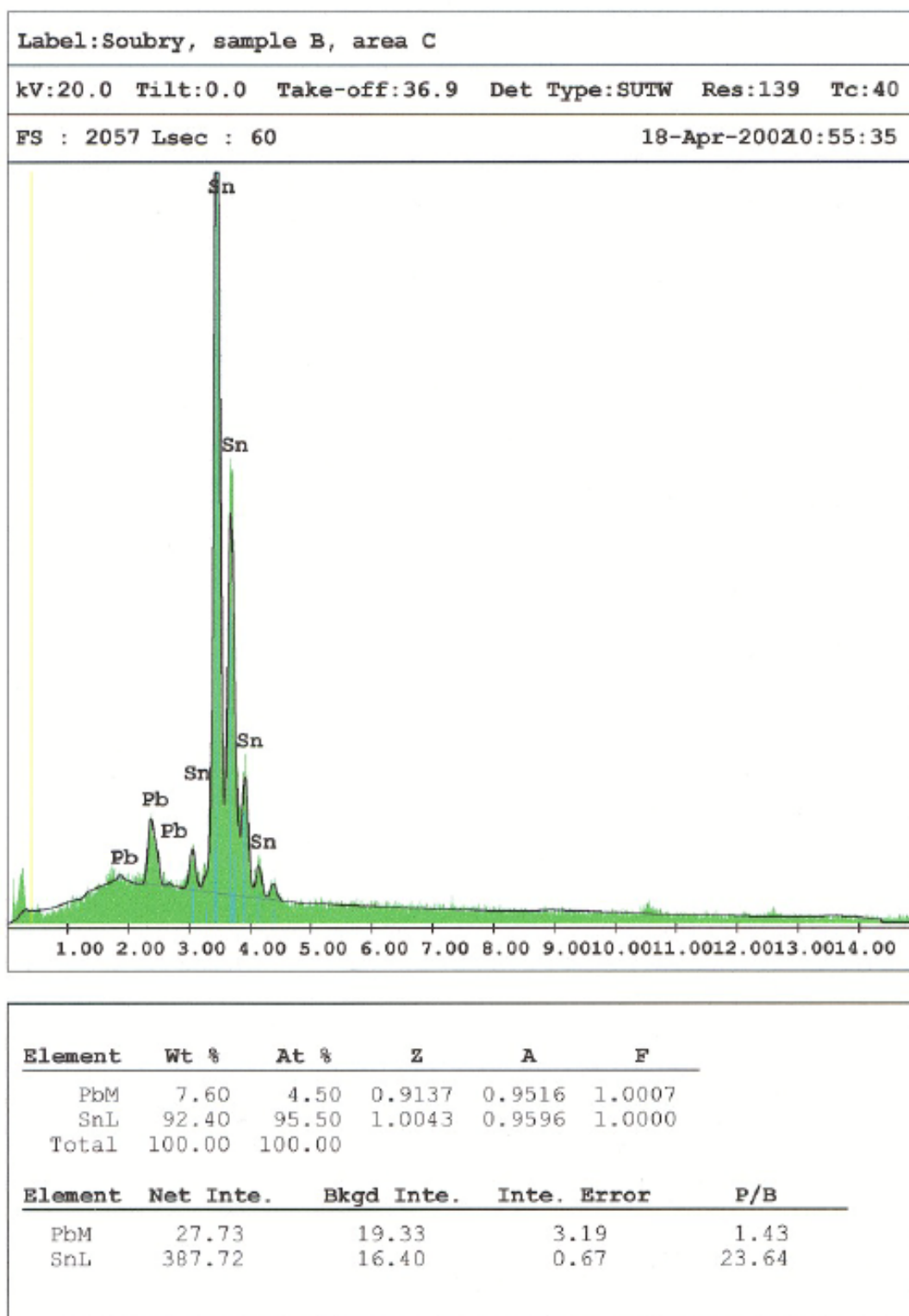
Bijlage 2



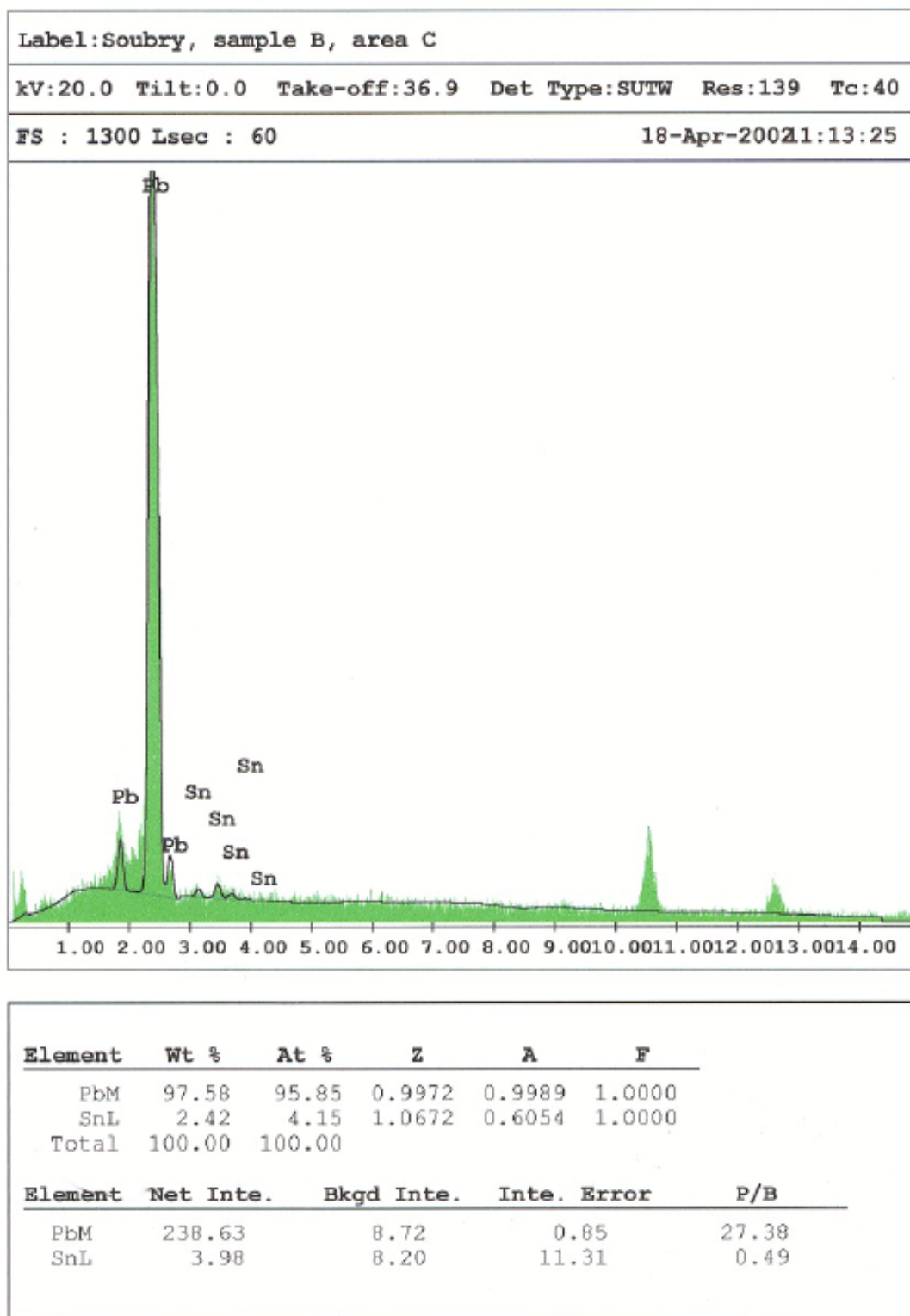
Figuur bijlage 2a: Samenstellingsanalyse 'proefstuk 1600', point scale (paragraaf 4.1.4.).



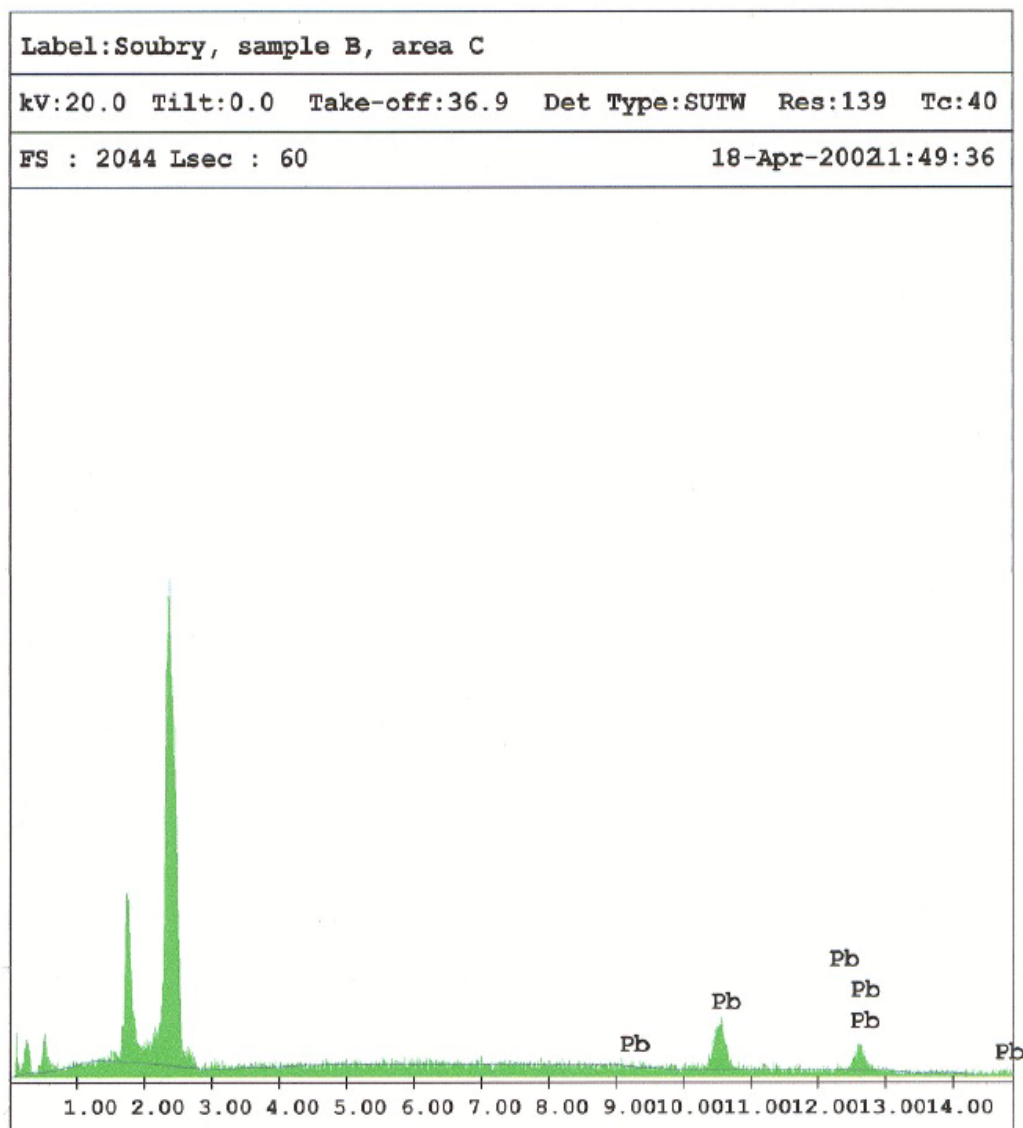
Figuur bijlage 2b: Samenstellingsanalyse 'proefstuk 1600', point scale (paragraaf 4.1.4.).



Figuur bijlage 2c: Samenstellingsanalyse 'proefstuk 1900', point scale (paragraaf 4.1.4.).



Figuur bijlage 2d: Samenstellingsanalyse 'proefstuk 1900', full scale (paragraaf 4.1.4.).



Figuur bijlage 2e: Samenstellingsanalyse ‘proefstuk 2000-gegoten’, full scale (paragraaf 4.1.4.).

Bijlage 3

Hoofdbestand -delen	(in gew. %)	Sporen	(in ppm)
		Ag	-1*
SiO ₂	51.80	Mo	143
Al ₂ O ₃	26.00	Pb	-1*
Fe ₂ O ₃	9.10	Sr	413
TiO ₂	1.00	U	-1*
K ₂ O	4.04	As	-1*
Na ₂ O	0.84	Se	1.5
CaO	3.58	Ti	13.4
MgO	2.46	Zn	213
MnO ₂	0.13	Cu	3
P ₂ O ₃	0.50	Co	-1*
PbO	0.012	Ni	163
BaO	0.008	Cr 3-waardig	336
S	0.14	Cr 6-waardig	-1*
ZnO	0.30	V	187
CuO	0.30	Ba	1492
SrO	0.30	Sb	35
CdO	0.80	Sn	46
Fluor	0.016	Hg	-1*
(* minder dan)		Cd	0.6
		Te	2
		W	142

Tabel bijlage 3: Samenstelling straalmiddel waarmee de staven uit étiré en inox gezandstraald werden voor de zoutneveltest (paragraaf 4.3.2.).

Bijlage 4

Datum	Tijd	Tijdverschil	T (°C)	Centrum			Rand			Vat	Opmerkingen
				Volume	debiet	pH	Volume	debiet	pH		
18/03	14:00	-	-	-	-	-	-	-	-	A	Opstarten
19/03	14:30	24:30	35.5	27.0	1.5	-	36.0	1.5	-	A	
20/03	8:30	18:00	35.5	20.0	1.0	-	20.5	1.0	-	A	
21/03	9:30	25:00	35.0	32.0	1.3	-	33.0	1.3	-	A	
22/03	11:00	25:30	35.5	35.5	1.4	6.2	34.0	1.3	6.3	A	Bijgevuld
	11:30	-	-	-	-	-	-	-	-	A	Proefstukken erin
	16:30	5:30	35.5	8.0	1.5	6.6	7.5	1.4	6.6	A	+ 5 dr HCl 1%
25/03	9:00	64:30	35.0	133.0	2.1	6.9	129.0	2.0	6.5	A	1 ^e evaluatie
26/03	14:30	29:30	34.5	66.0	1.9	7.0	53.0	1.8	7.0	A	
27/03	10:45	20:15	35.0	37.0	1.8	7.0	39.0	1.9	7.0	A	2 ^e evaluatie
28/03	12:00	25:15	35.5	51.0	2.0	6.6	44.0	1.7	6.7	B	
29/03	11:15	23:15	35.5	39.0	1.6	6.7	38.0	1.6	6.7	B	
02/04	9:15	94:00	35.0	-	-	6.8	-	-	6.8	B	Controleproefstukken eruit
	14:00	4:45	-	-	-	-	-	-	-	-	Stop

Tabel bijlage 4: Parameters opgemeten tijdens de zoutneveltest (paragraaf 4.3.3)