

BIJDRAGE TOT DE KENNIS VAN DE
VORSTBESTANDHEID VAN BOUWKERAMIEK

door
ing. J.H. van der Velden



postbus 342
7300 AH apeldoorn

bezoekadres
laan van westenenk 501

telex 36395 tnoap
telefoon 055 - 77 33 44

Ref.nr. : 82-012186
Dossiernr.: 8725-40005
Datum : september
P

Bestemd voor:

De Nederlandse Grofkeramische Industrie

„Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigdvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
copie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.”

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten
en verplichtingen van opdracht-
gever en opdrachtnemer verwezen
naar de „Algemene Voorwaarden
voor Onderzoeks- en ontwikke-
lingsopdrachten aan TNO, 1979”
dan wel de desbetreffende terzake
tussen partijen gesloten overeen-
komst.

<u>INHOUD</u>	<u>pag.</u>
SAMENVATTING	3
1. ALGEMENE INLEIDING	4
2. VORSTSCHADE IN DE PRAKTIJK	6
2.1 Inleiding	6
2.2 Voorkeurplaatsen van vorstschade	7
2.3 Aard van de bij vorstschade betrokken produkten	8
2.4 Invloed van het klimaat op de schadefrequentie	9
3. DE VOCHTBELASTING VAN BOUWKERAMIEK	14
3.1 Inleiding	14
3.2 Karakterisering van de vochtbelasting	16
3.3 Hygroscopisch vocht	19
3.4 Vocht opneming door condensatie	21
3.5 Vocht opneming door capillaire krachten	23
3.6 Droging van bouwkeramiek	36
4. BEVRIEZING EN ONTDOOIING VAN BOUWKERAMIEK	39
4.1 Algemene opmerkingen	39
4.2 Bevriezing van vrij water	40
4.3 IJsvorming in een haarvat	41
4.4 Bevriezing van een keramische scherf	45
4.5 Bevriezingssnelheid bij strenge vorst	48
4.6 Ontdooiing van bouwkeramiek	51
5. VORSTSCHADEMECHANISMEN	53
6. VORSTBESTANDHEIDSBEPROEVING	55
7. VERBETERING VAN DE VORSTBESTANDHEID EN ALGEMENE CONCLUSIES	58
8. LITERATUUR	61
FIGUREN 1 t/m 12	
TABELLEN 1 t/m 10	

SAMENVATTING

Op de grondslag van de resultaten van het speurwerk dat ten behoeve van de Nederlandse baksteen- en kleidakpannenindustrie door TNO wordt verricht, wordt de vorstbestandheidsproblematiek van bouwkeramiek geanalyseerd.

Na een beschrijving van de omstandigheden waaronder vorstschade zich in bouwconstructies manifesteert, gaat de studie, gezien de grote betekenis, die de vochtbelasting van het bouw materiaal blijkt te hebben, uitvoerig in op de wijze waarop de vocht opneming plaatsvindt en wordt het hygrisch gedrag van bouwkeramiek verklaard.

Wat de bevriezing en ontdooiing van het materiaal betreft krijgen vooral verschijnselen, die tot het ontstaan van vorstschade aanleiding kunnen geven, de aandacht. De fundamentele schade oorzaken worden aangegeven.

Op grond van het verworven inzicht in de problematiek worden aanbevelingen gedaan over de wijze waarop een vorstbestandheidsbeproeving in een vorst-dooisimulator dient te worden uitgevoerd en geeft de studie enkele richtlijnen voor de verbetering van de vorstbestandheid van bakstenen, keramische dakpannen en tegels.

1. ALGEMENE INLEIDING

Een van de meest kenmerkende eigenschappen van aan weer en wind blootgestelde uit klei gebakken bouwmaterialen, zoals bakstenen, keramische dakpannen en keramische tegels, is hun grote duurzaamheid. Slechts bij hoge uitzondering doen zich ernstige verweringsverschijnselen voor. Vorstschade is zo'n verschijnsel. Herhaalde bevriezing en ontdooiing van natte bouwkeramiek leiden soms tot schade in de vorm van scheuren, afsplinteringen of afschilferingen, die in esthetisch of technisch opzicht afbreuk doen aan de kwaliteit van de bouwconstructie. Het is een euvel dat zich ook bij andere bouwmaterialen wel manifesteert.

De praktijk heeft geleerd, dat het ontstaan van vorstschade in sterke mate afhankelijk is van de fabricagekwaliteit en de gebruiksomstandigheden van het produkt. Een gepaste waakzaamheid van zowel fabrikanten als gebruikers is daarom geboden.

In verscheidene centra van bouwmaterialenonderzoek en laboratoria voor technologisch onderzoek werden in de afgelopen decennia methoden voor de beoordeling van de weerstand tegen bevriezing ontworpen en getoetst en werden richtlijnen ontwikkeld voor de bedrijfsinterne bewaking en verbetering van de vorstbestandheid van bouwkeramiek. In de vakliteratuur wordt aan deze onderwerpen ruim aandacht besteed.

De niet gecoördineerde aanpak van die onderzoeken in de verschillende landen heeft een grondige en nuttige verkenning van de problematiek opgeleverd.

Wat betreft de vorstbestandheidsbeproeving van bouwmaterialen in Nederland, tekende zich bij het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies (IBBC-TNO) te Rijswijk (ZH) in het midden van de zestiger jaren een duidelijke koerswijziging af. Uit onderzoeken van dit instituut bleek namelijk steeds duidelijker, dat beproevingen door herhaalde eenzijdige bevriezing van proefeenheden uitkomsten opleverden, die beter in overeenstemming waren met het gedrag van de betreffende produkten in de praktijk, dan die van de voordien en elders ook thans nog wel toegepaste beproevingen door alzijdige bevriezing [1].

Gezien de technologische implicaties van een waarborging van de vorstbestandheid van bouwkeramiek werd in 1975 op initiatief van de Nederlandse baksteen- en kleidakpannenindustrie ook de werkgroep Grofkeramiek van de Hoofdgroep Maatschappelijke Technologie TNO (MT-TNO) te Apeldoorn bij de vorstbestandheidsresearch betrokken. De werkgroep bouwde daarbij voort op het door IBBC-TNO verworven inzicht.

Deze bijdrage geeft een beknopt overzicht van de huidige stand van kennis en ervaring met betrekking tot de vorstbestandheidsproblematiek.

2. VORSTSCHADE IN DE PRAKTIJK

2.1 Inleiding

Reeds gedurende een lange reeks van jaren wordt het IBBC-TNO betrokken bij het onderzoek van vorstschadegevallen in de praktijk. Het betreft daarbij gewoonlijk alleen ernstige gevallen van schade. De hierbij opgedane ervaring, gevoegd bij de ervaringen waarvan in de literatuur gewag wordt gemaakt, hebben een aantal algemene bevindingen opgeleverd over de voorkeurplaatsen van vorstschade in een bouwconstructie, over de aard van de bij vorstschade betrokken produkten en over de invloed van het klimaat op de schade-frequentie. Die bevindingen zijn in de navolgende paragrafen verwoord.

2.2 Voorkeurplaatsen van vorstschade

De ervaring leert, dat vorstschade zich het eerst of het meest uitgesproken voordoet op de meest vochtige plaatsen van een bouwconstructie, te weten: plaatsen met het grootste wateraanbod en met de meest ongunstige droogmogelijkheden.

In gevels manifesteert vorstschade zich het eerst en op den duur het hevigst aan de meest beregende zijde van het gebouw, dat wil in Nederland zeggen, vooral in gevels op het zuid-westen en westen. Noord-gevels blijven het langst gespaard. Men bemerkt ook vaak de beschuttende werking van belendende bebouwing. Vochtaanbod zonder noemenswaardige droging vindt men ter hoogte van het maaiveld. Als er schade is, manifesteert deze zich op die plaats in ieder geval. Andere kritieke plaatsen voor het ontstaan van vorstschade aan muren zijn in volgorde van afnemende gevoeligheid: grondkeringsmuren, schoorsteenkoppen, vrijstaande muren, muurgedeelten die uitsteken, hoeken van gevels en verder muurgedeelten juist onder de dakrand bij afwezigheid van een overstek en onder vensters zonder deugdelijke waterafvoer.

Bij hellende daken blijkt de noordzijde het meest schadegevoelig te zijn. Waarschijnlijk houdt dit verband met de geringere droogmogelijkheid van de noord-helling door gebrek aan bezonning.

Ten aanzien van aan weer en wind blootgestelde dekvloeren zijn een zeer vochtige fundering en een slechte afwatering ongunstige factoren met betrekking tot het ontstaan van schade, terwijl ook hier bezonning en warmtestraling van aangrenzende bebouwing de kans op vorstschade lijken te verkleinen.

2.3 Aard van de bij vorstschade betrokken produkten

Wat de bouwkeramiek betreft hebben gevallen van vorstschade meestal betrekking op al dan niet nageperste extrusieprodukten met een zichtbaar gelaagde scherf. Vaak zijn ze in die gevallen bovendien zwak gesinterd en/of hebben ze een zeer fijne poriënstructuur. Sterk gesinterde produkten met een homogene scherf en een geringe wateropneming zijn in het algemeen niet schadegevoelig.

Vorstschade aan uit slappe luchthoudende klei vervaardigde vormbakstenen en handvormstenen wordt doorgaans alleen aan zeer zachte exemplaren met een Mohs-hardheid ≤ 2 aangetroffen.

Geglazuurde produkten zijn in het algemeen gevoeliger voor vorstschade dan niet geglazuurde, in het bijzonder wanneer de glazuur onder hoge drukspanning staat.

Produkten met grove insluitsels kunnen bij bevriezing, ter plaatse van zich nabij de oppervlakte bevindende verontreinigingen, tot afsplinteringen aanleiding geven. Ook de aanwezigheid van reductiekernen in de scherf schaadt de weerstand tegen bevriezing, terwijl in sommige gevallen blinde koelscheuren na een vorstperiode zichtbaar blijken te zijn geworden.

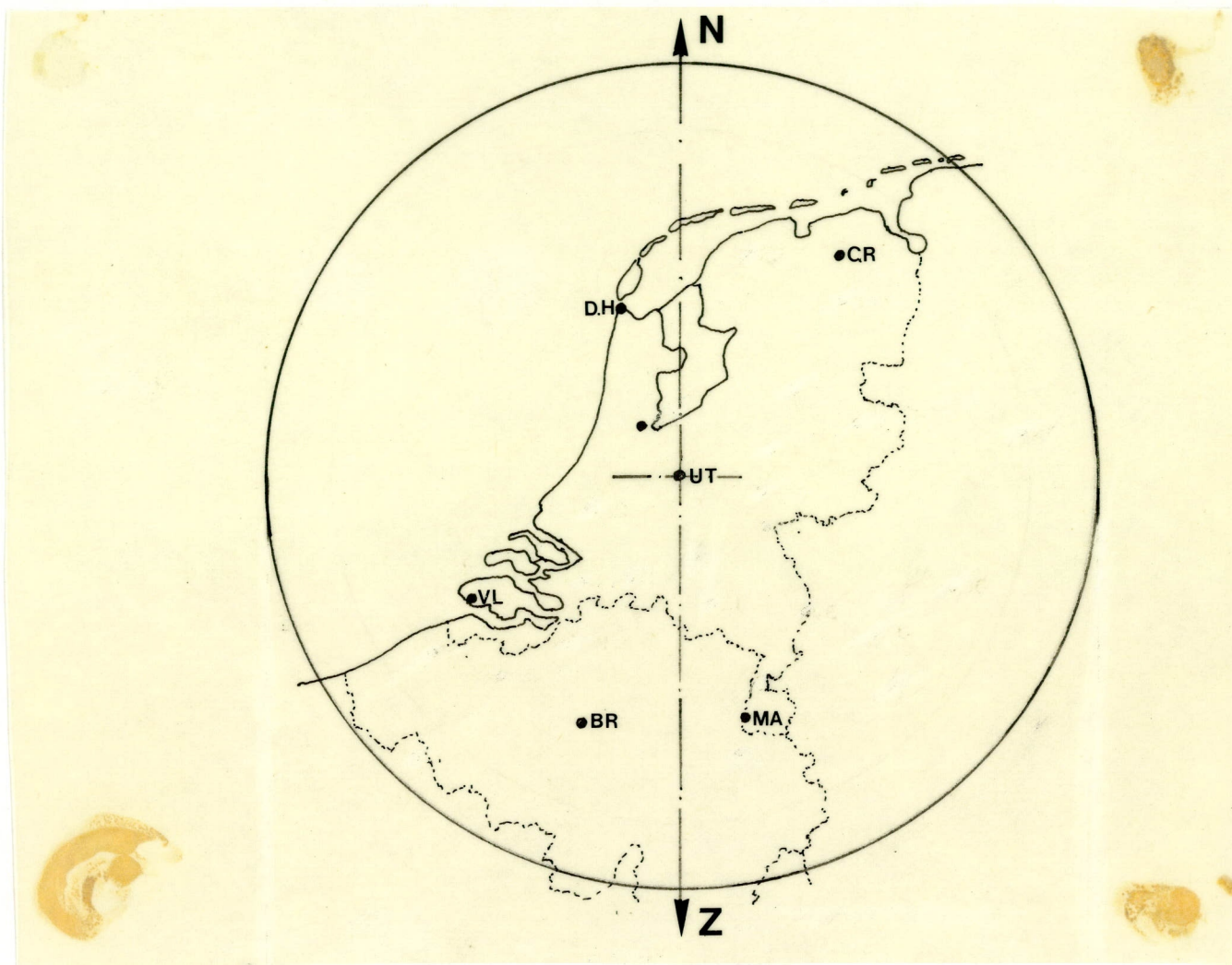
2.4 Invloed van het klimaat op de schadefrequentie

Ter algemene oriëntatie zijn in de tabellen 1 en 2 enkele klimatologische gegevens van Nederland en Europa opgenomen.

Tabel 1. Klimatologische verschillen in Nederland
(ontleend aan gegevens van het KNMI te De Bilt)

plaats (zie figuur 1)	gemiddelde jaarlijkse					
	mini- mum temp. °C	eerste vorst- dag 1)	laatste vorst- dag 1)	aantal		
				ijs- dagen 2)	vorst- dooi- dagen 3)	dagen met sneeuw- dek
Utrecht	-11	1/11	20/4	15	45	21
Den Helder	- 8	20/11	1/4	10	30	14
Groningen	-11	10/11	5/4	15	55	23
Maastricht	-10	5/11	20/4	15	50	18
Vlissingen	- 7	10/11	1/4	10	20	11

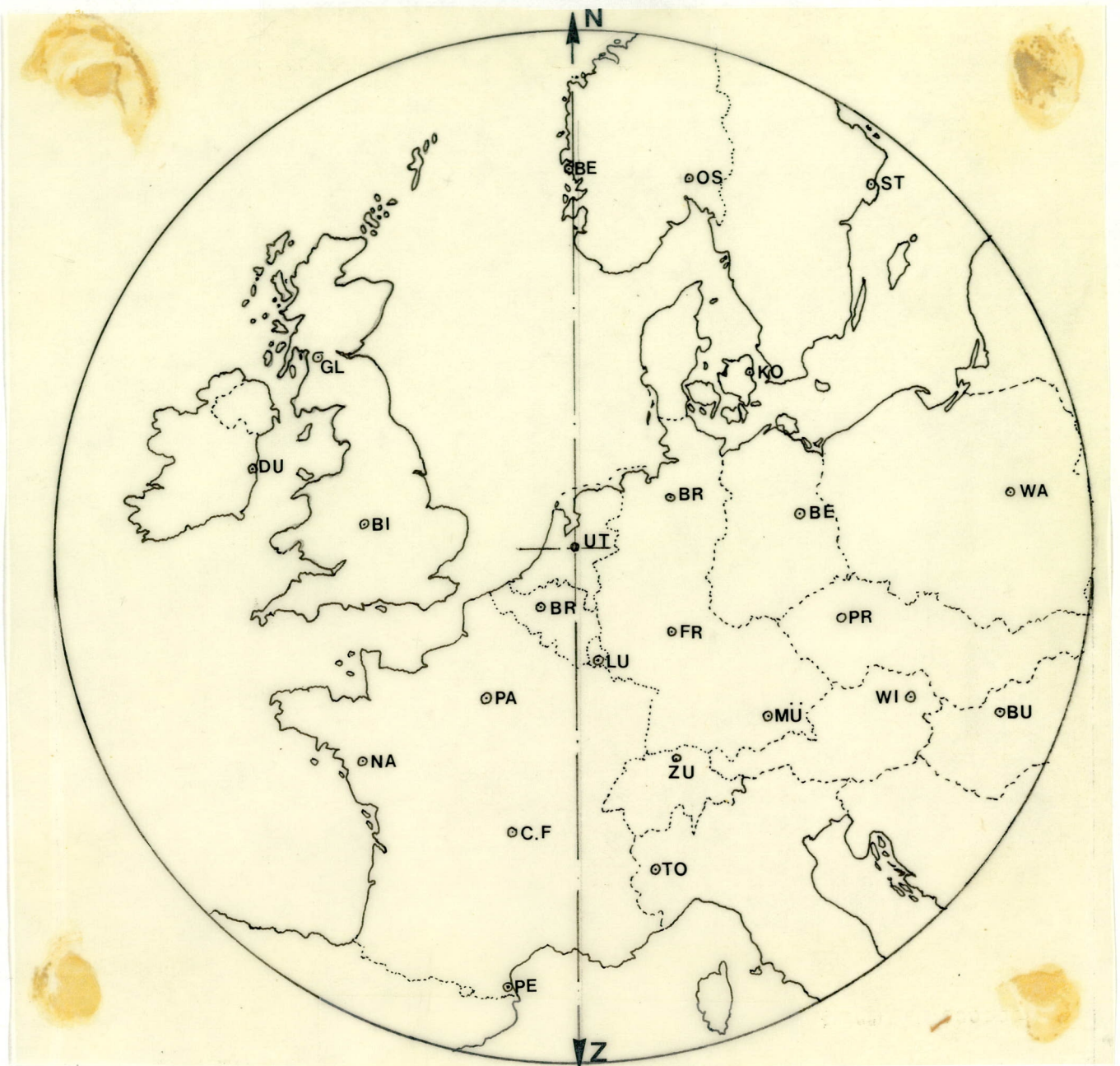
- 1) dag met een minimum temperatuur onder 0 °C
- 2) dagen met een maximum temperatuur onder 0 °C
- 3) dagen met een minimum temperatuur onder 0 °C
en een maximum temperatuur boven 0 °C.



Figuur 1 Kaart van Nederland, schaal $1:4.10^6$, rayondiameter 500 km

Tabel 2. Klimatologische verschillen in Europa
(ontleend aan gegevens van de TBE)

Plaats (zie figuur 2)	gemiddelde jaarlijkse		Plaats	gemiddelde jaarlijkse	
	mini- mum temp. °C	aantal vorst- dooi- dagen		mini- mum temp. °C	aantal vorst- dooi- dagen
Bergen (Norge)	- 9	40	München	-18	80
Berlin	-16	70	Nantes	- 7	10
Birmingham	-10	50	Oslo	-25	70
Bremen	-12	50	Paris	-10	50
Brussel	-10	50	Perpignan	- 4	25
Clermont-Ferrand	-14	75	Stockholm	-18	80
Dublin	- 7	45	Torino	-10	70
Frankfurt	-13	55	Utrecht	-11	45
Glasgow	- 6	50	Wien	-16	60
København	-13	60	Zürich	-15	60
Luxembourg	-14	90			



Figuur 2 Kaart van Europa, schaal $1:15.10^6$, rayondiameter 2500 km

Deze summiere en globale gegevens zijn uiteraard niet geschikt voor het leggen van relaties tussen klimaat en vorstschade. Het lijkt vooral de grilligheid van het weer, die kansen schept voor het ontstaan van vorstschade.

De ervaring leert, dat het Nederlandse klimaat af en toe een winter oplevert, waarin zich over het gehele land verspreid een merkbaar hoger aantal vorstschadegevallen voordoet dan in andere jaren. De schade ontstaat daarbij vaak aan objecten, die voordien vele jaren schadevrij zijn gebleven. Hierbij zij opgemerkt dat een eenmaal geïnitieerde vorstschade zich in het algemeen pas na enige jaren in haar volle omvang manifesteert.

Uit een klimaat- en vorstschadeanalyse van Van der Klugt (IBBC-TNO) over de jaren 1960-1980 komt naar voren, dat een winter die meer schadegevallen oplevert dan gewoonlijk, zich kenmerkt door één of meer abrupte wisselingen van perioden met ruim vocht-aanbod naar perioden van aanmerkelijke vorst. Zo'n abrupte wisseling kan zich bijvoorbeeld voordoen als gevolg van een plotselinge verandering van de windrichting van ZW naar NO.

3. DE VOCHTBELASTING VAN BOUWKERAMIEK

3.1 Inleiding

Uit het voorgaande blijkt onder meer, dat de kans op het ontstaan van vorstschade duidelijk verband houdt met de vochtigheidstoestand waarin het materiaal bij de bevriezing verkeert.

Eertijds meende men, dat de volumevergroting van het in het materiaal aanwezige water bij het stollen tot ijs, de enige aanleiding tot het ontstaan van vorstschade was [2]. Men voerde het begrip verzadigingsgraad in (dit is de verhouding van het daadwerkelijk met water gevulde poriënvolume van een bouwelement tot het totale voor water toegankelijke poriënvolume) en zocht aan de hand van vriesproeven op het laboratorium naar een kritieke verzadigingsgraad, die juist voldoende expansieruimte zou bieden om het produkt te vrijwaren van vorstschade.

Men slaagde er niet in een algemeen geldende kritieke verzadigingsgraad te vinden. Aangetoond werd, dat de met betrekking tot vorstschade kritieke verzadigingsgraad tussen wijde grenzen kan variëren en dat deze onder meer ook afhankelijk is van de wijze waarop de warmte-onttrekking bij de bevriezing plaatsvindt, namelijk éénzijdig of alzijdig [3].

Teneinde een juist beeld te verkrijgen van de betekenis van de vochtigheidstoestand van bouwkeraamiek met betrekking tot vorstschade zijn in dit hoofdstuk enige belangrijke gedragingen van vocht in dit materiaal in herinnering gebracht en nader geanalyseerd.

Tenzij anders vermeld, wordt onder vocht steeds water in vloeibare vorm verstaan, vrij van zouten of zuren. Tabel 3 vermeldt enkele basisgegevens.

Tabel 3. Enkele eigenschappen van water onder atmosferische druk

	sym- bool	eenheid	temperatuur	
			0 °C	20 °C
massiek volume*	V	$10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$	1,0002	1,0018
verzadigde dampspanning	P_{dv}	mbar	6,1	23,4
dynamische viscositeit	η	10^{-3} N.s/m^2	1,79	1,00
oppervlaktespanning	σ	10^{-3} N/m	75,7	72,8
oplosbaarheid van lucht in water (m^3 lucht bij 0 °C en 1013 mbar)	L	$10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$	28,9	18,7

* V bij 4 °C = $1,0000 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

3.2 Karakterisering van de vochtbelasting

Poreuze steenachtige materialen in bouwconstructies worden nat door:

- bevochtiging tijdens de bouw,
- penetratie van regen- of dooiwater,
- optrekkend bodemvocht,
- condensatie van waterdamp op of in het bouw materiaal.

Het vocht dringt daarbij in het poriënsysteem, dat in bouwkeramiek is opgebouwd uit haarvaten van uiteenlopende vorm en afmetingen, die een in principe doorstroombaar ruimtelijk netwerk van zich vernauwende en verbredende gangen vormen met blinde vertakkingen. De poriëndiameters variëren gewoonlijk tussen 0,1 μm en 50 μm . In zwak gesinterde produkten zijn de poriën hoekig. Naarmate sterker wordt gesinterd krijgen de poriën rondere vormen, neemt de sterkte van de scherf toe en wordt de gemiddelde poriëndiameter aanvanke-lijk iets groter. In sterk gesinterde produkten is een aantal hol-ten alzijdig afgesloten.

De afvoer van vocht uit een constructie geschiedt door droging aan de lucht waarbij de waterverdamping aan het oppervlak en in het poriënsysteem van het bouw materiaal plaatsvindt.

Het watergehalte van een bouwelement geeft men op in volumepro-
centen $[W \% (v/v)]$, of in massaprocenten betrokken op de massa van
het element in droge toestand $[W \% (m/m_d)]$. De relatie tussen beide
notaties is in formule 1 weergegeven.

$$[W \% (v/v)] = [W \% (m/m_d)] \cdot \rho_s \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

Hierin is ρ_s de scherfdichtheid in kg/m^3 .

De mate waarin een vochtig bouw materiaal verzadigd is met water,
wordt tot uitdrukking gebracht in de actuele verzadigingsgraad S_a

$$S_a = \frac{W_a}{W_m} \quad (2)$$

Hierin is: W_a het daadwerkelijke watergehalte en W_m het maximale
watergehalte, waarbij alle voor water toegankelijke poriën van het
bouwelement met water zijn gevuld.

Het begrip verzadigingsgraad wordt ook gebruikt in de betekenis van scherfeigenschap. De getalwaarde van S is dan het resultaat van een onderkeningsproef waarbij men de waterabsorptie door de scherf onder nauwkeurig omschreven omstandigheden heeft laten plaatsvinden, bijvoorbeeld door onderdompeling, door spontane eenzijdige wateraanzuiging of door een getrapte drenking. De proefuitkomsten zijn sterk afhankelijk van de gevolgde methode.

Ook voor de vaststelling van W_m uit formule 2 worden verschillende methoden toegepast. De meest gebruikte zijn: de vacuümmethode, de kookmethode en een globale berekening van W_m uit de scherfdichtheid van het materiaal.

Bij de vacuümmethode ontluicht men het poriënsysteem van een gewogen droog element in een vacuümvat, waarna men onder handhaving van het vacuüm water in het vat laat stromen tot het element zich geheel onder water bevindt. Vervolgens herstelt men de atmosferische druk op het water. Na verloop van tijd is het poriënsysteem geheel met water gevuld en kan het maximale watergehalte door weging vastgesteld worden.

Bij de kookmethode dompelt men een gewogen droog element onder in een vat met kokend water en laat men de inhoud van het vat geruime tijd koken. Het in de scherf gedrongen water vormt daarbij dampbellen die de lucht uit de poriën verdrijven. Door het element in ondergedompelde toestand in het kookvat te laten afkoelen en te bewaren zuigt de scherf zich na verloop van tijd vol water en kan het watergehalte door weging worden bepaald. De kookmethode heeft het voordeel, dat er geen speciale apparatuur nodig is.

Uit onderzoek blijkt, dat beide methoden voor zwak tot matig gesinterde produkten gelijke uitkomsten opleveren, doch dat de kookmethode voor sterk gesinterde produkten met zeer fijne poriën tot een lagere en dus minder nauwkeurige wateropneming leidt dan de vacuümmethode.

Aan een monster splijttegels werd bijvoorbeeld met de vacuümmethode $W_m = 7,2 \text{ \% (m/m}_d\text{)}$ gevonden en $W_m = 6,6 \text{ \% (m/m}_d\text{)}$ met de kookmethode. De bedoelde vergelijking had betrekking op een uitvoeringswijze met een ontluchting boven water gedurende twee uren op een druk van

2 kN/m², gevolgd door een bewaarperiode onder water van vier etmalen en een uitvoeringswijze met een effectieve kooktijd van vier uren en een afkoel- en bewaarperiode onder water van één etmaal.

Het maximale watergehalte W_m laat zich ook berekenen uit de gemakkelijk te bepalen scherfdichtheid ρ_s en de gemiddelde dichtheid ρ_w , van de vaste stof inclusief de niet voor water toegankelijke holten in de scherf.

Voor W_m in % (m/m_d) geldt:

$$W_m = \left(\frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_w'} \right) \cdot 10^5 \quad (3a)$$

Ons onderzoek [4] aan Nederlandse bouwkeramiek naar de getalwaarde van ρ_w' in kg/m³ leidde tot de volgende vuistregel:

$$\rho_w' = 2680 - 20 \cdot K_1 \quad (4)$$

Hierin is K_1 de gemiddelde lineaire bakkrimp in %, die het materiaal heeft ondergaan. De laatste term van de vuistregel brengt in het bijzonder het effect van de bakkrimp op het volume aan alzijdig gesloten poriën in rekening.

Van der Klugt [6] heeft aangetoond, dat berekeningen van maximale watergehalten met een vaste waarde van ρ_w' gelijk aan 2645 kg/m³ voor de meeste steenachtige bouwmaterialen goed bruikbare resultaten opleveren.

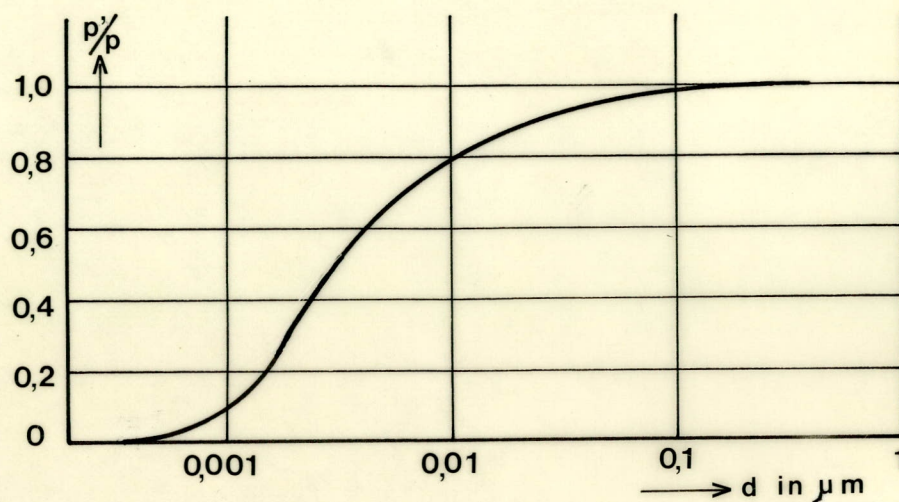
Formule (3a) voor W_m in % (m/m_d) wordt dan:

$$W_m = \frac{100.000}{\rho_s} - 37,8 \quad (3b)$$

Opgemerkt wordt, dat het voorgaande steeds betrekking had op de karakterisering van de gemiddelde vochtbelasting van een bouw-element. Een mogelijk ongelijkmatige verdeling van het vocht in een bouwelement komt in volgende paragrafen aan de orde.

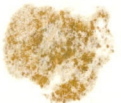
3.3 Hygroscopisch vocht

Een volledig droog monster bouwkeramiek, dat in lucht met een zekere relatieve vochtigheid wordt geplaatst, neemt op den duur een bepaalde hoeveelheid vocht op. Die vocht opneming wordt ingeleid door moleculaire adsorptie en voltooid door capillaire condensatie. Deze condensatie treedt op, omdat de maximale dampspanning van water in zeer nauwe haarvaten lager is dan die van vrij water. Thomson heeft die relatie beschreven. Ze is voor een temperatuur van 10 °C weergegeven in figuur 3.



Figuur 3 Relatieve maximale dampspanning (p'/p) als functie van de haarvatdiameter d

Op de horizontale as is de haarvatdiameter uitgezet en op de verticale as de verhouding van de maximale dampspanning boven de meniscus in een haarvat, tot de maximale dampspanning van vrij water.



De grafiek leert, dat, bij een normale relatieve vochtigheid van de lucht van 80%, de voor waterdamp toegankelijke haarvaten zich tot een meniscusdiameter van $0,01 \mu\text{m}$ met water zullen vullen.

Het volume aan poriën nauwer dan $0,01 \mu\text{m}$ is in bouwkeramiek relatief gering, op grond waarvan het evengewichtswatergehalte W_e van alle soorten bouwkeramiek bij een relatieve vochtigheid van 80% meestal lager blijkt te zijn dan 0,8% (m/m_d).

De grafiek laat verder zien, dat de dampspanningsverlaging en daarmee de hier bedoelde capillaire condensatie voornamelijk in poriën nauwer dan $0,1 \mu\text{m}$ (microporiën) een rol van betekenis kan spelen. Dit houdt in, dat in natte bouwkeramiek, alle poriën kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$ geheel met water gevuld zullen raken.

Opgemerkt wordt, dat de aanwezigheid van zouten in de scherf het evengewichtswatergehalte sterk kan doen stijgen. Dit verschijnsel kan zich voordoen in grondkeringsmuren en muren waarbij aan de waterdichtheid van de fundering onvoldoende aandacht is besteed. Het met het grondvocht aangevoerde zout hoopt zich bij de waterdamping uit de muur op in de scherf en leidt tot blijvend vochtig metselwerk [6].

3.4 Vocht opneming door condensatie

Op het oppervlak of in de macroporiën van bouwkeramiek zal alleen waterdamp condenseren, wanneer de dampspanning van de lucht, die op een gegeven plaats in contact is met het materiaal, hoger wordt dan de bij de materiaaltemperatuur behorende maximale dampspanning van water.

Aan de aan buitenlucht blootgestelde oppervlakte van een bouw-materiaal kan die situatie bijvoorbeeld ontstaan, wanneer de oppervlaktetemperatuur door uitstraling van warmte naar de hemel lager wordt dan de temperatuur van aangrenzende nagenoeg verzadigde buitenlucht (dauw). Ook een plotselinge weersverandering, waarbij koude massieve bouwkeramiek wordt blootgesteld aan warmere lucht met een hoger vochtgehalte kan tot condensatie van waterdamp op het oppervlak aanleiding geven. In "zuigende" bouwkeramiek zal het condenswater het poriënsysteem binnendringen.

In een buitenwand van droge verglaasde bouwkeramiek kunnen zich onder bepaalde omstandigheden, direct onder de glazuurlaag, eveneens condensatieverschijnselen voordoen. De waterdampspanning in de lucht aan de binnenzijde van de wand dient daarbij hoger te zijn dan de maximale dampspanning behorende bij de temperatuur van de glazuurlaag, die verondersteld wordt lager te zijn dan de temperatuur aan de binnenzijde. Er komt in dat geval een diffusieproces op gang met als drijvende kracht het bedoelde meestal zeer geringe dampspanningsverschil (zie 3.6). De condensvorming verloopt mede door de hoge diffusieweerstand van het materiaal uiterst traag en stopt geheel wanneer de vochtgrens in de scherf een temperatuurniveau heeft bereikt, waarbij de maximale dampspanning gelijk is aan de dampspanning van de lucht aan de binnenzijde van de beschouwde wand.

Het condenswater zal zich, op grond van de wetten geldende voor capillair watertransport, bij voorkeur in de nauwste poriën nestelen. Gezien de traagheid waarmee het proces verloopt, zal de hier bedoelde inwendige condensatie alleen op zeer lange termijn onder extreme omstandigheden een vorstschaderisico kunnen opleveren.

In een droge wand van bouwkeramiek zonder dampremmende laag zal het temperatuur- en dampspanningsverloop geen aanleiding tot inwendige condensatie kunnen geven [6].

3.5 Vocht opneming door capillaire krachten

3.5.1 Betekenis van capillair watertransport

Water, dat in contact wordt gebracht met een droog keramisch produkt, wordt door capillaire krachten in de scherf gezogen. Dit vochttransport, gevoed door een aanbod van regenwater, dooiwater of bodemvocht aan meestal één zijde van het produkt, levert in de praktijk een belangrijke bijdrage tot de vochtbelasting van bouwkeramiek in de periode voordat de vorst inzet. Het gedrag van het water in het ingewikkelde poriënsysteem van bouwkeramiek kan voor een belangrijk deel worden verklaard aan de hand van de eigenschappen van enkelvoudige cilindrische haarvaten.

3.5.2 Penetratie van water in haarvaten

Het watertransport in een met water in contact gebracht open cilindrisch haarvat wordt bewerkstelligd door de capillaire zuigspanning.

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \phi}{r} \quad (5)$$

Hierin is,

- p_c : capillaire zuigspanning in N/m^2 ,
- σ : oppervlaktespanning van water ($75,7 \cdot 10^{-3} N/m$ bij $0^\circ C$),
- r : straal van haarvat ter plaatse van de meniscus in m
- ϕ : randhoek tussen vloeistof en wand in graden.

De randhoek ϕ is bij waterpenetratie in haarvaten van keramisch materiaal in het algemeen practisch 0° ($\cos \phi = 1$).

Formule 5 wordt dan

$$p_c = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \quad (5a)$$

Opgemerkt wordt, dat de bedoelde randhoek in materiaal, dat een siliconenbehandeling heeft ondergaan, groter is dan 90° .

$\cos \phi$ heeft dan een negatieve waarde hetgeen betekent, dat er een uitwendige druk nodig is om water in gesiliconiseerde haarvaten te doen doordringen. Dit geval blijft hier verder buiten beschouwing.

De zuigspanning p_c blijkt in de nauwe poriën van bouwkeramiek zo groot te zijn, dat met betrekking tot het watertransport in dit materiaal in verreweg de meeste gevallen alleen nog de invloed van de inwendige wrijving van belang is. Een invloed van zwaartekracht of winddruk op het vochttransport wordt in het navolgende dan ook verwaarloosd.

Voor de invloed van de inwendige wrijving op het watertransport in haarvaten geldt volgens Poiseuille:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \eta \cdot h}{\pi \cdot r^4} \cdot q \quad (6)$$

Hierin is,

q : volumestroom in m^3/s

h : penetratie in het haarvat in m

r : straal van het haarvat in m

η : dynamische viscositeit van water ($1,79 \cdot 10^{-3}$ N.s/m² bij 0 °C)

Δp : drukval over penetratie h in N/m².

Uit de formules 5 en 6 volgen voor de penetratiesnelheid v in m/s en de penetratie h in m:

$$v = \frac{\sigma \cdot r}{4 \cdot \eta \cdot h} \quad (7)$$

$$h = \sqrt{\frac{\sigma \cdot r}{2 \eta}} \cdot \sqrt{t} \quad (8)$$

Aanvullend is hierin,

t : penetratietijdsduur in s.

3.5.3 Spontane waterabsorptie door een keramische scherf

Een bijvoorbeeld door berekening eenzijdig met water in contact gebracht blokvorming stuk bouwkeramiek (figuur 4) zuigt water aan tot het waterfront de tegenoverliggende zijde heeft bereikt. De wateropneming stopt op dat moment tamelijk abrupt. Op de penetratie van het vochtfront en de waterabsorptie blijken bij verwaarlozing van de invloed van de zwaartekracht formules van dezelfde bouw als formule 8 van toepassing te zijn. Het zijn:

$$x = B \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

$$m = A \cdot \sqrt{t} \quad (10)$$

Hierin is,

x : penetratie van het water in de scherf in m

B : waterpenetratiecoëfficiënt van de scherf in $\text{m/s}^{0,5}$
bij θ °C

m : waterabsorptie per m^2 aanzuigvlak in kg/m^2

A : waterabsorptiecoëfficiënt van de scherf in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0,5})$
bij θ °C

t : penetratietijdsduur in s.

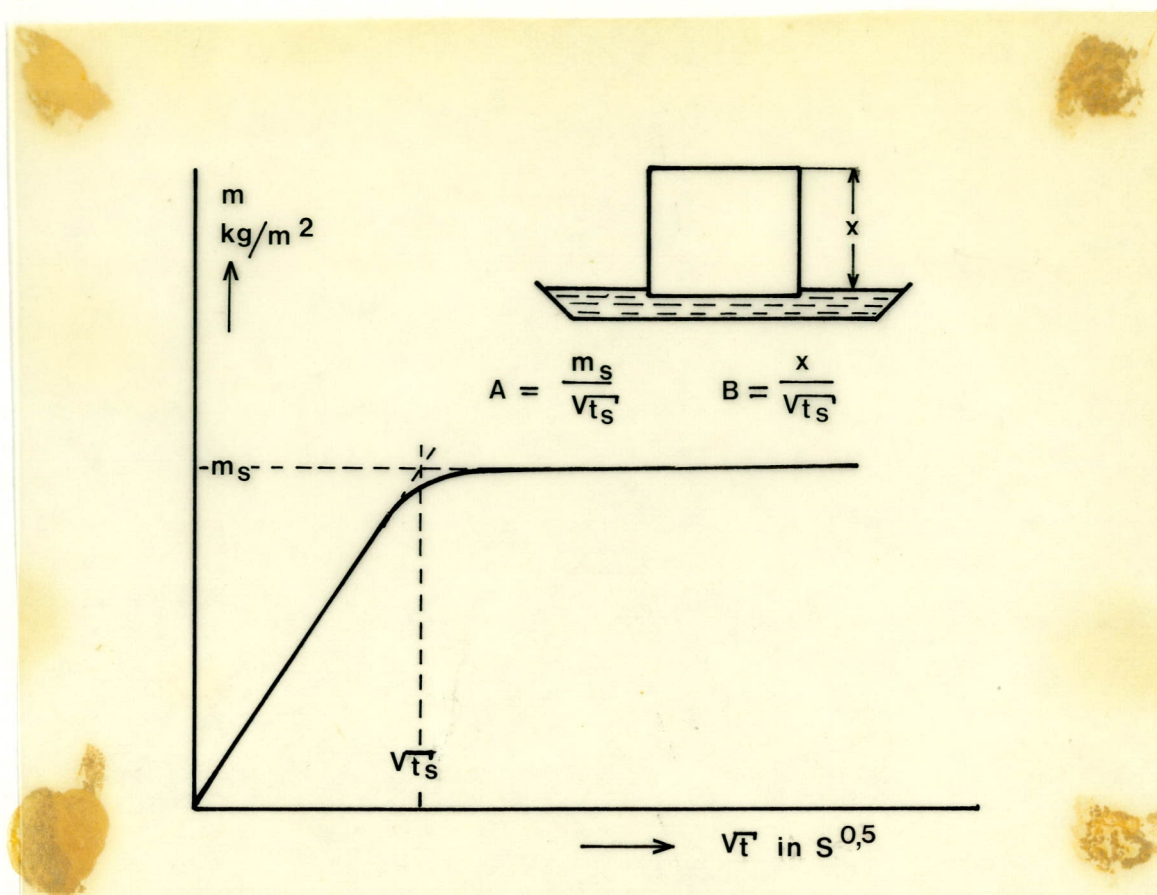
Voor de temperatuurafhankelijkheid van B en A gelden:

$$B = B_0 (1 + 0,0155 \cdot \theta) \quad (9a)$$

$$A = A_0 (1 + 0,0155 \cdot \theta) \quad (10a)$$

Hierin zijn A_0 en B_0 de waarden bij 0 °C.

De coëfficiënten A en B laten zich bepalen uit periodieke wegingen van een proefstuk met constante doorsnede, dat water aanzuigt. Figuur 4 laat het verband tussen m en $\sqrt{t}$ voor een proefstuk met een hoogte x zien.



Figuur 4 Spontane waterabsorptie door een keramische scherf

Voor de relatie tussen A en B geldt in de gestabiliseerde vochttoestand:

$$W_s = \frac{100 \cdot A}{B \cdot \rho_s} \quad (11)$$

Aanvullend is hierin,

W_s : spontane waterabsorptie in % (m/m_d)

ρ_s : scherfdichtheid in kg/m^3 .

Het quotiënt van de spontane waterabsorptie W_s en het maximale watergehalte W_m levert de spontane verzadigingsgraad S_s op.

$$S_s = \frac{W_s}{W_m} \quad (12)$$

De getalwaarden van A en B lopen voor de verschillende soorten bouwkeramiek sterk uiteen en zijn bovendien vaak afhankelijk van de richting van het watertransport door de scherf. Met name in extrusieprodukten zijn de coëfficiënten A en B in de persrichting soms dubbel zo groot als in richtingen loodrecht daarop. Ook in andere eigenschappen van de scherf, zoals bijvoorbeeld in de voortplantingssnelheid van ultrageluid, komt dit anisotrope gedrag tot uiting. De spontane waterabsorptie W_s in verschillende richtingen blijft vaak ongeveer gelijk. De anisotropie wordt meestal veroorzaakt door de oriëntatie van de massadeeltjes bij de vormgeving van het produkt. Grove massabestanddelen bevorderen in het algemeen een isotroop gedrag.

In tabel 4 zijn voorbeelden opgenomen van de hygrische eigenschappen van enkele Nederlandse bakstenen en dakpannen. De gegevens hebben betrekking op metingen loodrecht op het zichtvlak van de produkten. De eenvoudige bepalingen zijn uitgevoerd aan kleine uit de produkten gezaagde blokvormige proefstukken. W_m is berekend met formule 3b.

Tabel 4. Hygrische eigenschappen van enkele monsters bouwkeramiek

eigenschap	symbool	eenheid	baksteen		dakpan	
			1	2	1	2
scherfdichtheid	ρ_s	kg/m ³	1700	1950	1900	1950
max. watergehalte	W_m	% (m/m _d)	21,0	13,5	14,8	13,5
spontane waterabsorptie	W_s	% (m/m _d)	14,7	7,3	11,8	10,3
spontane verza- digingsgraad	S_s	-	0,70	9,54	0,80	0,76
waterabsorptie- coëfficiënt	A	kg/(m ² .s ^{0,5})	0,35	0,10	0,09	0,07
waterpenetratie- coëfficiënt	B	10 ⁻³ .m/s ^{0,5}	1,40	0,70	0,40	0,35

De waterpenetratiecoëfficiënt B is een maat voor de snelheid waarmee water in de scherf optrekt en zegt tevens iets over de fijnheid van de poriënstructuur. Naarmate de haarvaten nauwer zijn (vette grondstofmassa) en de beschikbare haarvatlengte in de X-, Y- en Z-richting van de scherf ten opzichte van de penetratie in de X-richting groter is (anisotropie), zal de penetratiecoëfficiënt lager uitvallen. Hierbij dient te worden opgemerkt, dat de formules 8 en 9 zich niet lenen voor een berekening van de voor de wateraanzuiging maatgevende poriënstraal. Daarvoor is het haarvatenstelsel in een scherf te grillig van vorm.

Een hoge waarde van de absorptiecoëfficiënt A betekent, dat de scherf in korte tijd veel (regen)water opneemt. Een hoge waarde van A in de X-richting in combinatie met een lage waarde van B in diezelfde richting betekenen, dat de scherf in een doorsnede loodrecht op de X-richting een zeer groot aantal relatief nauwe poriën zal bevatten die bij bevochtiging van de scherf met water gevuld raken en dan volgens formule 11 bij een gegeven scherfdichtheid resulteren in een grote spontane waterabsorptie W_s .

Omgekeerd geeft een hoge waarde van B en een kleine waarde van A aan, dat de scherf tamelijk weinig, doch relatief grove poriën bevat. De spontane waterabsorptie is dan gering. Blijkens de praktijkervaring is het vorstschaderisico in zo'n geval klein (zie 2.3).

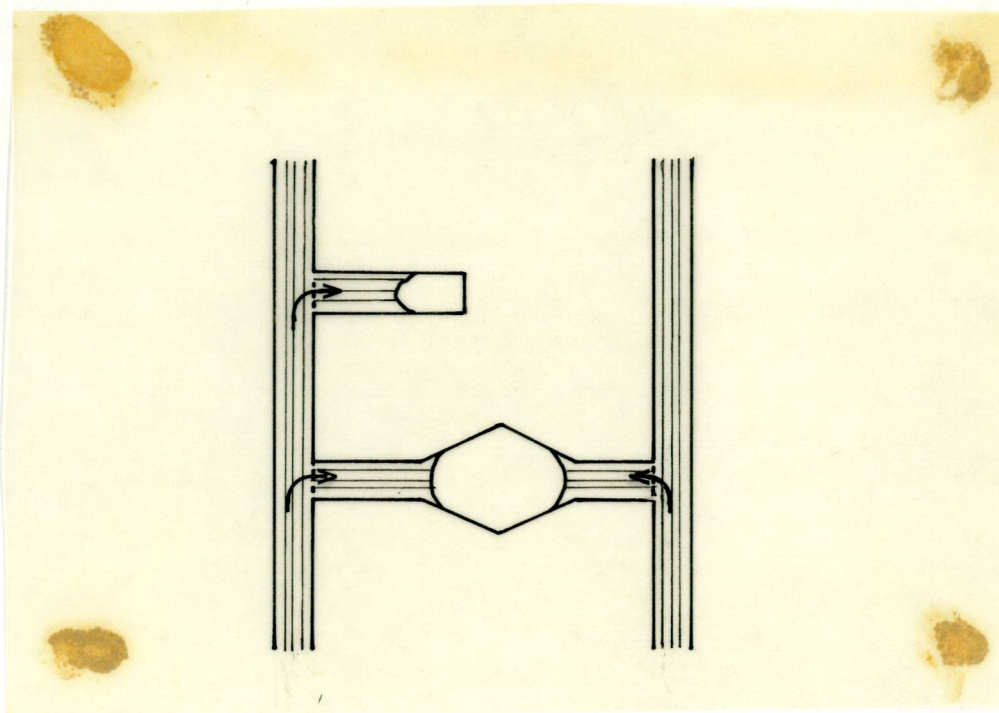
3.5.4 Insluiting van lucht bij waterabsorptie

Bij een éézijdige waterabsorptie kan de lucht in de poriën van de scherf in principe vóór het vochtfront uit ontsnappen. Toch blijkt uit de verzadigingsgraden in tabel 4, dat niet alle open poriën met water zijn gevuld. Her en der in het grillige haarvatenstelsel is kennelijk toch lucht ingesloten. Hiervoor komen in aanmerking: blinde haarvaten, dwarsverbindingen van haarvaten, die gelijktijdig door het waterfront worden gepasseerd en haarvaten, die tengevolge van lokale verschillen in zuigvermogen door het oprukkende water worden ingesloten.

Lucht van atmosferische druk, die in het poriënsysteem van een met water in contact staande scherf is gevangen, wordt door het opdringende water gecomprimeerd. Het watergehalte stabiliseert zich, zodra de druk in het samengeperste luchtvolume, gehoorzamen aan de wet van Boyle, in evenwicht komt met de atmosferische druk vermeerderd met de capillaire zuigspanning volgens formule 5a. In tabel 5 zijn de bedoelde overdrukken voor verschillende meniscusdiameters weergegeven.

Tabel 5. Overdruk in haarvaten met ingesloten lucht.

meniscusdiameter in μm	0,1	1	10	10
overdruk in bar	30,3	3,0	0,3	0,03



Figuur 5 Insluiting van lucht in haarvaten

Figuur 5 brengt het stabilisatieproces in beeld voor blinde haarvaten en beiderzijds door water ingesloten haarvaten. Opgemerkt wordt, dat de luchtbel in laatstbedoelde situatie steeds een zodanige positie zal innemen, dat de trekkracht van beide meniscussen gelijk is.

Belangrijke vragen met betrekking tot de vorstbestandheidsproblematiek zijn, in welk type poriën de gevangen lucht zich bijvoorkeur zal nestelen en onder welke omstandigheden de hoeveelheid gevangen lucht het grootst en daarmee de spontane verzadigingsgraad het laagst zal zijn.

De poriën kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$, zullen door capillaire condensatie (zie 3.3) al spoedig geheel met water gevuld raken.

In beiderzijds door water ingesloten haarvaten met een gewoonlijk sterk variërende diameter, zal de luchtbel positie kiezen in een relatief breed gedeelte, omdat de kans op evenwicht van

de trekkrachten van de meniscussen zich hier het eerst, namelijk bij de laagste compressie, voordoet.

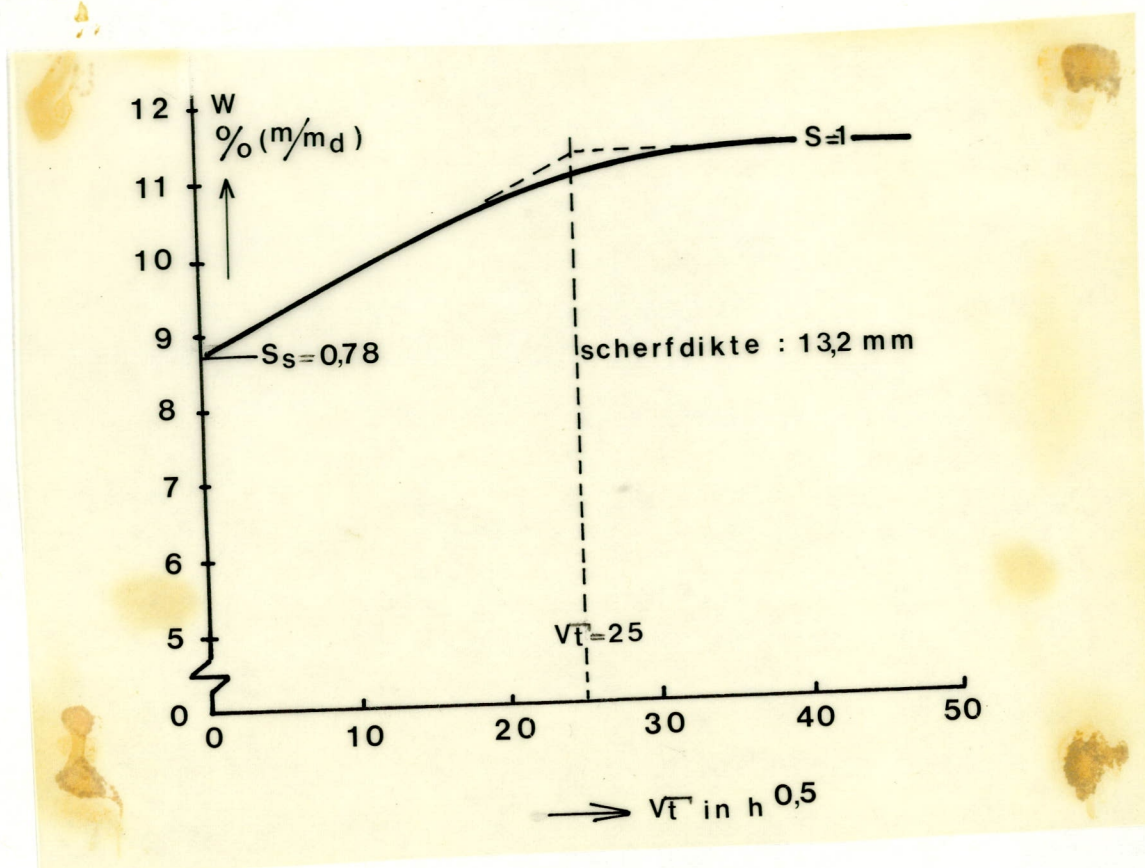
De kans op insluiting van lucht tengevolge van lokale verschillen in zuigvermogen zal groter zijn, naarmate de poriëndiameters in de scherf een grotere spreiding vertonen. De lucht zal daarbij in de grote poriën worden gevangen, aangezien de kans hier het grootst is, dat de relatief geringe zuigkracht van zo'n grote porie niet in staat is, de relatief grote hoeveelheid vulwater snel genoeg over de gemiddeld nauwere aanvoerweg aan te zuigen.

Aangezien het beschikbare gecomprimeerde volume aan blinde haarvaten in een scherf naar alle waarschijnlijkheid in de meeste gevallen relatief klein zal zijn, duidt een lage door spontane waterabsorptie verkregen verzadigingsgraad S_s (formule 12) derhalve op de aanwezigheid van sterk variërende poriëndiameters boven de grens van $0,1 \mu\text{m}$, met als bijzonderheid, dat de lucht in de relatief grote poriën gevangen zit (zie ook 3.5.5). Introductie van relatief grote poriën, door een iets sterkere sintering (zie 3.2), door te vormen met luchthoudende klei, door bijmenging van grofporeuze toeslagstoffen of uitbrandstoffen, verlaagt dus de spontane verzadigingsgraad en verhoogt het luchtgehalte in de natte scherf.

Een interpretatie van verzadigingsgraadbepalingen in bovenbedoelde zin is uiteraard alleen toelaatbaar, indien de lucht in de scherf bij de wateraanzuiging voldoende gelegenheid tot ontsnapping krijgt en indien de betreffende bepalingen op precies dezelfde wijze worden uitgevoerd. Een verzadigingsgraadbepaling door directe onderdompeling van het proefstuk in water geeft een vals beeld.

3.5.5 Volledige verzadiging van bouwkeramiek

De spontaan door een keramische scherf geabsorbeerde hoeveelheid water brengt deze slechts schijnbaar in een stabiele vochtigheidstoestand. Een met water in contact staande scherf blijft namelijk ook na een spontane waterabsorptie langzaam vocht opnemen tot deze geheel verzadigd is.



Figuur 6 Isotherme verzadiging van een panscherf

Figuur 6 toont deze verzadiging van een onder isotherme omstandigheden in water gedompelde panscherf. Het beginwatergehalte is de spontane waterabsorptie W_s . Na verloop van tijd heeft de scherf het maximale watergehalte W_m verkregen.

Dit verschijnsel kan verklaard worden uit het oplossen van de ingesloten lucht in het poriënwater en in de afvoer van de opgeloste lucht door diffusie naar het omringende vrije water. Voor een in water ondergedompelde planparallelle plaat bouwkeraamiek kan het verzadigingsproces beschreven worden met formule 13 [7].

$$\Delta s = \frac{F_{\theta}}{L} \cdot \sqrt{(1 - S_s) \cdot S_s} \cdot \sqrt{t_x} \quad (13)$$

Hierin is:

Δs : aanwas van de gemiddelde verzadigingsgraad van de scherf boven S_s

S_s : de spontane, door éézijdige capillaire aanzuiging bewerkstelligde verzadigingsgraad

t_x : diffusietijdsduur in uren, gerekend van het tijdstip waarop de spontane verzadigingsgraad S_s werd bereikt

L : halve dikte van de scherf in m

F_{θ} : rekenwaarde bij een watertemperatuur van θ °C.

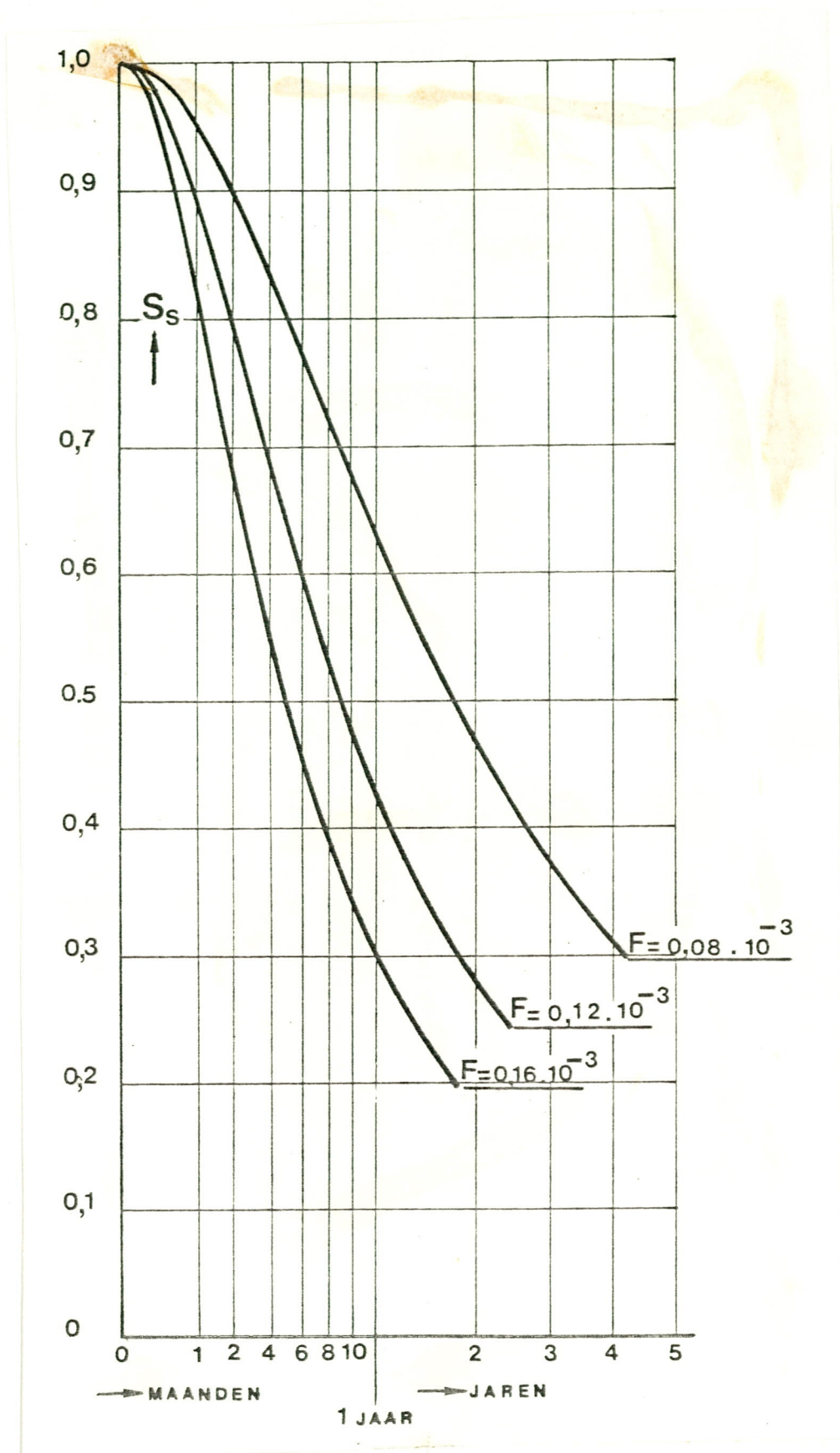
De aanwas Δs van de spontane verzadigingsgraad S_s ontstaat, zoals ook experimenteel werd aangetoond, doordat, gerekend van de oppervlakte af, een steeds dikker wordende laag van een ondergedompelde scherf volledig met water verzadigd raakt, terwijl in de dunner wordende kern de oorspronkelijke verzadigingsgraad S_s gehandhaafd blijft. Het verzadigingsproces bewerkstelligt derhalve een ongelijkmatige vochtverdeling in de scherf.

De getalwaarde van F_{θ} is kleiner, naarmate de met lucht gevulde poriën in de scherf groter zijn (zie hiertoe 3.5.4). Grote poriën blijven langer met lucht gevuld dan kleinere. Dit versterkt de stelling uit 3.5.4, dat de ingesloten lucht zich in met water doordrenkt materiaal voornamelijk ophoudt in de grove poriën. De rekenwaarde wordt voorts nog beïnvloed door de anisotropie van de scherf en de temperatuur. De rekenwaarde kan experimenteel op eenvoudige wijze vastgesteld worden door periodieke wegingen van onder water gedompelde dunne plaatvormige proefstukken. Bij bouwkeramiek worden gewoonlijk getalwaarden tussen $0,08 \cdot 10^{-3}$ en $0,16 \cdot 10^{-3}$ gevonden.

In figuur 7 is voor drie waarden van F_{θ} de met formule 13 berekende tijdsduur weergegeven voor de volledige verzadiging van een scherf over een diepte van 10 mm in relatie tot de initiële spontane verzadigingsgraad S_s . De sterke invloed van zowel F_{θ}

als S_g op dit overigens langzaam verlopende verzadigingsproces komen in deze figuur duidelijk tot uiting.

Een en ander betekent, dat bouwkeramiek in constructies, die langdurig met water in contact staan, een gemiddelde verzadigingsgraad kunnen bereiken, die uitstijgt boven de spontane verzadigingsgraad en waarbij dan een kleiner of groter deel van de scherf of in extreme gevallen de gehele scherf volledig met water verzadigd raakt. Men denke in dit verband bijvoorbeeld aan daken onder een langzaam smeltend sneeuwdek, aan dekvloeren op een slecht gedraineerde bodem, aan grondkeringsmuren en dergelijke. Een lage spontane verzadigingsgraad van het scherfmateriaal vertraagt het verzadigingsproces in zeer sterke mate. Voor beproevingsdoeleinden kan het proces worden versneld door de drenking van de proefstukken in heet water te doen plaatsvinden [8].



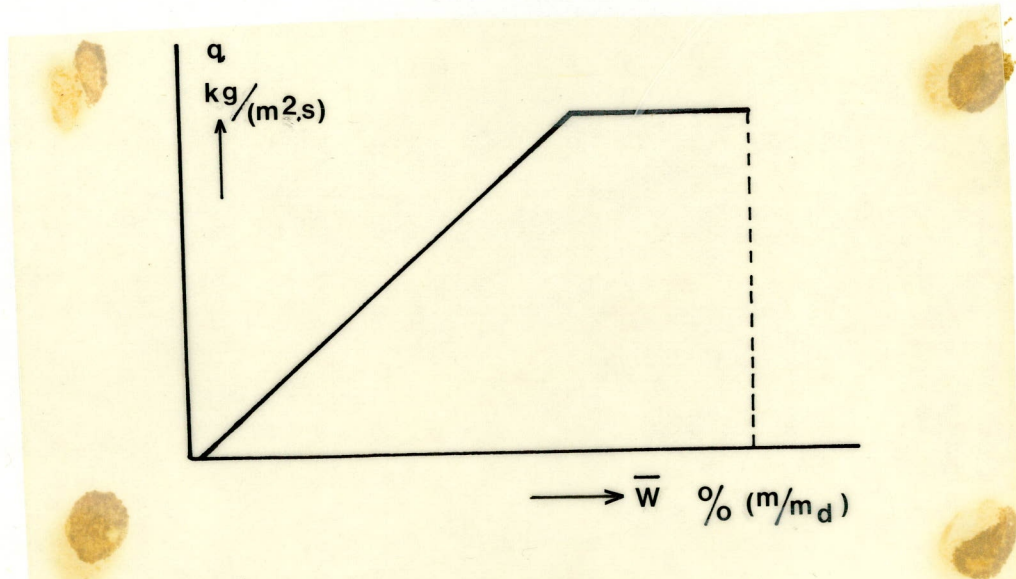
Figuur 7 Volledige verzadiging van een scherf over een diepte van 10 mm in relatie tot de initiële spontane verzadigingsgraad en de rekenwaarde F

3.6 Drogging van bouwkeramiek

In natte perioden voorafgaand aan de vorst wisselen perioden met vochttaanbod in het algemeen af met perioden waarin meer of minder water uit de bouwconstructie verdamppt. Hierdoor wordt de verzadiging van het bouw materiaal met water beperkt of vertraagd. Een evenwicht tussen waterabsorptie en verdamping bij een zo laag mogelijk watergehalte is met betrekking tot het vorstschaderisico van groot belang (zie 2.2).

In de eerste plaats is daartoe een lage waarde van de spontane waterabsorptie W_s gewenst (zie ook 2.3). Van belang zijn ook scherfeigenschappen, die onder gegeven uitwendige droogomstandigheden een zo hoog mogelijke verdampingssnelheid opleveren.

Bij de droging van met water doordrenkte bouwkeramiek dient onderscheid gemaakt te worden tussen een eerste droogstadium, waarin de waterverdamping aan de oppervlakte plaats vindt en een volgende fase, waarin het vochtfront zich allengs dieper in de poriën van de scherf terugtrekt.



Figuur 8 Schematisch verloop van de droogsnelheid q met het gemiddelde watergehalte $\bar{W}$ van een nat gebakken materiaal

In figuur 8 is het verloop van de droogsnelheid met het gemiddelde watergehalte van het produkt onder constante droogcondities schematisch weergegeven. In de eerste fase is de verdamping uit een vloer, een muur of een dak uitsluitend afhankelijk van de uitwendige omstandigheden, zoals luchttemperatuur, luchtvochtigheid, luchtsnelheid, bezonning en warmtetoevoer van binnen uit.

Bij gelijkblijvende omstandigheden is de verdampingssnelheid per oppervlakte eenheid ongeveer constant. Door de zuigkracht van de zich door waterverdamping krommende meniscussen (zie formule 5) kan het vochtfront zich geruime tijd aan het oppervlak van de scherf handhaven. Het watertransport naar het oppervlak van de starre scherf wordt mogelijk gemaakt door de expansie van de onder capillaire druk staande ingesloten lucht en doordat de wijde poriën worden leeggezogen door de nauwere, die een sterkere zuigkracht bezitten. De waterverdamping aan de oppervlakte, met de in figuur 8 aangegeven relatief hoge verdampingssnelheid, wordt derhalve op grond van het gestelde in 3.5.4 bevorderd door een lage spontane verzadigingsgraad van de scherf.

Een verschil in temperatuur tussen expositievlak en een warmere keerzijde van het produkt zal eveneens enigszins tot het vochttransport naar het expositievlak bijdragen. Hier is de temperatuurafhankelijkheid van de oppervlaktespanning verantwoordelijk voor het transport.

Het zal voorts duidelijk zijn, dat het verdampingsfront zich onder tamelijk vochtige weersomstandigheden tot een lager restwatergehalte aan het oppervlak kan handhaven dan bij goed drogend weer, waarbij de uit het binnenste van de scherf, per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid, aan te voeren hoeveelheid water groter is.

Zodra de aanvoer van water achterblijft bij de verdamping aan de oppervlakte, trekt het droogfront zich in de poriën terug en daalt de droogsnelheid. Die daling van de droogsnelheid onder overigens constant veronderstelde droogcondities wordt veroorzaakt door de met de diepte van het vochtfront in het produkt toenemende diffusieweerstand van de af te voeren waterdamp. Voor deze diffusieweerstand geldt bij 10 °C:

$$Z = \frac{\Delta p}{q} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot \mu \cdot x \quad (14)$$

Hierin is:

- Z : diffusieweerstand van waterdamp in de scherf in N.s/kg
 Δp : dampspanningsverschil in de richting van de
diffusiestroom over de afstand x in N/m²
 q : diffusiestroomdichtheid in kg/(m².s)
 x : afstand in m
 μ : diffusieweerstandsgetal van de scherf in de
richting van de diffusiestroom.

De getalwaarden van μ lopen voor bouwkeramiek sterk uiteen. Voor de meeste metselbaksteenfabrikaten bijvoorbeeld tussen 10 en 30.

De droging van een bouwelement met een gegeven dikte wordt op grond van formule 14 in de tweede droogfase bevorderd door een lage waarde van het diffusieweerstandsgetal. Dit getal is lager naarmate de scherf in de diffusierichting minder gelaagd van opbouw is. Het getal is echter tevens ten naaste bij omgekeerd evenredig met de spontane waterabsorptie W_s van de scherf [7]. De op grond hiervan vereiste hoge waarde van W_s is een wens, die strijdig is met de eerder geformeerde primaire eis, dat W_s , uiteraard binnen haalbare grenzen, zo laag mogelijk gekozen dient te worden. Samengevat, is een evenwicht tussen waterabsorptie en verdamping bij een zo laag mogelijk watergehalte derhalve het beste gewaarborgd in niet-gelaagde bouwkeramiek met een lage spontane waterabsorptie en een lage spontane verzadigingsgraad.

Het vorenstaande geldt uiteraard alleen voor niet-verglaasde bouwkeramiek. Een steeds toenemende verzadiging, als beschreven in 3.5.5, zal zich bij verglaasde bouwkeramiek, die op niet-geglazuurde plaatsen regelmatig in contact komt met water, zeker kunnen voordoen.

4. BEVRIEZING EN ONTDOOIING VAN BOUWKERAMIEK

4.1 Algemene opmerkingen

In dit hoofdstuk is getracht de bevriezing en ontdooiing van bouwkeramiek op inzichtelijke wijze te beschrijven.

Wat de bevriezing betreft hebben de beschouwingen voornamelijk betrekking op de vorming van ijs in een keramische scherf door éézijdige warmteonttrekking. Vooral verschijnselen, die tot het ontstaan van vorstschade aanleiding zouden kunnen geven, krijgen aandacht. Hierbij wordt voortgebouwd op de inzichten die door talrijke onderzoekers in de loop der jaren werden verworven [9, 10, 11, 12, 13, 14]. Aan een hypothetische benadering van de problematiek viel daarbij niet altijd te ontkomen.

4.2 Bevriezing van vrij water

Wanneer men een eventuele tijdelijke onderkoeling buiten beschouwing laat, stolt zuiver vrij water door warmteonttrekking onder atmosferische druk bij 0 °C tot ijs. De stollingswarmte bedraagt 332 kJ/kg. De faseverandering gaat, zoals tabel 6 laat zien, met een aanzienlijke vergroting van het massiek volume gepaard. Bij voortgezette afkoeling krimpt het ijs weer enigszins.

Tabel 6. Massiek volume van water en ijs onder atmosferische druk

toestand	massiek volume $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
water van 0 °C	1,0002
ijs van 0 °C	1,0908
ijs van - 10 °C	1,0891
ijs van - 20 °C	1,0875

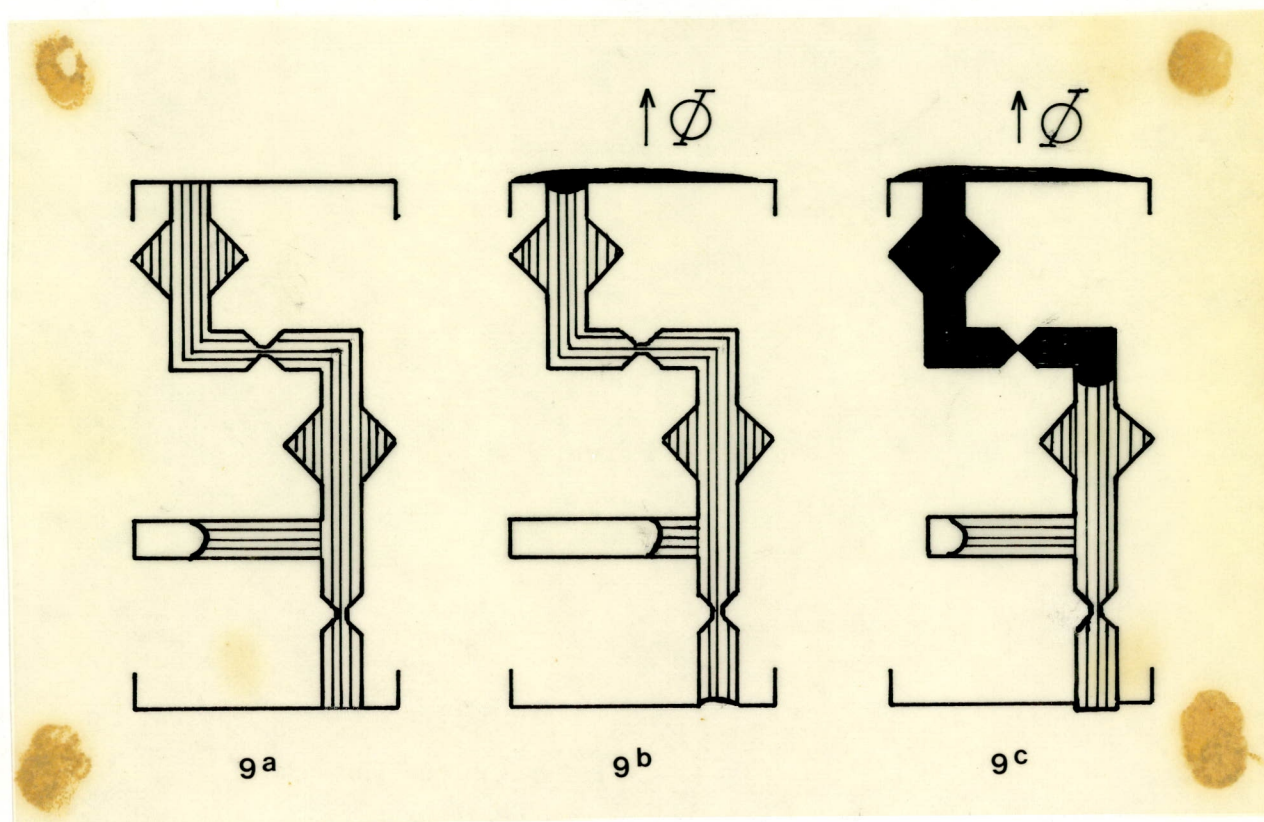
De volumevergroting bij de stolling is 9,1%.

Voor de krimp, die bij afkoeling van het ijs optreedt geldt gemiddeld een lineaire uitzettingscoëfficiënt van $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Ter vergelijking zij vermeld, dat de lineaire uitzettingscoëfficiënt van een keramische scherf slechts circa $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bedraagt.

Indien de bevriezing van het water onder verhoogde druk plaatsvindt, daalt het stolpunt onder 0 °C. Voor absolute drukken tussen 1 en 2000 bar bedraagt de vriespuntsdaling van water gemiddeld circa 0,01 °C/bar. Een drukverhoging van 100 bar levert derhalve een vriespuntsdaling van circa 1 °C op.

4.3 IJsvorming in een haarvat

Bij de bevroering van water in de haarvaten van een keramische scherf kunnen worden onderscheiden: een beginfase waarin de ijsvorming uitsluitend aan het oppervlak van de scherf plaatsvindt, een fase waarin het ijs in het haarvatenstelsel penetreert en een eindfase waarin het reeds gevormde ijs verder afkoelt.



Figuur 9 IJsvorming in een haarvat

Ter toelichting is in figuur 9a schematisch een haarvat met cirkelvormige doorsnede getekend. Het is met water van 0 °C gevuld en heeft een blinde aftakking met luchtzak. De meniscussen aan boven- en onderzijde zijn niet gekromd. De druk in het water is gelijk aan de atmosferische druk. Voorlopig wordt verondersteld dat de warmteonttrekking bij de bevroering uitsluitend aan de bovenzijde plaatsvindt en dat noch via de wanden van het systeem noch via de onderzijde warmte toe- of afvloeit.

Figuur 9b toont hetzelfde haarvat in het beginstadium van de bevriezing. Door eenzijdige warmteonttrekking aan de bovenzijde tot een omgevingstemperatuur onder 0 °C bevriest het water aan de monding. Om thermodynamische redenen kromt het grensvlak tussen water en ijs zich op soortgelijke wijze als het grensvlak tussen water en lucht bij waterverdamping en ontwikkelt zich een drukverschil over het grensvlak [11]. Deze frontdruk kan maximaal oplopen tot:

$$P'_c = \frac{2 \cdot \sigma_i}{r} \quad (15)$$

Hierin is:

P'_c : frontdruk in N/m²

r : straal van het haarvat ter plaatse van het ijsfront in m

σ_i : grensvlakspanning tussen water en ijs in N/m

Formule 15 komt overeen met formule 5a.

De grensvlakspanning tussen water en ijs bedraagt $33 \cdot 10^{-3}$ N/m, dat is ongeveer 44% van de oppervlaktespanning tussen water en lucht [11].

In tabel 7 is de maximale frontdruk P'_c voor verschillende grensvlakdiameters weergegeven.

Tabel 7. Drukverschil over het grensvlak tussen water en ijs in haarvaten

grensvlakdiameters in μm	0,1	1	10
frontdruk P'_c in bar	13,2	1,32	0,13

Omdat het aan de oppervlakte gevormde ijsvliesje geen druk kan opnemen manifesteert de frontdruk P'_c zich als een zuigspanning, die een watertransport naar het oppervlak tracht te bewerkstelligen. In het star veronderstelde haarvat wordt de mogelijkheid daartoe tijdelijk geboden door een gedeeltelijke expansie van de in het haarvat ingesloten lucht. De ijsvorming vindt bij voldoende water-

aanvoer alleen aan de monding van het haarvat plaats en er dringt geen ijs in het haarvat door.

Zodra de wateraanvoer achterblijft bij het door voortgezette warmteonttrekking gevormde ijs kan het ijs in een haarvat penetreren. Wijde haarvaten hebben de kleinste zuigkracht en vriezen het eerst dicht. Figuur 9c brengt de ijspenetratie in beeld. Tengevolge van variaties diameter en richting van het haarvat zet het ijs zich hierin al spoedig vast. Het aangroeiende ijs stuwt de hoeveelheid water die overeenkomt met de volumevergroting van het water bij de bevriezing (het surpluswater) voor zich uit. Het geëxpandeerde luchtinsluitel fungeert daarbij als buffer. De aanvankelijke onderdruk in het water onder het grensvlak neemt af en verandert bij voortgezette bevriezing en een beperkte ontsnappingsmogelijkheid van het surplus-water zelfs in een overdruk. Het ijs komt daarbij onder een druk te staan die gelijk is aan het drukverschil over het grensvlak tussen water en ijs (de frontdruk) vermeerderd met de druk die het surplus-water bewerkstelligt (de ontsnappingsdruk).

Tengevolge van variaties in de diameter van het haarvat zal de frontdruk tijdens de ijspenetratie sterk wisselend van grootte zijn. Vooral wanneer het ijsfront komend uit een wijd gedeelte een nauwe doorgang passeert, zal de druk op het ijs plotseling sterk toenemen. De frequentie van de drukwisselingen wordt mede door de bevriezingssnelheid bepaald.

De ontsnappingsdruk is op grond van formule 6 groter naarmate het haarvat nauwer, de door het surplus-water af te leggen weg langer en de volumestroom groter zijn. De grootte van de volumestroom wordt door de per tijdseenheid gevormde hoeveelheid ijs bepaald. De ontsnappingsdruk zal daarom groter zijn naarmate de vorst strenger is. Op grond van globale berekeningen mag worden verwacht, dat de ontsnappingsdruk, bij eenzijdige warmteonttrekking en onder voorwaarde dat de ontsnappingsroute niet is geblokkeerd, in het algemeen kleiner zal zijn dan 1 bar. Het behoeft geen betoog, dat de ontsnappingsdruk plaatselijk heel sterk kan oplopen, indien de ontsnappingsweg bijvoorbeeld door een ijsprop is geblokkeerd en zich geen luchtbuffer in het beschouwde volume-element bevindt. De kans

hierop komt in een volgende paragraaf in bespreking.

De totale op het ijs uitgeoefende druk bewerkstelligt een vriespuntsdaling van circa $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ per bar (zie 4.2) en een daarmee gepaard gaande onderkoeling van het water onder het ijsfront. Telkens, wanneer het ijsfront uit een nauw gedeelte van het haarvat in een wijder gedeelte arriveert zal de dalende frontdruk plotseeling een deel van het onderkoelde water doen bevriezen, hetgeen gepaard zal gaan met een piek in de ontsnappingsdruk.

De in het poriënwater opgeloste zouten en opgeloste lucht (zie tabel 3) worden vóór het ijsfront uitgedreven. Ze blijven in oplossing tot de concentraties eventueel zo hoog oplopen, dat de zouten uitkristalliseren en de lucht zich als belletjes afzet. De molaire concentraties van de opgeloste stoffen zijn in bouwkeramiek meestal zo laag, dat de vriespuntsdaling en de osmotische druk gewoonlijk gering zullen zijn. In principe mag echter worden verwacht, dat opgeloste stoffen vooral bij uitkristallisatie en luchtbelvorming, ook tot de drukopbouw in het haarvat kunnen bijdragen.

Volledigheidshalve dienen ook de kristaldrukken vermeld te worden, die bij temperaturen rond $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ door hydratatie van sommige zouten, zoals bijvoorbeeld NaCl en Mg Cl_2 , kunnen ontstaan [13].

De door de ijsvorming ontwikkelde krachten worden opgenomen door de haarvatwand. Eenmaal in een haarvat gevormd ijs zal bij verdere afkoeling, als gevolg van de relatief grote uitzettingscoëfficiënt (zie 4.2) meer krimpen dan het haarvat zelf. Mogelijk zal het ijs daarbij plaatselijk loskrimpen of scheuren. Verwacht mag worden, dat de bedoelde krimp de wand van het haarvat enigszins zal ontlasten totdat een temperatuurstijging van het ijs, bijvoorbeeld voorafgaand aan de dooi, de belasting weer zal doen toenemen.

4.4 Bevriezing van een keramische scherf

4.4.1 Eénzijdige bevriezing

De eenvoudige voorstelling van zaken, die in voorgaande paragraaf werd gegeven blijft in hoofdlijnen van toepassing op de eenzijdige bevriezing van een bijvoorbeeld door spontane absorptie met water doordrenkte scherf.

De bevriezing in een natte scherf voltrekt zich echter in een uitgestrekt vorstfront, dat zich voortdurend evenwijdig aan het scherfoppervlak naar binnen verplaatst. De buitenwaarts gerichte loodrecht op dit front staande componenten van de frontdrukken en de ontsnappingsdrukken belasten de keramische scherf in de opeenvolgende scheidingsvlakken tussen water en ijs op een van plaats tot plaats voortdurend wisselende trek. Vooral in materiaal met een kleine waterpenetratiecoëfficiënt en een relatief grote waterabsorptiecoëfficiënt (ook grote spontane waterabsorptie) zal die belasting aanzienlijk zijn. Hoge piekbelastingen zullen zich voorts voordoen in produkten met een heterogene scherfstructuur. In een extrusieprodukt met een zichtbaar gelaagde scherf, zal de lage frontdruk aan het ijsfront in de spleetjes evenwijdig aan het oppervlak plotseling sterk oplopen, zodra het ijs zich een weg zoekt door de meestal zeer nauwe poriën in de georiënteerde scherfmassa, die de spleetjes begrenst. Een soortgelijk effect heeft een nagenoeg dichtgesinterde reductiekern in een overigens tamelijk poreuze scherf.

Een ander belangrijk aspect van de bevriezing van een keramische scherf is het aandeel van de haarvatwanden in de warmteafvoer uit het systeem. In de voorgaande paragraaf bleef dit aspect geheel buiten beschouwing. Verondersteld werd immers, dat de warmteonttrekking geheel via het gevormde ijs geschiedde. Zelfs bij zeer poreuze bouwkeramiek is het wandaandeel in een scherfdoorsnede echter beduidend groter dan het poriënaandeel, terwijl de warmtegeleidingscoëfficiënt van het scherfmateriaal niet bijzonder veel van die van ijs ver-

schilt (zie tabel 8). Op grond hiervan mag worden verwacht, dat ook het scherfmateriaal in belangrijke mate bijdraagt tot het voor de bevvriezmg nodige warmtetransport. Mede door het grillige verloop van de poriën in een keramische scherf kan een en ander gemakkelijk leiden tot het ontstaan van ijspropfen in de ontsnappingswegen voor het surplus-water, waardoor de ontsnappingsdrukken plaatselijk zeer hoog kunnen oplopen en bovendien aanzienlijke vriespuntsdalingen kunnen optreden. De aanwezigheid van voldoende met lucht gevulde poriën in de natte scherf zal de drukopbouw bij bevvriezmg matigen. Zij fungeren zoals in 4.3 werd beschreven als buffers voor het surplus-water. Een lage spontane verzadigingsgraad van de scherf is in dit opzicht van belang.

De tijdens de bevvriezmg ontwikkelde krachten bewerkstellingen een dilatatie van het scherflichaam, die door het ijs wordt gefixeerd, tot de scherf zich bij ontdooiing weer ontspant en haar oorspronkelijke dimensies weer herkrijgt, tenzij de belasting tot een blijvende vervorming van het scherflichaam heeft geleid. Een meting van de blijvende dilatatie na een aantal vorst-dooiwisselingen wordt daarom wel toegepast voor de beoordeling van de weerstand tegen bevvriezmg van bouwkeramiek [15, 16].

4.4.2 Alzijdige bevvriezmg

De voorgaande beschouwingen hadden betrekking op een éénzijdige bevvriezmg van bouwkeramiek. Dit is een omstandigheid, die zich ook in bouwconstructies verreweg het meest voordoet. De alzijdige bevvriezmg treft men voornamelijk in laboratoria aan. Merkwaardigerwijs wordt ze daar soms nog toegepast voor de beoordeling van de vorstbestandheid van bouwkeramiek, die in de praktijk éénzijdig aan bevvriezmg wordt blootgesteld.

Bij een alzijdige bevvriezmg is een ontsnapping van surplus-water uit de scherf niet meer mogelijk. De drukopbouw in het proefobject hangt dan in sterkere mate dan bij éénzijdige bevvriezmg af van de hoeveelheid water in de scherf en van de

verzadigingsgraad. Ook vorm en afmetingen van het proefobject zullen de spanningstoestand, waarin het komt te verkeren, beïnvloeden. Een en ander komt tot uitdrukking in het van de praktijk afwijkende vorstschadebeeld, dat zich bij alzijdige vriesproeven vaak manifesteert.

Om genoemde redenen en bovendien op grond van het feit, dat een éénduidige en onderling gelijke vorstbelasting van tegelijkertijd beproefde produkten bij een alzijdige bevriezing moeilijk te realiseren is, verdienen vorstbestandheidsbeproevingen door éénzijdige bevriezing van proefobjecten verre de voorkeur.

4.5 Bevriezingssnelheid bij strenge vorst

Uit vorstschadeanalyses (zie 2.4) blijkt, dat een periode van strenge vorst eerder aanleiding geeft tot het ontstaan van vorstschade dan perioden van matige of lichte vorst. Het is in dit verband zinvol het verloop van de bevriezing van natte bouwkeramiek bij strenge vorst, eens wat nader te onderzoeken aan de hand van een van de werkelijkheid afgeleid eenvoudig rekenmodel.

Gekozen is een model bestaande uit een aan éénzijdige bevriezing blootgestelde, planparallelle, oneindig uitgestrekte, keramische scherf ter dikte van 100 mm met watergehalten van respectievelijk 5 - 10 - 15 en 20% (m/m_d). Ter vereenvoudiging van de globale berekeningen werd verondersteld dat de scherf aan het begin van de bevriezing een temperatuur heeft van 0 °C, dat de bevriezing bij 0 °C plaatsvindt en dat de hoeveelheid voelbare warmte in het model geen wijziging ondergaat.

Tabel 8. Globale warmtetechnische rekenwaarden

materiaal	ρ kg/m ³	c kJ/kg.K	λ W/(m.K)	ε -
keramische scherf (droog)	1800	0,8	0,6	0,94
keramische vaste stof	2645	0,8	1,9	n.v.t.
keramische scherf, nat, bevroren	-	-	2,0	0,95
keramische scherf, nat ontdooit	-	-	1,3	0,95
water	1000	4,2	0,6	0,96
ijs	918	2,1	2,3	0,91
rijp, sneeuw	500	2,1	0,5	0,96
staal, matzwart, licht berijpt	7800	0,46	50	0,95

In deze tabel is:

ρ : massadichtheid in kg/m³

λ : warmtegeleidingscoëfficiënt in W/(m.K)

ε : emissiequotiënt.

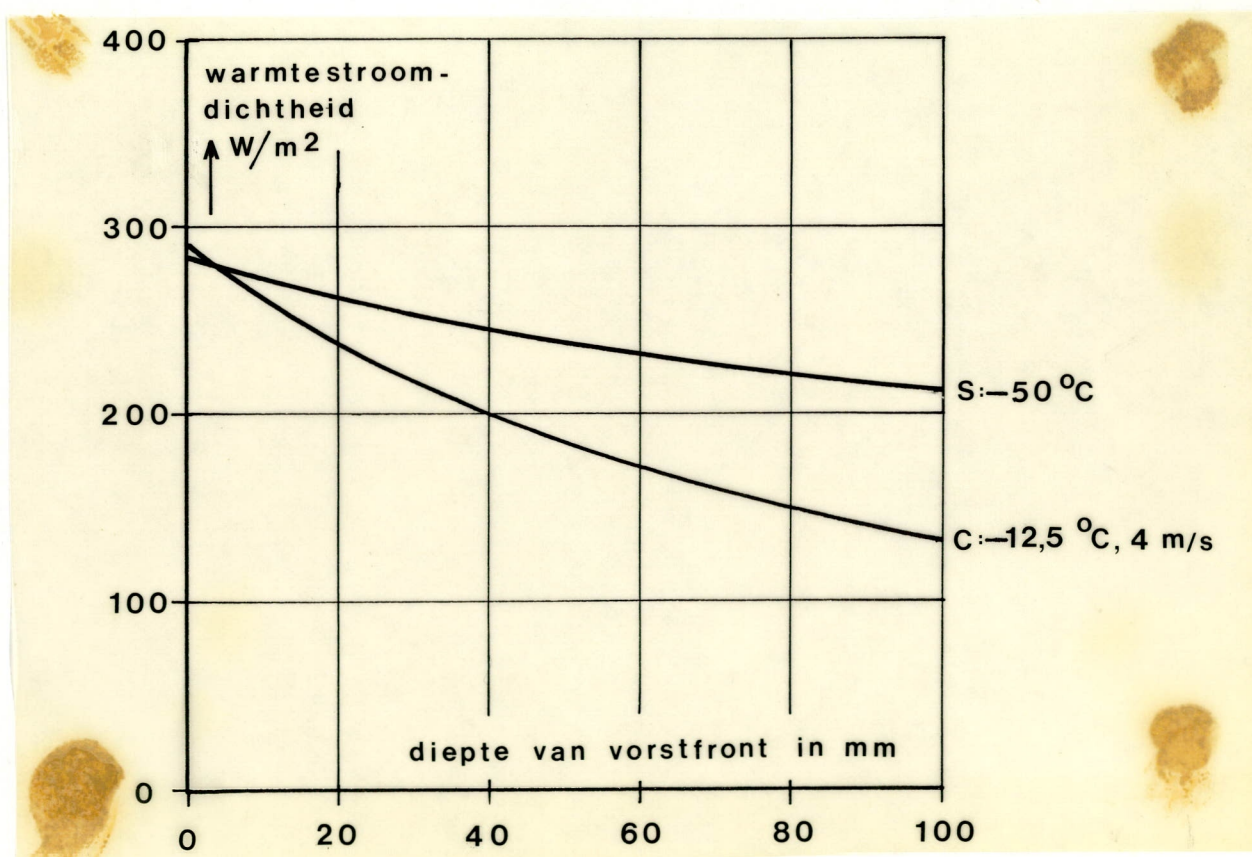
c : soortelijke warmte in kJ/(kg.K)

Wat het klimaat betreft, werd gekozen voor "strengte vorst", ge-effectueerd door een convectieve warmteoverdracht naar lucht van $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, die met een snelheid van 4 m/s langs het expositievlak stroomt. De warmteoverdrachtscoëfficiënt bedraagt onder deze omstandigheden circa $23\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$.

Voor de berekening van het warmtetransport werd gebruik gemaakt van de in tabel 8 vermelde globale rekenwaarden. Er werd voorts geen rekening gehouden met de volumevergroting bij het bevriezen van het water.

De resultaten van de globale berekeningen zijn weergegeven in de figuren 10 en 11.

Figuur 10 toont het verloop van de warmtestroomdichtheid met de diepte van het vorstfront voor vochtbelastingen tot 20% (m/m_d). Tevens is in deze figuur het verloop weergegeven van de warmtestroomdichtheid resulterend uit een warmteoverdracht door straling en natuurlijke convectie van een hellend expositievlak naar een evenwijdig daaraan opgestelde koelplaat met een oppervlakte-temperatuur van $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figuur 10 Eenzijdige warmte-onttrekking aan een natte scherf door gedwongen convectie (C: $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 m/s) en door straling (S: $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

1. The first part of the document is a letter from the President of the United States to the Congress, dated January 3, 1862. It contains a report on the state of the Union and the progress of the war against the rebellion. The President mentions the success of the Union arms and the determination to bring the rebellion to a speedy end.

2. The second part of the document is a report from the Secretary of the Treasury, dated January 10, 1862. It contains a detailed account of the financial condition of the United States and the measures taken to meet the demands of the war. The Secretary mentions the success of the Union arms and the determination to bring the rebellion to a speedy end.

3. The third part of the document is a report from the Secretary of the Interior, dated January 15, 1862. It contains a detailed account of the land and mineral resources of the United States and the measures taken to develop them. The Secretary mentions the success of the Union arms and the determination to bring the rebellion to a speedy end.

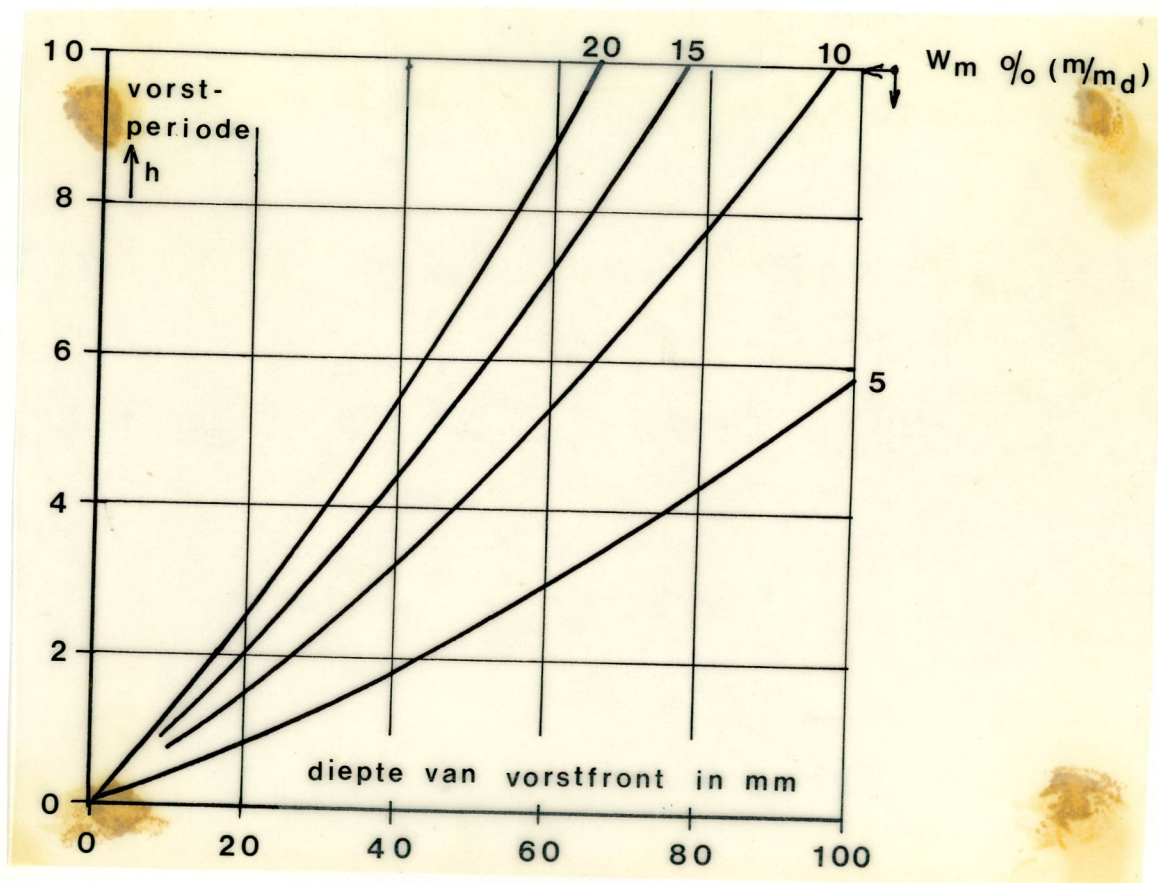
4. The fourth part of the document is a report from the Secretary of the Navy, dated January 20, 1862. It contains a detailed account of the naval forces of the United States and the measures taken to strengthen them. The Secretary mentions the success of the Union arms and the determination to bring the rebellion to a speedy end.

5. The fifth part of the document is a report from the Secretary of the War, dated January 25, 1862. It contains a detailed account of the military forces of the United States and the measures taken to strengthen them. The Secretary mentions the success of the Union arms and the determination to bring the rebellion to a speedy end.

Figuur 11 laat voor de gespecificeerde convectieve warmteoverdracht de vorstpenetratie als functie van de tijd zien. De vorstpenetratie blijkt sterk afhankelijk te zijn van het watergehalte. De aan deze figuur ontleende gemiddelde bevrozingssnelheden bij een vorstpenetratie van 20 mm zijn in tabel 9 opgenomen. Opgemerkt wordt, dat de toegepaste eenvoudige rekenmethode bevrozingssnelheden oplevert, die wat hoger zijn dan de bevrozingssnelheden, die onder de gegeven omstandigheden in werkelijkheid zouden optreden.

Tabel 9. Orde van grootte van de bevrozingssnelheid tot een vorstpenetratie van 20 mm bij strenge vorst

watergehalte in % /m/m _d)	5	10	15	20
bevrozingssnelheid in mm/h	24,1	13,5	9,9	8,2



Figuur 11 Vorstpenetratie als functie van de tijd bij éénzijdige warmte-onttrekking door gedwongen convectie ($C: -12,5^{\circ}\text{C}$, 4 m/s) voor verschillende watergehalten W_m

THE
LIBRARY
OF THE
MUSEUM OF
COMPARATIVE ZOOLOGY
AT
HARVARD UNIVERSITY
CAMBRIDGE, MASS.

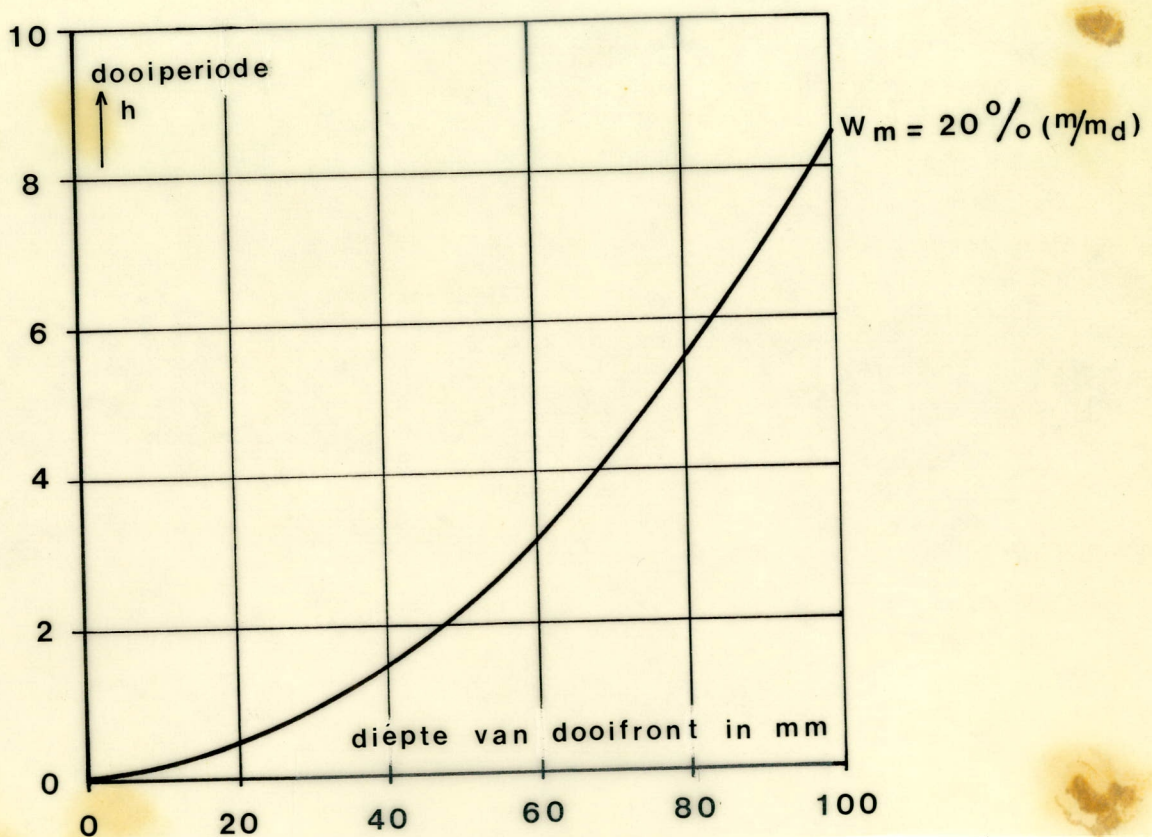
1914



RECEIVED
JAN 10 1914
MUSEUM OF COMPARATIVE ZOOLOGY
HARVARD UNIVERSITY
CAMBRIDGE, MASS.

4.6 Ontdooiing van bouwkeramiek

De toevoer van warmte door straling of convectorie aan bevroren bouwkeramiek doet de temperatuur daarvan stijgen en het ijs in de poriën smelten. De spanningstoestand, waarin de scherf na een periode van aanhoudende vorst kwam te verkeren, verandert. Aanvankelijk, tijdens de temperatuurverhoging van het ijs tot aan het smeltpunt nemen de op de poriënwallen uitgeoefende krachten naar alle waarschijnlijkheid enigszins toe als gevolg van de grote uitzettingscoëfficiënt van het ijs (zie 4.3). Gedurende de dooi ontspant het reeds ontdooide deel van de scherf zich geheel, doch blijft het wijkende ijsfront in het nog bevroren scherfgedeelte door de in paragraaf 4.3 besproken steeds wisselende frontdrukken belast.



Figuur 12 Diepte van het dooifront als functie van de tijd bij ontdooiing met stromend water van 15 °C

In de praktijk zijn de klimatologische omstandigheden waaronder de ontdooiing van bouwkeramiek plaatsvindt sterk verschillend. Bij simulatie van het effect van herhaalde bevroering en ontdooiing van bouwkeramiek op de structurele stabiliteit van de scherf laat men de proefstukken vaak onder water ontdooien. Men doet dat, ter bespoediging van het verloop van de beproeving en ter waarborging van de initiële vochtbelasting van het materiaal tijdens de opeenvolgende bevroeringen.

Figuur 12 geeft een globale indruk van de tijdsduur, die nodig is voor een éézijdige ontdooiing van een bevroren scherf tot een gegeven diepte, indien de dooi wordt bewerkstelligd door over het expositievlak stromend water met een constant veronderstelde temperatuur van 15 °C. Voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt werd een waarde van 600 W/(m².K) aangenomen. Ter vereenvoudiging van de berekeningen is verondersteld, dat de temperatuur van het bevroren deel van de scherf 0 °C is en dat de hoeveelheid voelbare warmte in de scherf geen wijziging ondergaat. Voor de berekeningen zijn voorts de globale rekenwaarden uit tabel 8 gebruikt. Uit de figuur blijkt onder meer, dat, voor een scherf met een zeer hoge vochtbelasting van 20% (m/m_d) een dooitijd van 2 uren voldoende is voor een ontdooiing tot een diepte van circa 50 mm.

5. VOCHTSCHADEMECHANISMEN

Algemeen wordt aanvaard, dat zichtbare vorstschade aan bouwkeramiek voortkomt uit een cumulatie van microbeschadigingen van de scherfstructuur tijdens herhaalde bevrozing en ontdooiing van vochtig materiaal.

Die beschadigingen ontstaan door een plaatselijk fatale belasting van de scherfstructuur. Oorzaken en aard van die belasting zijn in hoofdstuk 4 beschreven.

Van primaire belang zijn de krachten, die tijdens elke vries-dooicyclus op het zich evenwijdig aan het expositieoppervlak verplaatsende ijsfront in de scherf worden uitgeoefend. Het zijn:

- a. de frontdrukken van de grensvlakken tussen water en ijs, bewerkstelligd door de grensvlakspanning
- b. de ontsnappingsdrukken van het, uit de volumevergroting bij de faseovergang voortvloeiende, surplus-water in de door ijs geblokeerde poriën en op de ontsnappingsroute voor het vorstfront uit.

Andere verschijnselen, die de belastingstoestand van de scherf in bepaalde gevallen in ongunstige zin kunnen beïnvloeden zijn:

- c: de grote krimp en uitzetting van ijs bij temperatuurwisselingen
- d: de afscheiding van luchtbelletjes en de uitkristallisatie van zouten vóór het ijsfront
- e: de osmotische druk van opgeloste stoffen
- f: de hydratatie van zouten bij temperaturen rond 0 °C

Laatstgenoemde factoren zijn vermoedelijk van secundaire betekenis.

Zoals in hoofdstuk 4 werd uiteengezet veroorzaken frontdruk en ontsnappingsdruk tijdens de bevrozing en wat de frontdruk betreft ook tijdens de dooi een voortdurend wisselende belasting. Deze wisselende belasting, die bovendien gepaard zal gaan met een sterke kerfwerking, kan op bepaalde plaatsen of in bepaalde doorsneden van een scherf op den duur fataal zijn en schade doen ontstaan.

De normale treksterkte van een scherf in een richting loodrecht op het vorstfront, die bijvoorbeeld bij dakpannen meestal tussen 10

en 40 bar ligt, is gezien de aard van de belasting slechts in beperkte mate bruikbaar om het weerstandsvermogen van de scherf tegen het ontstaan van schade te beoordelen. Van belang is vooral dat de scherf geen sterke gelaagdheid vertoont en in voldoende mate is gesinterd. Door de sintering neemt de sterkte toe en neemt vooral de kerfwerking af, omdat de sintering een afronding van scherpe hoeken in de scherfstructuur bewerkstelligt. De bakkrimp, liefst gerelateerd aan de met een dilatometer vast te stellen sintercontractie, is daarom, zoals ook de ervaring leert, een belangrijke parameter met betrekking tot de vorstschadegevoeligheid van bouwkeramiek.

6. VORSTBESTANDHEIDSBEPROEVING

Zowel fabrikanten als gebruikers van bouwkeramiek wensen zekerheid over de vorstbestandheid van hun produkt. Ofschoon er van de goede ervaringen met een gegeven fabrikaat een geruststellende invloed uitgaat, is er een sterke behoefte aan een betrouwbare algemeen erkende proef van korte duur, die antwoord geeft op de vraag of het fabrikaat in kwestie op de lange termijn in een bouwconstructie vrij van vorstschade zal blijven. In de loop der jaren zijn dan ook in landen, waarin men met vorstschade wordt geconfronteerd, allerlei directe en indirecte vorstbestandheidsbeproevingen met meer of minder succes in gebruik gekomen [1, 17, 18].

De indirecte methoden blijven hier buiten beschouwing. Ze zijn tot nu toe onvoldoende betrouwbaar gebleken. Dit is op grond van de complexe in deze studie geanalyseerde problematiek wel verklaarbaar. Bij de directe methoden wordt een proefeenheid van het te beoordelen fabrikaat na bevochtiging aan herhaalde bevriezing en ontdooiing onderworpen, waarna deze op eventueel ontstane zichtbare schade in de vorm van scheuren, afsplinteringen of afschilferingen wordt geïnspecteerd.

De grilligheid van het weer, de verschillende soorten bouwkeramiek en de verschillen in gebruiksomstandigheden van de produkten bieden een oneindig aantal scenario's voor een simulatie van bevochtigings-, bevriezings-, ontdooiings- en expositieomstandigheden.

Aan een arbitrale keuze van dit scenario valt bij de laboratoriumbeproeving niet te ontkomen. Wanneer men er zich voorts rekenschap van geeft, dat bij de beproeving slechts een zeer klein aantal proefexemplaren van een partij, een levering of van een produktie over een lange periode betrokken is, dan is het duidelijk, dat zo'n beproeving nooit absolute zekerheid kan bieden over de vorstbestandheid van het betreffende fabrikaat in de praktijk op lange termijn.

Een vorstbestandheidsverklaring op grond van een met goed resultaat doorstane laboratoriumbeproeving dient in deze geest te worden geïnterpreteerd en mag alleen onder verwijzing naar de door partijen erkende proefspecificatie worden afgegeven.

Op basis van het huidige inzicht in de vorstbestandheidsproblematiek lijkt het zinvol voor het beproevingsscenario uit te gaan van de volgende, zoveel mogelijk op de werkelijkheid afgestemde algemene beginselen.

Wat betreft de proefeenheid:

Een selectief getrokken monster, met als selectiecriterium de op grond van uiterlijke kenmerken minst gesinterde produkten.

De grootte van de proefeenheid te relateren aan het aantal bouw-elementen per m² expositievlak.

Wat betreft de vochtbelasting van de proefeenheid:

Een keuze uit enkele in zwaarte verschillende klassen, rekening houdend met het verschil in gebruiksomstandigheden van de diverse soorten bouwkeramiek.

Wat betreft de bevochtigingswijze van de proefeenheid:

Om organisatorische redenen een getrapte drenking met aansluitend voor de zwaardere vochtbelastingen een drenking in heet water, die wat effect betreft overeenkomt met het gestelde in 3.5.5, doch minder tijd vergt [8].

Wat betreft de expositie aan het vorst- dooiklimaat:

Op grond van het gestelde in 4.4.2 zodanig, dat de warmteonttrekking bij de bevriezing uitsluitend aan de zichtzijde van de proef-exemplaren plaatsvindt.

Wat betreft vorstklimaat:

Uitwendige condities, constant en gelijk in elke vorstdooicyclus, voor elk soort produkt en voor elk van de te beproeven exemplaren en voorts ten aanzien van de warmtestroomdichtheid: overeenkomend met "strengte vorst" (zie 4.5).

Wat betreft de tijdsduur van de vorst:

Constant voor elke cyclus, doch, ter bekorting van de beproevingsduur, met een onderscheid in tijdsduur voor produkten met een scherfdikte ≤ 20 mm en produkten met een dikkere scherf.

Keuze voor alle fabrikaten met een dikte ≤ 20 mm gelijk en zodanig, dat volledige bevriezing gewaarborgd is.

Keuze voor alle dikkere fabrikaten eveneens gelijk en zodanig, dat een partiële bevriezing over een diepte van tenminste 50 mm plaats vindt (zie figuur 11).

Wat betreft het dooiklimaat:

Ontdooiing onder water van 15 °C ter handhaving van de oorspronkelijke vochtbelasting in elke cyclus.

Uitwendige omstandigheden constant en gelijk in elke cyclus, voor elk soort produkt en voor elk van de te beproeven exemplaren.

Wat betreft de tijdsduur van de dooi:

Constant voor elke cyclus en elk soort produkt en zodanig dat elk fabrikaat na afloop van de dooiperiode volledig is ontdooit.

Wat betreft de totale cyclusduur:

Om organisatorische redenen, bij voorkeur zodanig, dat per etmaal een geheel aantal vorst- dooicyclusen kunnen worden gerealiseerd.

Wat betreft het aantal cyclussen

Zodanig, dat vorstschade aan daarvoor ook in de praktijk gevoelige produkten zich duidelijk zichtbaar manifesteert. Op grond van proefervaringen zijn 24 cyclussen daartoe meestal voldoende.

Wat betreft de inspectie op vorstschade:

Een visuele inspectie, eventueel ondersteund door ultrasoon onderzoek van de scherf.

De vorenstaande opvattingen over een zinvolle op de werkelijkheid geënte opzet van de vorstbestandheidsbeproeving zijn in een afzonderlijk rapport nader uitgewerkt [17].

7. VERBETERING VAN DE VORSTBESTANDHEID EN ALGEMENE CONCLUSIES

De bestrijding van een slechts bij uitzondering optredend en onvoldoende begrepen fenomeen, zoals vorstschade, is soms ontmoedigend. Daarom is met deze studie getracht het inzicht in de vorstbestandsproblematiek te verdiepen. Het is inderdaad mogelijk gebleken tal van praktijkervaringen te verklaren en bouwstenen aan te dragen voor een effectief kwaliteitsbeleid.

De studie heeft ten aanzien van bepaalde scherfeigenschappen van bouwkeramiek een aantal wensen opgeleverd, die bij het optimaliseren van de weerstand tegen bevriezing zo goed mogelijk dienen te worden gehonoreerd. Zo goed mogelijk, omdat de mogelijkheden daartoe mede afhangen van andere wellicht tegenstrijdige kwaliteitseisen waaraan het produkt moet voldoen en omdat de bedrijfssituatie, althans op de korte termijn, in het algemeen enige beperkingen van structurele aard oplegt aan de uitvoerbaarheid van sommige maatregelen.

De scherfeigenschappen, die bij een gegeven vormgevingstechniek bijzondere aandacht verdienen zijn in tabel 10 genoemd. Het zijn eigenschappen, die met zeer eenvoudige hulpmiddelen vast te stellen zijn.

Ook is onder verwijzing naar de verklarende tekst aangegeven, in welke zin de genoemde eigenschappen voor een eventueel noodzakelijke verbetering van de vorstbestandheid, gewijzigd dienen te worden.

Tenslotte zijn enkele maatregelen vermeld, die tot een verandering van de scherfeigenschappen in de gewenste richting kunnen bijdragen.

Een siliconenbehandeling van de gehele scherf van een produkt komt uit prudentie niet in de tabel voor.

De bedoelde maatregelen hebben uiteraard alleen een duurzaam effect, indien de opeenvolgende deelprocessen bij de fabricage beheerst verlopen en indien men de samenstelling van de grondstof binnen redelijke grenzen onder controle heeft.

Voor een toetsing van het effect van getroffen maatregelen is men aangewezen op een betrouwbare directe vorstbestandheidsbeproeving (zie hoofdstuk 6).

De aanbevolen maatregelen ter verbetering van de vorstbestandheid van een produkt van een in dit opzicht verdachte kwaliteit zijn eenvoudig van aard. Bij een normale bedrijfsvoering met een alert kwaliteitsbeleid wordt de weerstand tegen bevriezing van bouwkeramiek dan ook zonder veel moeite ingebakken.

Tabel 10. Controle op scherfeigenschappen

eigenschap	aan te bevelen	
	wijziging	maatregelen
homogeniteit van de scherf	verbeteren zie : 2.3; 4.4.1; 5	eliminieren van: - zichtbare gelaagdheid - reductiekernen - koelscheuren - kalkpitten - grove insluitels
spontane verzadigingsgraad	verlagen zie: 2.2; 3.5.3; 3.6; 4.4.1; 5	- vormen met niet-ontluchte klei - grofporeuze toeslag bijmengen - uitbrandstof bijmengen - sterker sinteren
spontane waterabsorptie	verlagen zie: 2.3; 3.5.3; 3.6; 5	- sterker sinteren
waterabsorptiecoëfficiënt	verlagen zie 3.5.3; 4.4.1; 5	- sterker sinteren
waterpenetratiecoëfficiënt	verhogen zie 3.5.3; 5	- massa verschrallen - % mica in massa verlagen - grove toeslag bijmengen
rekenwaarde F voor volledige verzadiging	verlagen zie: 2,3; 2,4; 3.5.5; 5	- spontane verzadigingsgraad verlagen
bakkrimp	verhogen zie: 2.3; 5	- sterker sinteren

8. LITERATUUR

- [1] Van der Klugt, L.J.A.R.
Evaluatie van de zandkistvriesproef;
IBBC-TNO, rapport BI-72-91
- [2] Hirschwald, J.
Mitteilungen aus dem Min.- Geo.- Inst. der Techn. Hochschule,
Berlin, 1 (1910) 20.
- [3] Van der Klugt, L.J.A.R.
De kritieke verzadigingsgraad een stofeigenschap?;
IBBC-TNO, rapport BI-79-42
- [4] Van der Velden, J.H.
"Een empirisch model van Nederlandse klei"
Klei en keramiek, 27 (1977) 11/12 p. 190
- [5] Van der Klugt, L.J.A.R.
Hygrische eigenschappen van bouwmaterialen;
IBBC-TNO, rapport BI-72-75
- [6] Tammes, E. en Vos, B.H.
Warmte- en vochttransport in bouwconstructies
Kluwer Technische Boeken B.V. Deventer
- [7] Van der Velden, J.H.
Waterabsorptie van bouwkeramiek;
Klei/Glas/Keramiek, 2 (1981), 6, p. 176
- [8] Van der Velden, J.H.
Het drenken van bouwkeramiek bij vorstbestandheids-
beproevingen;
MT-TNO rapport 82-02117
- [9] Schneider, H.
Über den Frostwiderstand von Dachziegeln und seine Prüfung;
Ziegelindustrie, (1962), H8-H12, S 227.e.v.

- [10] Everett, D.H. and Haynes, J.M.
Capillary properties of some model pore systems
with special reference to frost damage;
Bulletin Rilem, (1965), nr. 27, p. 31
- [11] Koopmans, R.W.R. en Wartena, L.
Het bevriezen van grond;
Wegen, (1969), nr. 648, p. 327
- [12] Wiedmann, T.
Untersuchungen zur Wasseraufnahme und dem Frostverhalten
glasierter Spaltplatten;
Teil I und Teil II; Keramische Zeitschrift,
22 (1970); 4, p. 219 und 11, p. 679
- [13] Van Keulen, J.
Vorstbestendigheid;
Klei en Keramiek, (1971), p. 182
- [14] Schmidt, H.
Möglichkeiten zur Verbesserung der
Frostwiderstandsfähigkeit von Verblendern und
Dachziegeln;
Ziegeleitechnisches Jahrbuch, 1982, p. 52
Bauverlag GMBH, Wiesbaden
- [15] Lehmann, H und Ohnemüller, W.
Die Frostprüfung mit Hilfe physikalischer Meszgrößen;
Die Ziegelindustrie (1959); H.24, s.735
- [16] Albenque, M. et Fontaine, Th.
Derniers résultats de recherche en ce qui concerne la
résistance au gel
Publications du C.T.T.B., Paris, 1975

- [17] Van der Velden, J.H.
Bepaling van de weerstand tegen bevriezing van bakstenen,
keramische dakpannen en tegels met de stralingsvriesproef;
MT-TNO, rapport 82-07636
- [18] Schellbach, G.
Frostprüfung von Dachziegeln und Verblendern -
Vergleich, Bedeutung und Aussage verschiedener
genormter Frostprüfverfahren;
Ziegeleitechnisches Jahrbuch 1982, s.14,
Bauverlag GMBH, Wiesbaden