

4. Fysische en mechanische eigenschappen

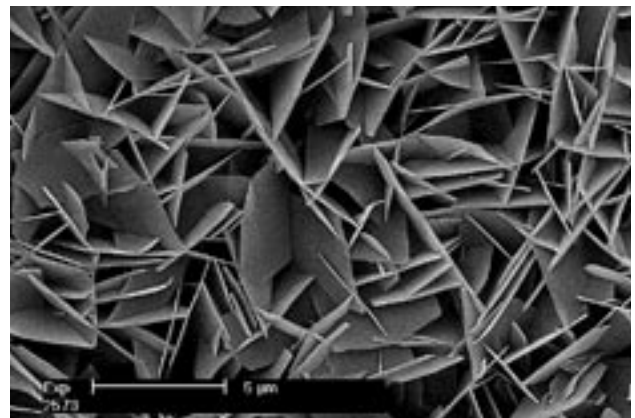
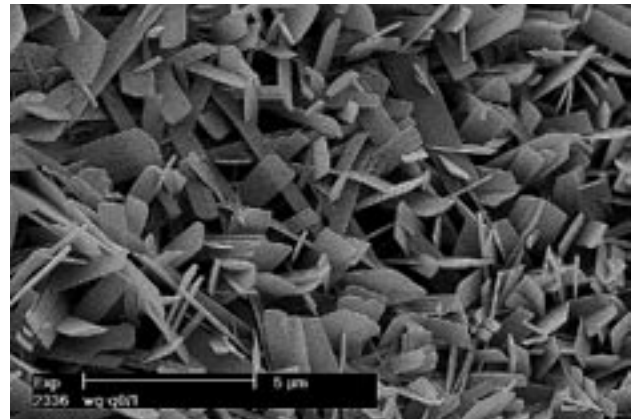
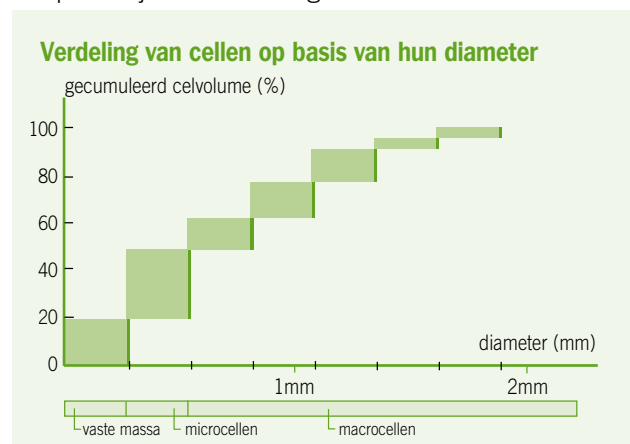
4.1 Uiterlijk en structuur

De structuur van cellenbeton wordt bepaald door de aanwezigheid van een groot aantal uiterst kleine cellen.

Cellenbeton wordt in verschillende volumemassa's vervaardigd, variërend van 300 tot 800 kg/m³ (normaal beton: 2400 kg/m³).

Deze cellen maken 80% uit van het totale volume.

We onderscheiden twee soorten cellen: macrocellen (0,5 – 2 mm), die bij het vrijkomen van waterstof worden gevormd, en microcellen met capillaire afmetingen, die bij het uitzetten van de massa worden gevormd en verspreid zijn in het vaste gedeelte van deze massa.



Voor cellenbeton van 500 kg/m³ bedraagt de verdeling van de cellen in volumepercent:

- Macrocellen 50%
- Capillaire microcellen
verspreid in de vaste massa 30%

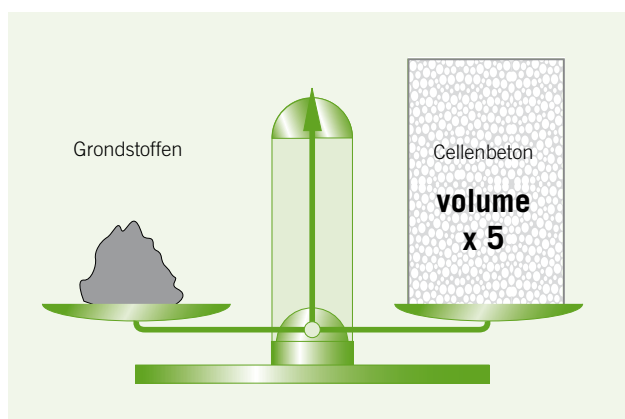
In totaal bestaat het volume van cellenbeton dus voor 80% uit lucht, terwijl de vaste massa 20% uitmaakt.

Met 1 m³ grondstof kan men dus 5 m³ cellenbetonmateriaal maken.

Deze opmerkelijke grondstofbesparing is een van de belangrijkste ecologische kenmerken van cellenbeton.

De oppervlakte van de cellen in 1 kg cellenbeton bedraagt 20 m².

In 1 m³ komt dit neer op ± 10.000 m².



Het is van het allergrootste belang dat de cellen klein, bolvormig en homogeen in de massa verdeeld zijn. Grote cellen verminderen de sterkte van het materiaal omdat de krachten worden overgedragen door de celwand. Hoe groter de cellen, hoe meer spanningen zich in de celwanden concentreren. Dit in tegenstelling tot normaal beton, waar de krachtoverdracht plaatsvindt via het toeslagmateriaal en waarbij de cement enkel fungeert als bindmiddel tussen de toeslagstoffen.

Door de productiemethode nauwgezet bij te sturen, kan men de diameter en het aantal gesloten cellen wijzigen en de volumemassa aanpassen (van 300 tot 800 kg/m³).



4.2 Schijnbare droge volumemassa

In de Belgische normen

NBN B 21-002 (blokken)

NBN B 21-004 (gewapende elementen)

en de Europese normen

EN 771-4 (blokken)

EN 12602 (gewapende elementen)

wordt cellenbeton in kwaliteitsklassen ingedeeld in functie van de schijnbare droge volumemassa (ρ -klasse) en van de druksterkte (f-klasse).

Karakteristieke druksterkte (f_{bk})

ρ -klasse	Maatstaven
ρ 0,4	$350 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 400 \text{ kg/m}^3$
ρ 0,5	$400 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 450 \text{ kg/m}^3$
ρ 0,6	$500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 550 \text{ kg/m}^3$
ρ 0,7	$600 \text{ kg/m}^3 \leq \rho < 650 \text{ kg/m}^3$

f-klasse	(N/mm ²)
f2	$f_{bk} \geq 2$
f3	$f_{bk} \geq 3$
f4	$f_{bk} \geq 4$
f5	$f_{bk} \geq 5$

De verschillende klassen worden aangeduid door de letter C voor blokken en CC voor gewapende elementen, gevolgd door de aanduiding van de karakteristieke druksterkte.

Hier volgen de kwaliteitsklassen die op dit ogenblik het meest op de Belgische markt worden gebruikt:

Klassen cellenbetonblokken:

Aanduiding	f-klasse (N/mm ²)	ρ -klasse
C2/400	2	ρ 0,4
C3/450	3	ρ 0,5
C4/550	4	ρ 0,6
C5/650	5	ρ 0,7

Klassen gewapende elementen:

Aanduiding	f-klasse (N/mm ²)	ρ -klasse (kg/m ³)
CC3/500	3	$400 \leq \rho < 500$
CC4/600	4	$500 \leq \rho < 600$

Op aanvraag kunnen andere klassen door de fabrikant worden geleverd.

4.3 Druksterkte

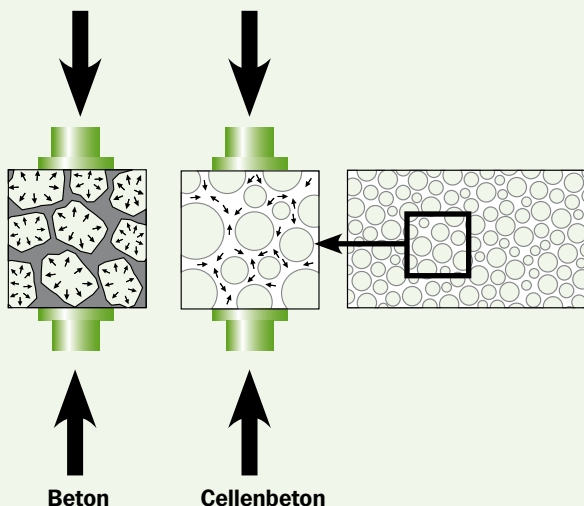
Uit de tabellen in de Belgische normen NBN B 21-002 en NBN B 21-004 (zie par. 4.2) kunnen we afleiden dat de druksterkte toeneemt bij stijgende volumemassa van het cellenbeton.

Bij de berekening van een muur dient men er rekening mee te houden dat metselwerk met gelijmde voegen (wat het geval is bij cellenbeton) een grotere drukweerstand heeft dan metselwerk met mortelvoegen.

Met metselwerk in gelijmde cellenbetonblokken van het type C4/550 kunnen constructies tot vijf verdiepingen hoog worden gebouwd.

Voor grotere prestaties kan door de cellenbetonproducent of de opdrachtgever een cellenbetonklasse met een hogere dichtheid worden aanbevolen, indien vereist, na berekening of volgens de norm 'Metselwerk' NBN B 24-301 of NBN ENV 1996-1-1 (zie par. 4.9.2).

Principe van krachtoverdracht in beton en cellenbeton



4.4 Buigtreksterkte

Alle betonsoorten zijn beter bestand tegen drukbelastingen dan tegen trekbelastingen. Bij gebrek aan proefondervindelijke gegevens moeten de volgende cijfers in acht worden genomen:

De karakteristieke zuivere treksterkte van cellenbeton is 12% van de druksterkte ($f_{ctk} = 0,12 f_{ck}$)

De karakteristieke buigtreksterkte is 22% van de druksterkte : $f_{ctfk} = 0,22 f_{ck}$ (prEN 12602).

Karakteristieke waarden van de buigtreksterkte

Klasse	f_{ctfk}
f2	0,44 N/mm ²
f3	0,66 N/mm ²
f4	0,88 N/mm ²
f5	1,10 N/mm ²



4.5 Schuifspanningen

Voor de schuifspanningen van cellenbeton dienen de volgende waarden te worden aangehouden:

Klasse	τ
CC3/500	0,07 N/mm ²
CC4/600	0,10 N/mm ²

4.6 Elasticiteitsmodulus (E-waarde)

“E” wordt uitgedrukt in N/mm², en is het quotiënt van de spanning gedeeld door de vervorming. De E-waarde moet worden berekend volgens de normen NBN B 21-004 en prEN 12602.

$$E_c = 5 (\rho_{dry} - 150) \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

met

$$\rho_{dry} = \text{droge volumemassa in kg/m}^3$$

Klasse	E_c
CC3/500	1750 N/mm ²
CC4/600	2250 N/mm ²

Door de autoclaving hebben cellenbetonproducten een veel kleinere kruip dan normaal beton. De kruipcoëfficiënt (phi) van cellenbeton is 0,3 [24].

De doorbuiging onder blijvende belasting wordt berekend met de elasticiteitsmodulus op lange termijn $E_{c,\infty}$

$$E_{c,\infty} = \frac{E_c}{1 + \text{phi}} = \frac{E_c}{1,3}$$



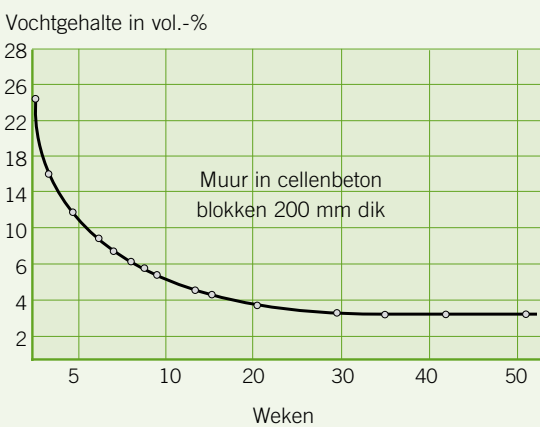
4.7 Gedrag van cellenbeton in de tijd

4.7.1 Droging van cellenbeton

Wanneer het cellenbeton de autoclaaf verlaat, bevat het ongeveer 23 volumepercent vocht.

De onderstaande grafiek toont aan dat het aanwezige vocht na drie maanden grotendeels verdwenen is. Het gebouw verkeert dan nog in het ruwbouwstadium.

Drogingskromme van cellenbetonblokken bij binnenklimaat [24]

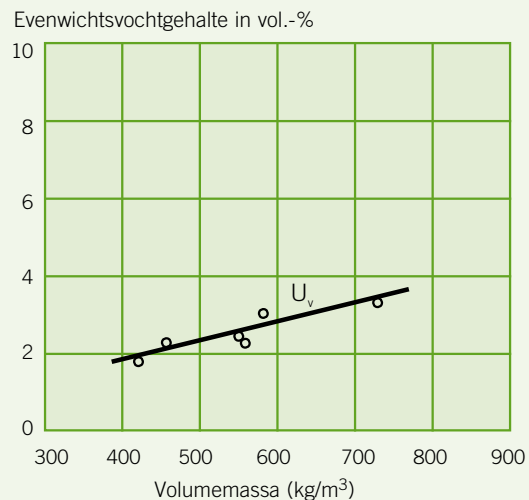


In de praktijk wordt het evenwichtsvochtgehalte van 2,5 in volumepercent van cellenbetonmetselwerk met een volumemassa van 500 kg/m^3 bereikt nadat het gebouw 12 tot 24 maanden in gebruik is, afhankelijk van de gebruiksomstandigheden van de constructie. Daarbij is rekening gehouden met het water dat bij de verwerking en de afwerking wordt toegevoegd, alsook door de regen tijdens de bouwwerken.



Deze evenwichtsfactor kan licht variëren afhankelijk van de volumemassa van het cellenbeton, zoals uit de onderstaande tabel blijkt.

Evenwichtsvochtgehalte (in volume) als functie van de volumemassa [22]

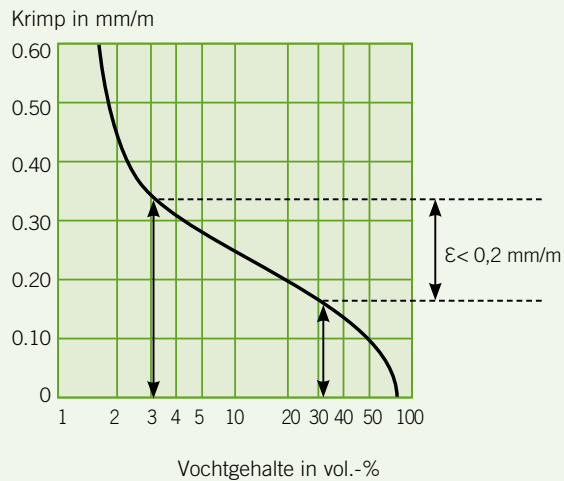


Het restwater van cellenbeton komt in verschillende vormen voor:

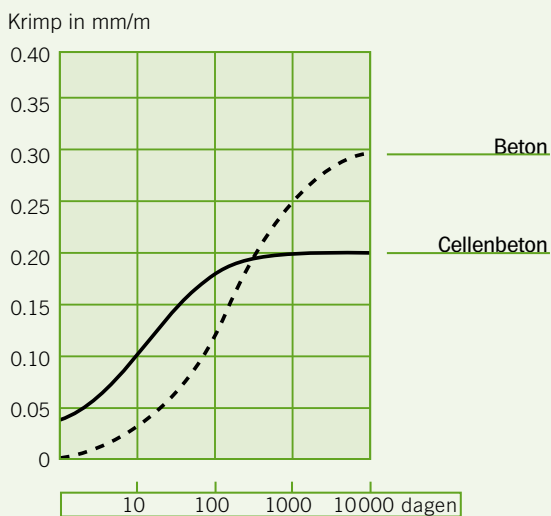
- als chemisch gebonden water (kristallen)
- als gelachtig water in de microporiën, en als vrij water
- in de lucht opgesloten in de capillaire poriën en in de macroporiën.

Voor cellenbeton is de drogingskrimp niet groter dan 0,2 mm/m, wat veel minder is dan voor zware betonblokken.

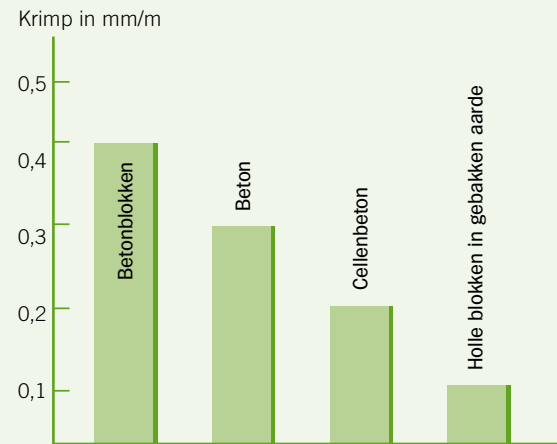
Drogingskrimp van cellenbeton [17]



Krimp in de tijd



Vergelijking van de drogingskrimp van diverse materialen



4.7.2 Verhardingskrimp

Cellenbeton verhardt tijdens het autoclaveren door de vorming van kristallen van gehydrateerd calciumsilicaat (Tobermoriet). Deze stof geeft cellenbeton zijn karakteristieke sterkte. Wanneer het cellenbeton de autoclaaf verlaat, is het verhardingsproces beëindigd en is de verhardingskrimp ook reeds voorbij. Bij de verwerking van cellenbeton moet men bijgevolg geen rekening houden met verhardingskrimp.

4.7.3 Warmte-uitzetting

De lineaire uitzettingscoëfficiënt van een materiaal is de variatie in lengte van een element van 1m bij een temperatuurstijging van 1K.

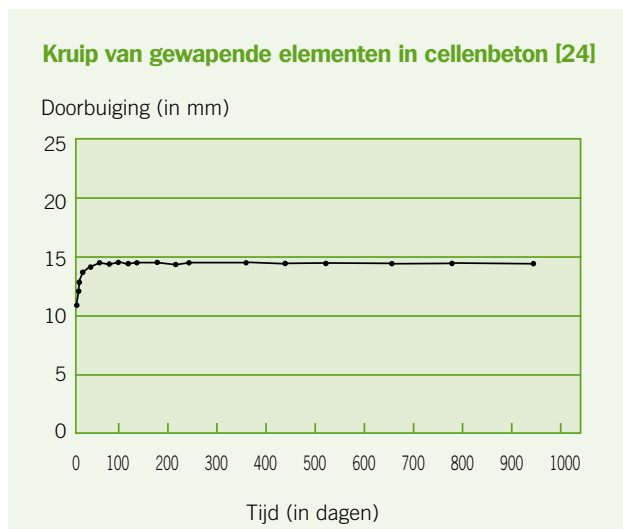
Voor cellenbeton bedraagt deze uitzettingscoëfficiënt $8 \cdot 10^{-6}$ m/mK.

Ter vergelijking volgt hier de lineaire uitzettingscoëfficiënt van verschillende metselstenen (in m/mK):

- baksteen $5 \cdot 10^{-6}$ m/mK
- kalkzandsteen $9 \cdot 10^{-6}$ m/mK
- graniet $5 \cdot 10^{-6}$ m/mK
- beton $10 \cdot 10^{-6}$ m/mK
- cellenbeton $8 \cdot 10^{-6}$ m/mK

4.7.4 Doorbuiging van gewapende elementen in cellenbeton

Naast de ogenblikkelijke doorbuiging bij het belasten van een constructief element treedt na verloop van tijd nóg een vormverandering op ten gevolge van kruip. De toename van de doorbuiging van de elementen, onder invloed van een blijvende vaste belasting, neemt af in de tijd. De volgende curve toont het verloop van de doorbuiging in de tijd van cellenbetonplaten.



4.7.5 Dampdiffusie

De dampdiffusie wordt veroorzaakt door het dampdrukverschil tussen de twee zijden van een poreuze wand. Dit drukverschil heeft geen mechanische gevolgen, maar maakt dampdiffusie in de richting van de drukdaling mogelijk.

Elk bouw materiaal heeft een bepaalde dampdiffusieweerstand. Het dampdiffusieweerstandsgetal μ is de maat voor deze weerstand.

De μ -waarde van lucht is 1. De μ -waarde van een materiaal geeft aan hoeveel keer de dampdiffusieweerstand van dit materiaal groter is dan die van een luchtlaag met dezelfde dikte.

Voor cellenbeton varieert de μ -waarde tussen 5 en 10 afhankelijk van de volumemassa. Die van een dampdicht materiaal is oneindig (∞).

Voorbeelden van materialen (waarden EN 12524):

• lucht	$\mu = 1$
• cellenbeton	
C2/400	$\mu = 4$
C3/450, CC3/500	$\mu = 5$
C4/550, CC4/600	$\mu = 6$
• gebakken aarde	$\mu = 20$
• hout	$\mu = 50 \text{ tot } 200$
• beton	$\mu = 100 \text{ tot } 130$
• gewapend beton	$\mu = 130$
• synthetisch isolatiemateriaal	$\mu = 20 \text{ tot } 300$
• geëxtrudeerd polystyreen	$\mu = 150$
• asfalt	$\mu = 50.000$
• PVC	$\mu = 20.000$
• glas	$\mu = \infty$
• staalplaat	$\mu = \infty$

Hoe kleiner de waarde μ , hoe beter de dampdiffusie. Dit betekent dat waterdamp sneller wordt afgevoerd. Aangezien cellenbeton een zeer lage μ -waarde heeft, zegt men dat het goed 'ademt'.

4.7.6 Chemische bestendigheid

De bestandheid van cellenbeton tegen chemische aantasting is vergelijkbaar met die van zwaar beton. Beide materialen zijn echter minder goed bestand tegen sterke zuren, die doorgaans niet voorkomen in woningen of industriële gebouwen. Door de hoge alkaliteit is cellenbeton bestand tegen zure regen. Lichte aantasting vindt slechts plaats tot enkele millimeters diep.

4.7.7 Wateropname

In direct contact met water (ook regenwater) zuigen materialen water op door capillariteit volgens de formule:

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

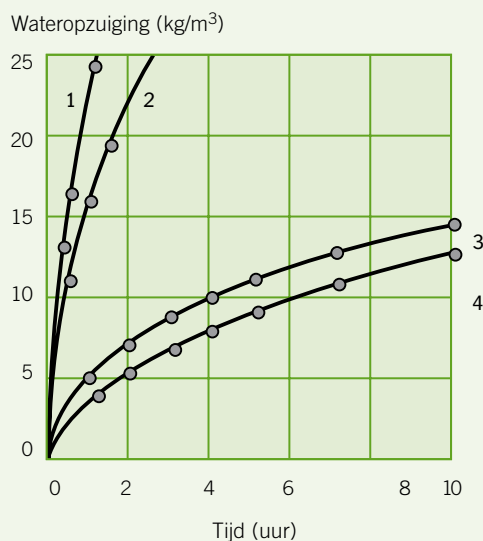
$m(t)$ = opgezogen water per oppervlakte-eenheid (kg/m^2) gedurende een periode t

A = wateropnamecoëfficiënt ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$)

t_w = contactduur met het water (seconden)

De A -waarde van cellenbeton varieert tussen $70 \cdot 10^{-3}$ en $130 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$. Deze waarde ligt veel lager dan die van gebakken aarde of gips. Dankzij de gesloten celstructuur van cellenbeton kan het water alleen opgezogen worden via de vaste stof waaruit het materiaal is samengesteld. Deze vaste stof maakt slechts 20% uit van het volume, wat de opname van het water sterk vermindert.

Capillaire opzuiging van verschillende materialen [12]



1. Pleister $1390 \text{ kg}/\text{m}^3$
2. Volle baksteen $1730 \text{ kg}/\text{m}^3$
3. Cellenbeton $600 \text{ kg}/\text{m}^3$
4. Kalkzandsteen $1770 \text{ kg}/\text{m}^3$

4.7.8 Weerstand tegen vorst en dooi

Cellenbeton wordt in de regel niet beschadigd door de cycli van bevriezen en ontdooien. Alleen voor bepaalde bijzondere constructies moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen. Een voorbeeld hiervan is de bouw van koelruimten. Poreuze materialen zijn doorgaans niet vorstbestendig boven een kritisch vochtgehalte. Dat geldt zowel voor zwaar beton als voor cellenbeton. Deze kritische vochtgrens voor cellenbeton van het type C4 is pas bereikt bij 45 volumepercent.

In principe wordt deze waarde nooit bereikt op de bouwplaats. Kort na de ingebruikneming van de constructie stabiliseert het vochtgehalte zich tussen 2 en 4 volumepercent. Als de buitenmuren in cellenbeton niet worden beschermd of behandeld, kan deze waarde 10% bereiken. Als een behandeling van het buitenoppervlak wenselijk is om wateropname en de daaruit voortvloeiende vermindering van het warmte-isulerende vermogen van het cellenbeton te voorkomen, moet de beschermlaag in elk geval waterdampdoorlatend zijn. Is de beschermlaag dampdicht, dan zal er condensatie van de waterdamp optreden in het buitenste gedeelte van de muur.

In dit geval kan verzadiging optreden, met zelfs overschrijding van het kritische vochtgehalte tot gevolg. Hierdoor ontstaat vorstschade. Dit principe geldt voor de meeste materialen. Een afwerklaag is dampdoorlatend als deze voldoet aan de **criteria van Künzels**, met name:

Wateropnamecoëfficiënt:

$$A \leq 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$$

Dampdiffusieweerstand:

$$S_d \leq 2 \text{ m}$$

met $S_d = \mu \cdot d$, of het dampdiffusieweerstandsgetal vermenigvuldigd met de dikte. Het product van beide parameters is onderworpen aan de volgende eis:

$$A \cdot S_d \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h}^{0.5})$$