

Post-HBO Bouwfysica

WV 2

- Vocht
- Luchtstroming door constructies en infiltratie

Ir J.A. (Arjan) Pleysier  
Deerns Bouwfysica en Energie

# 1 Capillair vochttransport

## 1.1 Capillariteit

Watermoleculen trekken elkaar aan indien zij zich op kleine afstand van elkaar bevinden: op minder dan  $10^{-3} \mu\text{m}$  ( $10^{-6} \text{mm}$ ).

De krachten worden cohesiekrachten genoemd.

Op een watermolecule die omringd wordt door andere moleculen is de resulterende kracht nul.

Een watermolecule die zich aan het wateroppervlak bevindt, ondergaat een resulterende kracht naar beneden. Er is arbeid nodig om de watermolecule los te maken uit de waterspiegel. De potentiële energie van de watermoleculen aan het wateroppervlak is dus groter dan de potentiële energie van de watermoleculen die zich niet aan het wateroppervlak bevinden.

Het energieverschil - per eenheid van oppervlak - wordt de oppervlakte-energie of oppervlaktespanning genoemd:  $\sigma$  in  $\text{J/m}^2$  of  $\text{N/m}$ .

NB de oppervlaktespanning is afhankelijk van de temperatuur.

Bij  $0^\circ \text{C}$  bedraagt de oppervlaktespanning circa  $76 \cdot 10^{-3} \text{N/m}$ , bij  $100^\circ \text{C}$  circa  $59 \cdot 10^{-3} \text{N/m}$ .

Watermoleculen die zich bij een vast oppervlak bevinden (b.v. de wand van een capillair) worden door die vaste stof aangetrokken: adhesiekrachten.

Indien de adhesiekrachten groter zijn dan de cohesiekrachten wordt het water (de waterspiegel of de meniscus) tegen de wand opgetrokken,

Zijn de cohesiekrachten groter dan de adhesiekrachten, dan wordt de waterspiegel als het ware neergedrukt.

In het eerste geval zal door het krachtenspel (de capillaire krachten) het water worden opgezogen in het capillair. Dit is het geval bij vele steenachtige bouwmaterialen. Het materiaal is hydrofiel, ook spreekt men wel van een capillair materiaal (eigenlijk een onjuiste of niets zeggende term).

In het tweede geval, indien de cohesiekrachten groter zijn dan de adhesiekrachten, wordt het water niet in een capillair opgezogen: het water wordt in feite afgestoten. Voorbeelden van deze waterafstotende of hydrofobe materialen zijn vele kunststoffen en natuurlijk de water afstotend behandelde (gehydrofobeerde) materialen.

Wanneer de adhesiekrachten groot zijn, maakt de waterspiegel een hoek van bijna  $0^\circ$  met de wand. Dit kan voor de meeste steenachtige materialen bij benadering worden aangehouden.

De capillaire zuigkracht (capillaire druk) bedraagt in dat geval:

$$p_c = - 2 \sigma / r \quad (58)$$

met:

$p_c$  capillaire zuigkracht [Pa]

$r$  capillairstraal [m]

$\sigma$  oppervlaktespanning genoemd [J/m<sup>2</sup>] of [N/m].

Voor de (maximale) stijghoogte in zo'n capillair kan worden afgeleid:

$$h = 2 \sigma / (g \cdot \rho \cdot r) \quad (59)$$

met:

$h$  stijghoogte [m]

$\rho$  oppervlaktespanning genoemd [J/m<sup>2</sup>] of [N/m].

$g$  valversnelling [10 m/s<sup>2</sup>]

$\rho$  volumieke massa van water [1000 kg/m<sup>3</sup>]

$r$  capillairstraal [m]

Zodat volgt:

$$h = 15 \cdot 10^{-6} / r \quad (60)$$

## 1.2 Capillair vochttransport in poreuze, hygroscopische materialen

Vochttransport in poreuze materialen is een complexe materie, en vindt plaats onder invloed van een vochtgradiënt (verschil in vochtgehalte) en door een temperatuurgradiënt. Door capillairen met een kleine diameter zal het vochttransport in vloeibare vorm plaatsvinden, door capillairen met een grote diameter in dampvorm; in capillairen met variabele diameter kan vochttransport deel in vloeibare vorm, deels door dampdiffusie plaatsvinden.

Begrijpelijk is, dat door de hiervoor behandelde capillaire krachten in een hydrofiel materiaal vloeistof transport plaatsvindt van een grotere naar een kleinere diameter van het capillair (immers: hoe kleiner de diameter van het capillair, hoe groter de capillaire zuiging).

Kortheidshalve wordt gesteld dat vochttransport in poreuze, hydrofiel materialen plaatsvindt:

- in de richting van het lagere vochtgehalte
- in de richting van de lagere temperatuur.

Bij materialen met een gemiddeld kleine diameter van de capillairen wordt een grotere (maximale) stijghoogte gevonden dan voor materialen met grotere capillairen. Wel is het zo, dat bij een kleine diameter van de capillairen de stromingsweerstand groot is. De hoeveelheid water die getransporteerd wordt onder invloed van de capillaire krachten is in een materiaal met een hoge

stromingsweerstand (veel kleine capillairen) veel kleiner dan in een materiaal met een lagere stromingsweerstand (een grof capillair materiaal).

### 1.3 Kritisch watergehalte

Indien het water in de capillairen een aaneengesloten netwerk vormt, kan het water in vloeibare vorm verplaatsen. Wordt de diameter van een capillair ergens zo groot, dat in het capillair plaatselijk een luchtbel aanwezig is, dan wordt het netwerk onderbroken. Het vochttransport kan niet alleen meer in vloeibare vorm plaatsvinden, maar zal ook in dampvorm de luchtbel moeten passeren. Het watergehalte waarbij het netwerk van capillairen juist niet meer geheel met water is gevuld, wordt het kritisch watergehalte genoemd. Is het watergehalte hoger dan het kritisch watergehalte dan treedt vochttransport in vloeibare vorm op, is het vochtgehalte lager, dan is vochttransport in alleen vloeibare vorm niet mogelijk, en neemt het vochttransport sterk af.

### 1.4 Optrekkend vocht

Bij steenachtige materialen hebben de capillairen geen constante diameter. De stijghoogte wordt dan bepaald door wat wel de effectieve capillairstraal wordt genoemd.

De maximale stijghoogte is voor veel steenachtige materialen enkele meters tot tientallen meters. De capillaire druk bedraagt dan wel 200.000 tot 300.000 Pa (bij een maximale stijghoogte van 20 tot 30 m).

De werkelijke stijghoogte is veel minder. Dit wordt veroorzaakt doordat het water vanaf het wandoppervlak (beter: vanaf het vochtfront in de wand) verdampt. Er ontstaat een evenwicht tussen de hoeveelheid water die door capillaire krachten wordt aangevoerd, en de hoeveelheid water die verdampt naar binnen en/of naar buiten.

Duidelijk zal zijn, dat de stijghoogte in een wand van een steenachtig materiaal hoger is:

- bij een dikkere wand
- bij een hoge luchtvochtigheid.

In het eerste geval: bijvoorbeeld halfsteens wand vergeleken met steens metselwerk is, bij een zelfde oppervlak waar het aangevoerde water aan het muuroppervlak wordt afgegeven, een grotere aanvoer van water (vanuit b.v. de ondergrond) mogelijk.

In het tweede geval zal vanaf een vochtig binnenoppervlak minder water kunnen verdampen naar de binnenlucht. Het dampspanningsverschil tussen het natte wandoppervlak en de binnenlucht (de drijvende kracht) is kleiner.

Door Tammes en Vos [1, pag. 284] is, voor een bepaalde kwaliteit baksteen binnenmuur (dik 200 mm) afgeleid:

$$h = 1,5 / ((100-\varphi) / 100)^{0,5} \quad (61)$$

met:

h stijghoogte [m]  
 $\varphi$  relatieve luchtvochtigheid [%]

Hieruit volgt dat bij een relatieve luchtvochtigheid tot ca 60% de stijghoogte weinig wordt beïnvloed. Bij een relatieve luchtvochtigheid van 85% is de stijghoogte ongeveer dubbel zo groot als bij 50%. Bij een relatieve luchtvochtigheid van 100% zou de stijghoogte oneindig worden: in dat geval wordt de stijghoogte nagenoeg gelijk aan de maximale stijghoogte.

Wordt de verdamping aan beide zijden verhinderd, dan wordt de stijghoogte logischerwijze eveneens nagenoeg de maximale stijghoogte.

Voor de liefhebber de iets uitgebreidere formule:

$$h = \frac{A}{2 \cdot \psi_o} \cdot \frac{(\pi b (\psi_o - \psi_c))^{0,5}}{(\rho_w \beta P' (100-\varphi) / 100)^{0,5}} \quad (62)$$

met:

h stijghoogte [m]  
A waterabsorptie coëfficiënt [kg / (m<sup>2</sup> / s<sup>0,5</sup>)]  
 $\psi_o$  maximaal watergehalte [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
 $\psi_c$  kritisch watergehalte [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
b dikte wand [m]  
 $\rho_w$  volumieke massa van water [kg / m<sup>3</sup>]  
 $\beta$  waterdampoverdrachtscoëfficiënt [s/m]  
P' verzadigingsdampspanning [Pa]  
 $\varphi$  relatieve luchtvochtigheid [%]

Voorbeeld 1: beton

A 0,03 [kg / (m<sup>2</sup> / s<sup>0,5</sup>)]  
 $\psi_o$  0,13 [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
 $\psi_c$  0,125 [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  1000 [kg / m<sup>3</sup>]  
 $\beta$  22 · 10<sup>-9</sup> [s/m]  
P' 2000 [Pa]  
 $\varphi$  50 [%]  
b 0,23 [m]

volgt: h = 0,055 m.

Voorbeeld 2: baksteen

A 0,37 [kg / (m<sup>2</sup> / s<sup>0,5</sup>)]  
 $\psi_o$  0,36 [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
 $\psi_c$  0,08 [m<sup>3</sup> / m<sup>3</sup>]  
 $\rho_w$  1000 [kg / m<sup>3</sup>]  
 $\beta$  22 · 10<sup>-9</sup> [s/m]  
P' 2000 [Pa]  
 $\varphi$  50 [%]  
b 0,22 [m]

h = 1,56 m

Metselwerk is geen homogeen materiaal: het bestaat uit baksteen en voegmortel.

Deze materialen kunnen een verschillende verdeling van capillairen hebben.

Veelal heeft de baksteen gemiddeld een veel grotere diameter van de capillairen dan de mortel. Het water kan de overgang van een kleine naar een grotere diameter moeilijker maken. Bovendien is de stromingsweerstand van de voegmortel - door de gemiddeld kleinere diameter van capillairen - vaak hoger dan van de baksteen.

De kwaliteit van de voegmortel kan daardoor van belangrijke invloed zijn op de uiteindelijk bereikte stijghoogte.

## 2 Hygroscopiciteit

In droge, poreuze materialen is in de poriën of capillairen lucht aanwezig. Deze lucht zal - afhankelijk van de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid - een zekere hoeveelheid vocht bevatten. Het poreuze materiaal neemt een deel van het vocht op: de massa neemt toe afhankelijk van de relatieve luchtvochtigheid.

De hoeveelheid vocht, die in het materiaal aanwezig is bij een zekere relatieve luchtvochtigheid, wordt het evenwichtsvochtgehalte genoemd. Hoe hoger de relatieve luchtvochtigheid, hoe hoger het evenwichtsvochtgehalte.

Het verband tussen het evenwichtsvochtgehalte en de relatieve luchtvochtigheid verschilt voor elk materiaal. Wel is de vorm van de curve voor materialen in hoofdlijnen gelijk: vanaf een rv van 0% stijgt het evenwichtsvochtgehalte, deze stijging neemt af, maar neemt bij hogere relatieve luchtvochtigheid (zeer) sterk toe. Zo bevat kalkzandsteen bijvoorbeeld bij een rv van 40% circa 2 vol% (volume %) vocht, bij 70% circa 4 vol%, en bij 95% meer dan 10 vol%.

De curve van het evenwichtsvochtgehalte kent wel een hysteresis: bij een toenemende rv (bevochtigingscurve) zal het evenwichtsvochtgehalte bij een zekere relatieve luchtvochtigheid lager zijn dan bij dezelfde relatieve luchtvochtigheid, wanneer het materiaal in een hogere luchtvochtigheid heeft verkeerdt, en gedroogd wordt.

Er zijn twee oorzaken van het opnemen van vocht door een materiaal: bij lagere luchtvochtigheid (zeg: tot ca 40%) wordt de opname van vocht bepaald door het aantrekken (adhesiekrachten) van de watermoleculen door de wand van de capillairen: moleculaire adsorptie. Bij lage relatieve luchtvochtigheid zullen de watermoleculen eerst in een laag tegen de wand van de capillairen aanwezig zijn, bij wat hogere luchtvochtigheid in meerdere lagen.

Zodra zoveel water aanwezig is tegen de wanden van de capillairen dat in de nauwste capillairen de waterlaagjes elkaar raken, wordt in het capillair (aan weerszijden van dat nauwe deel) een meniscus gevormd. Op dat moment begint een ander fenomeen, wat capillaire condensatie wordt genoemd.

Voor grondige behandeling hiervan wordt verwezen naar Hens [10, vanaf pag. 127].

Kort samengevat komt het erop neer, dat boven een holle watermeniscus de verzadigingsdampdruk lager is dan in grote ruimte. In de capillairen treedt condensatie op: capillaire condensatie.

De verzadigingsdampdruk boven de meniscus wordt gegeven door de wet van Thompson. Hoe kleiner de diameter van het capillair, hoe kleiner de verzadigingsdampdruk, en dus hoe groter de capillaire condensatie.

De wet van Thompson:

$$P'' = P' \exp(-p_c / \rho RT) \quad (63)$$

met:

$P''$	verzadigingsdampdruk boven de capillair	[Pa]
$P'$	verzadigingsdampdruk	[Pa]
$p_c$	capillaire zuigkracht	[Pa] zie formule (1)
$\rho$	volumieke massa van water	[kg / m <sup>3</sup> ]
$R$	gasconstante	= 462 [J/(kgK)]
$T$	absolute temperatuur	[K]

Een materiaal met in hoofdzaak grotere capillairen zal daardoor slechts weinig hygroscopisch zijn (b.v. baksteen). Een materiaal met zeer veel heel kleine capillairen (kalkzandsteen) is echter wel sterk hygroscopisch.

Door de aanwezigheid van zouten in de capillairen kan een materiaal zeer aanzienlijk sterker hygroscopisch worden. Deze zouten kunnen in de capillairen aanwezig zijn indien een gebouw onder (zee-) water heeft gestaan (Zeeland: 1945, 1953), maar kunnen ook aanwezig zijn tengevolge van capillair vochttransport. Bij het capillair vochttransport worden de in water oplosbare bestanddelen van mortel en baksteen door het water meegevoerd. Aan het wandoppervlak verdampt het water, maar de zouten blijven - in de capillairen - achter.

De hoeveelheid vocht die een materiaal bevat bij een relatieve luchtvochtigheid van 98% wordt het maximale hygroscopische vochtgehalte genoemd. Bij het maximale hygroscopische vochtgehalte zijn alle capillairen met een diameter die kleiner is dan  $50 \cdot 10^{-6}$  mm gevuld met water.

### 3 Opzuiging van water door poreuze materialen

Wanneer water op een poreus materiaal komt, zal het water worden opgezogen. Het vochtgehalte van het materiaal aan het oppervlak zal toenemen. Is het vochtgehalte hoger dan het kritisch vochtgehalte, dan zal het water door de capillaire krachten verder worden getransporteerd. De plaats waar het vochtgehalte juist kritisch is, wordt het vochtfront genoemd.

Het vochtfront beweegt zich met afnemende snelheid door de constructie. Dit kan een horizontale verplaatsing zijn - bij een gevel die nat wordt door regen, of een kelderwand door in de grond zakkend water - of ook een verticale verplaatsing - bij bijvoorbeeld optrekkend vocht.

De snelheid waarmee het water wordt opgezogen, c.q. de snelheid waarmee het vochtfront zich verplaatst, wordt gegeven door:

$$X = B t^{0,5} \quad (64)$$

met:

X plaats van het vochtfront, gemeten vanaf het oppervlak van watertoevoer [m]  
 B waterpenetratiecoëfficiënt [m/ s<sup>0,5</sup> ]  
 t tijd [s]

De hoeveelheid water die wordt opgezogen is afhankelijk van de snelheid van de verplaatsing van het vochtfront, en van de porositeit. De betrekking voor de hoeveelheid opgezogen water is:

$$M = A t^{0,5} \quad (65)$$

met:

M massa van het opgezogen water, per eenheid van oppervlak [kg/ m<sup>2</sup>]  
 A waterabsorptiecoëfficiënt [kg/(m<sup>2</sup>/ s<sup>0,5</sup> ) ]

Voor vele steenachtige materialen is de waterabsorptie- en de waterpenetratie coëfficiënt bekend. Een groot deel van de waarden in tabel 8 is ontleend aan Warmte- en vochttransport in bouwconstructies [9].

Tabel 8

materiaal	$\rho$	A	B
baksteen	1700	0,37	$1,4 \cdot 10^{-3}$
“ rood, zacht	1700	0,33	$1,6 \cdot 10^{-3}$
“ geel, hard	1700	0,28	$1,3 \cdot 10^{-3}$
“ strengpers		0,10	$0,7 \cdot 10^{-3}$
baksteen	1900	0,09	$0,7 \cdot 10^{-3}$
kalkzandsteen	1900	0,05	$0,3 \cdot 10^{-3}$
kalkzandsteen	1800	0,18	$0,8 \cdot 10^{-3}$
beton	2400	0,03	$0,5 \cdot 10^{-3}$
cellenbeton	700	0,10	$0,7 \cdot 10^{-3}$
cementmortel	2100	0,15	$0,6 \cdot 10^{-3}$
cementkalkpleister	1500	0,11	$0,6 \cdot 10^{-3}$
traskalkpleister	1500	0,08	$0,5 \cdot 10^{-3}$
tufsteen	1100	0,65	$2,1 \cdot 10^{-3}$
zandsteen	2000	0,36	$3,0 \cdot 10^{-3}$

Bij benadering geldt:

$$A \approx B \psi_c \rho$$

met:

$\psi_c$  kritisch watergehalte [m<sup>3</sup>/ m<sup>3</sup>]  
 $\rho$  soortelijke massa van water (1000) [kg/m<sup>3</sup>]



## 4 Drukkend grondwater

Bij drukkend grondwater werkt een uitwendige kracht op - bijvoorbeeld - de kelderwand: de grondwaterdruk. Deze uitwendige kracht werkt ook op het water in het materiaal van wand: op het water in de capillairen.

Het watertransport onder invloed van de uitwendige kracht bedraagt:

$$q = -\rho \frac{\Delta P_w}{w \cdot b} \quad (66)$$

met:

- $\rho$  soortelijke massa van water (1000) [kg/m<sup>3</sup>]
- $\Delta P_w$  uitwendige kracht [Pa]
- $w$  stromingsweerstand van het materiaal [Pa.s/m<sup>2</sup>]
- $b$  dikte van de wand [m]

De stromingsweerstand van is van slechts weinig materialen bekend. Voor baksteen bedraagt de stromingsweerstand ca 10<sup>10</sup>, voor klinkers ca 10<sup>12</sup>, voor grindbeton (volumieke massa circa 2400 kg/m<sup>3</sup>) 10<sup>18</sup> tot 2 á 3.10<sup>20</sup> [Pa.s/m<sup>2</sup>].

Indien de uitwendige kracht de (grond-) waterdruk is, dan geldt voor deze kracht:

$$\Delta P_w = \rho g h \quad (67)$$

met:

- $\rho$  soortelijke massa van water (1000) [kg/m<sup>3</sup>]
- $g$  valversnelling (9,8) [m/s<sup>2</sup>]
- $h$  hoogte van de waterkolom op de te beoordelen positie [m]

Het water kan onder invloed van de waterdruk aan de binnenzijde van de kelderwand alleen in vloeibare vorm uittreden wanneer de uitwendige kracht groter is dan de capillaire druk. Bij een 'normale' kelderwand zal geen baksteen (of beton) zijn toegepast met zulke grote capillairen dat het water onder een normale grondwaterdruk kan uittreden.

De capillaire zuigkracht bedraagt immers:

$$p_c = - 2 \sigma / r \quad (58)$$

met:

- $p_c$  capillaire zuigkracht [Pa]
- $r$  capillairstraal [m]
- $\sigma$  oppervlaktespanning [J/m<sup>2</sup>] of [N/m].

Voor een spleet geldt voor de capillaire zuigkracht:

$$p_c = - 2 \sigma / b \quad (68)$$

met:

- $p_c$  capillaire zuigkracht [Pa]
- $b$  breedte van de spleet [m]
- $\sigma$  oppervlaktespanning [J/m<sup>2</sup>] of [N/m].

Bij een grondwaterdruk van 1 m kan het water wel uittreden door een scheurtje met een breedte van slechts 0,02 mm. De uitwendige kracht is dan groter dan de capillaire zuigkracht.

Indien het aanbod van water - aangevoerd via de capillairen onder invloed van de uitwendige kracht - groter is dan van een nat binnenoppervlak kan verdampen, is het binnenoppervlak 'zichtbaar nat'.

Is de hoeveelheid water die kan verdampen aan het binnenoppervlak groter dan de hoeveelheid die wordt aangevoerd, dan zal het vochtfront zich tot een zekere diepte terugtrekken van het binnenoppervlak. Verdamping treedt dan op vanaf het vochtfront. De dampstroomdichtheid bedraagt bij verdamping vanaf het natte binnenoppervlak:

$$q = \beta \Delta P \quad (69)$$

met:

- $q$  dampstroom (dichtheid) [kg/m<sup>2</sup>s]
- $\beta$  waterdampoverdrachtscoëfficiënt [s/m]
- $\Delta P$  dampdruk verschil [Pa]

Bij verdamping vanaf enige diepte in de constructie speelt ook de dampdiffusie door de constructie - vanaf het vochtfront tot het oppervlak - een rol. In dat geval bedraagt de dampstroomdichtheid:

$$q = \Delta P / (\beta^{-1} + 5,3 \cdot 10^9 \Sigma \mu d) \quad (70)$$

met:

- $q$  dampstroom (dichtheid) [kg/m<sup>2</sup>s]
- $\beta$  waterdampoverdrachtscoëfficiënt [s/m]
- $\mu$  dampdiffusieweerstandsgetal [-]
- $d$  dikte van de materiaallaag (-lagen) tussen vochtfront en binnenoppervlak [m]
- $\Delta P$  dampdruk verschil [Pa]

## 5 Regendoorslag

Met regendoorslag wordt in het algemeen bedoeld die vochtinder waarbij regenwater door de wandconstructie heen dringt, en tot een vochtig of nat binnenoppervlak leidt.

Bij een massieve muur (b.v. steens metselwerk) zal het water door de baksteen of door de voegen worden doorgelaten.

Bij een spouwmuur moet het water naast het buiten- en binnenspouwblad bovendien de spouw kunnen passeren. Het water passeert de spouw in dat geval via een vochtbrug, die gevormd kan worden door koppelingen tussen binnen- en buitenspouwblad: vervuiling in de spouw, isolatiemateriaal met gebreken e.d.

Vochtinder die het gevolg is van lekkages tussen verschillende aansluitende constructies of materialen, door naden en kieren wordt niet als regendoorslag maar als lekkage beschouwd. Ook die schade doordat water onder uit een spouw (boven de fundering, boven een latei) niet snel genoeg wordt afgevoerd, en door capillaire opzuiging tot schade leidt, wordt niet gerekend regendoorslag.

Regendoorslag zal alleen optreden wanneer een gevel bij regen nat wordt. Wanneer het regent, en absoluut windstil is, valt de regen verticaal, en is een klein dakoverstek voldoende om de gevels droog te houden. Indien het waait zullen de naar de wind gekeerde gevels nat worden, de overige gevels blijven droog. Hoe harder het waait, hoe groter de regenbelasting van de gevel kan zijn. In Nederland blijkt regen vooral voor te komen bij windrichtingen tussen zuid en west. Bij gevels met een zuidwest oriëntatie wordt dan ook veel vaker regendoorslag vastgesteld, dan bij gevels met bijvoorbeeld een oost oriëntatie.

Overigens dient bedacht te worden dat na regendoorslag vaak verkleuringen op behang of geverfde wandoppervlakken zichtbaar blijven. Dat schade is ontstaan bij weersomstandigheden die slechts sporadisch voorkomen - regen bij oostenwind - is dan een schrale troost.

Tammes en Vos geven in [1] een overzicht van een aantal hevige slagregenperioden die in Den Helder zijn voorgekomen. Zij concluderen: "dat een wand gedurende ettelijke uren kan worden blootgesteld aan een slagregen intensiteit van  $10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  bij een windsnelheid van 15 a 20 m/s".

Door de berekening wordt het geveloppervlak nat, en zal water door het capillair materiaal opgezogen worden. Wanneer meer water door regen op de gevel komt dan kan worden opgezogen, zal een waterfilm ontstaan.

Het water kan naar het binnenoppervlak getransporteerd worden door:

- de capillairen, onder invloed van capillaire krachten
- (krimp-) scheuren, onder invloed van uitwendige krachten:
  - winddruk
  - zwaartekracht
  - de massa en de traagheid van de regendruppels

Al eerder is gesteld dat de capillaire zuigkracht zo groot is, dat de uitwendige krachten te klein zijn om water aan de binnenzijde te kunnen laten uit treden.

De winddruk op een gevel zal bij gemiddelde windsnelheid in de orde van 10 Pa liggen, en kan bij storm oplopen tot gemiddeld ruim 300 Pa. Bij windvlagen zal de

winddruk kortdurend kunnen oplopen tot waarden die twee a drie maal zo hoog zijn als de gemiddelde winddruk.

Bij orkaankracht kan de gemiddelde winddruk op een gevel zelfs meer dan 500 Pa. bedragen.

Het drukverschil over de gevel is afhankelijk van de druk in het vertrek. Het drukverschil kan daarom zowel kleiner - bij overdruk in het vertrek bij bijvoorbeeld een geopende ventilatievoorziening in de gevel waar de wind op staat - als groter zijn - door de onderdruk achter het gebouw, en een geopende ventilatievoorziening aan die gevel.

Bij een massieve muur kan het drukverschil daarom in de orde van grootte liggen van de hiervoor genoemde waarden.

Bij een spouwmuur wordt het grootste drukverschil over het binnenspouwblad gevonden, en is het drukverschil over het buitenspouwblad - dat door de regen nat wordt - veel kleiner. Wel zal de druktoename bij een windvlaag grotendeels over het buitenspouwblad werken.

In de praktijk zal, bij een geventileerde spouwmuur, het gemiddelde drukverschil over het buitenspouwblad bij een storm in de orde van 50 Pa liggen. Deze uitwendige kracht kan water door een spleet (krimpscheur) van 3 mm persen. Bij zeer grote winddrukken kan water door scheuren met een breedte van 0,5 mm en breder gestuwd worden.

Indien een waterfilm over de muur loopt, en in een scheur dringt, zal ook de hydrostatische druk als uitwendige kracht op het water in de scheur werken. Door deze uitwendige kracht kan water nog door (krimp-) scheurtjes van 0,1 mm worden gedrukt.

De hoeveelheid water die door een uitwendige kracht door een scheurtje kan worden geperst bedraagt ongeveer:

$$q = 64 \cdot 10^3 b^3 \cdot l \cdot \Delta P / d \quad (71)$$

met:

Q waterstroom door de spleet [kg/s]

b breedte van de spleet [m]

l lengte van de spleet [m]

d diepte van de spleet (gemeten vanaf het oppervlak) [m]

$\Delta P$  drukverschil [Pa]

De snelheid, waarmee het water door uitwendige krachten door een spleet wordt geperst is groot.

De tijd waarna het doorgedrongen water de andere zijde van de krimpseur of spleet bereikt kan geschat worden met:

$$t = 0,035 l^2/b \quad (72)$$

met:

- t tijd waarna water de andere zijde van de spleet bereikt [s]
- b breedte van de spleet [m]
- l lengte van de spleet [m]

In de praktijk kan bij een halfsteens muur regendoorslag al binnen enkele minuten optreden, bij een steens muur kan dat wel twee uur of langer duren.

Regendoorslag door het buitenspouwblad van spouwmuren kan dus niet veroorzaakt worden door het water dat door capillaire krachten door de baksteen wordt opgezogen, maar wordt veroorzaakt door de krimpseuren die in de stootvoegen aanwezig zijn. In de stootvoegen kan een hydrostatische druk optreden door een 'waterkolom' van maximaal de hoogte van de stootvoeg: 70 mm.

Bij een halfsteens buitenspouwblad van gemiddelde kwaliteit kan na een hevige slagregen per uur een hoeveelheid water in de orde van 6 kg/m<sup>2</sup>h zijn doorgelaten. Na een behoorlijke regenperiode kan een hoeveelheid door het buitenspouwblad doorgelaten regenwater van 10 kg/m<sup>2</sup> over de spouwzijde van het buitenspouwblad naar beneden afstromen.

## 6 Drogen

Een muur die door regendoorslag nat is geworden zal, wanneer de vochttoevoer is gestopt, weer drogen. Ook het bouwvocht dat na het storten van een betonconstructie aanwezig is, is na verloop van tijd gedroogd tot het evenwichtsvochtgehalte dat behoort bij de relatieve luchtvochtigheid van de omgeving.

Een steenachtig materiaal dat volledig met water verzadigd is zal, wanneer de relatieve luchtvochtigheid in het vertrek niet zeer hoog is, drogen. In eerste instantie zal door de afvoer van vocht (verdamping aan het oppervlak) het vochtgehalte dalen, en vindt toevoer van water door capillair vochttransport plaats vanuit het inwendige van de constructie, waar het vochtgehalte hoger is. Er is een vochtgradiënt: het vochtgehalte aan het oppervlak waar verdamping plaats vindt is lager dan het vochtgehalte in het inwendige van de constructie. Dit is de eerste droogfase.

Na verloop van tijd zal het vochtgehalte aan het oppervlak gedaald zijn tot het kritisch vochtgehalte. Bij verdere afvoer van vocht zakt het vochtgehalte aan het oppervlak onder het kritisch vochtgehalte, zodat geen aanvoer van vocht in vloeibare vorm meer plaatsvindt tot aan het oppervlak. Het vochtfront - waar het vochtgehalte kritisch is - trekt zich langzaam terug van het oppervlak.

Verdamping vindt nu niet meer plaats vanaf het materiaaloppervlak, maar vanaf een zekere diepte in de constructie. Vanaf het vochtfront naar het binnenoppervlak vindt het vochttransport plaats door dampdiffusie.

Indien de verdamping niet meer vanaf het oppervlak van de drogende constructie plaatsvindt, spreken we over de tweede droogfase.

Bij verdamping vanaf een nat oppervlak - eerste droogfase - geldt:

$$q = \beta \Delta P \quad (73)$$

met:

q dampstroom (dichtheid) [kg/m<sup>2</sup>s]

β waterdampoverdrachtscoëfficiënt [s/m]

ΔP dampdruk verschil [Pa]

Het dampdrukverschil in voorgaande formule is het verschil tussen de dampspanning aan het vochtfront en de dampspanning van de lucht in het vertrek. Hierbij is de dampdruk aan het - natte - oppervlak de verzadigingsdampspanning, die behoort bij de temperatuur van dat oppervlak.

Heeft het vochtfront zich tot enige afstand teruggetrokken vanaf het binnenoppervlak - dus in de tweede droogfase - dan geldt:

$$q = (\beta^{-1} + 5,3 \cdot 10^9 \mu x)^{-1} \Delta P \quad (74)$$

met:

q dampstroom (dichtheid) [kg/m<sup>2</sup>s]

β waterdampoverdrachtscoëfficiënt [s/m]

μ dampdiffusieweerstandsgetal [-]

x afstand tussen vochtfront en binnenoppervlak [m]

ΔP dampdruk verschil [Pa]

Al heel snel, bij een kleine afstand x waarover het vochtfront is teruggetrokken van het oppervlak, geldt dat  $5,3 \cdot 10^9 \mu x \gg \beta^{-1}$  zodat geldt:

$$q = (5,3 \cdot 10^9 \mu x)^{-1} \Delta P \quad (75)$$

Op de snelheid van drogen zijn - naast de materiaaleigenschappen van het drogende materiaal - het dampspanningsverschil en de waterdampoverdrachtscoëfficiënt van invloed. Het dampspanningsverschil tussen het vochtfront (dampspanning is daar de verzadigingsdampspanning die behoort bij de temperatuur van het vochtfront) en de dampspanning van bijvoorbeeld de binnenlucht wordt dus bepaald door de temperatuur (van vochtfront en binnenlucht) en de relatieve luchtvochtigheid.

Het betekent dat de snelheid van drogen vergroot kan worden door het dampspanningsverschil te vergroten. Dit heeft in zowel de eerste als de tweede droogfase effect. Zo kan men de temperatuur verhogen en de luchtvochtigheid binnen verlagen (ventileren).

Alleen tijdens de eerste droogfase kan men de droogsnelheid ook vergroten door de waterdampoverdrachtscoëfficiënt te vergroten. Deze is namelijk - evenals de warmteoverdrachtscoëfficiënt - afhankelijk van de luchtsnelheid en van het temperatuurverschil. Indien we het effect op de waterdampoverdrachtscoëfficiënt van de temperatuur verwaarlozen (verwarmen van de binnenlucht zal vaak ook tot een verwarmen van de te drogen constructie leiden, erg grote temperatuurverschillen krijgen we dan niet) betekent dit dat in de eerste droogfase de droogsnelheid onder meer vergroot kan worden door een ventilator langs de muur te laten blazen. De waterdampoverdrachtscoëfficiënt voor verschillende luchtsnelheden langs het oppervlak zijn gegeven in tabel 9.

Tabel 9

luchtsnelheid	waterdampoverdrachtscoëfficiënt
normaal	$22 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$
1 m/s	$50 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$
2 m/s	$85 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$
3 m/s	$105 \cdot 10^{-9} \text{ s/m}$

Wel is het zo, dat indien in de eerste droogfase de droogsnelheid sterk wordt opgevoerd, het vochtgehalte aan het oppervlak snel daalt tot het kritisch vochtgehalte, maar het vochtgehalte op grotere afstand van het oppervlak hoger blijft. Het gemiddelde vochtgehalte is dan op het moment dat de tweede droogfase start hoger. Of er dan werkelijk een winst is behaald in droogsnelheid is dan zeer de vraag: de tweede droogfase duurt langer.

Het gemiddelde vochtgehalte  $w_{tr}$  in de constructie bedraagt op het tijdstip dat de tweede droogfase start:

$$w_{tr} = \psi_c \rho + q \cdot d / (3D_w) \quad (76)$$

met:

- $\psi_c$  kritisch watergehalte [ $\text{m}^3 / \text{m}^3$ ]
- $\rho$  soortelijke massa van water (1000) [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $q$  dampstroom aan het oppervlak [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ]
- $d$  dikte van de constructie [m]
- $D_w$  vochtvereffeningscoëfficiënt [ $\text{m}^2\text{s}$ ]

De vochtvereffeningscoëfficiënt is een materiaaleigenschap, die ook van het vochtgehalte afhangt. Ten behoeve van berekeningen wordt voor deze wel een waarde 0 aangehouden bij vochtgehalten beneden het kritisch vochtgehalte, en een 'gemiddelde' waarde, onafhankelijk van het vochtgehalte voor vochtgehalten boven het kritisch vochtgehalte.

Voor de snelheid waarmee het vochtfront zich terugtrekt in de tweede droogfase wordt door Hens [2] en Tammes en Vos [1] de volgende (hier vereenvoudigd weergegeven) relatie gegeven.

$$X = (3,7 \cdot 10^{-13} \Delta P \cdot t / (\mu(\psi_c - \psi_h)))^{0,5} \quad (77)$$

$\Delta P$  dampdruk verschil tussen vochtfront en binnenlucht [Pa]

$\mu$  dampdiffusieweerstandsgetal [-]

$\psi_h$  hygroscoopisch watergehalte [ $m^3 / m^3$ ]

$\psi_c$  kritisch watergehalte [ $m^3 / m^3$ ]

Uit experimenteel onderzoek kan evenwel worden afgeleid dat het  $t^{0,5}$  verband niet geldt, maar dat er veeleer een lineair verband is tussen de plaats van het vochtfront en de tijd (Pel e.a., [12]).

Wanneer de tweede droogfase begint, ziet het materiaal er droog uit. Het bevat echter nog veel vocht. Indien men dan een dampdichte afwerking aanbrengt, zal het vochtgehalte zich weer vereffenen, en vindt men achter (of onder) de dampdichte afwerking een hoog vochtgehalte. Dit leidt vaak tot schade, bij bijvoorbeeld het aanbrengen van een dampdichte vloerbedekking op een cementdekvloer, of een coating op een wand.