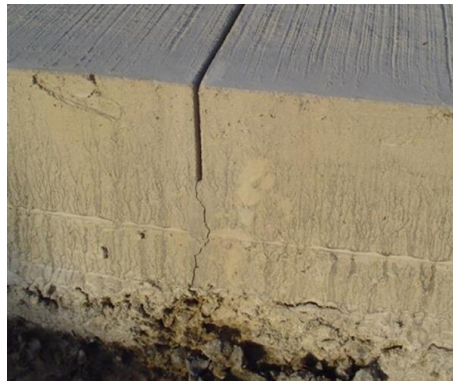


Vervormingseigenschappen

Betonconstructies kunnen niet uitsluitend worden ontworpen op druk- en treksterkte. Vervormingen spelen ook een belangrijke rol, vooral doorbuiging. Beheersing van de vervorming is noodzakelijk voor het beperken van scheurvorming. Bepalende eigenschappen zijn de elasticiteitsmodulus, kruip, relaxatie en krimp.



Krimpvoeg met krimpscheur

Bepalende vervormingseigenschappen

De voornaamste materiaaleigenschappen die bepalend zijn voor vervorming zijn:

- elasticiteitsmodulus;
- kruip;
- relaxatie;
- krimp.

Dit zijn geen op zichzelf staande eigenschappen. Inzicht in de onderlinge relaties draagt bij aan een optimaal ontwerp.

Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus (E-modulus) van een materiaal is het getal dat de verhouding weergeeft tussen de grootte van de spanning, veroorzaakt door de belasting, en de door deze spanning veroorzaakte (elastische) vervorming. Deze relatie staat bekend als de Wet van Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

waarbij:

E = elasticiteitsmodulus [N/mm²]

σ = spanning [N/mm²]

ε = specifieke vervorming [-]

De specifieke vervorming (rek) is de verlenging of verkorting van een materiaal per eenheid van lengte en is daardoor dimensieloos. Beton is een heterogeen materiaal, bestaande uit toeslagmateriaal ingebed in een matrix van cementsteen.

De elasticiteitsmodulus van beton wordt in sterke mate bepaald door het soort én het gehalte aan toeslagmaterialen in de betonsamenstelling (ervanuit gaande dat het gebruikte toeslagmateriaal een andere elasticiteitsmodulus heeft dan de cementsteen).

De relatie tussen elasticiteitsmodulus E en kubusdruksterkte f'_{ck} kan voor het gemak in een eenvoudige formule worden gevat:

karakteristieke kubusdruksterkte	elasticiteitsmodulus	volgens
$15 \leq f'_{ck} \leq 65$	$E'_b = 22250 + 250 f'_{ck}$	NEN-EN 1992-1-1
$65 < f'_{ck} \leq 105$	$E'_b = 35900 + 40 f'_{ck}$	CUR-Aanbeveling 97

Kruip

Elk materiaal vervormt als er een kracht op uitgeoefend wordt. Naarmate de kracht groter wordt, neemt de vervorming toe. Als bij beproeving de kracht niet verder wordt verhoogd, blijkt de vervorming toch nog enige tijd toe te nemen. Die extra vervorming noemen we kruip. Kruip is een belangrijk fenomeen voor betonconstructies. Het leidt tot grotere vervormingen dan waarop op grond van de E-modulus gerekend mag worden.

Kruip heeft invloed op de vervorming van de betonconstructie (bijvoorbeeld doorbuiging van vrijdragende vloeren en balken) en op herverdeling van de krachtsverdeling in de constructie (bijvoorbeeld ten gevolge van de bouwwijze, zetting, etc.).

Kruip van beton wordt veroorzaakt door vervorming van de gelstructuur, als gevolg van capillaire spanning in het chemisch niet-gebonden water. De grootte van de kruipvervorming is rechtevenredig met de elastische vervorming van beton.

Het verband tussen de kruipvervorming ($\epsilon\phi$) en de elastische vervorming (ϵ_{be}) wordt aangegeven met de kruipcoëfficiënt ϕ . Hier geldt:

$$\epsilon\phi = \phi \epsilon_{be}$$

De grootte van de kruip van beton is afhankelijk van:

- relatieve vochtigheid;
- ouderdom op het tijdstip van belasten;
- sterkteklasse van cement;
- sterkteklasse van beton;
- geometrie van de betondoorsnede;
- duur van de belasting.

De grootte van de kruipcoëfficiënt ϕ kan variëren van circa 0,8 tot circa 4,2.

$\phi = 0,8$ bij relatieve vochtigheid 100% en $f'_{ck} = 65 \text{ N/mm}^2$

$\phi = 4,2$ bij relatieve vochtigheid 60% en $f'_{ck} = 15 \text{ N/mm}^2$.

NEN-EN 1992-1-1 geeft richtlijnen voor de berekening van de kruipcoëfficiënt.

Relaxatie

In een materiaal dat belast wordt, ontstaan spanningen en vervormingen. Deze nemen toe, naarmate de belasting toeneemt. Indien het materiaal echter enige tijd onder constante vervorming wordt gehouden, neemt de spanning geleidelijk wat af in het materiaal. Deze afname van de spanning bij gelijkblijvende vervorming noemen we relaxatie. Het fenomeen relaxatie is van belang voor betonconstructies, omdat het tot geringere spanningen leidt dan waarop op grond van de elasticiteitsmodulus gerekend zou moeten worden. Deze reductie wordt berekend, door de normaalkracht en/of buigend moment te vermenigvuldigen met de relaxatiecoëfficiënt $k\phi$. Voor geleidelijk optredende permanent aanwezige belastingen geldt volgens de theorie van H. Trost:

$$k\phi = \frac{1}{(1 + 0,8\phi)}$$

waarbij:

ϕ = kruipcoëfficiënt

Rekenvoorbeeld relaxatie

Voor geleidelijk optredende permanent aanwezige belastingen geldt volgens de theorie van H. Trost:

$$k\phi = \frac{1}{(1 + 0,8\phi)}$$

waarbij:

ϕ = kruipcoëfficiënt

Voor een betonweg wordt gerekend met sterkteklasse C35/45, de dikte van de betonconstructie $h = 250$ mm en de relatieve vochtigheid $RV > 60\%$ (buiten).

De berekende kruipcoëfficiënt is $\phi = 0,84$.

Hieruit volgt de relaxatiecoëfficiënt $k\phi = 0,6$.

Dus van alle langdurig aanwezige krachten (moment, normaalkracht) blijft op de lange duur maar 60% over!

De door kruip veroorzaakte relaxatie van krachten is een hele belangrijke, gunstige eigenschap van beton.

Breukrek

Vers beton is de eerste vijf uur na aanmaak gemakkelijk vervormbaar. Daarna neemt de stijfheid snel toe, terwijl het beton nog nagenoeg geen druk- en treksterkte heeft. Het beton heeft wel grote weerstand tegen vervorming, maar weinig sterkte. In de praktijk betekent dit

dat beton tussen 5 en 20 uur na aanmaken gemakkelijk kan scheuren, met name door opgelegde vervormingen zoals thermische krimp en uitdrogingskrimp. Hogere aanvangstemperaturen van de betonspecie kunnen deze kritische periode verkorten.



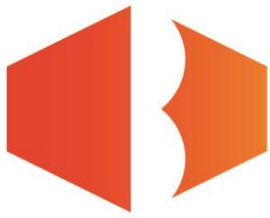
Thermische vervorming

Net als alle andere materialen zet beton uit als het warm wordt en krimpt het als het afkoelt. De mate waarin een materiaal uitzet of krimpt wordt aangegeven met de thermische uitzettingscoëfficiënt van dat materiaal. Deze wordt uitgedrukt per $^{\circ}\text{C}$. Voor de thermische uitzettingscoëfficiënt van beton is de thermische uitzettingscoëfficiënt van het toeslagmateriaal van groot belang:

- Beton met riviergrind: de thermische uitzettingscoëfficiënt bedraagt circa $12 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.
- Beton met kalksteen: de thermische uitzettingscoëfficiënt bedraagt circa $8 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.
- Lichtbeton op basis van geëxpandeerde kleikorrels: tussen 7 en $11 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Uitdrogingskrimp

Krimp ten gevolge van vochtverlies is een van de belangrijkste oorzaken van scheurvorming en dus van schade aan betonconstructies. In de betontechnologie onderscheiden we diverse vormen van krimp veroorzaakt door vochtverlies, afhankelijk van het stadium van de verharding van beton.



Vormen van krimp

	Mechanisme	Invloedsfactoren	Opmerkingen
Plastische krimp	Ontstaat door het verdampen van aanmaak-water vanuit de nog plastische betonspecie. Als er meer water aan het oppervlak verdampt dan uit het binnenste van het beton aangevoerd wordt (bleeding-capaciteit), kunnen er scheurtjes loodrecht op het oppervlak ontstaan.	Met name klimatologische factoren als relatieve vochtigheid, windsnelheid en temperatuur zijn van invloed op de verdampingssnelheid. De kans op scheurvorming is kleiner naarmate de beton-specie meer water en minder fijn materiaal bevat. Goed nabehandelen van betonspecie is de enige juiste remedie ter voorkoming van plastische krimpscheuren.	Plastische krimpscheuren zijn meestal slechts enkele centimeters diep. 'Droge' betonspecie met veel fijn materiaal zijn gevoeliger voor scheurvorming. Daarbij kunnen plastische krimpscheuren ook door-en-door zijn. Plastische krimpscheuren zijn hoofdzakelijk een visueel probleem.
Verhardings- of chemische krimp	De som van het volume aan cement en water is groter dan het volume van de daar-uit gevormde hydratatieproducten.	De soort en hoeveelheid cement.	Deze vorm van krimp veroorzaakt microscheurvorming in de cementsteen. De microscheuren worden gezien als de inleiders bij het bezwijken van beton onder een (te hoge) belasting. Bij een normale betonsamenstelling is de verhardingskrimp niet merkbaar als een uitwendige vervorming.
Autogene krimp	Een bijzondere vorm van verhardingskrimp: bij een zeer lage wcf wordt door de toenemende hydratatie al het aanvankelijk beschikbare water langzaam opgebruikt. Dit inwendige 'uitdrogings-proces' kan zelfs leiden tot een volume vermindering van de cementsteen en een meetbare krimp van beton.	Vooraf van belang bij een wcf < 0,40. Gebruik van silica fume of andere (zeer) fijne vulstoffen versterkt het effect in belangrijke mate.	Een hoog pastagehalte, in combinatie met een lage wcf, vergroot de autogene krimp. Bij bouwdelen in hogesterktebeton, waarbij vervormingen worden verhinderd, kan autogene krimp de oorzaak zijn van scheurvorming.
Uitdrogingskrimp	Is het gevolg van het verdampen van het niet-gebonden water in het beton via de capillaire poriën. Door dit waterverlies trekken de poriën samen. Hiertegenover staat echter dat door wateropname de poriën zwellen en het beton kan uitzetten.	Uitdrogingskrimp hangt voornamelijk af van de relatieve vochtigheid van de omgeving, afmetingen van het betreffende bouwdeel en de beton samenstelling. Een lage wcf leidt tot kleine capillaire poriën waaruit het water minder gemakkelijk verdamppt. Naarmate de hydratatiegraad groter is, zijn de capillaire poriën kleiner. Dit wordt bereikt door goed en voldoende lang nabehandelen.	Het fenomeen 'uitdrogingskrimp' is onlosmakelijk met de toepassing van cement verbonden. In de praktijk is uitdrogingskrimp bij beton met 'normale' sterkte ($f'_{ck} \leq N/mm^2$) op langere termijn de oorzaak van ongewenste scheurvorming in constructies die niet vrij kunnen vervormen. Voldoende dilatatie kan ongewenste scheurvorming voorkomen.

Rekenvoorbeeld

De zon warmt een grindbetonplaat met een lengte 10 m op van 15 °C naar 40 °C.

Temperatuurverhoging: 25 °C

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Per meter zet de plaat uit: $25 \times (12 \times 10^{-6})$ meter

Dat is: 300×10^{-6} meter = 0,3 mm/m

De plaat is 10 meter lang,

dus de hele plaat zet uit: $10 \times 0,3 = 3$ mm.

N.B.: Bij afkoeling tot 15 °C zal de plaat ook weer 3 mm krimpen.