1 Fysische verwering

F.J.P.M. Kwaad

Dit hoofdstuk behandelt de mogelijke oorzaken van die vormen van het onder de invloed van weer en wind optredende verlies van gesteentesamenhang, waarbij geen veranderingen optreden in de chemische en/of mineralogische samenstelling van het gesteente. De vormen die het verlies van mechanische gesteentesamenhang kan aannemen, zijn gruisvorming, afbladderen, vorming van hoekig gesteentepuin en het middendoor breken van gesteenteblokken. Een belangrijke voorwaarde voor het optreden der fysische verwering is een zekere porositeit van het gesteente. De fysische verwering treedt vooral op de voorgrond onder klimaten die een frequente vorstwisseling kennen en onder klimaten die gekenmerkt worden door hoge temperaturen en geringe neerslag. De belangrijkste processen van fysische verwering zijn vorstverwering, zoutverwering, insolatie en drukontlasting.

Ook bouwmaterialen, gebouwen, monumenten, bestratingen enz. worden aangetast door de verwering. Dit probleem heeft onder meer de volgende aspecten: het produceren van o.a. weerbestendige baksteen, dakpannen en beton, het conserveren van door stadslucht aangetaste oude gebouwen, en het voorkómen dat stenen kunstwerken als Egyptische obelisken en tempels bij overbrengen naar onze streken door verwering worden aangetast.

1-1 INLEIDING

Wij zullen hier spreken over de aantasting van vaste gesteenten, zoals zandsteen, kalksteen, leisteen en graniet door de tand des tijds. Tengevolge van langdurige blootstelling aan de invloeden van de atmosfeer, de hydrosfeer en de biosfeer kan vast gesteente afschilferen, uiteenvallen tot grotere of kleinere blokken of zelfs tot fijn gruis. In het uiterste geval kan het door chemische reacties van verschillende aard omgezet worden in een produkt, dat geen enkele gelijkenis meer vertoont met het gesteente, waaruit het ontstaan is. Al deze verschijnselen worden samengevat onder de noemer 'verwering'.

De betekenis van de verwering is zeer groot. In de eerste plaats maakt de verwering aardkorstmateriaal mobiel, zodat het verplaatst kan worden door stromend water, wind en gletsjers (massatransport) of door de inwerking van de zwaartekracht alleen (massabeweging). De gesteentemobilisatie door de verwering vormt zo de eerste fase in de ontwikkeling van de vormen van het aardoppervlak; om deze reden is de studie der verweringsverschijnselen een essentieel onderdeel van de fysische geografie. In de tweede plaats ontstaat door de verwering het materiaal, de 'aarde' waarin de hogere planten wortelen, die direct of indirect alle hogere dieren, inclusief de mens, tot voedsel dienen. Op dit aspect van de verwering zal in dit hoofdstuk niet worden ingegaan. Een derde, in tegenstelling tot het vorige als negatief te waarderen, aspect van de verwering is de aantasting van gebouwen, monumenten, bestratingen etc. Hieraan zal in dit hoofdstuk wél enige aandacht worden besteed.

Men kan verwering definiëren als het omzetten

c.q. het ter plaatse uiteenvallen van bestanddelen van de aardkorst onder invloed van fysische, chemische en/of biologische processen, die van buitenaf op de aardkorst inwerken. De toevoeging 'van buitenaf' dient in de eerste plaats om de verweringsverschijnselen te onderscheiden van de omzettingen die in de aardkorst op enige diepte onder het aardoppervlak plaatsvinden onder invloed van de daar heersende verhoogde temperatuur en/of druk. De laatste verschijnselen worden aangeduid met de term 'metamorfe verschijnselen'. Hierbij moet opgemerkt worden, dat het in de praktijk niet altijd even eenvoudig is om uit te maken of bepaalde vormen van het verlies van gesteentesamenhang, b.v. de vergruizing van graniet, nu de produkten zijn van subaërische verwering of van metamorfose. De woorden 'van buitenaf' geven ook aan, dat het gaat om invloeden die het gesteente, van zijn ontstaan uit gezien, vreemd zijn. Vrijwel ieder vast gesteente is ontstaan onder omstandigheden die afwijken van de condities waaraan het aan het aardoppervlak is blootgesteld. Verwering wordt dan ook wel gezien als een reactie van het gesteente op een verandering van omgeving, als een poging zich aan te passen aan nieuwe omstandigheden.

Het is gebruikelijk om bij het bespreken van verweringsverschijnselen en -processen de volgende driedeling aan te houden: *a* fysische of mechanische verwering, *b* chemische verwering, en *c* biologische of organische verwering. Hieruit mag men echter niet afleiden, dat op plaatsen waar de processen van fysische verwering actief zijn, geen chemische verwering zou (kunnen) plaatsvinden en omgekeerd. In feite is de aantasting van gesteenten door de verwering in de meeste gevallen terug te voeren op het samenwerken van zowel fysische als chemische processen van verschillende aard.

Fysische verwering is het verlies van gesteentesamenhang, uitsluitend teweeggebracht door mechanische beïnvloeding van het gesteente. Hierbij treden geen veranderingen op in de chemische samenstelling van het gesteente.

Chemische verwering is aantasting van het gesteente door water met daarin opgeloste stoffen. De chemische reacties die hierbij optreden, leiden tot veranderingen in de mineralogische en chemische samenstelling van het gesteente, onder meer doordat bepaalde bestanddelen van het gesteente in oplossing gaan en afgevoerd worden. Hierbij moet men wel bedenken, dat het soms om chemische reacties gaat, waarbij slechts een gering gedeelte van het totale gesteentevolume is betrokken, doch waarvan het effect een volledig uiteenvallen van het gesteente kan zijn. Leopold, Wolman en Miller (1964, p.99) zeggen hierover het volgende: 'Extensive disaggregation resulting from chemical action on grain boundaries would be expected to be accompanied by but slight changes in average chemical composition. Confusion on this point has led to the overemphasis of "physical weathering" because the importance of chemical action in this disaggregation was not appreciated.' Het volume-aandeel van het gesteente, dat betrokken is bij de tot het verlies van gesteentesamenhang leidende chemische omzettingen is volgens Birot (1962) soms niet groter dan 5 à 6%.

Een zaak, die in deze samenhang aandacht verdient, is de volgorde waarin de fysische en chemische verwering optreden. Vaak wordt gezegd dat de fysische verwering zou optreden als wegbereider voor de chemische verwering door vergroting van het totale oppervlak van een bepaald gesteentevolume. Dit is echter zeker geen algemeen geldige wetmatigheid; de omgekeerde volgorde komt ook voor. Zo komt Tricart (1956, p. 303) op grond van vorstverweringsexperimenten tot de conclusie: 'L'altération, quelle que soit son origine, fraie la voie à la gélivation.' Ook Martini (1967) vestigt er de aandacht op, dat het effect van de vorstverwering – een proces van fysische verwering – groter is naarmate het gesteente een intensievere chemische vóórwering heeft ondergaan. Op bepaalde gesteenten in volkomen gezonde toestand zou volgens hem vorst geen enkel effect sorteren.

Biologische verwering is de aantasting van het gesteente door de activiteiten van plant en dier. Vooral bij de beginnende verwering van kale gesteenteoppervlakken kunnen micro-organismen en lagere planten een belangrijke rol spelen (Bakker 1970). Van veel grotere betekenis echter is de rol die het organisch leven vervult bij de op de verwering volgende bodemvorming.

Het vervolg van dit hoofdstuk is uitsluitend gewijd aan een bespreking van de belangrijkste processen van fysische verwering en de condities waaronder deze processen optreden. De belangrijkste vormen van gesteentedesintegratie, waarbij de verschillende processen der fysische verwering een rol zouden (kunnen) spelen, zijn: *a* gruisvorming aan het oppervlak van dagzomende gesteenten, *b* desquamatie, d.i. het loslaten van dunnere en dikkere gesteenteschilfers, -schubben en -platen, parallel aan het oppervlak van het gesteente (zie fig. 1-2 en 1-5), *c* 'Kernsprunge', dit zijn langs een of enkele gladde vlakken midden-

door gebroken rolstenen en grotere gesteenteblokken (zie fig. 1-3), en *d* vorming van scherp, hoeking gesteentepuin.

Voor een uitgebreidere bespreking van deze verweringsvormen zij verwezen naar de boeken van Wilhelmy (1958) en Ollier (1969).

1-2 OORZAKEN VAN FYSISCHE VERWERING

Welke mogelijke oorzaken zijn er nu aan te wijzen voor de vormen van het verlies van gesteentesamenhang die aan het slot van de vorige paragraaf genoemd zijn en niet met een verandering in de chemische en/of mineralogische samenstelling van het gesteente gepaard gaan? Dat zijn er verschillende, die alle één ding gemeen hebben, het optreden van mechanische spanningen die niet volledig door het gesteente kunnen worden opgenomen: *a* drukontlasting, *b* afwisselende verhitting door bestraling door de zon (insolatie) en afkoeling van droog gesteente, *c* verhitting van gesteente waarvan de poriën gevuld zijn met water, *d* bevriezen van water in gesteenteporiën, *e* uitkristalliseren van zouten in gesteenteporiën, *f* zwellen van klei in gesteenteporiën door het opnemen van water(-damp), en *g* organische invloeden.

Birot (1962) geeft een vrij diepgaande bespreking van het mechanisme van de eerste zes processen, waaraan in het volgende het een en ander is ontleend.

1-2-1 Voorwaarden voor het optreden van fysische verwering

Gesteente-eigenschappen. Uit bovenstaand overzicht blijkt, dat een zekere porositeit van het gesteente een noodzakelijke voorwaarde is voor het optreden van het merendeel van genoemde processen. Hiermee is namelijk de mogelijkheid gegeven tot het binnendringen in het gesteente van bepaalde gesteentevreemde stoffen, waarvan de belangrijkste wel water is. Deze porositeit kan ontstaan zijn door een chemische voorverwering van het gesteente (zie het citaat van Tricart op p. 4), doch in de meeste gevallen is een zekere porositeit van het gesteente primair aanwezig. Op macroschaal kan een gesteente banen bevatten, waarlangs water kan binnendringen en circuleren in de vorm van:

a laagvlakken (afzettingsgesteenten);

b afzonderingsvlakken, ontstaan door krimp t.g.v. afkoeling of door drukontlasting;

c diaklasen, in massieve gesteenten voorkomende scheidingsvlakken die het gesteente soms doen gelijken op een uit grote blokken opgetrokken muur; diaklasen komen nooit alleen voor, doch altijd in systemen; de tot één systeem behorende diaklasen lopen op min of meer gelijke onderlinge afstanden evenwijdig aan elkaar; vaak komen in één gesteente verschillende diaklaassystemen voor, die een hoek met elkaar maken;

d schistositeit, splijting (in veel metamorfe gesteenten zoals leisteen).

Op microschaal kunnen van belang zijn:

a grensvlakken tussen mineralen, kristalindividuen of andere gesteente-elementen;

b splijtvlakken binnen een mineraal, b.v. mica;

c breukvlakken binnen een mineraal, b.v. kwarts.

Dit alles betreft de porositeit van natuursteen. De porositeit van grofkeramische produkten, zoals dakpannen, is van andere aard en wordt o.a. bepaald door de baktemperatuur, de mineralo-

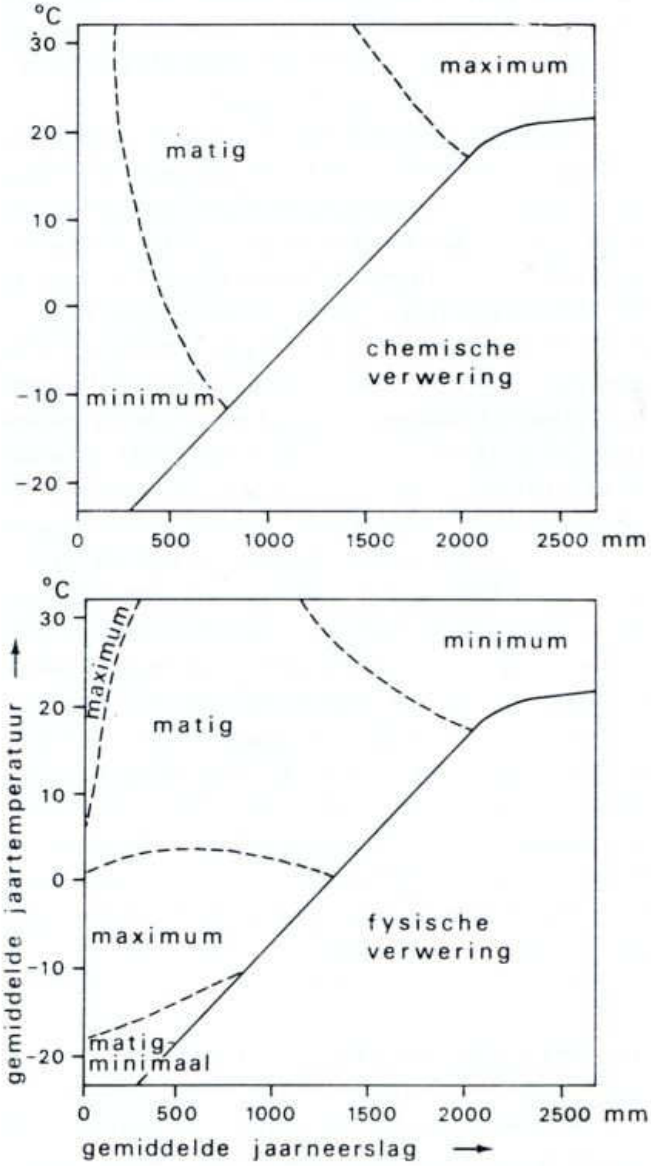

Fig. 1-1. Relatie klimaat-verwering. (Uit Wilson 1968.)

gische samenstelling van de gebruikte klei en de aard van bepaalde speciaal toegevoegde stoffen als zand, zaagsel, vliegas, polystyrol enz. (Rijken 1970). Bij beton maakt men onderscheid tussen gelporiën, die ontstaan bij de hydratatie van het cement, met water gevulde capillaire poriën en kogelvormige luchtporiën (Schäfer 1964). (De schrijver is dank verschuldigd aan Drs. W. Oosterbaan voor deze en enige andere literatuurverwijzingen betreffende de verwering van bouwmaterialen.)

Klimaatcondities. Welke klimatologische omstandigheden gunstig zijn voor het optreden van een bepaald verweringsproces wordt bepaald door de aard van het betreffende proces. Men kan dan twee groepen van klimaten aanwijzen, waaronder de fysische verwering op de voorgrond treedt, zonder dat de chemische verwering volledig van het toneel verdwijnt (zie figuur 1-1):

a klimaten, gekenmerkt door een frequente overschrijding van de 0°C bij aanwezigheid van voldoende water, aanleiding gevend tot vorstverwering (o.a. in hooggebergten);

b klimaten, gekenmerkt door hoge temperaturen in combinatie met een geringe neerslag, voorkomend in de woestijngebieden op aarde. De hoge temperaturen zouden aanleiding geven tot verwering door insolatie, het overheersen van de verdamping over de neerslag tot zoutverwering.

De laatste jaren blijkt steeds duidelijker dat eigenlijk nog een derde klimaat gunstig is voor het optreden van een bepaald proces van fysische verwering, de zoutverwering: dit is het klimaat met de extreem lage temperaturen, dat heerst in de poolgebieden, met name in Antarctica. In Antarctica is de neerslag zeer gering en kan de luchtvochtigheid dalen tot zeer lage waarden. Het is een echte koude woestijn, waarin duidelijk verschijnselen van zoutverwering zijn waargenomen.

Voorts kunnen er door lokale omstandigheden binnen humide macroklimaten aride microklimaten voorkomen met de daarbij behorende verweringsverschijnselen, b.v. de aride verweringsvormen der kale granieteilandbergen in de vochtige tropen. Ook bij de verwering van gebouwen in onze streken kunnen vorst- en zoutverwering een belangrijke rol spelen.

1-2-2 Processen der fysische verwering

Drukontlasting. Hoewel geen verwering in de zin van 'veroorzaakt door de directe invloed van het weer', wordt het losspringen van dikke, enigszins gebogen gesteenteplaten evenwijdig aan het oppervlak van het gesteente (fig. 1-2) door de meeste auteurs gerekend tot de fysische verwering, omdat het een verlies van gesteentesamenhang betreft dat wordt veroorzaakt door de nabijheid van het aardoppervlak. Het verschijnsel wordt toegeschreven aan het wegvallen van de druk waaraan ieder gesteente diep in de aardkorst blootstaat en waardoor het in een spanningstoestand verkeert. Het wegvallen van de druk wordt veroorzaakt door de verwijdering door erosie en denudatie van de hoger gelegen gesteentemassa's.

Fig. 1-2. Desquamatie van graniet, mogelijkerwijs veroorzaakt door drukontlasting. Zulova, Tsjecho-Slowakije. (Foto dr. J. Demek, Brno.)

Drukontlasting speelt waarschijnlijk een belangrijke rol bij de ontwikkeling van de z.g. eilandbergen in graniet (Wilhelmy 1958, Ollier 1969). Het treedt ook op bij de aanleg van tunnels in vast gesteente, waarbij de van de tunnelwanden afspringende schaalvormige gesteentefragmenten doorgaans niet meer zijn aan te passen op het breukvlak, een aanwijzing voor de spanningstoestand waarin het afgesprongen gesteentefragment verkeerde. Drukontlasting kan mogelijkerwijs ook de schubben en schalen voortekenen, welke uiteindelijk door insolatie of zoutverwering worden losgemaakt.

Insolatie. De insolatiehypothese, die in de tweede helft van de vorige eeuw is opgesteld ter verklaring van gruisvorming, desquamatie en het ontstaan van 'Kernsprunge' in woestijngebieden, houdt in dat er tot breuk leidende spanningen in het gesteente ontstaan onder invloed van de sterke verhitting van het gesteente door de zonne-

straling (insolatie). Vooral de afwisseling met een sterke nachtelijke afkoeling zou op de lange duur aanleiding geven tot materiaalmoeheidsverschijnselen. In woestijngebieden kan overdag de temperatuur van het bodemoppervlak waarden bereiken van 60, 70 of zelfs 80°C., gevolgd door nachtelijke minima van 15 tot 25°C. Verschillende auteurs vermelden nog, dat ook snelle afkoeling tengevolge van een plotselinge regenbui bijzonder desastreus voor het gesteente kan zijn. De insolatiehypothese werd in de periode 1900-1935 algemeen als juist aanvaard. Blackwelder (1933) spreekt van 'the dogma of insolation'. Sinds de experimenten van o.a. Griggs (1936), waarover hierna meer, is de insolatiehypothese een omstreden zaak.

Waardoor ontstaan in het algemeen thermische spanningen? De meeste stoffen, ook mineralen en gesteenten, zetten uit bij verhitting, waarbij het bedrag van de lengte- of volumetoename evenredig is met het bedrag waarmee de temperatuur verhoogd wordt. Deze evenredigheid komt tot uitdrukking in de uitzettingscoëfficiënt van de stof, welke is gedefinieerd als de lengte- of volumetoename (lineaire resp. kubieke uitzettingscoëfficiënt) bij een temperatuurverhoging van één graad. Wanneer niets de warmteuitzetting van een lichaam in de weg staat, ontstaan geen spanningen. Wanneer echter de warmteuitzetting van een lichaam wordt verhinderd, hetzij door zijn omgeving, hetzij doordat de temperatuur van verschillende delen van het lichaam met een verschillend bedrag wordt verhoogd, komt het lichaam in een spanningstoestand te verkeren. Men kan het vergelijken met de toename van de spanning van een autoband tijdens het rijden. Door de temperatuurstijging die veroorzaakt wordt door de wrijving met het wegdek, wil de lucht in de band uitzetten. Dit is niet mogelijk, de lucht wordt bij de hogere temperatuur als het ware samengeperst; hierdoor stijgt de spanning van de band. De in een vaste stof optredende spanning (s) is recht evenredig met het bedrag van de temperatuurverhoging (T), de uitzettingscoëfficiënt (a) van de stof en de elasticiteits- of Young's modulus (E) van deze stof, d.i. een materiaalconstante die bepalend is voor de mate van vervorming die optreedt, wanneer er op een lichaam een kracht wordt uitgeoefend. In formulevorm: $s = EaT$. Thermische spanningen leiden tot breuk, wanneer het bedrag van de spanning de sterkte van het materiaal te boven gaat.

Terug naar onze gesteenten. De insolatiehypothese kent twee varianten. De eerste variant laat spanningen ontstaan, doordat de vrije thermische uitzetting van het door de zon bestraalde gesteenteoppervlak wordt verhinderd door de koelere, dieper gelegen massa van het gesteente. Hierdoor zou het afspringen van schilfers en schubben parallel aan het gesteenteoppervlak veroorzaakt worden. De tweede variant schrijft het ontstaan van spanningen toe aan verschillen in de thermische eigenschappen van de mineralen waaruit het gesteente is opgebouwd (warmte-opnemend vermogen, soortelijke warmte, uitzettingscoëfficiënt etc.). Hierdoor zou gruisvorming aan het oppervlak van grofkorrelige gesteenten veroorzaakt worden.

De insolatiehypothese heeft door de experimenten van Tarr (1915), Blackwelder (1925) en Griggs (1936) voor vele onderzoekers sterk aan geloofwaardigheid ingeboet. Een van deze experimenten bestond uit een 89 400 × herhaalde droge verhitting van een graniethandstuk van 32 tot 142°C, zonder dat hierdoor ook maar het geringste scheurtje of barstje in het proefblok ontstond, terwijl de spanning tengevolge van de temperatuurgradiënt in het handstuk volgens Griggs 21,1 × zo hoog was als bij blootstelling onder natuurlijke omstandigheden van hetzelfde gesteente aan een dagelijkse temperatuurgang van 60°C. Ook de spanningen tengevolge van verschillen in de uitzettingscoëfficiënten van de verschillende mineralen waren onder de condities van het experiment waarschijnlijk groter dan in de natuur het geval is.

Voorts heeft de insolatiehypothese veel terrein verloren doordat is gebleken, dat er onder omstandigheden die als extreem gunstig moeten worden beschouwd voor verwering door insolatie, zoals de kerngebieden van woestijnen en de naar de zon toegewende zijden van gesteenteblokken, eigenlijk nauwelijks iets van verwering te merken is, terwijl er in de minder droge randgebieden der woestijnen, aan de schaduwzijde van gesteenteblokken en vooral op de in het zand begraven gedeelten van gesteenteblokken wél verwering optreedt. Het is wel zeker, dat dit het gevolg is van de aanwezigheid van wat vocht onder deze condities. Dit is in overeenstemming met de resultaten van Griggs die, toen hij het granietblok ging afkoelen met water in plaats van met een ventilator, na zeer korte tijd duidelijke verweringsverschijnselen kon waarnemen.

Dat de insolatiehypothese toch niet helemaal verlaten is en nog regelmatig in de literatuur opduikt, komt in de eerste plaats doordat men twijfelt aan de bewijskracht van de bovenvermelde experimenten vanwege de moeilijkheid om materiaalmoeheidsverschijnselen, welke in geologisch lange tijdsperioden zouden kunnen optreden, ex-

perimenteel op te wekken, en in de tweede plaats doordat men eigenlijk geen andere verklaring weet voor bepaalde verschijnselen, zoals het langs messcherpe vlakken middendoor breken van vuurstenen, kwartsietrolstenen en grotere blokken in warm-aride gebieden (zie fig. 1-3).

De insolatiehypothese is recentelijk wat sterker komen te staan door het onderzoek door Gray (1965) van de thermische spanningen die optreden bij het maken van mijngangen met behulp van de 'jet-flame'-methode. Bij deze methode wordt het gesteente tot mechanische desintegratie gebracht door het gesteenteoppervlak bloot te stellen aan snelle verhitting. De desintegratie bestaat uit het parallel aan het gesteenteoppervlak loslaten van schaalvormige gesteentefragmenten, welke qua vorm niet verschillen van de desquamatieschubben die aan het aardoppervlak door verwering ontstaan. Het proces wordt in het Engels 'spalling' genoemd. De dikte van de 'spalls' is waarschijnlijk omgekeerd evenredig met de temperatuurgradiënt; dus hoe sneller de temperatuur afneemt met toenemende afstand tot het gesteenteoppervlak, hoe dunner de 'spalls' zijn. Gray kwam op theoretische gronden tot onverwacht lage schattingen voor de temperatuurverhoging die nodig is om 'spalling' te veroorzaken. Metingen van de gesteentetemperatuur bevestigden echter dat een betrekkelijk geringe temperatuurverhoging – in één geval werd een ΔT van 61°C vastgesteld – inderdaad voldoende kan zijn voor het veroorzaken van 'spalling'.

Een verklaring voor de discrepantie tussen de experimentele resultaten van Gray en Griggs kan mogelijk gevonden worden in de omstandigheid dat Griggs heeft geëxperimenteerd met een uit zijn omgeving losgemaakt gesteenteblok, waardoor een zekere mate van vrije thermische expansie mogelijk was en de spanningen toch minder hoog opliepen dan Griggs veronderstelde, terwijl Gray het gesteente in zijn natuurlijke verband blootstelde aan verhitting, waardoor er geen enkele mogelijkheid tot vrije thermische expansie bestond.

Verhitting van nat gesteente. Birot (1962) heeft een chemisch inert gesteente als kwartszandsteen ondergedompeld in gedestilleerd water en gedurende 4 maanden blootgesteld aan een dagelijkse temperatuurschommeling tussen 20 en 70°C. Dit leverde een materiaalverlies op van 50 mg per 100 g monster. Birot schrijft dit toe aan spanningen die in het gesteente optreden tengevolge van de verhinderde thermische uitzetting van in gesteenteporiën opgesloten water. De verhitting van water zou volgens hem tot grotere spanningen

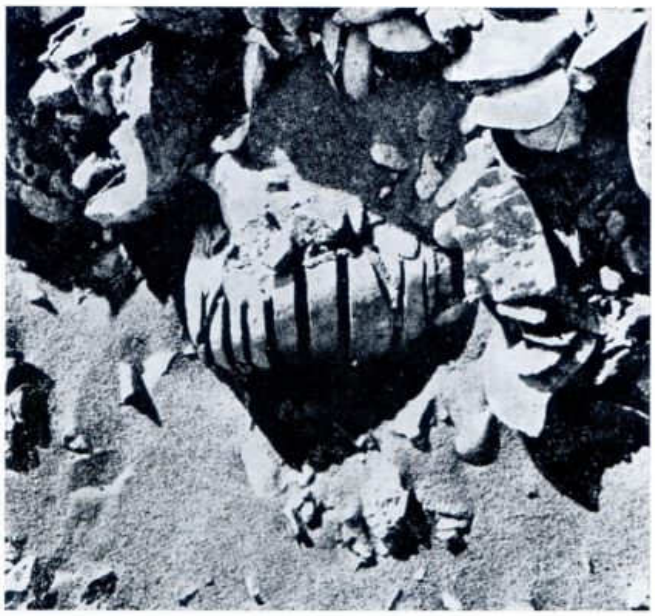

Fig. 1-3. 'Kernsprunge', toegeschreven aan insolatie. (Uit Wilhelmy 1958).

aanleiding geven dan de verhitting van droog gesteente, doordat de uitzettingscoëfficiënt van water ongeveer 100× zo groot is als de uitzettingscoëfficiënten der meeste gesteentevormende mineralen. Wanneer men echter met behulp van de formule $Pb = a/c$ (waarin a = kubieke uitzettingscoëfficiënt, b = spanningscoëfficiënt, c = compressibiliteit en P = druk) de druk berekent die wordt opgebouwd wanneer men het volume constant houdt bij verhitting van kwarts en water van 20 tot 60°C, dan komt men voor kwarts op een waarde van 545 atm. (Correns 1968) en voor water op ca. 350 atm. De reden hiervan is dat de compressibiliteit (samendrukbaarheid) van water zóveel groter is dan die van kwarts, dat hierdoor het effect van de vele malen grotere uitzettingscoëfficiënt van water volledig wordt tenietgedaan. Bovendien is niet goed in te zien, waarom het water niet uit de gesteenteporiën zou kunnen ontwijken. De juistheid van de verklaring die Birot geeft voor zijn experimentele resultaten moet dus in twijfel getrokken worden.

Vorstverwering. Het bevriezen van water in spleten, barsten en andere primaire of secundaire holle ruimten in het gesteente wordt door vele onderzoekers beschouwd als het belangrijkste proces van de fysische verwering. De effectiviteit van het proces wordt door geen enkele onderzoeker in twijfel getrokken, wél lopen de meningen uiteen over het mechanisme van het proces. De produkten van de vorstverwering zijn in de vorm van hoekig gesteentepuin en scherpkantige blokken overal waar te nemen waar bij aanwezigheid

van water de temperatuur regelmatig in beide richtingen het vriespunt passeert. Met name op de kale toppen der hooggebergten heeft de vorstverwering vrij spel (fig. 1-4). Het graatkarakter dat deze toppen soms hebben is voor een belangrijk deel het gevolg van de werkzaamheid van de vorstverwering. Vorstverweringsmateriaal wordt als fossiel verschijnsel ook aangetroffen in die gebieden, die de invloed hebben ondergaan van de pleistocene ijstijden.

Het bevriezen van water in poreuze materialen, zoals gesteenten, grond, keramische produkten en beton, is een fysisch gecompliceerde zaak, waaraan veel onderzoek is verricht door civiel-ingenieurs en natuurkundigen. De spanningen die optreden, worden doorgaans toegeschreven aan één van de volgende oorzaken of een combinatie ervan (zie Birot 1962):

a De volumetoename van 9% bij de faseovergang water-ijs, die alleen voorkomen kan worden door een druk op het water uit te oefenen. Deze druk bereikt een maximale waarde van 2115 kg/cm^2 bij een temperatuur van −22°C. Ter vergelijking: de drukvastheid van zandsteen loopt van 500-1500 kg/cm^2, die van kalksteen 400-1400 kg/cm^2, die van graniet en verwante gesteenten 1000-2800 kg/cm^2, en die van basalt tot meer dan 4000 kg/cm^2. De trekvastheid bedraagt gemiddeld 1/30 deel van de drukvastheid.

Een noodzakelijke voorwaarde voor het op deze wijze ontstaan van spanningen is, dat het water de gesteenteporie waarin het zich bevindt voor meer dan 9/10 deel vult en niet uit de porie kan ontwijken, evenmin als het zich vormende ijs. Birot vestigt er bovendien de aandacht op, dat de op een bepaald gesteentevolume uitgeoefende druk afhankelijk is van de hoeveelheid water die aanwezig is in dat gesteentevolume en die ongeveer gelijk is aan de porositeit van het gesteente. Zijn redenering is, dat het effect van één met water gevulde porie geringer zal zijn dan het effect van meerdere met water gevulde poriën die in hetzelfde gesteentevolume voorkomen. Volgens Birot is de spanning, waaraan het gesteente komt bloot te staan gelijk aan een door de porositeit aangegeven percentage van de druk die nodig is om bevriezen te voorkomen, b.v. temperatuur −10°C, benodigde druk om bevriezen te voorkomen 1120 atm., porositeit 3%, op het gesteente uitgeoefende spanning 33,6 atm.

b Een oorzaak van het optreden van spanningen, die door Powers voor beton – met zijn veel talrijker en veel fijnere poriën dan natuursteen – is nagegaan, is de hydraulische druk die wordt

Fig. 1-4. Door vorstverwering aangetaste toppen in het hooggebergte. Drei Zinnen, Dolomieten.

uitgeoefend door het nog niet bevroren water, dat door het zich vormende ijs wordt samengeperst. Een grote permeabiliteit (doorlatendheid) van het beton zou het op deze wijze ontstaan van spanningen verhinderen, omdat dan het water sneller uit de poriën kan ontwijken dan het vorstfront het gesteente kan binnendringen. Anders geformuleerd: gegeven een bepaalde afkoelingssnelheid, neemt de vorstgevoeligheid af met toenemende permeabiliteit; gegeven een bepaalde permeabiliteit neemt de vorstgevoeligheid toe met de afkoelingssnelheid.

c De derde en volgens velen meest belangrijke oorzaak voor het optreden van spanningen door bevriezing is het aangroeien van het ijs in de grotere gesteenteporiën, een groei die de neiging heeft door te gaan zelfs wanneer de betreffende gesteenteporie volledig gevuld is met ijs. Hierdoor kan een druk worden opgebouwd die het gesteente niet kan weerstaan. Dit mechanisme impliceert een waterbeweging in het gesteente naar de groeiende ijskristallen toe, door Lliboutry (1965) cryo-osmose genoemd. In ongeconsolideerd bodemmateriaal leidt dit groeiproces, dat in 1930 door Taber experimenteel aangetoond is, tot de vorming van ijslenzen. Dit is de oorzaak van het opvriezen van wegen, dat vooral in landen met zeer strenge winters een groot probleem is (Thoenes 1960).

Zaken die om een verklaring vragen zijn o.a. de oorsprong van het vermogen van het groeiende ijs om een tegendruk te overwinnen, de aard van de drijvende kracht van de waterbeweging in het gesteente of de bodem, en de empirisch gevonden

relatie tussen de afmetingen van de poriën en de grootte van de uitgeoefende kracht. Aanzetten tot een theorievorming op dit gebied, gebaseerd op de principes der thermodynamica, worden o.a. gegeven door Gold (1957), Penner (1958), Jackson en Chalmers (1958) en Everett (1961). Wij kunnen hier in dit boek niet nader op ingaan.

Zeer belangrijke eigenschappen van een vast gesteente in verband met zijn vorstgevoeligheid c.q. vorstbestendigheid zijn de porositeit (totaal poriënvolume) en de afmetingen van de afzonderlijke poriën (poriëngrootteverdeling). Birot (1962) geeft een waarde van de porositeit van 3-6%, waarbij de vorstgevoeligheid maximaal zou zijn. Zowel een geringere als een hogere waarde zouden samengaan met een minder grote vorstgevoeligheid. Wiman (1963) vond experimenteel een toename van de hoeveelheid vorstverweringsgruis bij een toename van het totaal poriënvolume. Everett (1961) komt op theoretische gronden tot de slotsom, dat het voorkomen van met water gevulde grove poriën, met elkaar verbonden door met water gevulde kleine poriën, een factor is die bijdraagt tot de vorstgevoeligheid van poreuze stoffen. Volgens Powers is voor het optreden van een hydraulische druk in beton van groot belang de afstand tussen de door zeer fijne 'gelporiën' van elkaar gescheiden met water gevulde capillaire poriën en de z.g. luchtporiën. Hoe kleiner deze afstand is, hoe gemakkelijker het water uit de capillaire poriën kan ontwijken naar de luchtporiën en hoe groter de vorstbestendigheid van het beton is. Rijken (1970) komt tot de conclusie, dat de vorstbestendigheid van dakpannen toeneemt met het aantal grove poriën (groter dan 1μ). Niet vorstbestendige pannen hebben een hoog percentage fijne poriën (kleiner dan 0,25μ). Lautridou (1971) heeft experimenteel vastgesteld, dat de aanwezigheid van poriën met een straal tussen 0,1 en 1μ bijdraagt tot de vorstgevoeligheid van kalksteen.

Gedurende vele jaren heeft men, in navolging van Hirschwald (1912), gemeend, dat een verzadigingsgraad van 80% – d.w.z. dat 8/10 deel van het totaal poriënvolume gevuld is met water – een kritieke grens is, waarbeneden het gesteente niet en waarboven het gesteente wél vorstgevoelig is. Theoretisch zou de grenswaarde moeten liggen bij 91%. Op proefondervindelijke basis heeft Hirschwald, werkend met natuursteen, de grens echter bij 80% gelegd. Recentelijk is gebleken, dat de verzadigingsgraad toch niet erg goed gecorreleerd is met de vorstgevoeligheid van keramische produkten en beton.

Condities die het optreden van vorstverwering bevorderen zijn, in volgorde van belangrijkheid: *a* frequente overschrijding van het vriespunt, *b* snelle temperatuurdaling, en *c* strenge vorst.

Tricart (1956) heeft experimenteel gesteentemonsters (vnl. kalksteen) blootgesteld aan vorstverwering onder twee klimaattypen: het IJslandse type met vooral dagelijkse vorstwisseling (minimumtemp. −7°C, maximumtemp. +6°C, cyclusduur 20 uur) en het Siberische type met vnl. seizoenschommelingen rond de 0°C (minimumtemp. schommelend tussen −20 en −30°C, maximumtemp. +10 tot +15°C, cyclusduur variërend van 40 tot 70 uur). Tricart vond een grotere intensiteit van de vorstverwering onder het Siberische regime dan onder het IJslandse. Wiman (1963) heeft de experimenten van Tricart herhaald met leisteen-, schist-, graniet-, kwartsiet- en gneissfragmenten. Hij vond juist, dat het IJslandse temperatuurregime aanleiding gaf tot een intensievere vorstverwering dan het Siberische.

Andere belangrijke experimenten op het gebied van de vorstverwering zijn uitgevoerd door Martini (1967), die de meest verbreide gesteenten van de West-Sudeten op hun vorstgevoeligheid heeft getest, en door het 'Centre de Géomorphologie' te Caen, Frankrijk, waar gedurende de afgelopen vijf jaar een serie vorstverweringsproeven is uitgevoerd met een aantal in Frankrijk voorkomende gesteentetypen (Lautridou 1971). Lautridou komt o.a. tot de conclusie, dat de strengheid van de vorst – hij heeft gewerkt met temperaturen van −30, −15 en −5°C – van veel minder belang is dan het aantal vorstwisselingen.

Zoutverwering. De verschijnselen der zoutverwering – d.i. de mechanische desintegratie van gesteenten onder invloed van het uitkristalliseren van zouten in gesteenteporiën – worden aangetroffen in woestijngebieden, aan rotsachtige zeekusten in klimaten die aanleiding geven tot het indampen van op het gesteente spattend zeewater en, zeer uitgesproken, in de beide poolgebieden. Zoutverwering is ook waargenomen aan gebouwen en monumenten in de gematigde streken. De verschijnselen, waarvoor zoutverwering (mede) verantwoordelijk zou kunnen zijn, zijn gruisvorming aan het gesteenteoppervlak, desquamatie (fig. 1-5) en het ontstaan van honingraatstructuren en tafoni (dit zijn verweringsholten aan de zijkanten en de onderzijde van gesteenteblokken, zie fig. 1-6). Een zeer uitgebreid overzicht van de literatuur op het gebied van de zoutverwering is onlangs verschenen in de 'Revue de Géomorphologie Dynamique' (Evans 1970).

Fig. 1-5. Desquamatie van graniet aan de Spaanse westkust bij Bayona, waarschijnlijk (mede) veroorzaakt door zoutinwerking.

Fig. 1-6. Tafoni in graniet, waarschijnlijk (mede) ontstaan ten gevolge van zoutinwerking. Bayona, Spaanse westkust.

De volgende processen worden aangevoerd ter verklaring van de desintegrerende werking van zouten (voor een uitvoerige bespreking met literatuurverwijzingen zie Kwaad 1970):

a Het uitkristalliseren van oververzadigde oplossingen in gesteenteporiën, waarbij de gevormde kristallen plus de verzadigde oplossing een groter volume innemen dan de oorspronkelijk aanwezige oververzadigde oplossing.

b Het aangroeien van zoutkristallen in gesteenteporiën.

c Het opnemen van kristalwater door aanvankelijk in watervrije toestand uitgekristalliseerde hydraatvormende zouten, b.v.

$$Na_2SO_4 + 10\,H_2O \rightarrow Na_2SO_4 \cdot 10\,H_2O.$$

d De warmte-uitzetting van uitgekristalliseerde zouten in gesteenteporiën. De kubieke uitzettingscoëfficiënt van b.v. NaCl is driemaal zo groot als die van kwarts.

In alle vier de gevallen gaat het weer, evenals bij de insolatie en de vorstverwering, om spanningen die opgewekt worden door een belemmerde volumetoename.

De eerste oorzaak vertoont enige overeenkomst met de volumetoename bij het bevriezen van water. Het grote verschil is echter, dat bij het uitkristalliseren van een zoutoplossing alleen het zout, dat slechts een klein deel van het systeem uitmaakt, overgaat in de vaste fase, terwijl bij het bevriezen van water het hele systeem overgaat in de vast fase. Dit leidt tot een veel geringere volumetoename bij het uitkristalliseren van een oververzadigde zoutoplossing dan bij het bevriezen van water. Voorts komt alleen in aanmerking uitkristalliseren tengevolge van afkoeling (als de oplosbaarheid daalt met dalende temperatuur). Bij uitkristalliseren tengevolge van verdamping van het oplosmiddel, een zeker zo belangrijke oorzaak van uitkristalliseren, kan geen sprake zijn van een volumetoename.

De tweede oorzaak vertoont meer overeenkomst met de gang van zaken bij de vorstverwering, zo zeer, dat vorstverwering en zoutverwering vaak samen besproken worden onder de titel 'verwering door kristalgroei'. Volgens Evans (1970) is kristalgroei het experimenteel en theoretisch best gefundeerde mechanisme van de zoutverwering. Het experimentele probleem bestaat uit het meten c.q. het aantonen van het bestaan van een aangroeiingsdruk en het vaststellen van de condities waaronder zoutkristallen, ondanks de aanwezigheid van een tegendruk, de neiging vertonen door te gaan met groeien. Becker en Day zijn er in het begin van deze eeuw in geslaagd het bestaan van een dergelijke aangroeiingsdruk aan te tonen. Belangrijke bijdragen tot de verklaring van de aangroeiingsdruk zijn geleverd door Correns en Steinborn (1939) en Wellman en Wilson (1965). Correns en Steinborn kwamen tot de conclusie dat aangroeiende zoutkristallen slechts een tegendruk kunnen overwinnen wanneer zich een dun filmpje van de oplossing kan handhaven tussen het zoutkristal en het gesteente. Dit is afhankelijk van de grootte van de grensvlakspanningen aan de grensvlakken zout–

gesteente, zout – oplossing en oplossing – gesteente. De uitgeoefende druk is afhankelijk van de mate van oververzadiging van de oplossing.

Wellman en Wilson beschrijven het uitkristalliseren van een oplossing in een poreuze stof. Volgens hen zouden hierbij, net als in het door Everett ontworpen model voor het bevriezen van water in poreuze materialen, de kristallen in de grote poriën aangroeien ten koste van de kristallen in de kleine poriën. Deze kristalgroei gaat door ook als de poriën volledig gevuld zijn. Zij schrijven dit gedrag toe aan het streven van ieder systeem om het gezamenlijk oppervlak van alle in het systeem voorkomende grensvlakken zo klein mogelijk te houden. Dit is een uitvloeisel van het streven van ieder systeem naar de toestand waarbij de vrije energie van het systeem minimaal is.

Met de derde mogelijke oorzaak van de zoutverwering, het afwisselend opnemen en afstaan van kristalwater door hydraatvormende zouten onder invloed van de dagelijkse en jaarlijkse gang van de temperatuur, is de naam van Mortensen verbonden. Deze onderzoeker heeft in 1933 een theoretisch model opgesteld voor de met deze wisselingen in de hydratatietoestand gepaard gaande en tot het ontstaan van spanningen aanleiding gevende volumeveranderingen van de betrokken zouten. Volgens Mortensen vindt in aride gebieden overdag, onder invloed van de dan heersende hoge bodemtemperaturen, aan of vlak onder het oppervlak uitkristallisatie in watervrije c.q. waterarme toestand plaats van in capillair opstijgend grondwater opgeloste zouten als natriumsulfaat, natriumcarbonaat, magnesiumsulfaat en calciumsulfaat. Kristallisatie aan het oppervlak wordt efflorescentie genoemd, vlak onder het oppervlak subflorescentie. Gedurende de nacht, wanneer onder invloed van de dalende temperatuur de dissociatiedampspanning van de betrokken hydraten daalt tot beneden de partiële waterdampspanning van de atmosfeer, zouden dan de watervrije zouten c.q. de lagere hydraten overgaan in een (hogere) gehydrateerde toestand door de adsorptie van waterdamp uit de atmosfeer. Voor de tegendruk die hierbij overwonnen kan worden, heeft Mortensen de volgende formule afgeleid:

$$P = \frac{189\,T \log(p_1 - p_2)}{V},$$

(waarin P = hydratatiedruk in atm., T = absolute temperatuur in °K, V = volume van 1 gmol kristalwater, p_1 = dampdruk van de atmosfeer bij T in mm Hg en p_2 = dissociatiedampdruk van het hydraat bij T in mm Hg). Met behulp van deze formule kan b.v. berekend worden dat $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ bij 20°C en een relatieve vochtigheid van 90% een druk van maximaal 338 atm. kan weerstaan.

De schrijver (Kwaad 1970) heeft met behulp van een klimaatkast met regelbare temperatuur en luchtvochtigheid onder verschillende condities de intensiteit van de verwering van graniet door zoutinwerking bepaald (zie tabel 1-1). De hoeveelheden verweringsgruis zijn afkomstig van granietblokjes van 7 × 7 × 7 cm. De belangrijkste conclusies van dit onderzoek zijn:

a De intensiteit van de verwering is afhankelijk van de aard van het zout (experiment 1),

b natriumsulfaat tast het gesteente óók aan onder condities, waaronder geen verandering in de hydratatietoestand van het zout mogelijk is (experimenten 2, 3 en 4),

c zoutverwering kan optreden onder vorst-dooicondities (experiment 5).

Verwering door de zwelling van klei in gesteenteporiën. Het is reeds lang bekend, dat klei een hygroscopische stof is, dat wil o.m. zeggen dat klei in staat is waterdamp uit de atmosfeer te adsorberen. Bij sommige kleimineralen – met name de mineralen uit de smectietgroep, zoals montmorilloniet – gaat dit gepaard met een volumetoename die in staat is een tegendruk te overwinnen. Zwellingsdrukken tot 10 atm. worden opgegeven in de literatuur. De zwelling van klei kan aanleiding geven tot grote civieltechnische problemen bij funderingswerkzaamheden.

Bakker et al. (1968) heeft de zwellingsdruk van klei aangevoerd als een mogelijke oorzaak van het afbladderen van gesteenten onder condities, waaronder processen als insolatie en 'Salzsprengung' geen rol kunnen spelen. De klei kan afkomstig zijn van een chemische vóórverwering van het gesteente of zijn ingespoeld of ingewaaid in holten die daar van te voren aanwezig waren.

Fysische verwering door organische invloeden. De meeste vormen van organische verwering zijn in wezen chemische processen. Er zijn echter enkele organische invloeden die een fysische desintegratie van het gesteente kunnen teweegbrengen: *a* diktegroei van boomwortels in spleten in het gesteente; *b* mechanische werking van lichenen (symbiose van algen en schimmels), een van de eerste groepen van lagere planten die kale gesteenteoppervlakken koloniseren. Lichenen, die in vochtige toestand gezwollen zijn, trekken samen bij uitdrogen en kunnen daarbij gesteentefragmenten afbreken die zijn opgenomen in het liche-

Tabel 1-1. Resultaten zoutverweringsexperimenten (Kwaad 1970)

nr. experiment	*temperatuur en rel. vochtigheid*	*zout,*	*tijdsduur experiment in weken*	*hoeveelheid verweringsgruis, g*
1	afwisselend 12 u. 15°C/ 90% en 12 u. 70°C/ 10%	geen zout, droog	2	nihil
			4	nihil
			6	nihil
			8	nihil
		geen zout, water	2	nihil
			4	nihil
			6	nihil
			8	nihil
		$CaSO_4$	2	nihil
			4	nihil
			6	nihil
			8	nihil
		$MgSO_4$	2	3,52
			4	7,10
			6	11,08
			8	13,80
		Na_2CO_3	2	6,95
			4	12,26
			6	17,32
			8	25,05
		Na_2SO_4	2	18,61
			4	36,34
			6	50,46
			8	76,15
		NaCl	2	1,83
			4	4,47
2	afwisselend 12 u. 20°C/ 30% en 12 u. 60°C/ 10%	Na_2SO_4 duplo	2	10,89
			2	12,92
		NaCl duplo	2	2,42
			2	4,63
3	constant 20°C/30%	Na_2SO_4	2	5,46
		NaCl	2	4,77
4	constant 60°C	Na_2SO_4	2	1,77
		NaCl	2	3,27
5	afwisselend 6 u. −20°C en 6 u. 20°C/ 40%	water	2	0,16
			4	0,43
		Na_2SO_4	2	1,42
			4	3,02
		NaCl	2	2,80
			4	4,78

Het verweringsgruis is in alle gevallen afkomstig van granietblokjes van 7 × 7 × 7 cm met een gewicht van ongeveer 950 g. Het gruis werd steeds na 2 weken verzameld en gewogen. De hoeveelheden verweringsgruis na resp. 4, 6 en 8 weken zijn dus de gesommeerde hoeveelheden van resp. twee, drie en vier achtereenvolgende perioden van 2 weken.

nenweefsel. De hyfen van de lichenen die de kleinste spleetjes binnendringen kunnen ook een mechanische invloed uitoefenen.

1-3 VERWERING VAN GEBOUWEN EN BOUWMATERIALEN

Hoewel de fysische geografie, i.c. de geomorfologie, voornamelijk geïnteresseerd is in de onder natuurlijke condities optredende verweringsverschijnselen, eventuele wetmatigheden in hun verspreiding over het aardoppervlak, hun betekenis voor de landschapsvorming en hun ontstaanswijze en ontstaansvoorwaarden – in dit hoofdstuk is het accent gelegd op het laatste –, hebben wij in dit hoofdstuk toch ook de aandacht willen vestigen op het feit, dat gebouwen, monumenten en andere uit steen vervaardigde kunstwerken als wegen, bruggen, havenwerken enz. evenzeer blootstaan aan de invloeden der verwering als natuursteen in zijn natuurlijke ligging. In deze paragraaf nog enige opmerkingen hierover.

In het voorgaande is gebleken, dat van de zijde van de baksteenindustrie en de wegenbouw veel onderzoek wordt verricht op het gebied van de weerbestendigheid van dakpannen, beton enz. om te komen tot een zo goed mogelijk produkt. Veel aandacht wordt hierbij besteed aan het verkrijgen van een optimale porositeit, een eigenschap die, zoals we gezien hebben, van grote invloed is op de vorstbestendigheid. In dit verband kan ook het werk van Thomlinson (1940) genoemd worden, die een mathematisch model heeft opgesteld voor de spanningen die onder invloed van de dagelijkse en jaarlijkse temperatuurgang kunnen optreden in de platen van betonwegen.

Tricart (1960) heeft zoutverweringsexperimenten uitgevoerd met het oog op het uitbrengen van een advies betreffende het gesteente, dat het best gebruikt zou kunnen worden voor de aanleg van de haven van Cotonou (Dahomey). Gebleken was nl. dat het gesteente, dat gebruikt was voor de haven van Tema (Ghana) vrij snel ten prooi viel aan zoutverwering, zodat het vervangen moest worden. Tricart vond o.m. dat de aanwezigheid van biotiet (zwarte mica) in het gesteente een

zwaktefactor is, daar de verwering vaak het eerst op dit mineraal aangrijpt.

Een andere zaak is het conserveren van oude gebouwen in onze stadscentra, die behalve door de 'natuurlijke' verweringsprocessen als insolatie en vorstverwering in toenemende mate worden bedreigd door aantasting tengevolge van de luchtverontreiniging (Winkler 1966, 1970). Zo leidt een verhoogd SO_2-gehalte van de stedelijke atmosfeer tot een versnelde aantasting van uit kalksteen opgetrokken gebouwen door de omzetting van kalk in calciumsulfaat dat onder volumetoename kan overgaan in gips, dat bovendien een grotere oplosbaarheid heeft dan kalk. Regelmatig verschijnen de laatste tijd berichten in de pers over de aantasting van oude gebouwen door verontreinigde lucht, zoals de Dom van Keulen, waarvoor thans jaarlijks een groot deel van de ongeveer één miljoen mark, bestemd voor restauratie en onderhoud, moet worden gebruikt om het aangevreten gesteente te restaureren. In Rijnland-Westfalen heeft men onlangs een spoedprogramma opgesteld, gericht op het redden van oude kunstwerken, zoals de 700 jaar oude beeldengroep aan de buitenkant van de Mariakerk in Ahlen. Zie voorts hfdst. 6: 'Stadsklimaten'.

Een derde aspect betreft de gevolgen van het overbrengen van stenen kunstwerken uit droge naar vochtige klimaten. Zo vertoonde een granieten Egyptische obelisk (Cleopatra's naald), waarvan de poriën gevuld waren met magnesiumsulfaat, twee jaar na plaatsing in het New Yorkse Central Park reeds duidelijk de sporen van zoutverwering, die in het droge Egyptische klimaat geen kans had gekregen (Winkler 1966). Om iets dergelijks te voorkomen is de eveneens uit Egypte afkomstige Tempel van Taffeh, die in 1971 is overgebracht naar het Rijksmuseum voor Oudheden te Leiden, geplaatst op een geheel overkapte binnenplaats met air-conditioning. Zo ook hebben de fragmenten van Romeinse altaren, gewijd aan de Zeeuwse godin Nehalennia, die in 1971 zijn opgevist nabij Colijnsplaat, alvorens ze konden worden tentoongesteld een langdurig zoetwaterbad ondergaan om de zouten uit te wassen die de stenen zouden doen springen.

LITERATUUR

Bakker, J. P., 1970. 'Zur Ökologie einer Blaualgenkruste in den feuchten Tropen auf dem Biotitgranit einer Inselberglandschaft (Voltzberggebiet – Surinam).' *Colloquium Geographicum*, Universität Bonn, Band 12, pp. 125–176.

Bakker, J. P., F. J. P. M. Kwaad und H. J. Müller, 1968. 'Einige vorläufige Bemerkungen über Salz- und Tonsprengung besonders in Hinblick auf Granit.' *Przeglad Geograficzny*, 40, pp. 387–399.

Birot, P., 1962. *Contribution à l'étude de la désagrégation des roches*. Centre de documentation universitaire, Paris.

Blackwelder, E., 1925. 'Exfoliation as a phase of rock weathering.' *Journal of Geology*, 33, pp. 793–806.

Blackwelder, E., 1933. 'The insolation hypothesis of rock weathering.' *American Journal of Science*, Fifth Series, Vol. 26, pp. 97–113.

Correns, C. W., 1968. *Einführung in die Mineralogie* (*Kristallographie und Petrologie*). Berlin.

Correns, C. W. und W. Steinborn, 1939. 'Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft.' *Zeitschrift Kristallographie*, A, 101, p. 117.

Evans, I. S., 1970. 'Salt crystallization and rock weathering: a review.' *Revue de Géomorphologie Dynamique*, 19, pp. 153–177.

Everett, D. H., 1961. 'The thermodynamics of frost damage to porous solids.' *Transactions Faraday Society*, 57, pp. 1541–1551.

Gold, L. W., 1957. 'A possible force mechanism associated with the freezing of liquids in porous materials.' *Highway Research Board Bulletin*, 168, pp. 65–72.

Gray, W. M., 1965. 'Surface spalling by thermal stresses in rocks.' *Proceedings rock mechanics symposium Toronto*, pp. 85–106.

Griggs, D. T., 1936, 'The factor of fatigue in rock exfoliation.' *Journal of Geology*, 44, pp. 783–796.

Hirschwald, J., 1912. *Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung*. Berlin.

Jackson, K. and B. Chalmers, 1958. 'Freezing of liquids in porous media with special reference to frost heaving in soils.' *Journal Applied Physics*, 29, pp. 1178–1181.

Kwaad, F. J. P. M., 1970. 'Experiments on the granular disintegration of granite by salt action.' *Public. Fysisch-geografisch en bodemkundig laboratorium*, 16, University of Amsterdam, pp. 67–80.

Lautridou, J. P., 1971. 'Conclusions générales des expériences de gélifraction expérimentale.' *Centre de géomorphologie du* CNRS, *Caen*, Bulletin 10, pp. 65–84.
Leopold, L. B., M. G. Wolman and J. P. Miller, 1964. *Fluvial processes in geomorphology*. London.
Lliboutry, L., 1964. *Traité de glaciologie*. Paris.
Martini, A., 1967. 'Preliminary experimental studies on frost weathering of certain rock types from the West Sudetes.' *Biuletyn Peryglacjalny*, 16, pp. 147–194.
Mortensen, H., 1933. 'Die "Salzsprengung" und ihre Bedeutung für die regionalklimatische Gliederung der Wüsten.' *Petermann's Mitteilungen*, pp. 130–135.
Ollier, C. D., 1969. *Weathering*. Edinburgh.
Penner, E., 1958. 'Pressures developed in a porous granular system as a result of ice segregation.' *Highway Research Board Special Report*, 40, pp. 191–199.
Rijken, A. J., 1970. 'Nieuwe ontwikkelingen op het gebied van vorstbestendigheid.' *Klei en keramiek*, 20, pp. 202–214.
Schäfer, A., 1964. *Frostwiderstand und Porengefüge des Betons. Beziehungen und Prüfverfahren*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 167.
Taber, S., 1930, 'The mechanism of frost heaving.' *Journal of Geology*, 38, pp. 303–317.
Tarr, W. A., 1915. 'A study of some heating tests and the light they throw on the disintegration of granite.' *Economic Geology*, 10, pp. 348–367.
Thoenes, D., 1960. 'Vorstschade aan wegen.' *Landbouwkundig Tijdschrift*, 72, pp. 241–248.
Thomlinson, J., 1940. 'Temperature variations and consequent stresses produced by daily and seasonal temperature cycles in concrete slabs.' *Concrete and constructional engineering*, pp. 298–307.
Tricart, J., 1956. 'Etude expérimentale du problème de la gélivation.' *Biuletyn Peryglacjalny*, 4, pp. 285–318.
Tricart, J., 1960. 'Expériences de désagrégation de roches granitiques par la cristallisation du sel marin.' *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementband 1, pp. 239–240.
Wellman, H. W. and A. T. Wilson, 1965, 'Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments.' *Nature*, 205, pp. 1097–1098.
Wilhelmy, H., 1958. *Klimamorphologie der Massengesteine*. Braunschweig.
Wilson, L., 1968. 'Morphogenetic classification.' In: R. W. Fairbridge (editor), *The encyclopedia of geomorphology*, London, pp. 717–729.
Wiman, S., 1963. 'A preliminary study of experimental frost weathering.' *Geografiska Annaler*, 45, pp. 113–121.
Winkler, E. M., 1966. 'Important agents of weathering for building and monumental stone.' *Engineering Geology*, 1, pp. 381–400.
Winkler, E. M., 1970. 'The importance of air pollution in the corrosion of stone and metals.' *Engineering Geology*, 4, pp. 327–334.

Deze tekst is uit:
Fysische Geografie - Aspecten van het landschapsonderzoek
Onder redactie van P.D. Jungerius, E.A. Koster en F.J.P.M. Kwaad
Academische Paperbacks
Oosthoek's Uitgeversmaatschappij BV
Utrecht, 1973