2016•2017
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Ontwerp protocol voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming

Promotor :
Prof. ir. Pieter BAEKELAND

Promotor :
dr.ir. PETER BUFFEL

Andries Buteneers

Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2016•2017
Faculteit Industriële ingenieurswetenschappen
master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

Masterproef

Ontwerp protocol voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming

Promotor :
Prof. ir. Pieter BAEKELAND

Promotor :
dr.ir. PETER BUFFEL

Andries Buteneers
Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële wetenschappen: bouwkunde

universiteit hasselt | KU LEUVEN

VOORWOORD

Deze Masterproef is het sluitstuk van mijn opleiding tot Master in de industriële wetenschappen: Bouwkunde, aan de Universiteit Hasselt. Het maken van de thesis is geen eenvoudige opgave. Een goede begeleiding is hierbij dus essentieel. Ik wil iedereen bedanken die rechtstreeks of onrechtstreeks betrokken was bij het realiseren van deze Masterproef.

In de eerste plaats wil ik mijn promotoren bedanken. Mijn dank gaat uit naar mijn interne promotor Prof. Ir. Pieter Baekeland voor de intensieve opvolging en inspanningen, zoals het geven van vele bronnen en uitleg. Ik dank ook mijn externe promotor Dr. Ir. Peter Buffel, voor zijn intensieve opvolging en uitleg. Ik wil de promotoren ook bedanken voor de tijd die ze hebben vrijgemaakt om mij te begeleiden.

Graag wil ik ook familie en vrienden bedanken voor het nalezen van deze thesis en/of aanmoedigingen doorheen het academiejaar.

Inhoudstafel

VOORWOORD ..... **I**
LIJST VAN ILLUSTRATIES ..... **V**
LIJST VAN TABELLEN ..... **VII**
LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN EN AFKORTINGEN ..... **IX**
ABSTRACT ..... **XIII**
ABSTRACT IN ENGLISCH ..... **XV**
1 INLEIDING **1**
2 LITERATUURSTUDIE **3**
2.1 Toelichting begrippen **3**
2.1.1 Verhinderde vervorming 3
2.1.2 Krimp 4
2.1.3 Kruip 5
2.1.4 Temperatuur 5
2.1.5 Scheurvorming 5
2.2 Toelichting methodes **6**
2.2.1 De minimumwapening 7
2.2.2 Voorbeeld minimumwapening 11
2.2.3 Scheurwijdtes 12
2.2.4 Voorbeeld scheurwijdte 14
2.2.5 Invloed van de druksterkte 17
2.2.6 Invloed van temperatuur 19
2.2.7 Voorbeeld temperatuur 20
2.2.8 Kruip 21
2.2.9 Voorbeeld kruip 21
2.2.10 Krimp 23
2.2.11 Voorbeeld krimp 24
2.2.12 Berekening benodigde staaldoorsnede 26
2.3 Toelichting methoden voor opgelegde vervorming **27**
2.3.1 Berekening vervormingsverhindering 27
2.3.2 Voorbeeld vervormingsverhindering 28
2.4 Besluit **28**
3 OPSTELLEN VAN ONTWERPPROTOCOL **29**
3.1 Parameters **29**
3.1.1 De wapeningsdiameter 29
3.1.2 Belemmeringsgraad 30
3.1.3 Tussenafstand van de staven 30
3.1.4 Alfa e 31
3.2 Opstellen tabellen **32**
3.2.1 Geval (a): symmetrische belemmering 33
3.2.2 Geval (b): asymmetrische belemmering 39

3.3 Geval a: beschrijving invloed parameters 44
3.4 Geval b: beschrijving parameters 46
3.5 Aanpassingsformule 50
3.6 Besluit 51

4 VOORBEELDEN 53

4.1 Voorbeeld 1: balk ingeklemd aan zijn uiteinden 53
4.2 Voorbeeld 2: wand gestort op uitgeharde plaat 57
4.3 Voorbeeld 3: andere betonsterkte 62
4.4 Besluit 65

5 BESLUIT 67

LITERATUURLIJST 69

BIJLAGE 70

Bijlage 1: Sterkte- en vervormingeigenschappen voor beton 70
Bijlage 2: Verhinderingsfactoren voor typische situaties 71
Bijlage 3: Milieuklasse 72
Bijlage 4: Tabellen ontwerpprotocol 73
Bijlage 4.1: Geval a 73
Bijlage 4.2: Geval b 77
Bijlage 5: Flowchart 79

LIJST VAN ILLUSTRATIES

Figuur 1: Staaf vrij uiteinde 3
Figuur 2: Staaf langs beide zijden ingeklemd 3
Figuur 3: Thermische krimp [9] 4
Figuur 4: Doorsnede voorbeeld 6
Figuur 5: Invloed trekkracht op scheurwijdte 16
Figuur 6: Verloop druk- en treksterkte 18
Figuur 7: Elasticiteitsmodulus i.f.v. de tijd 18
Figuur 8: Kruipcoëfficiënt binnenmilieu [3] 22
Figuur 9: Types vervormingsverhindering [5] 27
Figuur 10: Maximale staafdiameter voor scheurvorming in elementen [5] 29
Figuur 11: Maximum staafafstand voor scheurbeheersing in elementen [5] 30
Figuur 12: Op trek belast element [3] 35
Figuur 13: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering 37
Figuur 14: vergelijking staafdiameter 38
Figuur 15: Maximale staafdiameter asymmetrische belemmering 43
Figuur 16: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd 44
Figuur 17: Maximale staafdiameter i.f.v. staalspanning 44
Figuur 18: Verschillende betondruksterkte 45
Figuur 19: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd 46
Figuur 20: Invloed van temperatuur op maximale staafdiameter 46
Figuur 21: Invloed van de relatieve vochtigheid op de maximale staafdiameter 47
Figuur 22: Invloed van verschillende betondruksterkten 48
Figuur 23: Invloed cementklasse 49
Figuur 24: Invloed fictieve dikte van de dwarsdoorsnede 49
Figuur 25: Invloed einde van de nabehandeling 50
Figuur 26: Voorbeeld 1 54
Figuur 27: Oplossing voorbeeld 1 55
Figuur 28: Vergelijking protocol en NBN EN 1992-1-1 56
Figuur 29: Aanpassen RV 60
Figuur 30: Berekende scheurwijdte 60
Figuur 31: Voordbeeld 3 62
Figuur 32: Oplossing voorbeeld 3 63
Figuur 33: Minimumwapening voor verschillende betondruksterktes 64

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Gegevens voorbeeld 6
Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3] 9
Tabel 3: Temperatuur van binnenomgeving [14] 19
Tabel 4: Temperatuur voor gebouwen boven het grondniveau [14] 19
Tabel 5: Waarden voor k_h [3] 24
Tabel 6: Aanbevolen waarden van w_{max} [2] 32
Tabel 7: Parameters geval a 36
Tabel 8: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering 37
Tabel 9: Parameters geval b 42
Tabel 10: Maximale staafdiameter asymmetrische belemmering 43
Tabel 11: Aangepaste parameters 48
Tabel 12: Gegevens voorbeeld 1 53
Tabel 13: Maximale staafdiameter aangepast 54
Tabel 14: Maximale staafdiameter aangepast 55
Tabel 15: Gegevens voorbeeld 2 57
Tabel 16: Maximale staafdiameter aangepast 58
Tabel 17: Maximale staafdiameter 59
Tabel 18: Gegevens voorbeeld 3 62
Tabel 19: Maximale staafdiameter aangepast 63

LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN EN AFKORTINGEN

Afkortingen:

-W/C-factor: dit is een getal dat de verhouding weergeeft tussen de massa water een cement
-NBN: Normalisation Belge/Belgische Normalisatie
-RH: relatieve vochtigheid

Symbolen:

Latijnse hoofdletters

A	oppervlakte van de doorsnede
A_c	oppervlakte van de betondoorsnede
$A_{c,eff}$	meewerkende oppervlakte van het beton onder trek
$A_{p'}$	oppervlakte van de doorsnede van een voorspanelement
A_s	oppervlakte van de doorsnede van de wapening
$A_{s,min}$	minimumoppervlakte van de doorsnede van de wapening
A_{ct}	oppervlakte van beton binnen de trekzone
E	elasticiteitsmodulus
E_c	tangentiële elasticiteitsmodulus van beton
E_{cm}	secans-elasticiteitsmodulus van beton
$E_{cm}(t)$	secans-elasticiteitsmodulus van beton in functie van de tijd in dagen
E_s	rekenwaarde van de elasticiteitsmodulus van betonstaal
I	kwadratisch oppervlaktemoment (traagheidsmoment) van het betonprofiel
L	lengte
M	buigend moment
N	normaalkracht
$N_{s;pr}$	staalkracht in primaire scheur
N_t	trekkracht
N_{Ed}	rekenwaarde van de optredende normaalkracht (trek of druk)
R_{ax}	vervormingsverhinderingsfactor
$S_{r,max}$	maximale scheurafstand
ΔT	temperatuursverschil
W	weerstandsmoment

Latijnse kleine letters

b	totale breedte van een doorsnede; of meewerkende flensbreedte in een T- of L-balk
b_t	gemiddelde breedte van de trekzone
c	betondekking
d	effectieve hoogte van een dwarsdoorsnede (nuttige hoogte)
d_1	afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening A_{s1}
d_2	afstand getrokken rand tot zwaartepunt wapening A_{s2}
f_{ck}	karakteristieke cilinderdruksterkte van beton na 28 dagen
$f_{ck}(t)$	karakteristieke druksterkte van beton in functie van de tijd in dagen
f_{ccm}	gemiddelde waarde van de kubusdruksterkte van beton
f_{cm}	gemiddelde waarde van de cilinderdruksterkte van beton
$f_{cm}(t)$	gemiddelde waarde van de druksterkte van beton in functie van de tijd in dagen
$f_{ct,eff}$	gemiddelde waarde van de treksterkte van het beton op het tijdstip waarop voor beton de eerste scheuren worden verwacht
f_{ctm}	gemiddelde waarde van de axiale treksterkte van beton

$f_{ctm}(t)$	gemiddelde waarde van de axiale treksterkte van beton in functie van de tijd in dagen
f_{yd}	rekenwaarde van de vloeigrens van betonstaal
f_{yk}	karakteristieke vloeigrens van betonstaal
h	hoogte
h_{cr}	hoogte van de trekzone
h_0	fictieve dikte van de dwarsdoorsnede
k	een coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet gelijkmatige eigenschappen
k_c	een coëfficiënt die rekening houdt met de spanningsverdeling binnen de doorsnede onmiddellijk voor het scheuren en met verandering van de hefboomarm
k_{cr}	spannings-sterkteverhouding
k_h	een coëfficiënt die afhangt van de fictieve dikte
k_t	factor die afhangt van de belastingsduur
k_1	geeft de coëfficiënt weer die rekening houdt met de aanhechteigenschappen van de wapening
k_2	geeft de coëfficiënt weer die rekening houdt met de rekverdeling
k_3	gelijk aan 3,4
k_4	gelijk aan 0,425
l	(of l of L) Lengte; overspanning
l_{st}	overdrachtslengte
s	coëfficiënt die afhangt van de soort cement
t	ouderdom van het beton
t_s	ouderdom van het beton aan het begin van de uitdrogingskrimp
t_0	ouderdom van het beton op het moment van belasten
u	omtrek van dat deel van de dwarsdoorsnede dat is blootgesteld aan uitdroging
v	afstand van de neutrale lijn tot de uiterste vezel
w_k	scheurwijdte
x	afstand tot de neutrale as

Griekse kleine letters

α	factor of spreidingshoek
α_c	uitzettingscoëfficiënt
α_e	verhouding van E_s/E_{cm}
$\beta_{as}(t)$	tijdscoëfficiënt autogene krimpverkorting
$\beta_{cc}(t)$	coëfficiënt die bepaald wordt door de ouderdom van beton
$\beta_{ds}(t,t_s)$	tijdscoëfficiënt van de uitdrogingskrimp
β_{RH}	coëfficiënt voor de relatieve vochtigheid
ε_c	betonstuik
ε_{ca}	autogene krimpverkorting
$\varepsilon_{ca}(\infty)$	basis autogene krimpverkorting
$\varepsilon_{cc}(\infty,t_0)$	kruipvervorming
ε_{cm}	gemiddelde betonrek tussen de scheuren
ε_{cd}	uitdrogingskrimpverkorting
ε_{cs}	totale krimpverkorting
ε_{sm}	gemiddelde rek van de wapening
ε_{tree}	vervorming die optreed wanneer het element volledig vrij kan vervormen
$\Delta\varepsilon$	rekverschil
$\Delta\varepsilon_{cT}$	rekverandering ten gevolge van temperatuursverandering
ξ_1	aangepaste verhouding van de aanhechtsterkte rekeninghoudend met de verschillende diameters van voorspan- en betonstaal
ρ	wapeningsverhouding A_s/ A_{ct}
$\rho_{p,eff}$	wapeningsverhouding $A_s/ A_{c,eff}$

σ	spanning
σ_{cr}	betontrekspanning op het moment van scheuren
σ_s	absolute waarde van de maximaal toelaatbare spanning in de wapening onmiddellijk na het ontstaan van de scheur
$\sigma_{s,cr}$	staalspanning in de scheur
σ_{sr}	staalspanning direct na scheurvorming
σ_{cT}	spanning ten gevolge van temperatuursverandering
Φ	staafdiameter
Φ_b	staafdiameter van de beugel
Φ_s	aangepaste maximale staafdiameter
Φ_s^*	maximale staafdiameter gegeven in "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]"
$\varphi(\infty,t_0)$	kruipcoëfficiënt
$\varphi_k(\infty,t_0)$	niet-lineaire kruipcoëfficiënt

ABSTRACT

In deze masterproef wordt er een ontwerpprotocol opgesteld voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming. De probleemstelling is hier: "hoe wordt de wapening bepaald onder invloed van verhinderde vervorming?". Deze is noodzakelijk voor de scheurbeheersing. Als hier niet aan voldaan wordt, heeft dit negatieve gevolgen voor de duurzaamheid van het beton.

Het ontwerpprotocol wordt opgemaakt vertrekkende uit de "NBN EN 1992-1-1" en de "NBN EN 1992-3". Er moet ook voldoende informatie zijn over de belemmeringsgraad, krimp, kruip, scheurwijdte, temperatuur en uitharding van beton. Deze parameters zijn maatgevend. Het ontwerpprotocol moet de hoeveelheid wapening bepalen voor een bepaalde scheurbeheersingseis. Dit houdt in dat er een scheurwijdte beperking wordt opgelegd. Doordat er voldaan moet worden aan deze scheurwijdte is het ontwerpprotocol gebaseerd op de directe berekening hiervan bij verhinderde vervorming.

Met behulp van het opgestelde ontwerpprotocol kan er op een relatief eenvoudige manier de hoeveelheid wapening bepaald worden. Nu wordt deze op een nauwkeurigere manier berekend dan bij de methode van de minimumwapening in de "NBN EN 1992-1-1".

ABSTRACT IN ENGLISCH

This master thesis deals with a protocol that is being prepared for concrete under the influence of restraint deformation. The issue is here: "How is the reinforcement determined under the influence of restraint deformation?". This is necessary to comply with the crack control. If this is not sufficient, this negatively affects the durability of the concrete.

This protocol is based on the "NBN EN 1992-1-1" and the "NBN EN 1992-3". There must be enough information that investigates the restraint factor, shrinkage, creep, crack width, temperature and curing of concrete. These parameters are decisive. The design protocol must determine the amount of reinforcement for a particular cracking requirement. This cracking requirement implies that there is imposed a crack width limitation. Because there must be comply with this crack width, the design protocol is based on the direct calculation of the crack width in case of restraint deformation.

By using the design protocol, the amount of reinforcement can be determined in a relatively simple way. With this method the amount of reinforcement is determined more accurately than in the method of the minimum reinforcement of the "NBN EN 1992-1-1".

1 INLEIDING

Situering:

Als laatstejaarsstudent van de opleiding "master in de industriële wetenschappen: bouwkunde" is mij de mogelijkheid gegeven om mijn masterproef te realiseren bij Tractebel. De opdracht in deze masterproef is het uitwerken van een ontwerpprotocol voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming.

Een betonnen element is onder invloed van verhinderde vervorming wanneer het bijvoorbeeld onderhevig is aan een temperatuursdaling, waarbij de verkorting gegenereerd door deze temperatuursdaling niet zal kunnen optreden. Deze verkorting wordt belemmerd door de constructie zelf. Dit is onder andere het geval bij een staaf ingeklemd aan zijn uiteinden.

In deze masterproef worden de verhinderde vervormingen, veroorzaakt door krimp-, kruip- en temperatuurseffecten onderzocht.

Een verhinderde vervorming kan trek- of drukspanningen veroorzaken, deze trekspanningen kunnen scheuren veroorzaken. Deze scheuren zijn nadelig voor de waterdichtheid en de duurzaamheid van beton. Het is dus de bedoeling om de spanningen op te vangen. De scheurvorming kan beheerst worden met verschillende methodes. Het is van het allergrootste belang dat deze methodes juist worden bepaald, wat geen eenvoudige opgave is. Daarom wordt er in deze masterproef onderzoek verricht naar een ontwerpprotocol voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming.

Probleemstelling:

Er moet dus naar een manier gezocht worden om de scheurvorming onder controle te houden. Dit wordt gedaan door wapening te voorzien. De onderzoeksvraag in deze masterproef is dan ook "hoe wordt de wapening bepaald voor scheurbeheersing bij verhinderde vervorming ten gevolge van krimp, kruip en temperatuurseffecten?".

In de "NBN EN 1992-1-1" wordt er een methode weergegeven voor het bepalen van de minimumwapening voor een bepaalde scheurwijdte. Deze methode bevat niet alle reële processen. In de "NBN EN 1992-3" wordt de methode weergegeven om scheurwijdtes te berekenen die te wijten zijn aan een opgelegde vervorming. Maar er is geen duidelijke methode terug te vinden waarmee de wapening bepaald kan worden.

Doelstelling:

Het doel is een berekening maken van de vervormingen te wijten aan krimp, kruip en temperatuursverschillen. Hierbij moet ook het uitharden van beton in rekening gebracht worden. Tot slot zou het mogelijk moeten zijn om de wapening te bepalen met behulp van eenvoudige formules, tabellen of grafieken.

Methode:

Als voorbereiding wordt er een literatuurstudie gemaakt om een beter beeld te krijgen van alle begrippen en berekeningswijzen (methodes). Daarna worden de methodes toegepast op voorbeelden.

Dan worden er formules opgemaakt voor de berekening van de scheurwijdte vertrekkende uit de "NBN EN 1992-1-1" en de "NBN EN 1992-3".

Als de berekening voor de scheurwijdte is opgesteld, wordt deze omgevormd, zodat hier de maximum staafdiameter uitgehaald kan worden. Deze staat in functie van de staalspanning. Indien de formules van de maximum staafdiameter gekend zijn kan er gestart worden met de opmaak van het ontwerpprotocol.

In een later stadium wordt dit ontwerpprotocol toegepast op een aantal voorbeelden. Door dit onderzoek is het mogelijk om op een eenvoudige manier de nodige wapening te bepalen bij een verhinderde vervorming.

2 LITERATUURSTUDIE

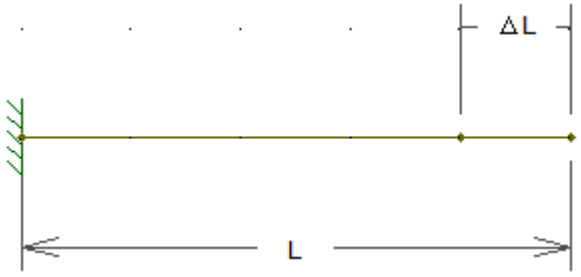
Alvorens te beginnen, is het nodig om enkele begrippen toe te lichten. Dit is van essentieel belang om verdere stappen in de masterproef te begrijpen en een beeld te vormen van wat er juist onderzocht wordt. Dit helpt ook om gericht naar informatie te zoeken. Daarna worden er methodes weergegeven en toegepast aan de hand van een voorbeeld. In dit hoofdstuk is het noodzakelijk om te weten wat de (methodes) formules betekenen. Op basis van deze methodes wordt er in het volgende hoofdstuk een ontwerpprotocol opgemaakt.

2.1 Toelichting begrippen

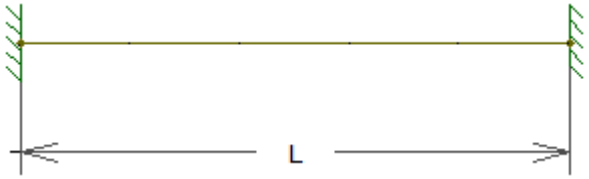
Nu worden enkele begrippen toegelicht, die nodig zijn om bepaalde methodes beter te verstaan.

2.1.1 Verhinderde vervorming

Het is noodzakelijk om begrip 'verhinderde vervorming', goed te definiëren. Dit wordt gedaan aan de hand van een voorbeeld.
Een staaf, met een vrij en een ingeklemd uiteinde, die onderhevig is aan een temperatuursdaling, zal verkorten (zie verkorting ΔL "figuur 1: Staaf vrij uiteinde"). Wanneer deze staaf aan beide zijden is ingeklemd (zie "figuur 2: Staaf langs beide zijden ingeklemd") zal deze niet korter kunnen worden. Desondanks zal de staaf nog altijd willen verkorten bij een temperatuursdaling. Hierdoor zullen er trekspanningen ontstaan. Er wordt dan gesproken over een opgelegde vervorming of verhinderde vervorming.



Figuur 1: Staaf vrij uiteinde



Figuur 2: Staaf langs beide zijden ingeklemd

Als een opgelegde vervorming verhinderd wordt, kan er scheurvorming optreden. De oorzaken van opgelegde vervormingen of verhinderde vervormingen zijn in dit geval krimp-, kruip- en temperatuurseffecten. [7] [8]

2.1.2 Krimp

Krimp is het verkleinen van het betonvolume. Een mogelijke oorzaak kan het verdampen van water uit vers beton zijn. Er zijn verschillende soorten krimp. Ze worden onderverdeeld op basis van tijd. Bij Beton dat 24 uur oud is (jong beton), zijn er twee soorten krimp: chemische krimp en plastische krimp. Als het beton tussen de 2 à 3 dagen oud is, is er sprake van drie soorten krimp: autogene krimp, uitdrogingskrimp en thermische krimp. [9]

- Autogene krimp:

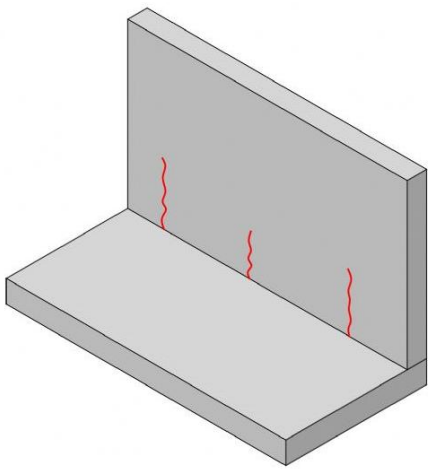
Autogene krimp wordt ook wel interne droging genoemd. Dit is een vervorming die optreedt bij een capillaire spanning, veroorzaakt door intern waterverbruik. Door kleine holten in het beton ontstaan er capillaire buisjes, waar het water zich opstapelt. Bij deze vervorming is het niet noodzakelijk om wateruitwisseling te hebben met de omgeving. Het effect van autogene krimp is groter bij een lage W/C-factor.

- Uitdrogingskrimp:

Uitdrogingskrimp ontstaat wanneer water niet volledig verbruikt wordt tijdens de hydratatiereactie. Dit restwater verlaat het beton door een verschil in relatieve vochtigheid met de buitenomgeving. Als de buitenomgeving droger is ontstaat er een drukverschil dat zorgt voor spanningen. Het effect van uitdrogingskrimp is groter bij de aanwezigheid van een hoge W/C-factor, een lage relatieve luchtvochtigheid en een groot blootgesteld oppervlak van het betonelement.

- Thermische krimp:

De hydratatiereactie van cement is een exothermische reactie. Hierbij komt warmte vrij uit het systeem waardoor het beton zal opwarmen. Na deze reactie zal het beton ook moeten afkoelen, waardoor het zal verkorten. Dit zal belemmerd worden door een reeds bestaande constructie en het nog warme middengedeelte (het beton aan het buitenoppervlak koelt sneller af dan in de kern). Dit veroorzaakt spanningen, waardoor er ook weer scheuren kunnen ontstaan.



Figuur 3: Thermische krimp [9]

2.1.3 Kruip

Kruip is een toename van de vervorming die geleidelijk gebeurt in functie van de tijd. Hierbij is het betonelement onderhevig aan een constante spanning. Kruip hangt af van verschillende factoren. Een belangrijke factor hierbij is de leeftijd van het beton wanneer de belasting aangrijpt. Ook de druksterkte van het beton heeft invloed op de kruip, die wordt ook bepaald door de leeftijd van het beton. Een andere factor is de relatieve vochtigheid. Om deze factoren in rekening te brengen, wordt er gebruik gemaakt van de kruipcoëfficiënt φ. Deze coëfficiënt wordt later uitgebreid behandeld in de literatuurstudie.

2.1.4 Temperatuur

Als beton van temperatuur verandert gaat dit gepaard met een volumeverandering (vorm). Elk materiaal heeft een uitzettingscoëfficiënt α_c . De uitzettingscoëfficiënt geeft de rekverandering per graden Kelvin weer. De totale rekverandering wordt dan als volgt berekend.

$$\Delta\varepsilon = \Delta T.\alpha_c \qquad \textit{formule 2.1}$$

$\Delta\varepsilon$: het rekverschil [-];

ΔT : de temperatuursverandering [K];

α_c : de uitzettingscoëfficiënt [K^{-1}].

Er zijn verschillende elementen die temperatuurverschillen kunnen veroorzaken:

- Warmte die vrijkomt bij de hydratatiereactie (zie thermische krimp);
- De invloed van het klimaat, straling van de zon, de verschillende seizoenen, neerslag,…;
- De functie van het gebouw: warmte die vrijkomt van werkende machines, Ovens,…;
- Brand.

De invloed van temperatuur wordt verder uitgewerkt in de literatuurstudie en bij de berekeningen. [1] [7]

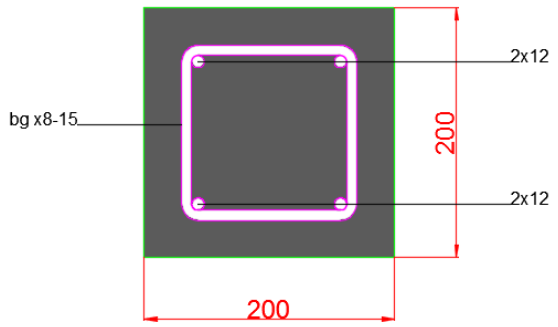
2.1.5 Scheurvorming

Mogelijke oorzaken van vervorming zijn al kort besproken. Deze vervormingen kunnen trek en een rekverschil veroorzaken in het beton. Omdat beton een geringe treksterkte heeft, kunnen er scheuren ontstaan. Beton zal pas scheuren wanneer de resulterende trekspanning groter is dan de treksterkte van het beton. Hiermee rekening houdend, zal er in de volgende hoofdstukken getracht worden dit rekverschil te bepalen dat veroorzaakt wordt door de trekspanning. Scheurvorming is niet te vermijden door extra wapening te voorzien, maar bij gebruik van oordeelkundig geplaatste wapening kan de scheurwijdte beperkt blijven. [1] [6]

2.2 Toelichting methodes

De literatuurstudie zal bestaan uit een gedeelte van informatie gevonden uit cursussen en boeken en een gedeelte NBN EN 1992-1-1 en NBN EN 1992-3. De bestaande technieken om wapening te berekenen ten gevolge van verhinderde vervorming worden samengevat en besproken. Vervolgens worden deze getoetst aan de hand van voorbeelden.

In deze voorbeeldoefening, is er gebruik gemaakt van een gewapende betonnen staaf. Zie "Figuur 4: Doorsnede voorbeeld" voor meer informatie. Deze staaf is aan beide uiteinden ingeklemd.



Figuur 4: Doorsnede voorbeeld

In "Tabel 1: Gegevens voorbeeld" staan de gegevens opgelijst, die noodzakelijk zijn. De druksterkte klasse is C30/37.

Tabel 1: Gegevens voorbeeld

maximale scheurwijdte	w_k	0,3	mm
lengte	l	1000	mm
betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm²
gemiddelde waarde druksterkte beton	f_{cm}	38	N/mm²
staalkwaliteit	f_{yk}	500	N/mm²
elasticiteitsmodulus staal	E_s	200000	N/mm²
elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	32837	N/mm²
hoogte van de doorsnede	h	200	mm
breedte van de doorsnede	b	200	mm
betondekking	c	30	mm
diameter beugel	ϕ_b	8	mm
diameter langswapening	ϕ_s	12	mm
afstand getrokken rand tot zwpt wap As1	d_1	44	mm
afstand gedrukte rand tot zwpt wap As2	d_2	44	mm
nuttige hoogte	d	156	mm
hoeveelheid wapening in doorsnede	A_s	452,39	mm²

2.2.1 De minimumwapening

Hier wordt de berekening van de minimumwapening toegelicht rekeninghoudend met de scheurbeheersing. Later is er dieper ingegaan op bepaalde aannames die in de NBN EN 1992-1-1 gemaakt zijn. [3] [12]

Om de minimumwapening te bepalen, zijn er verschillende stappen noodzakelijk. Er is de berekening van de wapening rekeninghoudend met de scheurbeheersing, de brosse breuk en de bepaling of het al dan niet als gewapend beschouwd wordt. De berekende minimumwapening is dan het maximum.

Vereiste minimumwapening scheurbeheersing formule 7.1 uit "NBN EN 1992-1-1":

$$A_{s,min}.\sigma_s = k_c.k.f_{ct,eff}.A_{ct} \qquad \textit{formule 2.2}$$

$A_{s,min}$: de minimale (vereiste) oppervlakte van de doorsnede van het betonstaal in de trekzone;

A_{ct} : de oppervlakte van beton binnen de trekzone;

σ_s : de absolute waarde van de maximaal toelaatbare spanning in de wapening onmiddellijk na het ontstaan van de scheur;

$f_{ct,eff}$: de gemiddelde waarde van treksterkte van beton op het tijdstip waarop voor beton de eerste scheuren worden verwacht;

k : een coëfficiënt die rekening houdt met het effect van niet gelijkmatige eigenspanningen;

k_c : een coëfficiënt die rekening houdt met de spanningsverdeling binnen de doorsnede onmiddellijk voor het scheuren en met verandering van de hefboomarm.

In bovenstaande formule wordt het evenwicht van de krachten uitgeschreven. De staaltrekkracht moet gelijk zijn aan betontrekkracht. De staaltrekkracht is het product van de staalspanning en de staaldoorsnede. Voor de betontrekkracht is dit ook het product van de betondoorsnede en de betonspanning, waarbij nog twee coëfficiënten in rekening worden gebracht.

Vereiste minimumwapening brosse breuk:
Met "formule 9.1N uit NBN EN 1992-1-1" wordt bepaald wanneer er sprake is van gewapend of ongewapend beton. Dit is belangrijk want de onderstaande berekeningen zijn alleen van toepassing op gewapend beton.

$$A_{s,min} = 0{,}26\,\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.b_t.d \quad \geq 0{,}0013\,b_t\,.d \qquad \textit{formule 2.3}$$

b_t : duidt de gemiddelde breedte van de trekzone aan;

f_{ctm} : de gemiddelde waarde van treksterkte van beton op het tijdstip waarop voor beton de eerste scheuren worden verwacht;

d : de nuttige hoogte.

formule 2.3 kan aangetoond worden door het momentenevenwicht uit te schrijven. Wat volgt is geen 'bewijs van' maar een poging tot het intuïtief uitleggen van de formule. Voor het berekenen van het moment dat veroorzaakt wordt in het beton zijn onderstaande formules noodzakelijk.

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{I}{v}} \; met\, W = \frac{I}{v} \qquad \textit{formule 2.4}$$

$$I = \frac{b.h^3}{12} \qquad \textit{formule 2.5}$$

I : het oppervlaktetraagheidsmoment voor een rechthoek [mm^4];

σ : de spanning [N/mm²];

M : het buigmoment [Nmm];

W : het weerstandsmoment [mm³];

v : de afstand van de neutrale lijn tot de uiterste vezel [mm].

"formule 2.4" wordt ingevuld in "formule 2.5".

$$\sigma = \frac{M}{\frac{\frac{b.h^3}{12}}{v}} \qquad \textit{formule 2.6}$$

Voor een rechthoek is v=h/2, dit wordt ingevuld in "formule 2.6".

$$\sigma = \frac{M}{\frac{\frac{b.h^3}{12}}{h/2}} = \frac{M}{\frac{b.h^2}{6}} \qquad \textit{formule 2.7}$$

Nu wordt "formule 2.7" omgevormd en toegepast voor het moment in beton.

$$M_{ck} = f_{ctm} \frac{b.h^2}{6} \qquad \textit{formule 2.8}$$

Het moment dat veroorzaakt wordt door de wapening wordt bepaald. Hier zijn twee aannames gemaakt: z = 0,9 d en d = 0,9 h

$$M_{wap} = A_{s,min}.f_{yk}.z = 0{,}81\, A_{s,min}.f_{yk}.h \qquad \textit{formule 2.9}$$

$A_{s,min}$: de wapeningsdoorsnede [mm²];

z : de afstand tussen betondrukresultante en trekkracht wapening [mm];

d : de nuttige hoogte [mm].

Vervolgens wordt het momentenevenwicht uitgeschreven. Hiervoor wordt "formule 2.8" gelijkstelt aan "formule 2.9".

$$f_{ctm}\,\frac{b.h^2}{6} = 0{,}81\,A_{s,min}.f_{yk}.h$$

$$A_{s,min} = \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.\frac{b.h^2}{6\,h} = \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.\frac{1}{6}.\frac{b.h}{0{,}81} = \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.\frac{1}{6}.\frac{b.\frac{d}{0{,}9}}{0{,}81}$$

$$= 0{,}23\,\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.b.d \qquad \textit{formule 2.10}$$

Er wordt vastgesteld dat er bij "formule 2.3" er een klein verschil is bij de aannames t.o.v. "formule 2.10".

Als de doorsnede minder wapening bevat dan $A_{s,min}$ uit "formule 2.3" wordt deze beschouwd als ongewapend beton. In deze berekeningen is er een onderscheid bij het gebruikt voor balken of platen. Bij platen wordt er met een standaard breedte gewerkt van één meter.

Als er een scheurwijdte beperking wordt opgelegd (w_k) dan zal σ_s een lagere waarden hebben als f_{yk}. Nu wordt σ_s bepaald a.d.h.v. onderstaande tabel. Bij bepaling van de nodige wapening wordt "formule 2.2" gebruikt. Deze methode is enkel bruikbaar voor specifieke gevallen. Het is een bepaling van de nodige wapening bij een scheurbeheersing die gebruik maakt van een niet directe berekening van de scheurwijdte. Op deze manier wordt de berekening korter.

Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]

Staalspanning [2] (MPa)	**Maximale staafdiameter** (mm) w_k = 0,4 mm	w_k = 0,3 mm	w_k = 0,2 mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	5
400	8	6	4
450	6	5	–

OPMERKING 1 De waarden in de tabel zijn gebaseerd op de volgende aannamen: c = 25 mm; $f_{ct,eff}$ = 2,9 MPa; h_{cr} = 0,5; (h-d) = 0,1h; k_1 = 0,8; k_2 = 0,5; k_c = 0,4; k = 1,0; k_t = 0,4 en k' = 1,0.

OPMERKING 2 Onder de van toepassing zijnde belastingscombinaties.

De tabel dient gecorrigeerd te worden voor toestanden die verschillen van de aannames onder opmerking. Formule 7.6N uit "NBN EN 1992-1-1" is voor buiging of waarvoor een deel van de doorsnede onder druk staat.

$$\phi_s = \phi^*_s.\left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right).\frac{k_c.h_{cr}}{2\,(h-d)} \qquad \textit{formule 2.11}$$

Formule "7.7N uit NBN EN 1992-1-1" is voor trek.

$$\phi_s = \phi^*_s \cdot \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) \cdot \frac{h_{cr}}{8\,(h-d)} \qquad \textit{formule 2.12}$$

Φ_s : de aangepaste maximale staafdiameter [mm];

Φ_s^* : de maximale staafdiameter gegeven in "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]" [mm];

h : de totale hoogte van de doorsnede [mm];

h_{cr} : de hoogte van de trekzone [mm];

d : de nuttige hoogte [mm].

2.2.2 Voorbeeld minimumwapening

- Berekening vereiste minimumwapening:

Het voorbeeld is onderhevig aan een verhinderde vervorming, die een centrische trekkracht veroorzaakt. Eerst moet de effectieve treksterkte van beton bepaald worden. Om vervolgens de aangepaste maximale staafdiameter te bepalen. Dit met een opgelegde scheurwijdte beperking van 0,3 mm. Dit wordt gedaan met "formule 2.23" en "formule 2.12" voor trek.

$$f_{ct,eff} = 0{,}30\, {f_{ck}}^{2/3} = 0{,}30x30^{\frac{2}{3}} = 2{,}90\ \frac{N}{mm^2} \quad \leq C50/60$$

$$\phi_s = {\phi^*}_s . \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) . \frac{h_{cr}}{8\,(h-d)}$$

k_c is gelijk aan 1 voor zuivere trek en h_{cr} is gelijk aan de hoogte, aangezien de volledige doorsnede onderhevig is aan trek.

Als volgt wordt de toelaatbare staalspanning bepaald. Voor een berekening zonder scheurwijdte beperking wordt de waarde van de vloeigrens genomen, f_{yk}. Als er wel een grens is voor de scheurwijdte moet deze bepaald worden volgens "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]", hier worden de waarden van de staafdiameter aangepast met bovenstaande aanpassingsformule. De staalspanning wordt gevonden door te interpoleren met diameter 12 in de aangepaste tabel.

Zonder scheurwijdte beperking:

$$\sigma_s = 500\ N/mm^2$$

Met scheurwijdte beperking:

$$\sigma_s = 217{,}13\ N/mm^2$$

Deze waarde wordt gevonden door de aangepaste maximale staafdiameter Φ_s te interpoleren in "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]".

Daarna wordt "formule 2.2" gebruikt om de minimumwapening te bepalen.

Zonder scheurwijdte beperking:

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 1x1x2{,}90x\frac{200x200}{500} = 231{,}72\ mm^2 < 452{,}39\ mm^2$$

k_c = 1 voor zuivere trek.

k = 1 voor lijven met h≤300 mm.

A_{ct} = h.b = 200x200 mm²

Met scheurwijdte beperking:

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 1x1x2{,}90x\frac{200x200}{217{,}24} = 533{,}59\ mm^2 < \sout{452{,}39}\ mm^2$$

$A_{s,min} < A_s$ Voldoet niet aan deze eis

- Vereiste minimumwapening brosse breuk:

Om deze waarde te bepalen wordt "formule 2.3" gebruikt.

$$A_{s,min} = 0{,}26\,\frac{f_{ctm}}{f_{yk}}.b_t.d \quad \geq 0{,}0013\,b_t.d$$

$$A_{s,min} = 0{,}26x\frac{2{,}90}{500}x200x156 \quad \geq 0{,}0013x200x156$$

$$46{,}99\,mm^2 \quad \geq 40{,}56\,mm^2$$

Nu wordt de maximum waarde genomen van $A_{s,min}$. Bij een berekening zonder en met scheurwijdte beperking en bij brosse breuk.

$$\max(\,231{,}72\,;533{,}59\,;46{,}99\,) = \;533{,}31\,mm^2$$

De minimumwapening met scheurwijdte beperking is maatgevend.

2.2.3 Scheurwijdtes

In dit deel is de berekening van scheurwijdtes "NBN EN 1992-1-1" weergegeven. Onderstaande formule "(7.8) uit "NBN EN 1992-1-1" wordt gebruikt om de scheurwijdte (w_k) te bepalen. [3] , [12]

$$w_k = \;S_{r,max}.(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \qquad \textit{formule 2.13}$$

$S_{r,max}$: de maximale scheurafstand;

ε_{sm} : de gemiddelde rek van de wapening;

ε_{cm} : de gemiddelde betonrek tussen de scheuren.

De betekenis van "formule 2.13" kan als volgt uitgelegd worden. De scheurwijdte w_k is eigenlijk het lengteverschil tussen staal en beton. Het lengteverschil van een materiaal wordt met "formule 2.14" bepaald.

$$\Delta L = \;L.\varepsilon \qquad \textit{formule 2.14}$$

"formule 2.13" is dezelfde als "formule 2.14", maar in een andere situatie. Het enige verschil is dat er in "formule 2.13" met een rekverschil gewerkt wordt van twee materialen. Om dit te begrijpen, volgt volgende veronderstelling.

$$L = scheurafstand = \;S_{max}$$

$$\Delta L = scheurwijdte = \;w_k$$

$$\varepsilon = \;\Delta\epsilon = rekverschil = \;\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$$

Het verschil tussen de staalrek en betonrek wordt door volgende formule "(7.9) uit NBN EN 1992-1-1" weergegeven.

formule 2.15

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t.\frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}.\left(1 + \alpha_e.\rho_{p,eff}\right)}{E_s} \geq 0{,}6\ \frac{\sigma_s}{E_s}$$

σ_s : de spanning in de trekwapening;

α_e : de verhouding E_s/E_{cm};

$\rho_{p,eff}$: $(A_s+\xi_1^2.A_p')/A_{c,eff}$ voor voorspanelement ($A_s/ A_{c,eff}$ als het niet is voorgespannen);

A_p' : de oppervlakte van de doorsnede van voorspanelementen met voor- of nagerekt staal;

$A_{c,eff}$: de meewerkende oppervlakte van het beton onder trek;

ξ_1 : de aangepaste verhouding van de aanhechtsterkte rekening houdend met de verschillende diameters van voorspan- en betonstaal;

k_t : de factor die afhangt van de belastingsduur.

"formule 2.15" is het rekverschil tussen staal en beton, deze is hieronder niet bewezen maar op een intuïtieve manier uitgelegd.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \approx \frac{\sigma_s - \sigma_{sr}}{E_s}$$

Niet gescheurd:

$$N = N_s + N_c = \sigma_s.A_s + \sigma_c.A_c$$

Wetende dat:

$$\sigma_s = \alpha_e.\sigma_c \quad en \quad \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \rho_{p,eff}$$

$$N_{kr} = \alpha_e.f_{ct}.A_s + f_{ct}.A_c$$

$$N_{kr} = f_{ct}.A_c\left(1 + \alpha_e.\rho_{p,eff}\right)$$

Gescheurd:

$$N_{kr} = \sigma_{sr}.A_s$$

De kritische trekkracht van de niet gescheurde toestand moet gelijk zijn aan de kritische trekkracht van gescheurde toestand.

$$\sigma_{sr}.A_s = f_{ct}.A_c\left(1 + \alpha_e.\rho_{p,eff}\right)$$

$$\sigma_{sr} = f_{ct}.\frac{1 + \alpha_e.\rho_{p,eff}}{\rho_{p,eff}}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} \approx \frac{\sigma_s - f_{ct}.\frac{1+\alpha.\rho_{p,eff}}{\rho_{p,eff}}}{E_s}$$

Het enige dat nog ontbreekt t.o.v. formule (1.14) is de factor k_t. Dit is een factor voor korte of lange belastingsduur.

De maximale scheurafstand wordt berekend met onderstaande formule "(7.11) uit NBN EN 1992-1-1".

$$S_{r,max} = k_3.c + k_1.k_2.k_4.\emptyset/\rho_{p,eff} \qquad \textit{formule 2.16}$$

ϕ : de staafdiameter;

c : de betondekking;

k_1 : de coëfficiënt die rekening houdt met de aanhechteigenschappen van de wapening;

k_2 : de coëfficiënt die rekening houdt met de rekverdeling.

Indien de hart op hart afstand van de hechtende wapening groter is dan 5(c+Φ/2) of indien er geen hechtende wapening in de trekzone aanwezig is, wordt "formule (7.14) uit NBN EN 1992-1-1" gebruikt om de maximale scheurafstand te bepalen.

$$S_{r,max} = 1{,}3\ (h - x) \qquad \textit{formule 2.17}$$

2.2.4 Voorbeeld scheurwijdte

Nu worden er scheurwijdtes berekend voor het algemene voorbeeld. De staaf is nu onderhevig aan een trekkracht (N_t) van 120 kN voor lange duur. Eerst moet er nog berekend worden of de constructie wel gescheurd is.

Beton is gescheurd wanneer de betontrekspanning groter is dan f_{ctm}.

$$\sigma_c \geq f_{ctm}$$

$$\frac{N_t}{h.b} \geq 0{,}30\ {f_{ck}}^{2/3}$$

$$\frac{120x10^3}{200x200} \geq 0{,}30x30^{2/3}$$

$$3\ N/mm^2 \geq 2{,}90\ N/mm^2$$

Het beton zal in dit voorbeeld gescheurd zijn. De berekening van de scheurwijdte is geldig.

Bij vaststelling van scheurvorming in het beton, kan nu de staalspanning berekend worden. Er zijn 4 staven met een diameter van 12 mm voorzien.

$$\sigma_s = \frac{120x10^3}{\frac{12^2x\pi}{4}x4} = 265{,}26\ N/mm^2$$

Vervolgens wordt factor k_t bepaald. Deze factor geeft aan of het een kort- of langdurende belasting is. In het voorbeeld is het een belasting voor lange duur.

k_t = 0,6 voor kortdurende belasting.
k_t = 0,4 voor langdurende belasting.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} = \frac{200000}{32836{,}57} = 6{,}09$$

Bepaling van $\rho_{p,eff}$:

$$A_s = \frac{12^2 x\pi}{4} x4 = 452{,}39\ mm^2$$

$$A_{c,eff} = Min\left[\frac{(h-x)}{3}\ ; 2{,}5\ (h-d)\ ; \frac{h}{2}\right] b$$

$$A_{c,eff} = Min[centrische\ trek; 110\ ; 100] x200 = 20000\ mm^2$$

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{452{,}39}{20000} = 0{,}0226$$

Nu wordt "formule 2.15" ingevuld om het rekverschil te bepalen.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{265{,}26 - 0{,}4x\frac{2{,}90}{0{,}0226}x(1 + 6{,}09x0{,}0226)}{200000} \geq 0{,}6x\frac{265{,}26}{200000}$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = 0{,}001035\ \geq 0{,}000796$$

Er wordt verder gerekend met 0,001035.

Aan de hand van formule "formule 2.16" of "formule 2.17" wordt de maximale scheurafstand bepaald. Om te weten welke formule er dient gebruikt te worden, is de bepaling van de staafafstand noodzakelijk. De staafafstand is de hart op hart afstand van de wapening.

$$Staafafstand = 200 - 30x2 - 8x2 - 12 = 112\ mm$$

$$5\left(c + \frac{\phi}{2}\right) = 5\left(30 + \frac{12}{2}\right) = 180\ mm$$

$$112\ mm < 180\ mm$$

"formule 2.16" wordt gebruikt om de maximale scheurafstand te berekenen. Hier moeten ook nog vier coëfficiënten bepaald worden.

De coëfficiënt k_1 houdt rekening met de aanhechteigenschappen van de hechtende wapening.

k_1 = 0,8 voor staven met hoge aanhechting;
k_1 = 1,6 voor staven met een glad oppervlak.

De coëfficiënt k_2 houdt rekening met de rekverdeling.
k_2 = 0,5 voor buiging;
k_2 = 1,0 voor zuivere trek.

Voor gevallen met excentrische trek wordt "formule 2.18" gebruikt.

$$k_2 = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2.\varepsilon_1} \qquad \textit{formule 2.18}$$

In het voorbeeld moet k_2 = 1,0.

De waarden voor k_3 en k_4 zijn vastgelegd in de NBN EN 1992-1-1 ANB. [2]

k_3 = 3,4
k_4 = 0,425

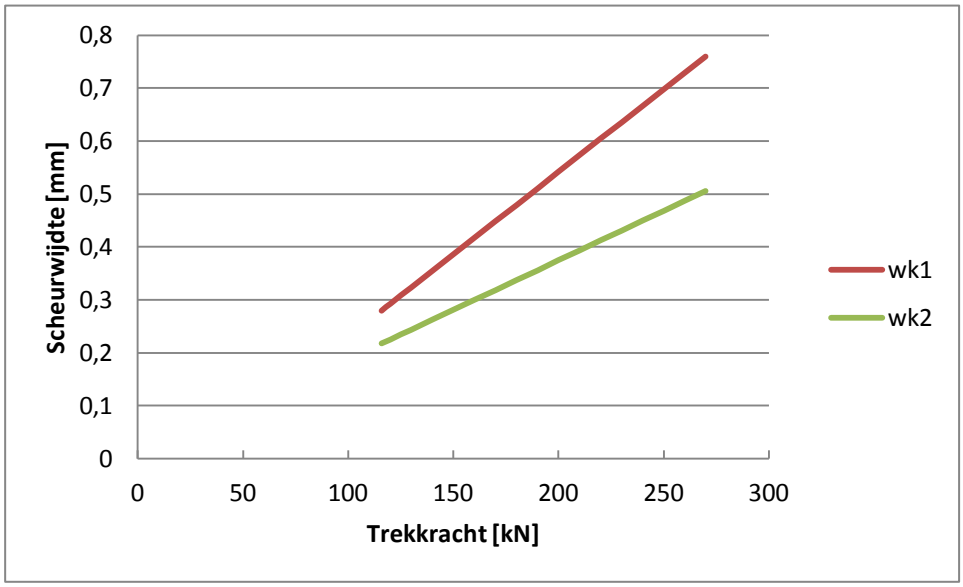
Nu wordt "formule 2.16" ingevuld.

$$S_{r,max} = 3{,}4x30 + 0{,}8x1x0{,}425x\frac{12}{0{,}0226} = 282{,}38\,mm$$

Om de scheurwijdte w_k te bepalen wordt "formule 2.13" gebruikt.

$$w_k = 282{,}38x0{,}001035 = 0{,}29\,mm$$

Er wordt een grafiek weergegeven die de invloed van verschillende trekkrachten op de scheurwijdte toont, toegepast op het algemene voorbeeld. Dit wordt gedaan om vast te stellen wat er gebeurt wanneer 0,6 σ_s/E_s groter of kleiner is bij "formule 2.15".



Figuur 5: Invloed trekkracht op scheurwijdte

In "Figuur 5: Invloed trekkracht op scheurwijdte" houdt wk1 enkel rekening met het linkse deel van "formule 2.15", terwijl wk2 enkel rekening houdt met het rechtse deel.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t.\frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}}.\left(1 + \alpha_e.\rho_{p,eff}\right)}{E_s} \geq 0{,}6\,\frac{\sigma_s}{E_s}$$

2.2.5 Invloed van de druksterkte

De druksterkte van beton hangt af van de ouderdom, de temperatuur, het type cement en de nabehandeling. Het is belangrijk om tijdens de berekeningen rekening te houden met de druksterkte van het beton in functie van de uithardingstijd. Om de druksterkte te bepalen voor beton dat tussen de 3 tot 28 dagen oud is wordt "formule 2.19" gebruikt. Voor beton dat ouder is wordt "formule 2.20" gebruikt. [3]

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8\,(MPa) \quad voor\ 3 < t < 28\ dagen \qquad \textit{formule 2.19}$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck} \quad voor\ t \geq 28\ dagen \qquad \textit{formule 2.20}$$

$f_{ck}(t)$: de karakteristieke druksterkte van beton in functie van de tijd in dagen;

$f_{cm}(t)$: de gemiddelde druksterkte van beton in functie van de tijd in dagen.

De waarde voor de betondruksterkte voor t≤3 dagen, wordt gebaseerd op proeven.

Om de gemiddelde druksterkte van beton in functie van de tijd te bepalen wordt gebruik gemaakt van onderstaande formules. [11]

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t).f_{cm} \qquad \textit{formule 2.21}$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left(s.\left(1-\sqrt{\frac{28}{t}}\right)\right)} \qquad \textit{formule 2.22}$$

f_{cm} : de gemiddelde beton druksterkte op 28 dagen;

$\beta_{cc}(t)$: de coëfficiënt die bepaald wordt door de ouderdom van beton;

t : de ouderdom van beton in dagen;

s : de coëfficiënt die afhangt van de soort cement.

Met behulp van de druksterkte kan de elasticiteitsmodulus en de treksterkte bepaald worden. Als de druksterkte verandert, verandert ook de treksterkte en de elasticiteitsmodulus van beton. Dit moet ook in rekening gebracht worden in de berekeningen. Voor de formules die nodig zijn om de treksterkte en de elasticiteitsmodulus van beton te bepalen zie "Bijlage 1: Sterkte- en vervormingeigenschappen voor beton".

$$f_{ctm} = 0{,}30\ {f_{ck}}^{2/3} \leq C50/60 \qquad \textit{formule 2.23}$$

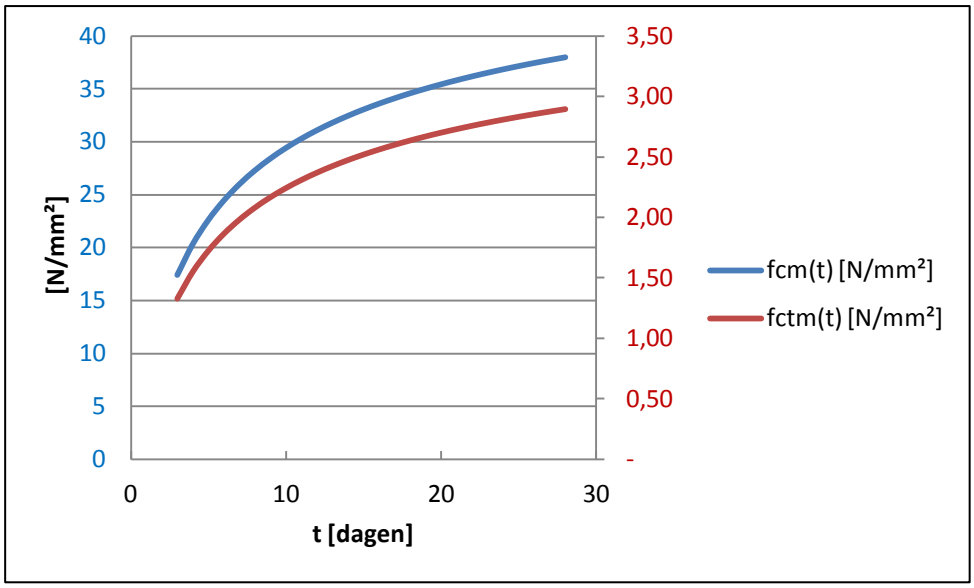
Deze formules tonen aan dat als de druksterkte van beton toeneemt de treksterkte dit ook doet. Als de treksterkte toeneemt, zal de minimumwapening ook toenemen (zie formule minimumwapening). Hieruit kan het volgende geconcludeerd worden. Als de sterkteklasse van beton toeneemt, zal er meer minimumwapening voorzien moeten worden voor de scheurbeheersing.

Om de treksterkte in functie van de tijd te bepalen, wordt volgende benadering weergegeven in de "NBN EN 1992-1-1".

$$f_{ctm}(t) = (\beta_{cc}(t))^{\alpha}.f_{ctm} \qquad \textit{formule 2.24}$$

Hierbij is $\alpha = 1$ voor $3<t<28$ dagen en $\alpha = 2/3$ voor $t \geq 28$.

"Figuur 6: Verloop druk- en treksterkte" geeft de invloed van de tijd op de betondruksterkte en de betontreksterkte weer. Deze nemen exponentieel toe. Hieruit wordt ook afgeleid dat beton een zeer geringe treksterkte heeft. Deze grafiek is voor een beton met cement van de sterkteklasse CEM 32,5 N, bij een gemiddelde temperatuur van 20 °C. De berekening start pas bij beton van drie dagen oud, omdat hier de krimpverschijnselen optreden.

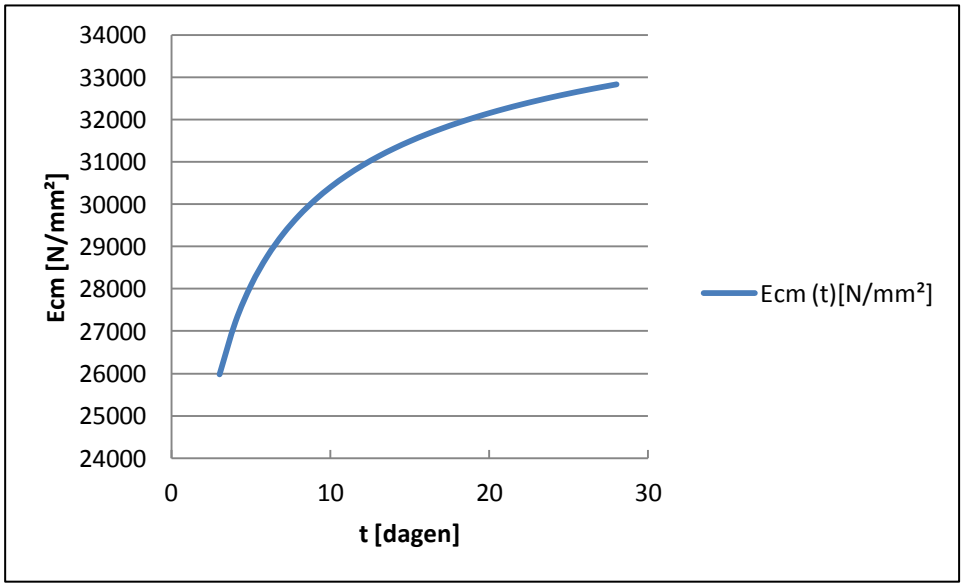


Figuur 6: Verloop druk- en treksterkte

Om de elasticiteitsmodulus in functie van de tijd te bepalen, wordt onderstaande formule gebruikt.

$$E_{cm}(t) = (f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3}.E_{cm} \qquad \textit{formule 2.25}$$

In "Figuur 7: Elasticiteitsmodulus i.f.v. de tijd" wordt de invloed van de tijd op de elasticiteitsmodulus weergegeven.



Figuur 7: Elasticiteitsmodulus i.f.v. de tijd

2.2.6 Invloed van temperatuur

Zoals besproken in "2.1.4 Temperatuur" zal een temperatuurverschil een rekverandering veroorzaken bij beton. Door deze rekverandering treedt er een spanning op in het beton, omdat het beton belemmerd wordt in zijn vervorming. Deze spanning wordt met onderstaande formule bepaald. [7]

$$\sigma_{cT} = E.\Delta\varepsilon_{cT} \qquad \textit{formule 2.26}$$

σ_{cT} : de spanning ten gevolge van temperatuurverandering [N/mm²];

E : de elasticiteitsmodulus van beton [N/mm²];

$\Delta\varepsilon_{cT}$: de rekverandering ten gevolge van temperatuursverandering [-].

De wet van Hooke is geldig zolang het een elastische vervorming is. De elasticiteitsmodulus is de evenredigheidsconstante. De rek is de relatieve lengte verandering.

Om de temperatuursverschillen te berekenen, wordt er gebruik gemaakt van de "NBN EN 1991-1-5 NL" en de "NBN EN 1991-1-5 ANB". Het temperatuursverschil wordt dan bepaald met de tabellen uit deze norm. [13] [14]

Tabel 3: Temperatuur van binnenomgeving [14]

Seizoen	Temperatuur T_{in}
Zomer	T_1
Winter	T_2
OPMERKING De aanbevolen waarden van de EN, T_1 = 20° C en T_2 = 25° C, zijn genormeerd voor kamers met gecontroleerde gewone temperaturen, behalve tegenstrijdige aanbevelingen van het individueel project. Voor kamers waar de controle van gewone temperaturen niet verzekerd is, behoren meer extreme temperaturen beschouwd te worden, bijvoorbeeld T_1 = 0° C (winter) et T_2 = 35° C (zomer). Voor andere kamers (bij voorbeeld koelkamers) wordt de temperatuur bepaald door de specifieke voorwaarden van elk individueel project.	

Tabel 4: Temperatuur voor gebouwen boven het grondniveau [14]

Seizoen	Significante factor		Temperatuur T_{out} in °C
Zomer	Relatief absorberend vermogen afhankelijk van de kleur van de buitenzijde	0,5 helder licht	$T_{max} + T_3$
		0,7 licht gekleurd	$T_{max} + T_4$
		0,9 donker	$T_{max} + T_5$
Winter			T_{min}
OPMERKING Voor de uiterste waarden van de luchttemperatuur in de schaduw, zijn de volgende waarden beschouwd als genormeerd : minimumluchttemperatuur in de schaduw T_{min} : - 21 °C; maximumluchttemperatuur in de schaduw T_{max} : + 38 °C. De waarden van de isothermenkaarten van Bijlage A, met bepaling naar de locatie, worden ook beschouwd als genormeerd. De minimumluchttemperatuur in de schaduw T_{min} zoals hierboven houdt geen rekening met de verkoeling door de nachtstraling. Voor constructieve elementen met een lage thermische traagheid moet deze temperatuur T_{min} met 8°C worden verminderd. De door de EN aanbevolen waarden van de zonnestralingseffecten T3, T4 en T5 zijn genormeerd : T_3 = 0°C, T_4 = 2°C, T_5 = 4°C voor naar het noordoosten gekeerde zijdes T_5 = 18°C, T_4 = 30°C, T_5 = 42°C voor naar het zuidwesten gekeerde of horizontale zijdes Voor tussengelegen orientaties wordt de waarde naar de hoekrichting geïnterpoleerd. Bij voorbeeld, voor een naar het noordwesten gekeerd element, krijgt men : T_3 = (0° + 18°) * 0,5 = 9°C, T_4 = (2° + 30°) * 0,5 = 16°C, T_5 = (4° + 42°) * 0,5 = 23°C			

2.2.7 Voorbeeld temperatuur

De staaf van het algemene voorbeeld is onderhevig aan een temperatuursverandering. Eerst blootgesteld aan een temperatuur van 30 °C, vervolgens aan een temperatuur van 15 °C. De uitzettingscoëfficiënt van beton bedraagt (α_c) 12.10^{-6} K^{-1}.

Dan wordt de rekverandering ten gevolge van de temperatuursdaling bepaald. Dit wordt gedaan met "formule 2.1".

$$\Delta\varepsilon = \Delta T.\alpha_c = (15-30)x12x10^{-6} = -0{,}00018$$

Nu wordt "formule 2.26" gebruikt om de spanning te bepalen. Er vindt een verkorting plaats, dus er zal een trekspanning optreden.

$$\sigma_{cT} = E.\Delta\varepsilon_{cT} = 32836{,}57(-0{,}00018) = -5{,}91\ N/mm^2$$

Door de spanning te vermenigvuldigen met de oppervlakte wordt de kracht berekend.

$$P = \sigma_{cT}.h.b = -5{,}91x200x200 = -236423\ N$$

Bij een temperatuursdaling van 15 °C treedt er een trekspanning op van ongeveer 6 N/mm². In dit voorbeeld veroorzaakt dit een aanzienlijke kracht. Er wordt nu al vastgesteld dat de temperatuur een belangrijke parameter is, deze kan grote trekkrachten veroorzaken. Het gevolg is dat dit veel invloed heeft op de scheurwijdte.

2.2.8 Kruip

In de NBN EN 1992-1-1 is er een methode terug te vinden om de kruipvervorming van beton te bepalen. Er wordt hier ook verwezen naar bijlage B van de NBN EN 1992-1-1 voor het berekenen van de kruipcoëfficiënt. [3] [7]

De kruipcoëfficiënt is afhankelijk van E_c, de tangentiële elasticiteitsmodulus. Hiervoor wordt aangenomen dat:

$$E_c = 1{,}05\, E_{cm} \qquad \textit{formule 2.27}$$

E_c : de tangentiële elasticiteitsmodulus [N/mm²];

E_{cm} : de gemiddelde elasticiteitsmodulus [N/mm²].

De kruipvervorming $\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$ wordt met volgende formule uit de "NBN EN 1992-1-1" bepaald.

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0).\frac{\sigma_c}{E_c} \qquad \textit{formule 2.28}$$

$\varphi(\infty,t_0)$: de kruipcoëfficiënt, bepaald met behulp van bijlage B en NBN EN 1992-1-1;

σ_c : de aangebrachte betondrukspanning [N/mm²].

In "formule 2.28" wordt de kruipvervorming bepaald. Dit wordt gedaan door rekening te houden met de kruipcoëfficiënt bij de spanningsrek relatie.

Indien de betondrukspanning op ouderdom t_0 de waarde 0,45 $f_{ck}(t_0)$ heeft, wordt "formule 2.29" gebruikt om de kruipcoëfficiënt te bepalen.

$$\varphi_k(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0)\, e^{1{,}5(k_{cr}-0{,}45)} \qquad \textit{formule 2.29}$$

$\varphi_k(\infty,t_0)$: de niet-lineaire fictieve kruipcoëfficiënt;

k_{cr} : de spannings-sterkteverhouding $\sigma_c/f_{cm}(t_0)$.

2.2.9 Voorbeeld kruip

Het algemene voorbeeld wordt onderworpen aan een drukkracht van 200 kN (CEM 32,5 N). De staaf wordt belast na 10 dagen in een binnenmilieu.

Eerst wordt de betondrukspanning bepaald.

$$\sigma_c = \frac{200000}{200x200} = 5\ N/mm^2$$

Nu moet de betondruksterkte na 10 dagen berekend worden. De ouderdomscoëfficiënt wordt bepaald met "formule 2.22".

$$\beta_{cc}(t) = e^{\left(0{,}38x\left(1-\sqrt{\frac{28}{10}}\right)\right)} = 0{,}774$$

De gemiddelde druksterkte in functie van de tijd wordt bepaald met "formule 2.21".

$$f_{cm}(t) = 0{,}774x38 = 29{,}421\ N/mm^2$$

De karakteristieke druksterkte in functie van de tijd wordt met "formule 2.19" berekend.

$$f_{ck}(t) = 29{,}421 - 8 = 21{,}421\ N/mm^2$$

Er moet met de niet-lineaire fictieve kruipcoëfficiënt gewerkt worden, wanneer de betondrukspanning op de ouderdom t_0 de waarde 0,45 $f_{ck}(t_0)$ overschrijdt.

$$0{,}45\ f_{ck}(t_0) = 0{,}45\text{x}21{,}421 = 9{,}640\ N/mm^2$$

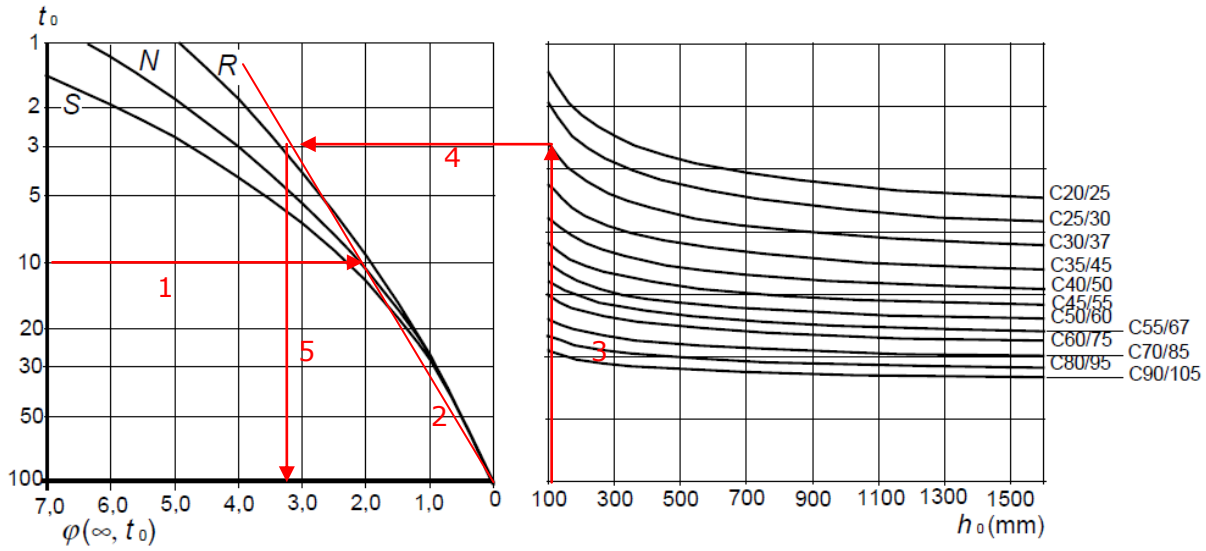
$$5\ N/mm^2 < 9{,}640\ N/mm^2$$

Enkel "formule 2.28" wordt gebruikt om de kruipvervorming te berekenen.

De fictieve dikte. $h_0 = 2.A_c/u$

$$h_0 = \frac{2x200x200}{200x2 + 200x2} = 100\ mm$$

De kruipcoëfficiënt wordt berekend met "Figuur 8: Kruipcoëfficiënt binnenmilieu [3]".



Figuur 8: Kruipcoëfficiënt binnenmilieu [3]

$$\varphi(\infty, t_0) = 3{,}2$$

De tangentiële elasticiteitsmodulus wordt bepaald met "formule 2.27". Deze modulus komt in aanmerking bij mobiele lasten en dynamische verschijnselen. Daarom wordt deze ook wel de dynamische elasticiteitsmodulus genoemd en dit bij een spanning σ_c=0.

$$E_c = 1{,}05\ E_{cm} = 1{,}05x32836{,}57 = 34478{,}40\ N/mm^2$$

De kruipvervorming wordt bepaald met "formule 2.28".

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = 3{,}2x\frac{5}{34478{,}40} = 0{,}000464$$

2.2.10 Krimp

Er is ook een methode in de "NBN EN 1992-1-1" om de totale krimpverkorting te bepalen. Hier wordt er rekening gehouden met 2 componenten: de uitdrogingskrimp en de autogene krimp.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \qquad \textit{formule 2.30}$$

ε_{cs} : de totale krimpverkorting;

ε_{cd} : de uitdrogingskrimpverkorting;

ε_{ca} : de autogene krimpverkorting.

Volgens "formule 2.30" bestaat de totale krimpverkorting uit de uitdrogingskrimpverkorting en de autogene krimpverkorting. De uitdrogingskrimp wordt veroorzaakt door restwater dat achterblijft en daarna het beton verlaat door een verschil in relatieve vochtigheid met de omgeving. Autogene krimp wordt veroorzaakt door intern waterverbruik.

Eerst wordt de basisverkorting ten gevolge van uitdrogingskrimp berekend. Hiervoor kan tabel 3.2 in de NBN EN 1992-1-1 gebruikt worden, maar in bijlage B kan dit ook met formules bepaald worden.

$$\varepsilon_{cd,0} = 0{,}85 \left[(220 + 110.\alpha_{ds1}).e^{\left(-\alpha_{ds2}.\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)} \right].10^{-6}.\beta_{RH} \qquad \textit{formule 2.31}$$

$$\beta_{RH} = 1{,}55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \qquad \textit{formule 2.32}$$

f_{cm} : de gemiddelde druksterkte [N/mm²];

f_{cmo} : 10 N/mm²;

α_{ds1} : de coëfficiënt die afhangt van de cementsoort;
3 voor cementklasse S
4 voor cementklasse N
6 voor cementklasse R

α_{ds2} : de coëfficiënt die afhangt van de cementsoort;
0,13 voor cementklasse S
0,12 voor cementklasse N
0,11 voor cementklasse R

RH : de relatieve vochtigheid van de omgeving [%];

RH_0 : 100 %.

Voor de ontwikkeling van de uitdrogingskrimp in de tijd wordt "formule 2.33" gebruikt.

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s).k_h.\varepsilon_{cd,0} \qquad \textit{formule 2.33}$$

k_h : een coëfficiënt die afhangt van de fictieve dikte h_0 volgens "Tabel 5: Waarden voor kh [3]".

Tabel 5: Waarden voor k_h [3]

h_0	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Voor het berekenen van de tijdscoëfficiënt wordt "formule 2.34" gebruikt.

$$\beta_{ds}(t,t_s) = \frac{(t-t_s)}{(t-t_s)+0{,}04\sqrt{h_0^3}} \qquad \textit{formule 2.34}$$

t : de ouderdom van het beton [dagen];

t_s : de ouderdom van het beton aan het begin van de uitdrogingskrimp [dagen]; Normaal is dit bij het einde van de nabehandeling;

h_0 : de fictieve dikte van de dwarsdoorsnede [mm] = $2.A_c/u$;
A_c : de oppervlakte van de dwarsdoorsnede van het beton [mm²];
u : de omtrek van dat deel van de dwarsdoorsnede dat is blootgesteld aan uitdroging [mm].

De autogene krimpverkorting wordt met "formule 2.35" bepaald.

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t).\varepsilon_{ca}(\infty) \qquad \textit{formule 2.35}$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2{,}5\,(f_{ck}-10).10^{-6} \qquad \textit{formule 2.36}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0{,}2\,t^{0{,}5})} \qquad \textit{formule 2.37}$$

$\varepsilon_{ca}(\infty)$: de basis autogene krimpverkorting;

$\beta_{as}(t)$: de tijdscoëfficiënt autogene krimpverkorting [dagen].

2.2.11 Voorbeeld krimp

Nu wordt deze methode toegepast op het algemene voorbeeld. De relatieve vochtigheid is 40%, de ouderdom van het beton is 10 dagen en de nabehandeling stopt na 5 dagen.

Met "formule 2.32" wordt de coëfficiënt voor de relatieve vochtigheid bepaald.

$$\beta_{RH} = 1{,}55x\left[1-\left(\frac{40}{100}\right)^3\right] = 1{,}4508$$

De basisverkorting veroorzaakt door uitdrogingskrimp wordt met "formule 2.31" berekend.

$$\varepsilon_{cd,0} = 0{,}85x\left[(220+110x4)xe^{\left(-0{,}12x\frac{38}{10}\right)}\right]x10^{-6}x1{,}4508 = 0{,}00051$$

De fictieve dikte. $h_0 = 2.A_c/u$

$$h_0 = \frac{2x200x200}{200x2 + 200x2} = 100\ mm$$

De waarde voor k_h wordt bepaald met "Tabel 5: Waarden voor kh [3]".

$$k_h = 1{,}0$$

De berekening voor de tijdscoëfficiënt van uitdrogingskrimp gebeurt met "formule 2.34".

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(10-5)}{(10-5) + 0{,}04x\sqrt{100^3}} = 0{,}111$$

De uitdrogingskrimp wordt met "formule 2.33" berekend.

$$\varepsilon_{cd}(t) = \ 0{,}111x1{,}0x0{,}00051 = 5{,}732x10^{-5}$$

Berekening van de autogene krimp.

De tijdscoëfficiënt van de autogene krimp wordt met "formule 2.37" berekend.

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{-0{,}2x10^{0{,}5}} = 0{,}4687$$

De basis autogene krimp wordt berekend met "formule 2.36".

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = \ 2{,}5x(30-10)x10^{-6} = 5x10^{-5}$$

De autogene krimp wordt berekend met "formule 2.35".

$$\varepsilon_{ca}(t) = \ 0{,}4687x5x10^{-5} = 2{,}343x10^{-5}$$

De totale krimpverkorting wordt bepaald met "formule 2.30".

$$\varepsilon_{cs} = \ 5{,}732x10^{-5} + 2{,}343x10^{-5} = 8{,}075x10^{-5}$$

2.2.12 Berekening benodigde staaldoorsnede

Nu wordt de methode toegelicht voor het berekenen van de benodigde staaldoorsnede volgens "Betonconstructies onder temperatuur- en krimpvervormingen" [7]. Dit is een vereenvoudigde berekeningsmethode. Deze begint met het evenwicht uit te schrijven.

$$N_{s;pr} = N_{cr}(A_{c;eff})$$

Verder uitgewerkt geeft dit:

$$A_s.\sigma_{s,cr} = \sigma_{cr}.A_{c;eff}$$

$N_{s;pr}$: de staalkracht in primaire scheur [kN];

A_s : de staaldoorsnede in trekband [mm²];

$\sigma_{s,cr}$: de staalspanning in de scheur [N/mm²];

σ_{cr} : de betontrekspanning op het moment van scheuren [N/mm²];

$A_{c;eff}$: het effectief betonoppervlak [mm²].

Het effectieve betonoppervlak wordt met onderstaande formule bepaald:

$$A_{c;eff} = b.h_{eff} = b.(c + 2.\emptyset + \tan(\alpha)\,.\,l_{st}\,)$$

b : de beschouwde breedte [mm];

l_{st} : de overdrachtslengte [mm];

c : de betondekking [mm];

$\emptyset$: de staafdiameter [mm];

α : de spreidingshoek [°].

De overdrachtlengte wordt als volgt bepaald:

$$l_{st} \approx \frac{1{,}2\ w_{mo}.E_s}{\sigma_{s,cr}}$$

w_{mo} : de gemiddelde korte duur scheurwijdte [mm²].

De staalspanning $\sigma_{s,cr}$ wordt bepaald met:

$$\sigma_{s,cr} = \frac{n.\sigma_{cr}}{2} + \sqrt{\left(\frac{n.\sigma_{cr}}{2}\right)^2 + \frac{f_{ccm}.E_s\ (0{,}5\ w_{mo})^{1{,}18}}{0{,}4\ \emptyset}}$$

n : de verhouding van de elasticiteitsmodulus van staal over beton E_s/E_c;

f_{ccm} : de gemiddelde kubusdruksterkte [N/mm²].

De benodigde staaldoorsnede wordt dan uit het evenwicht gehaald:

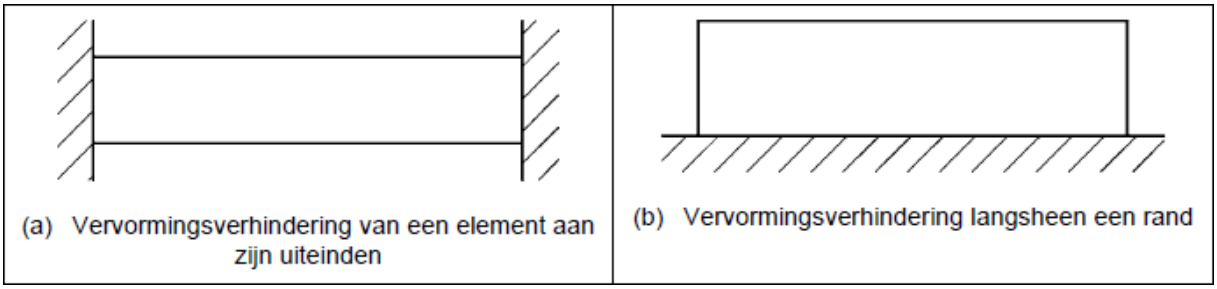
$$A_s = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{s,cr}}.b.h_{eff}$$

2.3 Toelichting methoden voor opgelegde vervorming

De methodes die nu worden toegelicht zijn voor opgelegde vervorming ("NBN EN 1992-3 NL") [5]. Dit zijn aanvullingen voor "NBN EN 1992-1-1".

2.3.1 Berekening vervormingsverhindering

Er zijn twee gevallen terug te vinden waar sprake is van vervormingsverhindering.



Figuur 9: Types vervormingsverhindering [5]

Wanneer een nieuw gedeelte beton gestort wordt tussen twee reeds bestaande gedeeltes, doet geval (a) zich voor. Geval (b) doet zich voor wanneer een wand gestort wordt op een reeds bestaande plaat.

- Geval (a):

Voor geval (a) wordt het rekverschil in "formule 2.13" vervangen door onderstaande formule. Dit is voor een directe berekening van de scheurwijdte.

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0{,}5\,\alpha_e . k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{\left(1 + \frac{1}{\alpha_e . \rho}\right)}{E_s} \qquad \textit{formule 2.38}$$

Voor een niet directe berekening wordt de staalspanning berekend, zodat er met behulp van grafieken een gepaste wapeningsschikking bekomen kan worden.

$$\sigma_s = k_c . k . \frac{f_{ct,eff}}{\rho} \qquad \textit{formule 2.39}$$

ρ : A_s/A_{ct}.

Hier wordt er ook weer gebruik gemaakt van een aanpassingsformule voor de maximale staafdiameter.

$$\phi_s = \phi^*_s . \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) . \frac{h}{10 . (h - d)} \qquad \textit{formule 2.40}$$

- Geval (b):

Hier wordt het rekverschil in "formule 2.13" vervangen door onderstaande formule.

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax}.\varepsilon_{tree} \qquad \textit{formule 2.41}$$

R_{ax} : de vervormingsverhinderingsfactor (zie "Bijlage 2: Verhinderingsfactoren voor typische situaties");

ε_{tree} : de vervorming die optreedt wanneer het element volledig vrij kan vervormen.

Bij geval (b) is de scheurwijdte afhankelijk van vervormingsverhinderingsfactor en de vervorming indien het element vrij zou zijn.

2.3.2 Voorbeeld vervormingsverhindering

Enkel het rekverschil moet opnieuw berekend worden voor het algemene voorbeeld. Eerst wordt de wapeningsverhouding berekend.

$$\rho = \frac{A_s}{A_{ct}} = \frac{452{,}39}{200x200} = 0{,}0113$$

Nu is de wapeningsverhouding gekend en de andere parameters zijn al berekend in de vorige voorbeelden.

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0{,}5x6{,}09x1x1x2{,}90x\frac{\left(1 + \frac{1}{6{,}09x0{,}0113}\right)}{200000} = 6{,}84x10^{-4}$$

Vervolgens kan de scheurwijdte berekend worden met "formule 2.13".

$$w_k = S_{r,max}.(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 282{,}38x6{,}84x10^{-4} = 0{,}19\,mm$$

In "2.2.4 Voorbeeld scheurwijdte" was er een w_k = 0,29 mm. Dit geeft een verschil in scheurwijdte van 0,1 mm. Dit verschil is er omdat er bij vervormingsverhindering een andere formule gebruikt wordt voor het rekverschil.

2.4 Besluit

In dit hoofdstuk zijn vooral de methodes besproken die mogelijk bruikbaar zijn bij het volgende hoofdstuk "Opstellen van ontwerpprotocol". Zo gaat de methodiek van het bepalen van de minimumwapening en de scheurwijdte berekening de basis vormen voor de weergave van het ontwerpprotocol bij verhinderde vervorming.

Het opstellen van het ontwerpprotocol gebeurt op basis van de gegevens van "NBN EN 1992-3", hier zijn de berekeningen voor de vervormingsverhindering het vertrekpunt voor het opstellen van het ontwerpprotocol. Deze methodes worden dan aangevuld met bijvoorbeeld de berekeningen voor temperatuur, krimp, verhinderingsgraad en ouderdom van beton.

Door de literatuurstudie uit te schrijven en de methodes toe te passen op voorbeelden is het al duidelijker wat bepaalde parameters betekenen. Nu kan er gestart worden met het opstellen van het ontwerpprotocol.

3 OPSTELLEN VAN ONTWERPPROTOCOL

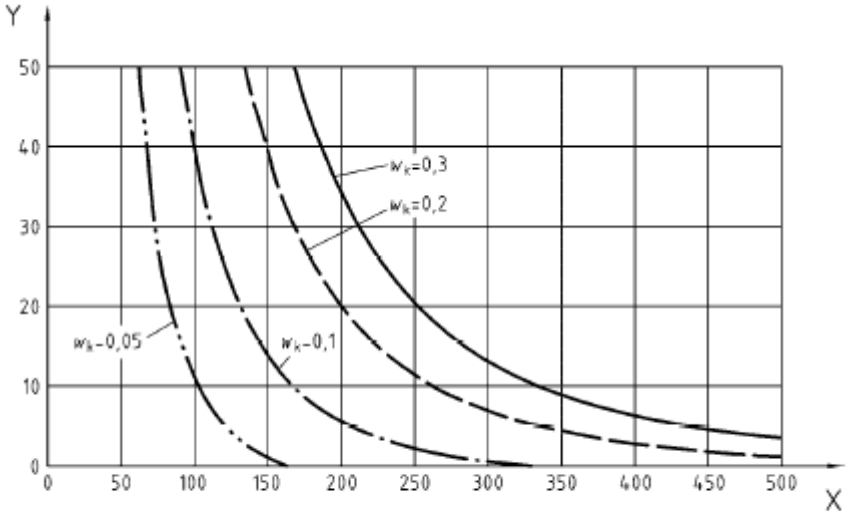
Eerst worden enkele parameters besproken: de wapeningsdiameter, de belemmeringsgraad, de tussenafstanden van de staven en α_e. Dan volgt de opmaak van een methode om de scheurwijdte op een directe manier te berekenen. Bij een omvorming van deze methode wordt de maximum staafdiameter berekend. Door het gebruik van de formules van de maximum staafdiameter worden er tabellen opgemaakt voor verschillende gevallen. Deze tabellen vormen de basis van de niet directe berekening. Er worden enkel tabellen opgemaakt voor de maximum staafdiameter, omdat deze manier meer mogelijkheden biedt voor het gebruik van het protocol.

3.1 Parameters

De bespreking van de parameters zijn noodzakelijk om de invloed van de scheurwijdte berekening te verduidelijken.

3.1.1 De wapeningsdiameter

In "Figuur 10: Maximale staafdiameter voor scheurvorming in elementen [5]" wordt de invloed van de maximum staafdiameter voor scheurwijdte en de staalspanning weergegeven. Volgende conclusie wordt gemaakt: hoe groter de maximum staafdiameter hoe kleiner de maximaal toegelaten staalspanning bij een gegeven scheurwijdte. Dit is een belangrijke vaststelling, wat betekent dat de scheurwijdte beperkt kan worden door een gepaste staafdiameter en staalspanning te gebruiken.



Verklaring

X spanning in de wapening, σ_s (N/mm^2)

Y maximum staafdiameter mm)

Figuur 10: Maximale staafdiameter voor scheurvorming in elementen [5]

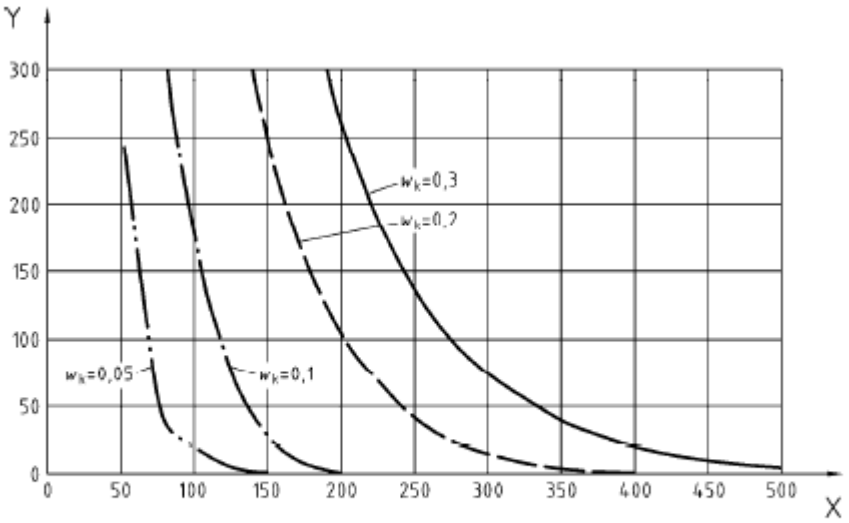
3.1.2 Belemmeringsgraad

Een vervorming is niet altijd volledig belemmerd. De belemmeringsgraad wordt gebruikt om aan te duiden hoe groot de belemmering is.

De verhinderingsfactor (belemmeringsgraad) is noodzakelijk om de verhinderingsvervorming te berekenen. Deze factoren zijn terug te vinden in "Bijlage 2: Verhinderingsfactoren voor typische situaties". Er wordt enkel gewerkt met de grootste verhinderingsgraad, want hier is de verhinderde vervorming ook het grootste. Dan kan hiervoor de gepaste wapening berekend worden.

3.1.3 Tussenafstand van de staven

Er kan ook gewerkt worden met een maximum tussenafstand van de staven in plaats van de maximum diameter om de scheurwijdte te beperken. Uit onderstaande grafiek kan het volgende worden vastgesteld. Hoe kleiner de staafafstand, hoe hoger de toegelaten staalspanning bij een zelfde maximale scheurwijdte. In de masterproef zal de nodige wapening bepaald worden op basis van tabellen voor de maximale staafdiameter, niet op basis van tussenafstanden. Er dient wel nog rekening gehouden te worden met de constructieve schikkingen en de tussenafstand van de staven kan best niet groter zijn dan 300 mm.



Verklaring

X spanning in de wapening, σ_s (N/mm^2)

Y maximum staafafstand (mm)

Figuur 11: Maximum staafafstand voor scheurbeheersing in elementen [5]

3.1.4 Alfa e

Dit is een parameter die bepaald wordt door de verhouding van de elasticiteitsmodulus van staal en beton. In deze masterproef gaat er gewerkt worden met α_e (zie "formule 3.1").

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}} \qquad \textit{formule 3.1}$$

In het ontwerpprotocol wordt er rekening gehouden met de ouderdom van het beton. Met andere woorden, in welke mate het beton al uitgehard is. Dan moet in bovenstaande formule de term E_{cm} worden aangevuld met "formule 2.25".

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}(t)} = \frac{E_s}{(f_{cm}(t)/f_{cm})^{0,3}.E_{cm}} \qquad \textit{formule 3.2}$$

Alfa e geeft het verband tussen staal en beton weer. Dit wil zeggen: als de staalspanning op een bepaalde locatie gekend is, kan de betonspanning op die zelfde locatie bepaald worden. Er wordt vanuit gegaan dat er een perfecte aanhechting is tussen staal en beton. Dit wil zeggen dat de staalrek gelijk is aan de betonrek op dezelfde locatie.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c$$

De rek wordt bepaald door de spanning te delen door de elasticiteitsmodulus, dit wordt gedaan voor de rek van beton en staal.

$$\frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\sigma_c}{E_{cm}}$$

De staalspanning is dan gelijk aan.

$$\sigma_s = \frac{\sigma_c}{E_{cm}}.E_s$$

Wetende dat alfa e bepaald wordt met "formule 3.1".

$$\sigma_s = \alpha_e.\sigma_c$$

3.2 Opstellen tabellen

Aan de hand van de scheurwijdte berekening voor geval a en b, zie "2.3 Toelichting methoden voor opgelegde vervorming" wordt het ontwerpprotocol opgesteld. Eerst volgt een aanvulling van de formules van vervormingsverhindering, zodat deze formules kunnen worden omgevormd. Dan zijn nog niet alle parameters ingevuld. Zo kunnen deze naar keuze worden aangepast: om de invloed van bepaalde parameters te onderzoeken en om verschillende tabellen op te maken die gebruikt kunnen worden voor specifieke gevallen.

De directe berekening houdt in dat de scheurwijdte 'direct' berekend wordt. De niet directe berekening houdt in dat nodige wapening bepaald wordt met tabellen of grafieken.

Er wordt met een scheurwijdte beperking gewerkt. De scheurwijdte beperking is afhankelijk van de milieuklasse. In onderstaande tabel worden de maximale scheurwijdtes voor de milieuklasse weergegeven.

Tabel 6: Aanbevolen waarden van w_{max} [2]

Tabel 7.1N-ANB – Aanbevolen waarden van w_{max} (mm)			
Blootstellings-klasse	**Milieuklasse**	**Gewapende en voorgespannen onderdelen met voorspanning zonder aanhechting**	**Voorgespannen onderdelen met voorspanning met aanhechting**
		Quasi-blijvende belastingscombinatie	**Frequente belastingscombinatie**
X0, XC1	**EI**	0,4[1]	0,2
XC2, XC3, XC4	**EE1, EE2, EE3**	0,3	0,2[2]
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	**EE4, ES1, ES2, ES3, ES4**		Decompressie
Opmerking 1 Voor deze blootstellingsklasse X0 en XC1 en de milieuklasse EI, heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid ; deze grens is gesteld om een acceptabel uiterlijk te verzekeren. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk mag deze beperking worden afgezwakt. **Opmerking 2** Voor deze blootstellings- en milieuklassen moet, aanvullend, decompressie onder de quasi-blijvende belastingscombinatie worden getoetst.			

Milieuklasse beschrijft waaraan het beton wordt blootgesteld, dus wat het beton gaat aantasten. Zie "Bijlage 3: Milieuklasse" voor meer informatie. [3]

3.2.1 Geval (a): symmetrische belemmering

Nu wordt "formule 2.38" gebruikt (de constructie is onder invloed van belemmerde vervorming) in plaats van "formule 2.15" voor het bepalen van het rekverschil. De "formule 2.38" voor het rekverschil bij vervormingsverhindering wordt verder uitgewerkt, zodat α_e één keer geschrapt kan worden.

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 0{,}5.\alpha_e.k_c.k.f_{ct,eff}.\frac{\left(1+\frac{1}{\alpha_e.\rho}\right)}{E_s}$$

$$= \frac{0{,}5.\alpha_e.k_c.k.f_{ct,eff} + \frac{0{,}5.\cancel{\alpha_e}.k_c.k.f_{ct,eff}}{\cancel{\alpha_e}.\rho}}{E_s}$$

$$= \frac{0{,}5.\alpha_e.k_c.k.f_{ct,eff} + \frac{0{,}5.k_c.k.f_{ct,eff}}{\rho}}{E_s}$$

Er wordt getracht de wapeningsverhouding weg te werken. De wapeningsverhouding is een onbekende. Nu wordt er gekeken of er niks bekend in bovenstaande formule staat, dat in een andere vorm geschreven kan worden. De aandacht gaat nu uit naar de tweede term in de teller. ρ is de verhouding van de staaldoorsnede en de oppervlakte van de betondoorsnede net voor het scheuren.

$$\frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\frac{A_s}{A_{ct}}} = \frac{k_c.k.f_{ct,eff}.A_{ct}}{A_s}$$

A_s mag gelijk gesteld worden aan $A_{s,min}$ omdat er gezocht wordt naar de nodige staaldoorsnede. Als deze term verder bekeken wordt, valt het op dat deze term een verband heeft met het evenwicht van de betontrekkracht en de staaltrekkracht. Dit evenwicht wordt uitgeschreven in "formule 2.2" en wordt voor de duidelijkheid hieronder nog eens herhaald.

$$A_{s,min}.\sigma_s = k_c.k.f_{ct,eff}.A_{ct}$$

$$\sigma_s = \frac{k_c.k.f_{ct,eff}.A_{ct}}{A_{s,min}}$$

Het rode gedeelte in de formule van het rekverschil dat eigenlijk het krachten evenwicht voorstelt, mag vervangen worden door de staalspanning. Er wordt ook vastgesteld dat de formule van het rekverschil herschreven kan worden tot "formule 3.3".

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{0{,}5\ \alpha_e . k_c . k . f_{ct,eff} + 0{,}5\ \sigma_s}{E_s}$$

$$= \frac{\alpha_e . k_c . k . f_{ct,eff} + \sigma_s}{2 . E_s} \qquad \textit{formule 3.3}$$

Voor de maximale scheurafstand wordt "formule 2.16" gebruikt. In deze formule wordt er ook weer een wapeningsverhouding terug gevonden. Die zo herschreven moet worden dat deze niet meer rechtstreeks in de formule staat. Omdat de wapeningsverhouding uit onbekenden bestaat. Doordat in deze formule $S_{r,max}$ gebruikt wordt is het ontwerpprotocol enkel geldig als de hart op hartafstand van de hechtende wapening kleiner is dan 5 (c+ø/2).

$$S_{r,max} = k_3 . c + k_1 . k_2 . k_4 . \emptyset / \rho_{p,eff}$$

Dit is echter een andere wapeningsverhouding als bij het rekverschil. Hier is het de verhouding van de wapeningsdoorsnede en de effectieve betondoorsnede.

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$$

$$\rho = \frac{A_s}{A_{ct}}$$

Er wordt in beide formules van de wapeningsverhouding A_s teruggevonden. Deze worden dan gelijkgesteld aan elkaar.

$$\rho_{p,eff} . A_{c,eff} = \rho . A_{ct} \qquad \textit{formule 3.4}$$

Uiteraard moet er een verband gezocht worden tussen ρ en $\rho_{p,eff.}$ Dit verband wordt gevonden door de berekeningswijze van de betondoorsnede in trek van naderbij te bekijken. Hierin is enkel de hoogte van de trekzone anders. Bij centrische trek geld volgende.

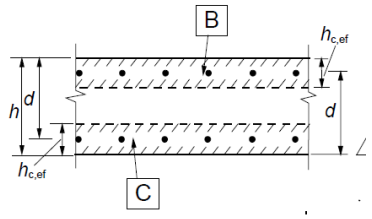
$$A_{ct} = h . b = h_{cr} . b$$

$$A_{c,eff} = 2\ h_{eff} . b$$

Normaal is h_{eff} het minimum van drie formules. Deze drie formules zijn onderzocht, om te weten wanneer deze geldig zijn. Hierbij is vastgesteld dat onderstaande formule voor h_{eff} de meest waarschijnlijke is.

$$h_{eff} = 2{,}5\ (h - d)$$

Bij zuivere trek is er boven en onder een effectieve zone dan wordt h_{eff} vermenigvuldigd met twee. Zie "Figuur 12: Op trek belast element [3]" voor effectieve zone.



Figuur 12: Op trek belast element [3]

De "formule 3.4" wordt verder uitgewerkt.

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_{ct}}{A_{c,eff}} . \rho = \frac{h}{5\,(h-d)} . \rho \qquad \textit{formule 3.5}$$

Nu moet enkel ρ anders uitgeschreven worden in "formule 3.5". Dit wordt weer gedaan door het krachten evenwicht te gebruiken tussen staal en beton. Als de formule van het krachten evenwicht wordt omgevormd, geeft dit onderstaande formule.

$$\rho = \frac{k_c . k . f_{ct,eff}}{\sigma_s} \qquad \textit{formule 3.6}$$

Bij "formule 3.5" wordt "formule 3.6" ingevuld, dit geeft als resultaat onderstaande formule.

$$\rho_{p,eff} = \frac{h}{5\,(h-d)} . \frac{k_c\,.k\,.f_{ct,eff}}{\sigma_s} \qquad \textit{formule 3.7}$$

Nu kan $\rho_{p,eff}$ worden ingevuld in "formule 2.16" de maximale scheurafstand. Dit geeft onderstaand resultaat.

$$S_{r,max} = k_3 . c + \frac{k_1 . k_2 . k_4 . \emptyset}{\left(\frac{h}{5\,(h-d)}\ \frac{k_c . k\,.f_{ct,eff}}{\sigma_s}\right)} \qquad \textit{formule 3.8}$$

De formules voor het rekverschil en de maximale scheurafstand zijn aangepast, "formule 2.13" voor de scheurwijdte kan ingevuld worden.

$$w_k = S_{r,max} . (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$w_k = formule\ 3.8 x formule\ 3.3$$

Onderstaande formule is de globale formule voor de scheurwijdte.

$$w_k = \left(k_3\, c + \frac{k_1\,.k_2\,.k_4\,\emptyset}{\left(\frac{h}{5\,(h-d)}\ \frac{k_c\,.k\,.f_{ct,eff}}{\sigma_s}\right)} \right) . \left(\frac{\alpha_e . k_c\,.k\,.f_{ct,eff} + \sigma_s}{2\,E_s} \right) \qquad \textit{formule 3.9}$$

Nu moet "formule 3.9" enkel nog worden omgevormd, voor de berekening van de staafdiameter. Vervolgens kunnen de tabellen worden opgemaakt.

$$\emptyset = \left(\frac{w_k}{\frac{\alpha_e . k_c . k . f_{ct,eff} + \sigma_s}{2\, E_s}} - k_3 . c \right) . \frac{\frac{h}{5\,(h-d)} \cdot \frac{k_c . k . f_{ct,eff}}{\sigma_s}}{k_1 . k_2 . k_4} \qquad \textit{formule 3.10}$$

Er wordt vastgesteld dat de effectieve trekspanning van beton niet lineair evenredig is met de staafdiameter. Bij "formule 2.40", een aanpassingsformule (in de norm "NBN EN 1992-3 NL), wordt er van uitgegaan dat dit wel lineair evenredig is. Een onderzoek voor al dan niet evenredigheid van de effectieve trekstrekte is noodzakelijk.

Het opgestelde ontwerpprotocol is enkel geldig voor wapening in 1 laag en voor wapening met één en dezelfde diameter. Er moest naar een verband gezocht worden tussen staalspanning en scheurwijdte, dit wordt gedaan door te werken met een maximum staafdiameter. Het valt op dat de staafdiameter onafhankelijk is van de breedte. In "3.3 Geval a: beschrijving invloed parameters" worden de parameters verder besproken.

Bij de opmaak van de tabellen is volgende aanname gebeurd h-d = 0,1 h.

Vervolgens wordt er een tabel opgemaakt voor de maximale staafdiameter voor symmetrische belemmering (geval a). Eerst worden de parameters bepaald, die weergegeven zijn in onderstaande tabel.

Tabel 7: Parameters geval a

E_{cm}=	32836,57	N/mm²
f_{ctm}=	2,90	N/mm²
f_{ck}=	30	N/mm²
f_{cm}=	38	N/mm²
c=	25	mm
k_1=	0,8	
k_2=	1	trek
k_3=	3,4	
k_4=	0,425	
k_c=	1	trek
E_s=	200000	N/mm²
k=	1	

Nu dat de parameters gekend zijn, worden deze in "formule 3.10" ingevuld. Er wordt voor verschillende spanningen en scheurwijdtes de maximale staafdiameter berekend.

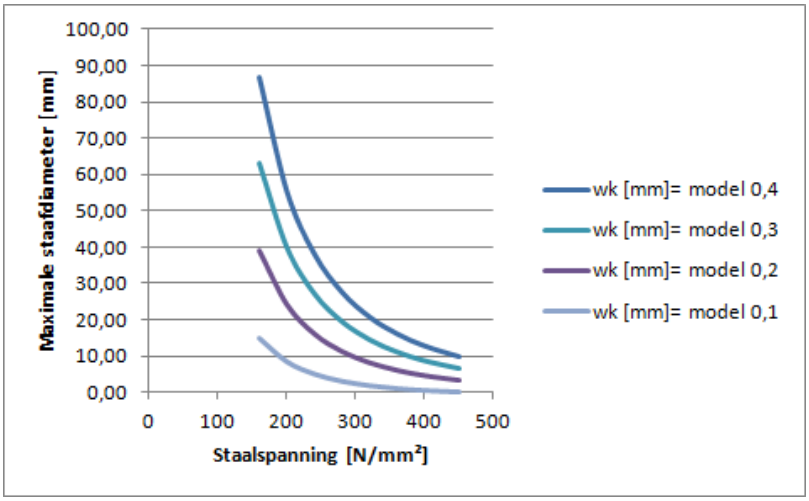
Tabel 8: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	87		63		39		15	
200	55		40		24		8	
240	38		27		16		5	
280	28		19		11		-	
320	21		14		8		-	
360	16		11		6		-	
400	13		9		5		-	
450	10		6		-		-	

In deze tabel dient de gebruiker de staafdiameter zelf eerst nog aan te passen met de aanpassingsformule (formule 3.18 of formule 3.19). Daarna kan de gebruiker de waarden eventueel afronden naar de eerst bruikbare diameter. In deze masterproef worden de waarden niet afgerond naar de eerst volgende staafdiameter, maar wordt er rechtstreeks geïnterpoleerd. Zo blijft de nauwkeurigheid behouden. Er kunnen best geen staven gebruikt worden met een diameter groter dan 32 mm, aangezien overlapping dan erg penaliserend is. Met deze constructieve schikking moet wel rekening gehouden worden.

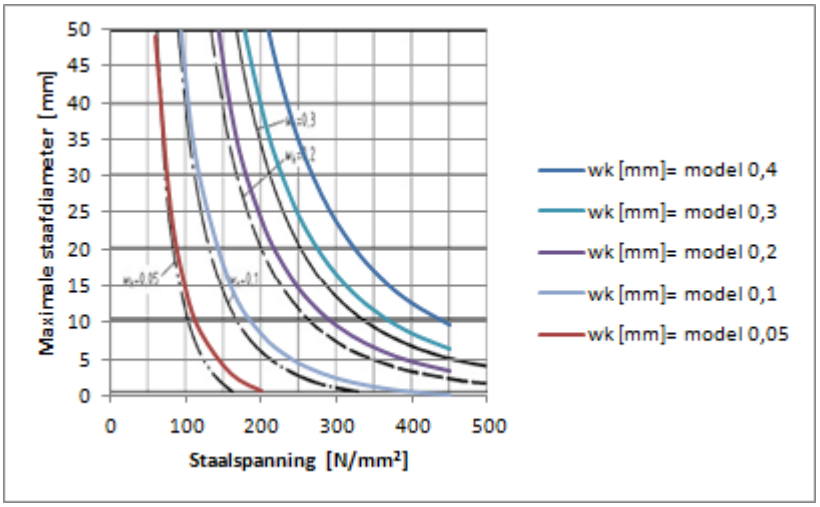
In de tabellen staan echter wel diameters groter dan 32 mm, deze worden echter niet afgerond. Omdat na gebruik van de aanpassingsformule de diameters kleiner kunnen worden. Zo wordt overschatting vermeden.

De berekeningen kunnen ook gemaakt worden op basis van grafieken. Onderstaande grafiek is geldig voor vervormingsverhindering van symmetrische belemmering.



Figuur 13: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering

Nu wordt "Figuur 13: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering" vergeleken met "Figuur 10: Maximale staafdiameter voor scheurvorming in elementen [5]". Dit wordt gedaan door de grafieken samen te voegen in één grafiek.



Figuur 14: vergelijking staafdiameter

De waarde van het opgestelde ontwerpprotocol voor de maximum staafdiameter liggen iets hoger dan die uit "NBN EN 1992-3". De oorzaak hiervan is waarschijnlijk, dat in het opgestelde ontwerpprotocol andere aannames zijn gemaakt.

De wapeningsverhoudingen ρ en $\rho_{p,eff}$ zijn uit de formules gehaald, omdat dit onbekenden zijn. Het nadeel hiervan is dat het nog niet geweten is of de gevonden combinatie staafdiameter/spanning mogelijk is. De kans bestaat dat de wapening niet te plaatsen is of de dat het maximum wapeningspercentage overschreden is. Voor balken en kolommen is $A_{s,max} = 0{,}04\ A_c$. [2]

In hoofdstuk "4 Voorbeelden" wordt het opgestelde ontwerpprotocol toegepast op voorbeelden.

3.2.2 Geval (b): asymmetrische belemmering

Het opstellen van de globale formule van de scheurwijdte voor de asymmetrische belemmering gebeurt volgens dezelfde methode als die van de symmetrische belemmering.

Op basis van de directe berekening van de scheurwijdte wordt een formule opgesteld. Hieronder en in "formule 2.13" wordt de formule voor de scheurwijdte weergegeven. Deze formule is eigenlijk het lengteverschil tussen het staal en het beton. Het rekverschil en de maximale scheurafstand worden later ingevuld.

$$w_k = S_{r,max}.(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Eerst worden de formules van de maximale scheurafstand en het rekverschil anders uitgeschreven, zodat er geen onbekende meer instaan. Dit wil zeggen dat er getracht wordt om de wapeningsverhouding zo neer te schrijven dat deze niet meer rechtstreeks in de formule staat.

Voor het rekverschil wordt "formule 2.41" gebruikt. De ε_{tree} bestaat uit een temperatuurgradiënt, een krimp- en een kruipgradiënt. De kruipgradiënt valt weg, omdat deze van toepassing is voor drukkrachten. De ε_{tree} is de vervorming die zou optreden indien het element volledig vrij zou kunnen vervormen. [10]

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax}.\varepsilon_{tree}$$

Temperatuur: $\Delta\varepsilon = \Delta T.\alpha_c$

Krimp: $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$

In dit geval wordt er voor de temperatuursgradiënt gewerkt met "formule 2.1".

$$\Delta\varepsilon_{temp} = \Delta T.\alpha_c$$

Hieronder volgt de berekening van de krimpgradiënt. Eerst wordt de uitdrogingskrimp berekend. Hier wordt "formule 2.31" en "formule 2.32" gebruikt.

$$\varepsilon_{cd,0} = 0{,}85\left[(220 + 110.\alpha_{ds1}).e^{\left(-\alpha_{ds2}.\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)}\right].10^{-6}.\beta_{RH}$$

Voor β_{RH} : $RH_0 = 100$ %

$$\beta_{RH} = 1{,}55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right]$$

Voor de berekening van h_0 wordt er gezocht naar een gepaste aanname. De hoogtes van een wand zijn vaak gelegen tussen 2,6 m en 3 m. De dikte van deze wand bedraagt in dit geval 20 cm.

$$\mathrm{h_0} = 2.\mathrm{A_c/u}$$

$$h_0 = \frac{2x200x2600}{200 + 2600x2} = 192{,}59$$

$$h_0 = \frac{2x200x3000}{200 + 3000x2} = 193{,}54$$

$$h_0 \approx 193\,mm$$

Voor k_h te berekenen wordt "Tabel 5: Waarden voor kh [3]" gebruikt. Om een exacte waarde te bekomen wordt er geïnterpoleerd.

$$k_h = 1 + \frac{0{,}85 - 1}{200 - 100} x(193 - 100) = 0{,}8605 \approx 0{,}86$$

Voor de berekening van de tijdcoëfficiënt, wordt "formule 2.34" gebruikt.

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0{,}04\sqrt{h_0^3}}$$

Voor de uitdrogingskrimp wordt "formule 2.33" gebruikt.

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s).k_h.\varepsilon_{cd,0}$$

De autogene krimp wordt met volgende formules bepaald: "formule 2.35", "formule 2.36" en "formule 2.37".

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t).\varepsilon_{ca}(\infty)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2{,}5\,(f_{ck} - 10).10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - e^{(-0{,}2\,t^{0{,}5})}$$

Voor de som van de autogene en de uitdrogingskrimp.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

$$= 0{,}85\left[(220 + 110.\alpha_{ds1}).e^{\left(-\alpha_{ds2}.\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)}\right].10^{-6}.1{,}55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right] \qquad \textit{formule 3.11}$$

$$.k_h.\frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0{,}04\sqrt{h_0^3}}$$

$$+2{,}5\left(1 - e^{(-0{,}2\,t^{0{,}5})}\right).(f_{ck} - 10).10^{-6}$$

Voor de totale krimp.

$$\varepsilon_{tree} = \Delta\varepsilon_{temp} + \varepsilon_{cs} = \Delta T.\alpha_c + \varepsilon_{cs} \qquad \textit{formule 3.12}$$

De vervormingsverhinderingsfactor komt uit "Bijlage 2: Verhinderingsfactoren voor typische situaties".

$$R_{ax} = 0{,}5$$

Het rekverschil wordt met "formule 2.41" berekend.

$$(\epsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax}.\varepsilon_{tree} = R_{ax}.(\Delta T.\alpha_c + \varepsilon_{cs}) \qquad \textit{formule 3.13}$$

De maximale scheurafstand wordt met "formule 2.16" berekend. Doordat in deze formule $S_{r,max}$ gebruikt wordt, is het ontwerpprotocol enkel geldig als de hart op hartafstand van de hechtende wapening kleiner is dan 5 (c+ø/2).

$$S_{r,max} = k_3.c + k_1.k_2.k_4.\emptyset/\rho_{p,eff}$$

Uit voorgaande "formule 2.2" is ook geweten dat dit de formule van het krachten evenwicht tussen staal en beton is. Voor meer uitleg zie symmetrische belemmering

$$\sigma_s = k_c.k.\frac{f_{ct,eff}.A_{ct}}{A_{s,min}} = \frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\rho}$$

Aan de hand van "formule 3.5" wordt het verschil weergegeven voor de verschillende wapeningsverhoudingen. Volgende aannames zijn gemaakt: h-d = 0,1 h h_{cr} = 0,5 h. Voor geval b wordt er aangenomen dat heel de wand onder trek staat. De situatie wordt vereenvoudigd: de verhouding van de rek is gelijk aan die van de verhinderingsfactoren. Onderaan is de verhinderingsfactor 0,5 en bovenaan is deze gelijk aan 0. Als het volledig onder trek staat, bevindt er zich een randzone zowel aan de onder- als aan de bovenkant van het effectief trekspanningsgebied. Daarom wordt de effectieve hoogte vermenigvuldigd met 2.

$$\rho_{p,eff} = \frac{h_{cr}}{5\,(h-d)}.\rho_{eff} = \frac{0{,}5\,h}{0{,}5\,h} = \frac{0{,}5}{0{,}5} = 1.\rho$$

Dus "formule 2.2" kan ook als volgt geschreven worden.

$$\rho_{p,eff} = \frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\sigma_s} \qquad \textit{formule 3.14}$$

Scheurwijdte "formule 2.13" wordt ingevuld.

$$w_k = S_{r,max}.(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

$$S_{r,max} = \left(k_3.c + \frac{k_1.k_2.k_4.\emptyset}{\frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\sigma_s}}\right) \qquad \textit{formule 3.15}$$

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = R_{ax}.\left(\begin{array}{c} \Delta T.\alpha_c + 0{,}85\left[(220 + 110.\alpha_{ds1}).e^{\left(-\alpha_{ds2}.\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)}\right].10^{-6} \\ .1{,}55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right].k_h.\frac{(t-t_s)}{(t-t_s) + 0{,}04.\sqrt{h_0^3}} \\ +2{,}5\left(1 - e^{(-0{,}2\,t^{0{,}5})}\right).(f_{ck} - 10).10^{-6} \end{array}\right)$$

Nu wordt deze formule omgevormd, zodat de diameter hier uit gehaald kan worden.

$$\emptyset = (w_k/R_{ax}.(\varepsilon_{tree}) - k_3.c).\frac{\frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\sigma_s}}{k_1.k_2.k_4.\emptyset} \qquad \textit{formule 3.16}$$

Met:

$$\varepsilon_{tree} = \begin{matrix} \Delta T.\alpha_c + 0{,}85\left[(220 + 110.\alpha_{ds1}).e^{\left(-\alpha_{ds2}.\frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right)}\right].10^{-6} \\ .1{,}55\left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3\right].k_h.\frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0{,}04.\sqrt{h_0^3}} \\ +2{,}5\left(1 - e^{(-0{,}2\,t^{0{,}5})}\right).(f_{ck} - 10).10^{-6} \end{matrix}$$

Met "formule 3.16" kunnen de nodige tabellen of grafieken worden opgemaakt, die essentieel zijn bij de niet directe berekening voor vervormingsverhindering van een lange wand langsheen een rand.

Nu moeten de parameters bepaald worden voor de tabel op te stellen. De waarden van de parameters worden weergegeven in "Tabel 9: Parameters geval b".

Tabel 9: Parameters geval b

E_{cm}=	32836,57	N/mm²
F_c=	2,90	N/mm²
f_{ck}=	30	N/mm²
fcm	38	N/mm²
c=	25	mm
k_1=	0,8	
k_2=	0,5	
k_3=	3,4	
k_4=	0,425	
k_c=	0,4	
E_s=	200000	N/mm²
t=	28	dagen
t_s=	5	dagen
k=	0,65	
RH=	100,00	%
R_{ax}=	0,50	
α_{ds1}=	3	
α_{ds2}=	0,13	
h_0=	193	mm
k_h=	0,86	
ΔT=	15	°C
α_c=	0,000012	K^{-1}

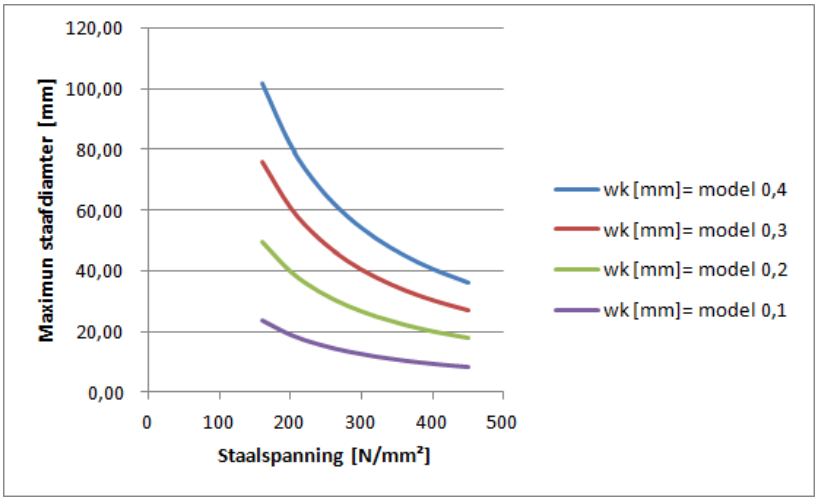
De parameters zijn nu gekend, deze worden in "formule 3.16" ingevuld. Hier wordt voor verschillende spanningen en scheurwijdtes de maximale staafdiameter berekend.

Tabel 10: Maximale staafdiameter asymmetrische belemmering

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	102		76		50		24	
200	81		61		40		19	
240	68		51		33		16	
280	58		43		28		14	
320	51		38		25		12	
360	45		34		22		11	
400	41		30		20		9	
450	36		27		18		8	

In deze tabel dient de gebruiker de staafdiameter zelf aan te passen met de gepaste aanpassingsformule en eventueel af te ronden naar de eerst bruikbare diameter. Door niet af te ronden blijft de nauwkeurigheid behouden.

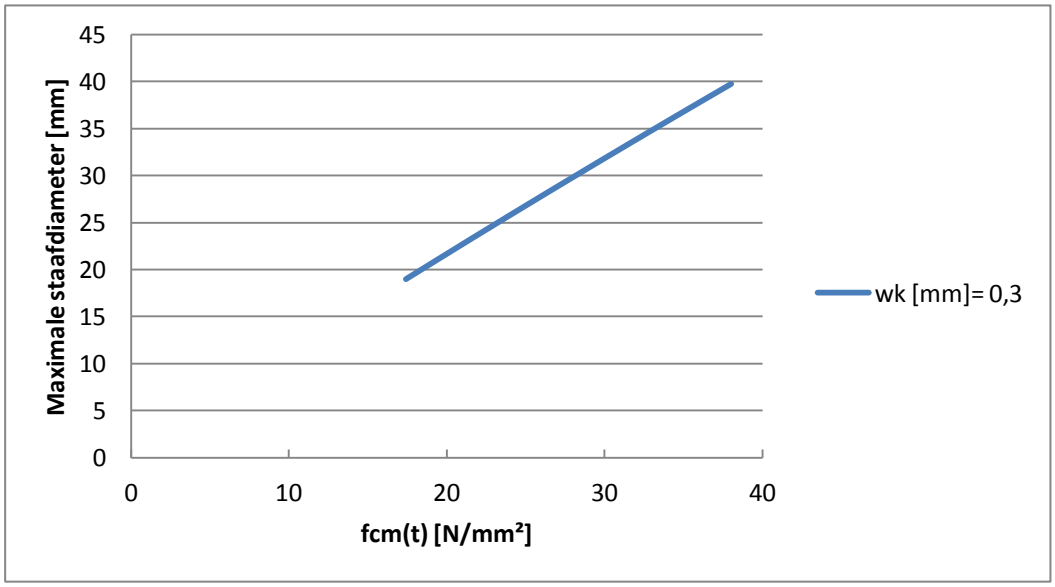
De berekeningen kunnen ook gemaakt worden op basis van grafieken. Onderstaande grafiek is geldig voor vervormingsverhindering van een lange wand langsheen een rand.



Figuur 15: Maximale staafdiameter asymmetrische belemmering

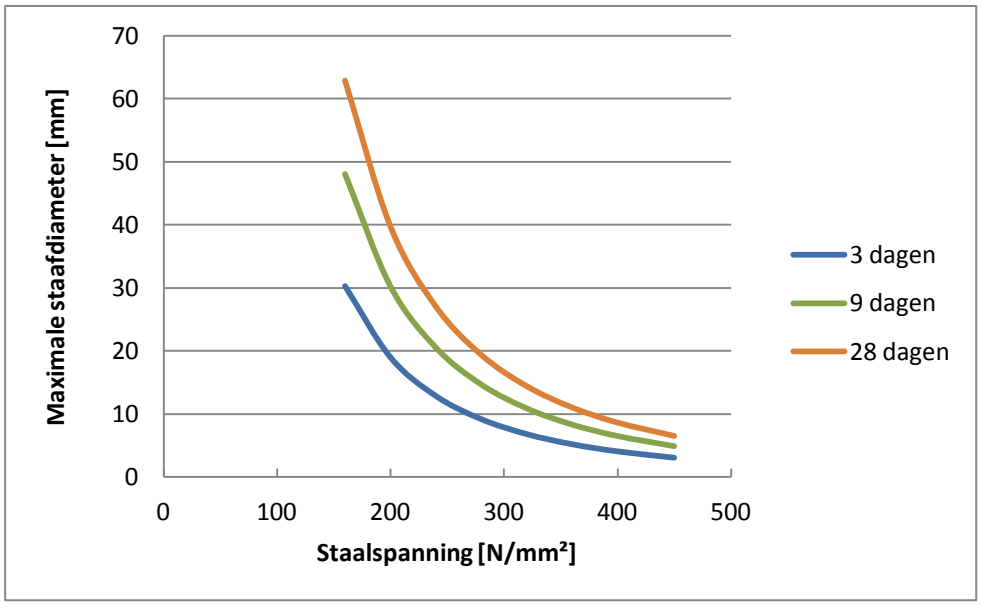
3.3 Geval a: beschrijving invloed parameters

Eerst wordt er bepaald welke invloed het verloop van de uitharding van beton op de maximale staafdiameter heeft. In "Figuur 16: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd" is de maximale staafdiameter berekend voor verschillende druksterktes van beton voor een bepaalde ouderdom van beton, zodat de scheurwijdte 0,3 mm blijft. Het verloop start bij beton van 3 dagen oud, omdat vanaf hier de krimpverschijnselen kunnen optreden. Er wordt vastgesteld dat hoe minder sterk het beton is hoe lager de maximale staafdiameter moet zijn.



Figuur 16: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd

"Figuur 17: Maximale staafdiameter i.f.v. staalspanning" geeft weer hoe groot de invloed van de betondruksterkte voor verschillende uithardingstijden van beton is op de maximale staafdiameter (bij een w_k = 0,3mm). Opmerkelijke vaststelling is hier dat de invloed van de uithardingstijd minder is bij hoge spanningen. Dit wil zeggen dat staven met kleine diameters voordeliger zijn als staven met grote diameters.



Figuur 17: Maximale staafdiameter i.f.v. staalspanning

Bij het opstellen van de tabellen is er vastgesteld dat de effectieve treksterkte van het beton niet lineair evenredig lijkt te zijn met de maximale staafdiameter. In de "NBN EN

1992-1-1" en de "NBN EN 1992-3" wordt er in de aanpassingsformules van uitgegaan dat de treksterkte van beton wel lineair evenredig is met de maximale staafdiameter. Dit moet verder onderzocht worden.

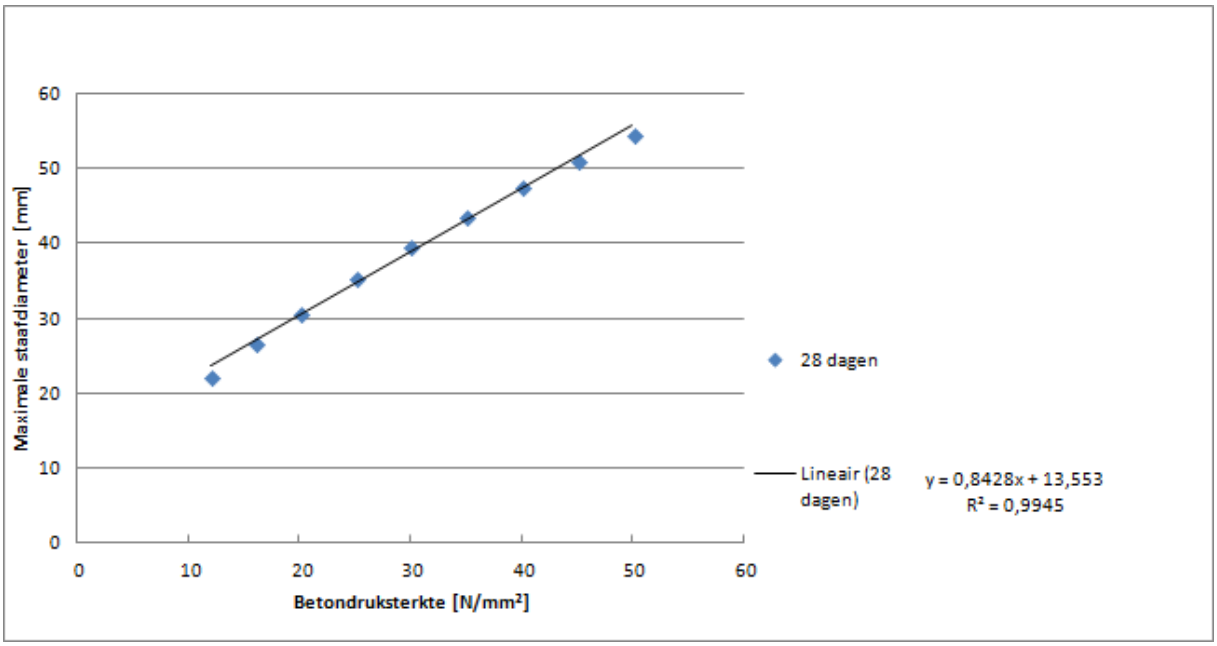
De effectieve treksterkte wordt bepaald door de betondruksterkte. Nu wordt onderzocht wat het verband is tussen de verschillende betondruksterktes en de maximum staafdiameter. De vraag is nu: kan het verband benaderd worden door een rechte? Als het antwoord 'ja' is, betekend dit dat de betontreksterkte in de aanpassingsformule behouden kan worden. Als dit niet het geval is moet er gewerkt worden met een veelterm benadering.

Bij het bepalen van de betontreksterkte wordt er gewerkt met 2 formules. Deze zijn terug te vinden in "Bijlage 1: Sterkte- en vervormingeigenschappen voor beton".

$$f_{ctm} = 0{,}30\, {f_{ck}}^{2/3} \leq C50/60$$

$$f_{ctm} = 2{,}12\, ln\left(1 + \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)\right) > C50/60$$

Omdat er twee formules gebruikt worden, wordt er best één deel onderzocht. Er wordt nu het deel onderzocht kleiner dan C50/60.

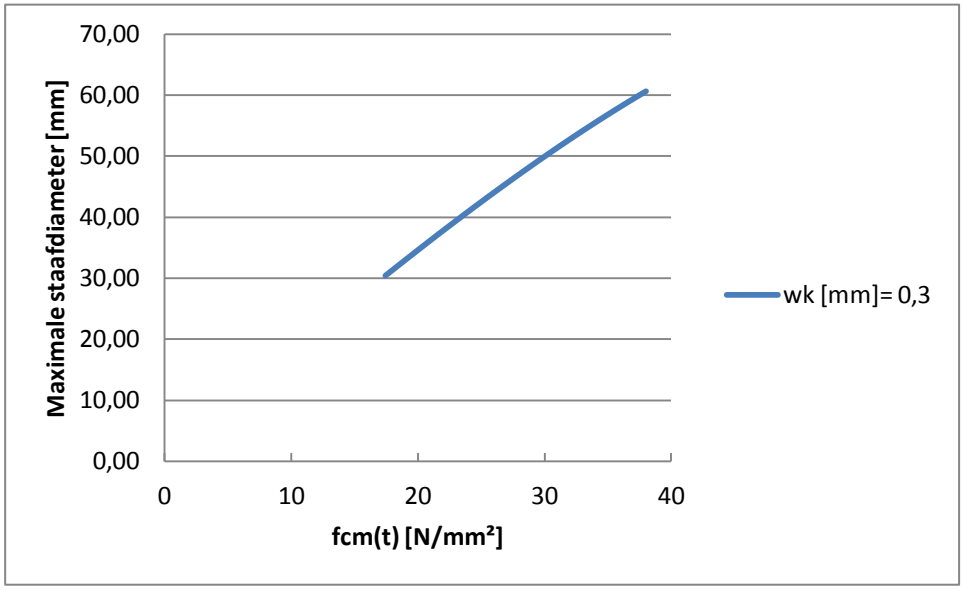


Figuur 18: Verschillende betondruksterkte

Er wordt vastgesteld dat een lineaire benadering een goede benadering is. Er zal van worden uitgegaan dat het verband tussen de betondruktsterkte en maximale staafdiameter recht evenredig is, zodat de treksterkte van het beton mag aangepast worden doormiddel van een aanpassingsformule. Zo blijft de complexiteit van berekening beperkt.

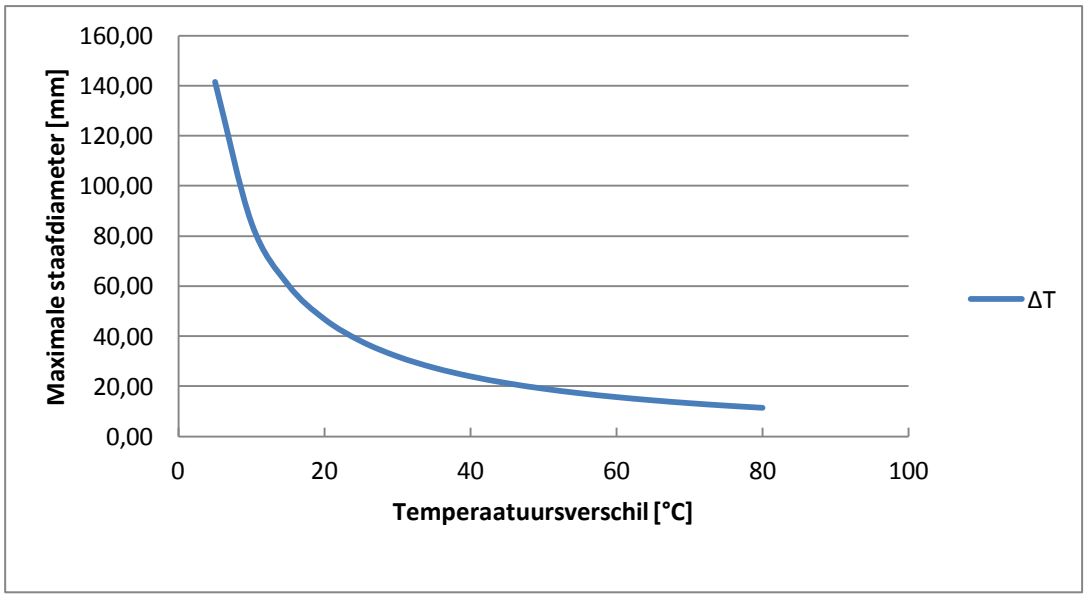
3.4 Geval b: beschrijving parameters

In "Figuur 19: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd" is duidelijk te zien dat de grafiek dezelfde vorm heeft als deze bij geval a. Hoe minder sterk het beton hoe kleiner de maximum staafdiameter moet zijn. Het verschil van beide gevallen zit in de berekening van de rek. De scheurafstand wordt met dezelfde formule bepaald. Er wordt vastgesteld dat "formule 2.16" invloed heeft op de maximale staafdiameter.



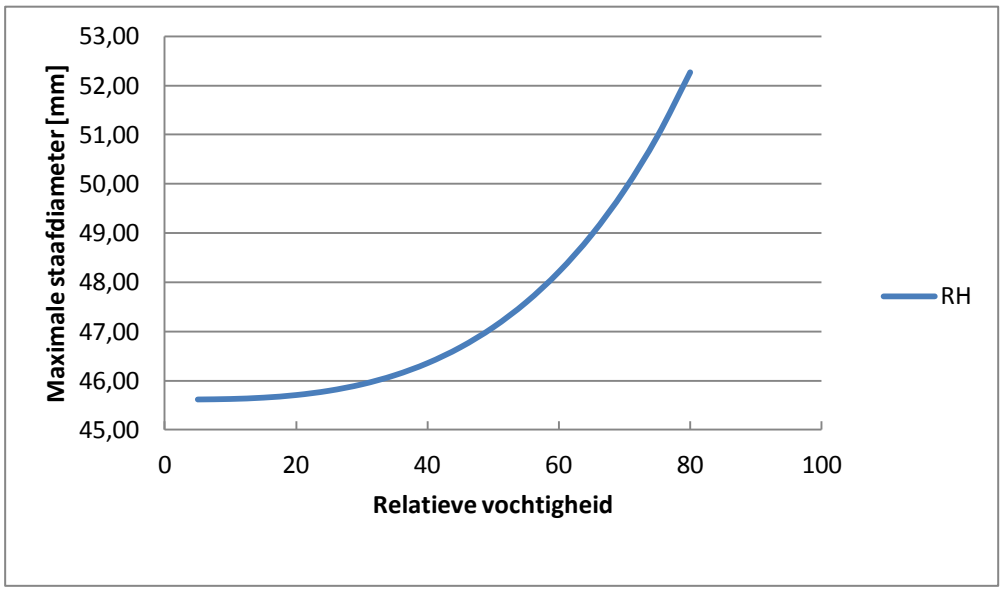
Figuur 19: Maximum staafdiameter i.f.v. betondruksterkte in de tijd

In "Figuur 20: Invloed van temperatuur op maximale staafdiameter" is duidelijk te zien dat het temperatuursverschil een zeer grote invloed heeft op de maximale staafdiameter. Hoe groter het temperatuursverschil, hoe kleiner de maximale staafdiameter moet zijn. Bij kleine temperatuursverschillen is de invloed juist groter op de maximale staafdiameter. Tussen een temperatuursverschil van 15 °C en 40°C, heeft een kleine afwijking hier zeer grote gevolgen voor de maximale staafdiameter. Er moet rekening gehouden worden met de constructieve schikking. Dit betekend best geen staafdiameters groter dan 32 mm gebruiken.



Figuur 20: Invloed van temperatuur op maximale staafdiameter

In "Figuur 21: Invloed van de relatieve vochtigheid op de maximale staafdiameter" is duidelijk te zien dat de relatieve vochtigheid een parameter is met invloed. Hoe lager de relatieve vochtigheid, hoe kleiner de maximale staafdiameter mag zijn. Hoe hoger de relatieve vochtigheid, hoe groter de maximale staafdiameter mag zijn. Aangezien het water minder snel verdampt bij een hoge relatieve vochtigheid, heeft dit een positief effect op de beheersing van de scheurwijdte. De relatieve vochtigheid kan best zo hoog mogelijk zijn. De invloed van de relatieve vochtigheid neemt ook af naarmate het temperatuursverschil groter wordt. Dit komt doordat een groot temperatuursverschil een groot rekverschil veroorzaakt, waardoor de invloed van andere parameters kleiner wordt. In de figuur wordt er gewerkt met een temperatuursverschil van 15 °C. Daarom liggen de waarden van de maximum staafdiameter zo hoog, maar zo wordt wel het positieve effect voor de relatieve vochtigheid duidelijk weergegeven.

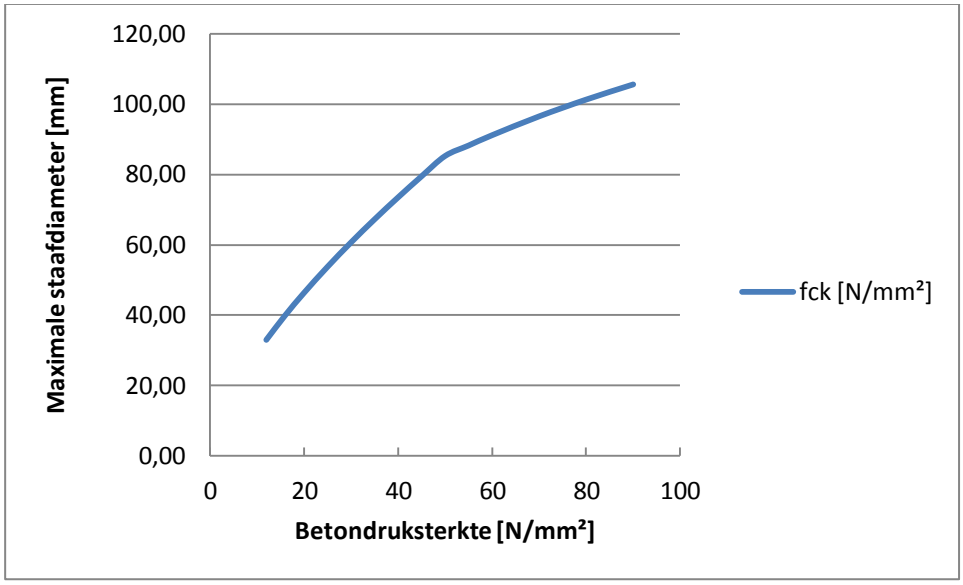


Figuur 21: Invloed van de relatieve vochtigheid op de maximale staafdiameter

Er zijn parameters met veel of met weinig invloed. Dit kan ook worden aangetoond met "formule 3.16". Hier staat de scheurwijdte in de teller. In de noemer staat dan de verhinderingsgraad maal de rek indien het element volledig vrij zou kunnen bewegen. De rek bestaat uit een optelling van de rekverandering ten gevolge van temperatuurs-, autogene- en uitdrogingskrimp effecten. De rek, te wijten aan temperatuurseffecten, kan veel groter worden als deze van autogene krimp en uitdrogingskrimp. Hierdoor zullen parameters die nodig zijn voor de berekening van autogene krimp en uitdrogingskrimp veel minder invloed hebben. Als het temperatuursverschil groter wordt zal de invloed van de andere parameters nog meer dalen.

$$\emptyset = (w_k/R_{ax}.(\varepsilon_{tree}) - k_3.c).\frac{\frac{k_c.k.f_{ct,eff}}{\sigma_s}}{k_1.k_2.k_4.\emptyset}$$

In onderstaande "Figuur 22: Invloed van verschillende betondruksterkten" is er duidelijk een overgang op te merken van de berekeningswijze voor de trekspanning van beton. Deze overgang treedt op bij een beton van C50/60. Na onderzoek wordt er weer vastgesteld dat er een lineair verloop is, zoals bij symmetrische belemmering.



Figuur 22: Invloed van verschillende betondruksterkten

- Parameters met beperkte invloed:

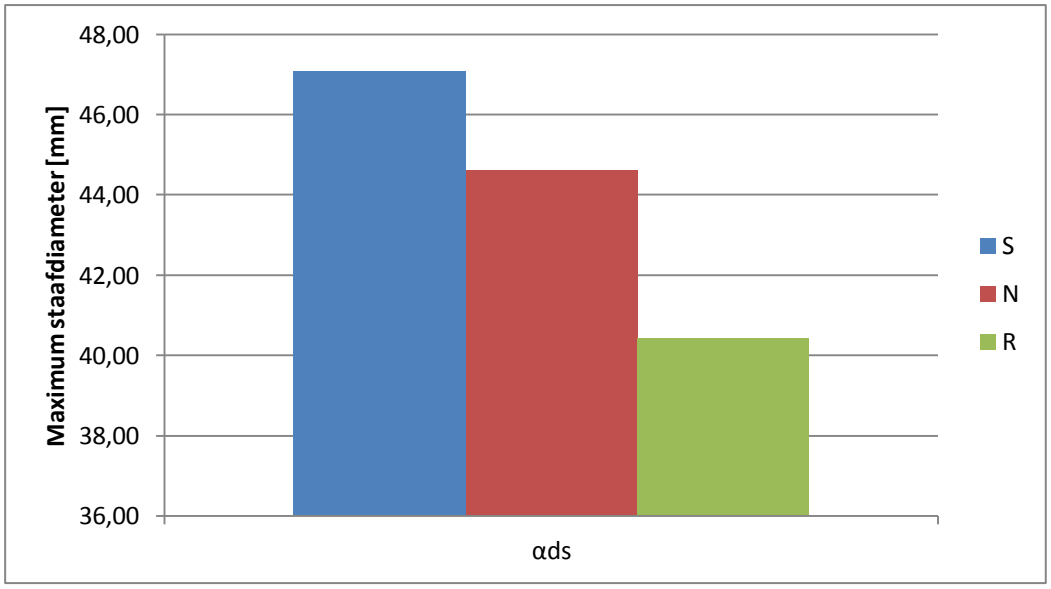
Om de invloed van deze parameters duidelijk te maken, moet de relatieve vochtigheid en het temperatuursverschil laag genoeg zijn. Anders zullen deze parameters geen merkbare invloed hebben. In "Tabel 11: Aangepaste parameters" zijn de waarden voor de relatieve vochtigheid en het temperatuursverschil terug te vinden die gebruikt zijn om de invloeden te bepalen.

Tabel 11: Aangepaste parameters

RH=	50,00	%
ΔT=	15	°C
spanning=	200	N/mm²
w_k [mm]=	0,3	mm

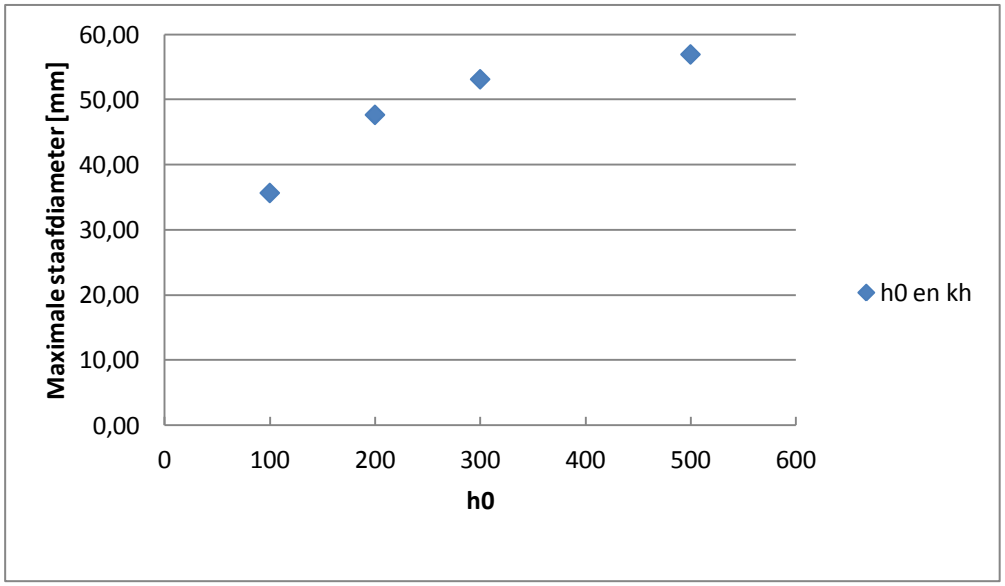
De parameters die nu besproken zullen worden zijn de cementklasse, de fictieve dikte van de dwarsdoorsnede en het einde van de nabehandeling van het beton.

In onderstaande figuur wordt de invloed van de cementklasse weergegeven. Deze invloed is zeer beperkt. De maximale staaldiameter mag best niet groter zijn dan 32 mm, waardoor de cementklasse bij een scheurwijdte beperking van 0,3 mm geen invloed heeft. Als deze scheurwijdte beperking kleiner wordt of de spanning hoger, is het wel mogelijk dat de maximale staafdiameter kleiner wordt dan 32 mm.



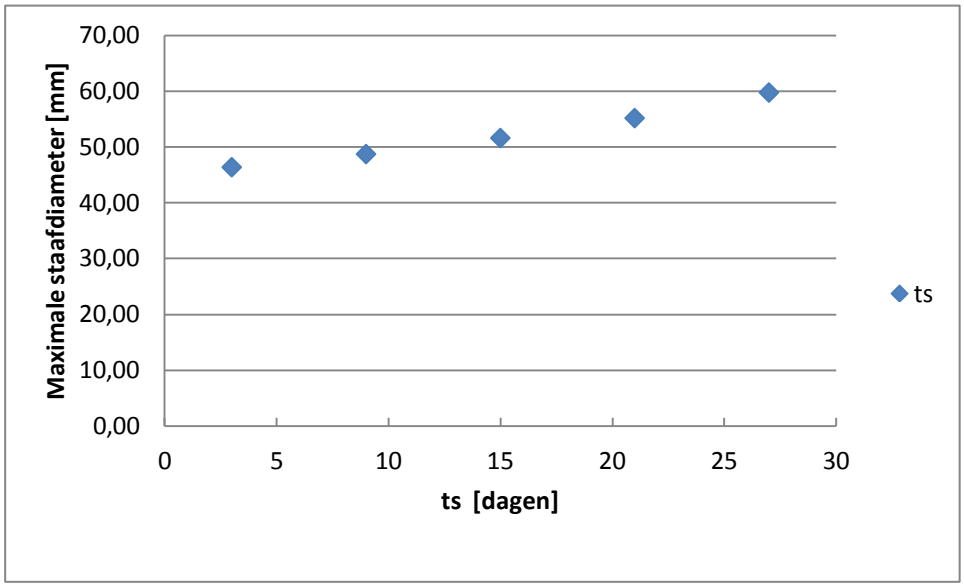
Figuur 23: Invloed cementklasse

Bij "Figuur 24: Invloed fictieve dikte van de dwarsdoorsnede" wordt er vastgesteld dat hoe dikker de fictieve dwarsdoorsnede is, hoe groter de maximale staaldiameter mag zijn. De invloed van deze parameter is beperkt.



Figuur 24: Invloed fictieve dikte van de dwarsdoorsnede

In "Figuur 25: Invloed einde van de nabehandeling" is duidelijk te zien dat hoe langer de nabehandeling duurt hoe hoger de maximale staaldiameter is. Deze invloed blijft echter ook beperkt.



Figuur 25: Invloed einde van de nabehandeling

Globaal kan er vastgesteld worden dat de invloed van deze parameters beperkt is. Deze parameters kunnen maatgevend zijn bij een binnenklimaat, maar als er dan rekening gehouden wordt met de constructieve schikking, is de invloed ook nog zeer beperkt. Bij een binnenklimaat zijn de relatieve vochtigheid en het temperatuursverschil beperkt.

Als het temperatuursverschil groot (60 °C) is, zijn zowel de cementklasse als de fictieve dikte en het einde van de nabehandeling zo goed als verwaarloosbaar. Het is dan niet meer noodzakelijk om deze uit te rekenen.

3.5 Aanpassingsformule

In de "NBN EN 1992-3 NL" en de "NBN EN 1992-1-1" wordt gebruik gemaakt van aanpassingsformules voor de berekening van de minimumwapening. Voor het opstellen van de aanpassingsformule voor het ontwerpprotocol wordt er gestart met "formule 2.40"

$$\phi_s = \phi^*_s \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) \frac{h}{10\,(h-d)}$$

Zoals al besproken in de voorgaande paragrafen heeft $f_{ct,eff}$ een lineair verloop met de maximale staafdiameter. De aanpassingsformule uit de "NBN EN 1992-1-1" blijft behouden. Voor symmetrische belemmering onderhevig aan zuivere trek wordt onderstaande formule gebruikt. De parameters k_2 en k_c worden toegevoegd bij de aanpassingsformule voor buiging, deze zijn verschillend voor buiging en trek.

$$\phi_s = \phi^*_s \cdot \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) \cdot \frac{h}{10\,(h-d)} \qquad \textit{formule 3.17}$$

Voor symmetrische belemmering onderhevig aan buiging wordt onderstaande formule gebruikt. Dan worden er andere waarden voor k_2 en k_c gebruikt. Buiging kan zich voordoen, wanneer een balk bovenaan blootgesteld is aan een temperatuursstijging en onderaan aan een temperatuursdaling.

$$\phi_s = \phi^*_s \cdot \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) \cdot \frac{h}{10.(h-d)} \frac{1}{k_2} \cdot \frac{k_c}{1} \qquad \textit{formule 3.18}$$

Voor asymmetrische belemmering valt het gedeelte van h en d weg. Het gaat hier over een wand. Aangezien dat de verhinderingsgraad evenredig is met de maximale staafdiameter, kan deze ook in de formule geïmplementeerd worden. Zo kunnen er op een eenvoudige manier ook andere verhinderingsgevallen berekend worden.

$$\phi_s = \phi^*_s \cdot \left(\frac{f_{ct,eff}}{2{,}9}\right) \cdot \frac{0{,}5}{R_{ax}} \qquad \textit{formule 3.19}$$

3.6 Besluit

Het vertrekpunt voor het opstellen van het ontwerpprotocol was het opmaken van de globale formules voor symmetrische en asymmetrische belemmering. Met deze globale formules kan de maximale staafdiameter bepaald worden in functie van de staalspanning en de scheurwijdte.

Na het opmaken van de formules werden de invloeden van de parameters bepaald. Hieruit werd dan afgeleid of bepaalde parameters veel invloed hadden of dat deze weinig invloed hadden.

Er werden ook verschillende tabellen opgemaakt, omdat niet alle parameters aanpasbaar waren met de aanpassingsformule. Voor symmetrische belemmering zijn er tabellen opgemaakt voor verschillende uithardingstijden van beton en voor asymmetrische belemmering zijn er enkele tabellen opgemaakt voor verschillende temperatuursverschillen (zie “Bijlage 4: Tabellen ontwerpprotocol”).

Nu dat het ontwerpprotocol is opgemaakt, kan de werking ervan aangetoond worden met enkele voorbeelden.

4 VOORBEELDEN

Aan de hand van voorbeeldoefeningen, worden de mogelijkheden van het ontwerpprotocol afgetoetst. Eenmaal het voorbeeld is gemaakt, wordt dit ook vergeleken met de methode van de minimumwapening volgens de 'NBN EN 1992-1-1".

Hier wordt er duidelijk gemaakt of het nieuwe ontwerpprotocol voordelen heeft of met andere woorden: is het onderzoek al dan niet geslaagd.

Ook de nauwkeurigheid wordt getest. Dit wordt gedaan door eerst gebruikt te maken van het nieuwe ontwerpprotocol en daarna een directe berekening op te maken of een tabel op te stellen voor dat specifieke geval. Vooraleer van start te gaan met de voorbeelden kan "Bijlage 5: Flowchart" bekeken worden. Hierin wordt weergegeven wanneer welke methode gebruikt moet worden.

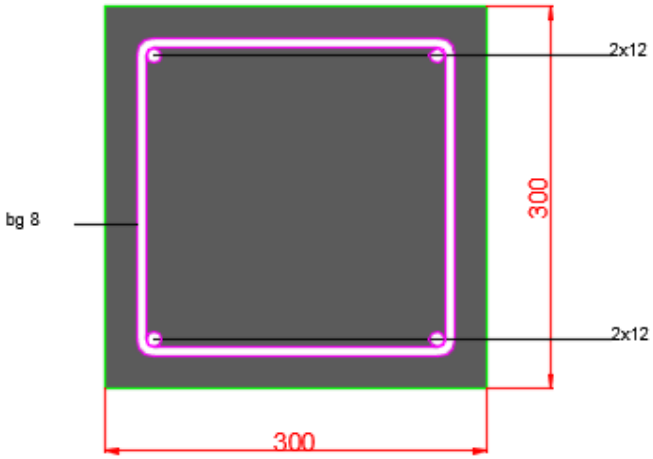
4.1 Voorbeeld 1: balk ingeklemd aan zijn uiteinden

Gegeven:

Het voorbeeld heeft een vierkante doorsnede. Zie onderstaande tabel voor gegevens. Zowel boven- als onderaan bevinden zich twee staven met diameter 12 mm.

Tabel 12: Gegevens voorbeeld 1

beugel	ϕ_b	8	mm
diameter wapening	ϕ_s	12	mm
minimum betondekking voor de scheurwijdte	c	25	mm
betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm²
gemiddelde waarde druksterkte beton	f_{cm}	38	N/mm²
staalkwaliteit	f_{yk}	500	N/mm²
elasticiteitsmodulus staal	E_s	200000	N/mm²
elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	32837	N/mm²
hoogte van de doorsnede	h	300	mm
breedte van de doorsnede	b	300	mm
afstand getrokken rand tot zwpt wap As1	d_1	39,0	mm
nuttige hoogte	d	261,0	mm
trekwapening	A_{s1}	226	mm^2
drukwapening	A_{s2}	226	mm^2
coëfficiënt k	k	1	
coëfficiënt k_1	k_1	0,8	
coëfficiënt k_2	k_2	1	trek
coëfficiënt k_3	k_3	3,4	
coëfficiënt k_4	k_4	0,425	
coëfficiënt k_c	k_c	1	trek



Figuur 26: Voorbeeld 1

Gevraagd:

Controleer of een balk die belast is op zuivere trek voldoet aan een scheurbeheersing van 0,3 mm bij symmetrische belemmerde vervorming (geval A).

Oplossing:

- Berekening volgens "NBN EN 1992-1-1":

Nu moet "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]" aangepast worden met aanpassingsformule "formule 2.11".

Tabel 13: Maximale staafdiameter aangepast

Staalspanning	wk [mm]=	0,4	wk [mm]=	0,3
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp
160	40		32	30,73
200	32		25	24,01
240	20		16	15,37
280	16		12	11,52
320	12		10	9,60
360	10		8	7,68
400	8		6	5,76
450	6		5	4,80

Uit de "Tabel 13: Maximale staafdiameter aangepast" wordt dan de staalspanning bepaald.

$$\sigma_s = 275{,}05\ N/mm^2$$

Als de staalspanning gekend is, wordt met "formule 2.2" de minimum wapening bepaald.

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 947{,}77\ mm^2 < \sout{452\ mm^2}$$

Volgens de berekening van "NBN EN 1992-1-1" voldoet de wapeningshoeveelheid niet.

- Berekening volgens opgesteld ontwerpprotocol:

Nu moet de tabel voor geval a voor beton van 28 dagen oud aangepast worden met de aanpassingsformule "formule 3.17"

Tabel 14: Maximale staafdiameter aangepast

Staalspanning	wk [mm]=	0,4	wk [mm]=	0,3
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp
160	87		63	48,31
200	55		40	30,52
240	38		27	20,77
280	28		19	14,87
320	21		14	11,06
360	16		11	8,46
400	13		9	6,62
450	10		6	4,99

Uit de "Tabel 14: Maximale staafdiameter aangepast" wordt dan de staalspanning bepaald.

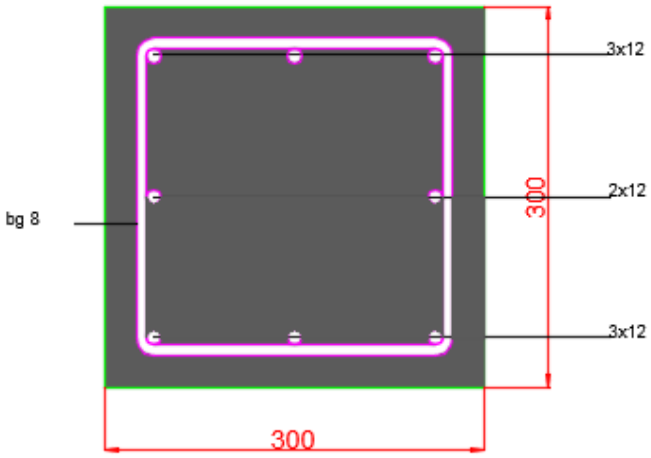
$$\sigma_s = 310{,}16\ N/mm^2$$

Als de staalspanning gekend is, wordt met "formule 2.2" de minimum wapening bepaald.

$$A_{s,min} = k_c.k.f_{ct,eff}.\frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 840{,}49\ mm^2 < \sout{452\ mm^2}$$

De wapeningshoeveelheid voldoet volgens het ontwerpprotocol niet. Er moet extra wapening voorzien worden. Er worden nu 8 staven met diameter 12 voorzien. Dit geeft een nieuwe wapeningssectie van.

$$A_s = 904{,}78\ mm^2$$

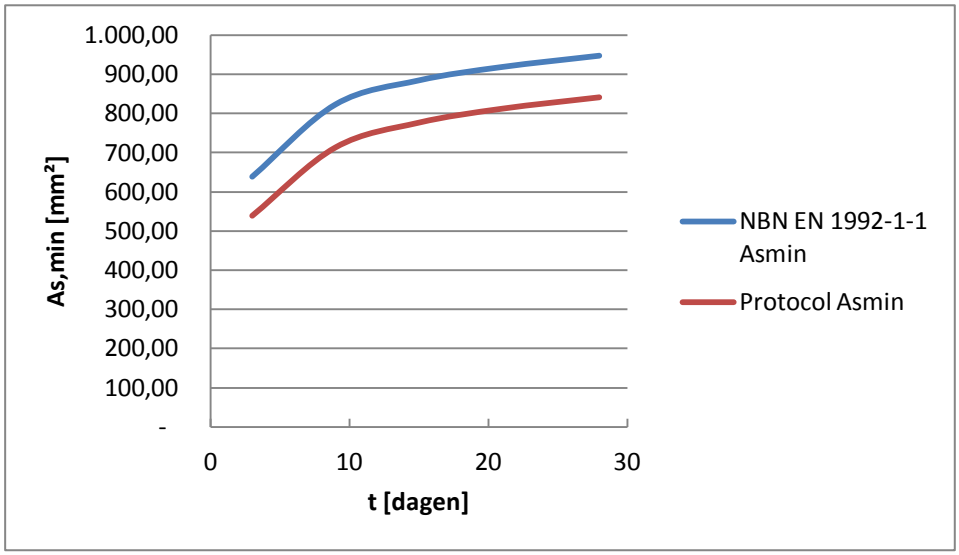


Figuur 27: Oplossing voorbeeld 1

Het valt wel op dat er bij de berekening volgens het ontwerpprotocol er een kleinere wapeningssectie noodzakelijk is.

Dit voorbeeld wordt nu verder onderzocht. Wat is het verschil tussen de "NBN EN 1992-1-1" en het protocol als de ouderdom van beton wordt aangepast.

Als het protocol gevolgd wordt (zie "Figuur 28: Vergelijking protocol en NBN EN 1992-1-1"), is er minder wapening noodzakelijk om aan de scheurbeheersing te voldoen. De berekening start bij beton van 3 dagen oud, omdat vanaf hier de autogene- en de uitdrogingskrimp kunnen optreden.



Figuur 28: Vergelijking protocol en NBN EN 1992-1-1

In de voorgaande paragrafen is al gezegd dat de maximaal toelaatbare staafdiameter kleiner wordt naarmate het beton jonger is. Er wordt niet verwacht dat de uitgerekende staaldoorsnede kleiner wordt. Dit is echter wel het geval, aangezien de effectieve treksterkte van beton in de teller staat van de formule voor de minimumwapening en deze kleiner is bij jong beton.

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

4.2 Voorbeeld 2: wand gestort op uitgeharde plaat

Gegeven:

Nu wordt er een voorbeeld oefening gemaakt van geval b. Er wordt een wand van 20 cm dik en 3 meter hoog op een bestaande betonnen vloer gestort in een buitenmilieu (nachtstraling wordt mee in rekening gebracht). Voor bepaling van het temperatuursverschil zie "2.2.6 Invloed van temperatuur".

$$\Delta T = 38 - (-21 - 8) = 67\,°C \approx 70\,°C$$

In de onderstaande tabel worden de gegevens opgelijst.

Tabel 15: Gegevens voorbeeld 2

scheurwijdte	w_k	0,3	mm
temperatuursverschil	ΔT	70	°C
tijd	t	28	dagen
relatieve vochtigheid	RH	40	%
einde nabehandeling	ts	10	dagen
uitzettingscoëfficiënt van beton	α_c	0,000012	K^{-1}
maximale scheurwijdte	w_k	0,3	mm
lengte	l	1000	mm
betonkwaliteit	f_{ck}	30	N/mm²
gemiddelde waarde druksterkte beton	f_{cm}	38	N/mm²
staalkwaliteit	f_{yk}	500	N/mm²
elasticiteitsmodulus staal	E_s	200000	N/mm²
elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	32836,57	N/mm²
hoogte van de wand		3000	mm
dikte van de wand		200	mm
betondekking	c	25	mm
maas afstand		150	mm
diameter wapening	ϕ_s	12	mm
treksterkte beton	f_{ctm}	2,90	N/mm²
coëfficiënt k_1	k_1	0,8	
coëfficiënt k_2	k_2	0,5	
coëfficiënt k_3	k_3	3,4	
coëfficiënt k_4	k_4	0,425	
coëfficiënt k_c	k_c	0,4	
ouderdom van het beton	t	28	dagen
ouderdom van het beton aan het begin van de uitdrogingskrimp	t_s	5	dagen
coëfficiënt k	k	0,65	
relatieve vochtigheid	RH	40,00	%
vervormingsverhinderingsfactor	R_{ax}	0,50	
coëfficiënt cementsoort	α_{ds1}	3	
coëfficiënt cementsoort	α_{ds2}	0,13	
fictieve dikte van de dwarsdoorsnede	h_0	193	mm
coëfficiënt fictieve dikte	k_h	0,86	
wapening	A_s	753,98	mm²/m

Gevraagd:

Bereken $A_{s,min}$ volgens "NBN EN 1992-1-1" en via het ontwerpprotocol bij een scheurbeheersingseis van 0,3 mm.

Oplossing:

- Berekening volgens "NBN EN 1992-1-1":

Nu moet "Tabel 2: Maximale staafdiameter voor scheurbeheersing [3]" aangepast worden met aanpassingsformule "formule 2.11".

Tabel 16: Maximale staafdiameter aangepast

Staalspanning	wk [mm]=	0,4	wk [mm]=	0,3
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp
160	40		32	32,00
200	32		25	25,00
240	20		16	16,00
280	16		12	12,00
320	12		10	10,00
360	10		8	8,00
400	8		6	6,00
450	6		5	5,00

Uit de "Tabel 16: Maximale staafdiameter aangepast" wordt dan de staalspanning bepaald.

$$\sigma_s = 280\ N/mm^2$$

Als de staalspanning gekend is, wordt met "formule 2.2" de minimum wapening bepaald per meter.

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s . 3} = 537{,}92 \frac{mm^2}{m} < 753{,}98 \frac{mm^2}{m}$$

Volgens de berekening van "NBN EN 1992-1-1" voldoet de wapeningshoeveelheid.

- Berekening volgens opgesteld ontwerpprotocol:

Nu moet de tabel voor geval b voor beton van 28 dagen oud en RH van 40% aangepast worden met aanpassingsformule "formule 3.19". De parameters van het voorbeeld zijn dezelfde als de gebaseerde waarden uit de tabellen. De aanpassingsformule heeft hierdoor geen verandering teweeggebracht.

Tabel 17: Maximale staafdiameter

Staalspann	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	70	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	70
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	21	21	22	22	23	15	15	16	16	17
200	17	17	17	18	18	12	12	12	13	13
240	14	14	14	15	15	10	10	10	11	11
280	12	12	12	13	13	9	9	9	9	10
320	11	11	11	11	12	8	8	8	8	8
360	9	9	10	10	10	7	7	7	7	7
400	8	9	9	9	9	6	6	6	6	7
450	8	8	8	8	8	5	5	6	6	6

Uit de "Tabel 17: Maximale staafdiameter" wordt dan de staalspanning bepaald.

$$\sigma_s = 206{,}30\ N/mm^2$$

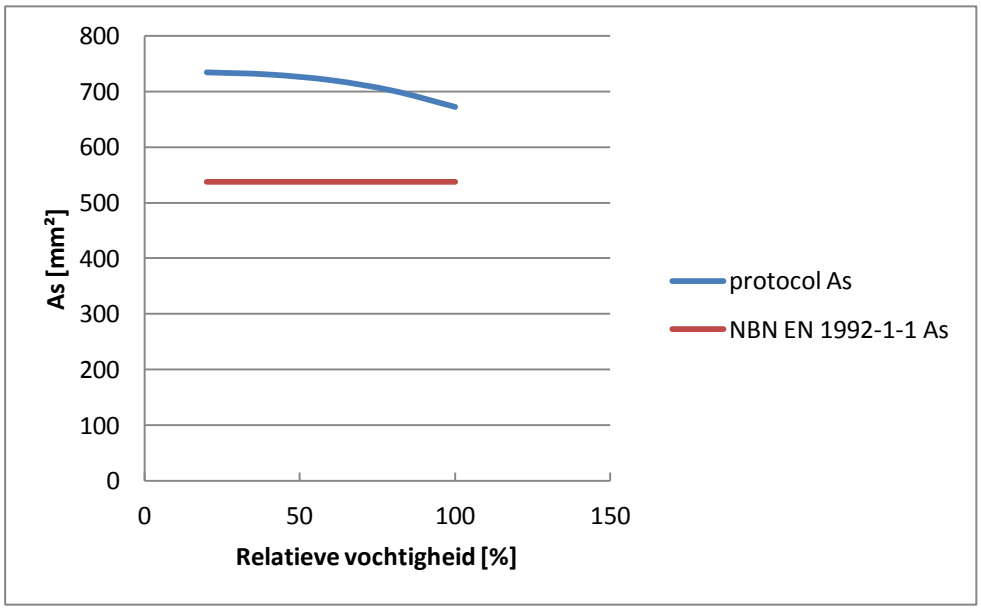
Als de staalspanning gekend is, wordt met "formule 2.2" de minimum wapening berekend per meter.

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s . 3} = 730{,}10 \frac{mm^2}{m} < 753{,}98 \frac{mm^2}{m}$$

De wapeningshoeveelheid voldoet volgens het ontwerpprotocol. Het is opvallend dat er bij de berekening volgens het ontwerpprotocol er een grotere wapeningssectie noodzakelijk is in vergelijking met NBN EN 1992-1-1.

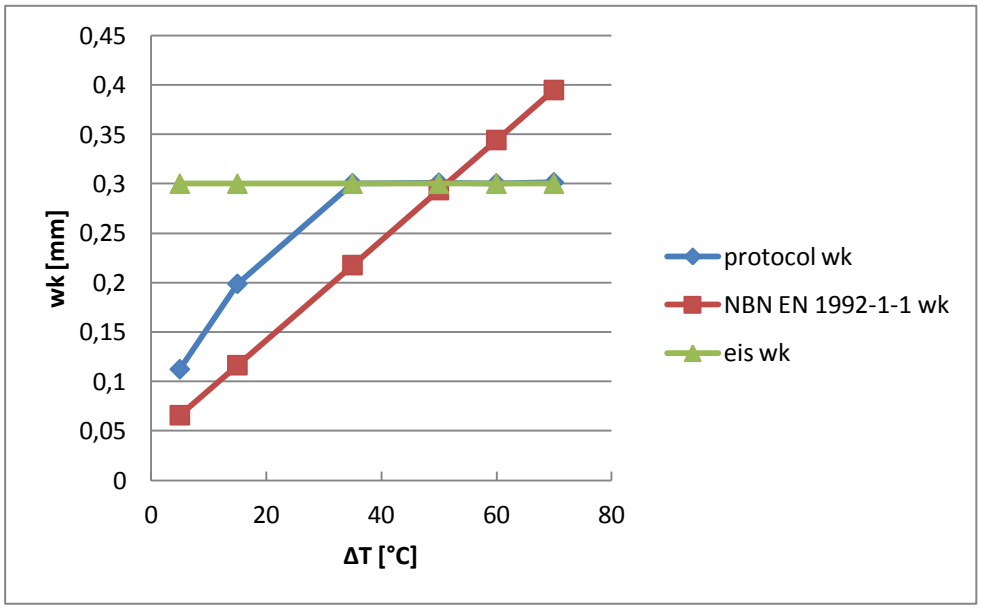
Dit voorbeeld wordt nu nader onderzocht. De oorzaak waarom de wapeningsectie bij het protocol groter is dan bij de "NBN EN 1992-1-1" moet gekend zijn. Wat is het verschil tussen de "NBN EN 1992-1-1" en het protocol als de relatieve vochtigheid en het temperatuursverschil worden aangepast en wat betekend dit voor de scheurwijdte.

Voorbeeld 2 wordt verder onderzocht. De relatieve vochtigheid wordt aangepast. Bij de methode van de minimumwapening volgens de "NBN EN 1992-1-1", wordt er geen rekening gehouden met de relatieve vochtigheid. Het opgestelde ontwerpprotocol houdt wel rekening met de relatieve vochtigheid. Voor vaststelling zie onderstaande figuur. Een hoge relatieve vochtigheid heeft een positief effect op de hoeveelheid wapening.



Figuur 29: Aanpassen RV

Nu wordt het temperatuursverschil aangepast en een minimumwapening berekening gemaakt bij elk temperatuursverschil. Met deze wapeningssectie wordt dan de scheurwijdte berekend volgens de methode van "2.3 Toelichting methoden voor opgelegde vervorming". In "Figuur 30: Berekende scheurwijdte" wordt er vastgesteld dat zowel bij de methode van de "NBN EN 1992-1-1" als bij het opgestelde ontwerpprotocol de wapeningssectie in het begin wordt overschat. Bij het protocol is dit omdat er gewerkt moest worden met diameter 12 mm. Deze diameter is bij lage temperatuursverschillen niet terug te vinden in de tabel van het ontwerpprotocol (zie Bijlage 4.2: Geval b). Dit komt omdat de staalspanning beperkt is tot 500 N/mm².



Figuur 30: Berekende scheurwijdte

De methode van de "NBN EN 1992-1-1" houdt geen rekening met het temperatuursverschil, dus hier kan maar één wapeningsectie berekend worden. Na een verdere toename van het temperatuursverschil, wordt de wapeningssectie niet meer overschat bij het protocol. Bij de "NBN EN 1992-1-1" wordt niet meer aan de scheurwijdte beperking voldaan bij hoge temperatuursverschillen.

Het probleem van de overschatting bij het protocol kan opgelost worden door de wapeningsdiameter te verhogen. Bij de "NBN EN 1992-1-1" kan dit niet worden opgelost.

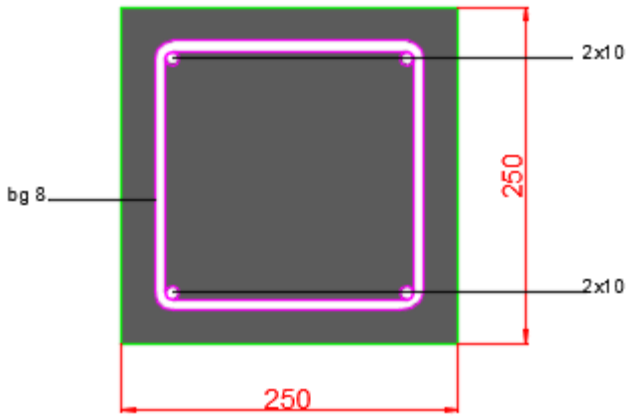
4.3 Voorbeeld 3: andere betonsterkte

Gegeven:

Het voorbeeld heeft een vierkante doorsnede met afmeting van 250 mm. Zie onderstaande tabel voor gegevens. Zowel boven- als onderaan zitten twee staven met diameter 10 mm.

Tabel 18: Gegevens voorbeeld 3

beugel	ϕ_b	8	mm
diameter wapening	ϕ_s	10	mm
minimum betondekking voor de scheurwijdte	c	25	mm
betonkwaliteit	f_{ck}	50	N/mm²
gemiddelde waarde druksterkte beton	f_{cm}	58	N/mm²
staalkwaliteit	f_{yk}	500	N/mm²
elasticiteitsmodulus staal	E_s	200000	N/mm²
elasticiteitsmodulus beton	E_{cm}	37278	N/mm²
hoogte van de doorsnede	h	250	mm
breedte van de doorsnede	b	250	mm
afstand getrokken rand tot zwpt wap As1	d_1	38,0	mm
nuttige hoogte	d	212,0	mm
wapening	As1	157	mm2
wapening	As2	157	mm2
treksterkte van beton	f_{ctm}	4,07	N/mm²
coëfficiënt k	k	1	
coëfficiënt k_1	k_1	0,8	
coëfficiënt k_2	k_2	0,5	buiging
coëfficiënt k_3	k_3	3,4	
coëfficiënt k_4	k_4	0,425	
coëfficiënt k_c	k_c	0,4	buiging



Figuur 31: Voordbeeld 3

Gevraagd:

Bepaal $A_{s,min}$ voor verhinderde vervorming zonder gebruik te maken van een directe berekening van de scheurwijdte. De balk is onderhevig aan zuiver trek en de scheurwijdte beperking is 0,2 mm.

Oplossing:

De waarden van "Tabel 8: Maximale staafdiameter symmetrische belemmering" worden gebruikt bij een scheurwijdte van 0,2 mm. Deze waarden voor de maximum staafdiameter worden dan aangepast met "formule 3.17".

Tabel 19: Maximale staafdiameter aangepast

Staalspanning	wk [mm]=	0,2
[N/mm²]	model 0,2	afr
160	39	35,94
200	24	22,24
240	16	14,79
280	11	10,33
320	8	7,47
360	6	5,55
400	5	4,19
450	3	3,01

Uit de "Tabel 19: Maximale staafdiameter aangepast" wordt dan de staalspanning bepaald.

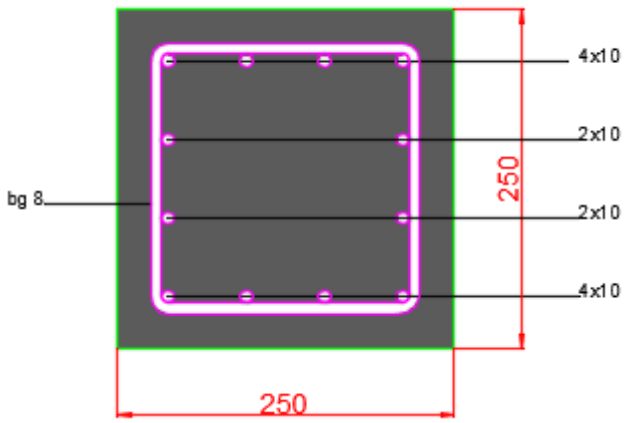
$$\sigma_s = 284{,}61\ N/mm^2$$

Als de staalspanning gekend is wordt met "formule 2.2" de minimum wapening bepaald.

$$A_{s,min} = k_c . k . f_{ct,eff} . \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 894{,}11\ mm^2 \ < \sout{314\ mm^2}$$

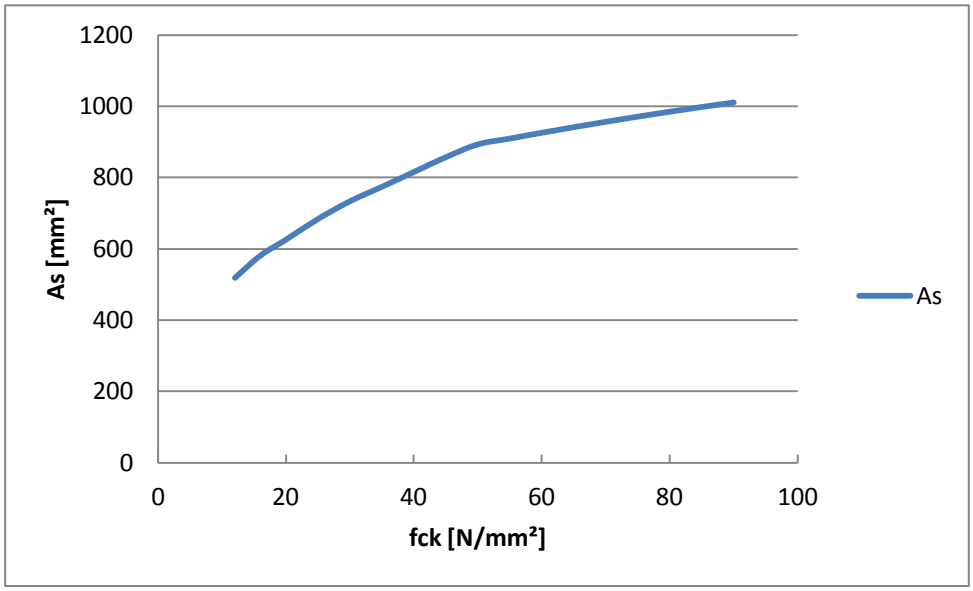
Volgens de berekening van het protocol voldoet de wapeningshoeveelheid niet. Hier is extra wapening vereist. In plaatst van 4 staven worden er nu 12 staven voorzien met een diameter van 10 mm. Dit geeft volgende wapeningssectie.

$$A_s = 942{,}48\ mm^2$$



Figuur 32: Oplossing voorbeeld 3

Dit voorbeeld wordt verder onderzocht door de $A_{s,min}$ voor verschillende betondruksterktes te bepalen. In onderstaande figuur is het verloop van de minimumwapening weergegeven. Hoe hoger de betondruksterkte hoe meer wapening voorzien moet worden om de scheurwijdte te beheersen.



Figuur 33: Minimumwapening voor verschillende betondruksterktes

Dit is een belangrijke vaststelling. Een verhoging van de betondruksterkte heeft ook negatieve gevolgen, er moet meer minimumwapening voorzien worden. Stel op een werf is er beton van een f_{ck} = 50 N/mm² over voor het storten van balken. In plaats van deze overschot weg te gooien, wordt dit op een andere plaats gebruikt waar beton van f_{ck} = 30 N/mm² voorzien was. Bij dit voorbeeld betekent dit concreet dat de minimumwapening moet verhoogd worden met 18%. Als deze wapeningsverhoging niet wordt doorgevoerd kan dit negatieve gevolgen hebben voor de scheurbeheersing.

4.4 Besluit

Aan de hand van de voorbeelden is de werking van het ontwerpprotocol verduidelijkt. Er worden ook de nodige vaststellingen gemaakt. Bij het gebruik van het opgestelde ontwerpprotocol, is er soms minder minimumwapening nodig dan bij de methode van de "NBN EN 1992-1-1", dit hoofdzakelijk voor geval a (symmetrische belemmering).
Voor geval b (asymmetrische belemmering) bij hoge temperatuursverschillen is er bij het opgestelde ontwerpprotocol meer wapening nodig dan bij de methode van de "NBN EN 1992-1-1".
Er is een grotere nauwkeurigheid bekomen door bij toepassing van het opgestelde ontwerpprotocol voor verhinderde vervorming.

Een minpunt is dat er meerdere tabellen en parameters zijn, het is essentieel de juiste tabel en parameters te gebruiken. Rekeninghoudend met de relatieve vochtigheid en het temperatuurverschil.

5 BESLUIT

Het doel van deze Masterproef was om een ontwerpprotocol op te maken voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming veroorzaakt door krimp-, kruip- en temperatuurseffecten. Het protocol hield in dat de nodige wapening voor de scheurbeheersing moest bepaald worden.

In de literatuurstudie zijn de methodes weergegeven die bruikbaar waren voor het ontwerpprotocol. Zo ligt de berekening van de minimumwapening en de scheurwijdte berekening van de "NBN EN 1992-1-1" aan de basis voor de weergave van het ontwerpprotocol bij verhinderde vervorming. De "NBN EN 1992-3" vormt het vertrekpunt van de berekeningen die nodig waren voor het opstellen van het ontwerpprotocol.

Bij het ontwerpprotocol werden er globale formules opgemaakt voor symmetrische en asymmetrische belemmering, zodat deze eenvoudig konden worden aangepast. Hierdoor werd het mogelijk om verschillende tabellen op te maken voor de maximale staafdiameter. Door deze tabellen te gebruiken kan er nauwkeuriger gewerkt worden, daar niet alle parameters aanpasbaar zijn bij gebruik van aanpassingsformules.

In het onderzoek is er aan de hand van voorbeelden vastgesteld dat er bij het ontwerpprotocol vaak minder wapening nodig is in vergelijking met de methode van de minimumwapening bij de "NBN EN 1992-1-1". Dit is vooral bij symmetrische belemmering, maar ook bij asymmetrische belemmering met een klein temperatuursverschil.
Bij asymmetrische belemmering met grote temperatuursverschillen is er meer wapening nodig bij gebruik van het ontwerpprotocol. Daarentegen bij de methode van de minimumwapening uit de "NBN EN 1992-1-1" er minder wapening nodig is, maar er wordt niet voldaan aan de scheurwijdte eis bij grote temperatuursverschillen.

In deze Masterproef was het gebruik van een aantal veronderstellingen bij de wapeningsverhoudingen en bij bepaalde parameters van beton noodzakelijk, om de niet directe berekeningen mogelijk te maken.

<u>Voorstel voor verder onderzoek:</u>

Het ontwerpprotocol is opgesteld voor verschillende scheurwijdte eisen en is gebaseerd op de karakteristieke scheurwijdte berekening. Verder onderzoek naar hoe de scheurwijdtes in de realiteit zullen zijn en hoe deze gemeten worden is noodzakelijk om het ontwerpprotocol af te toetsen. Komen de berekende scheurwijdte overeen met diegenen die gemeten worden?

LITERATUURLIJST

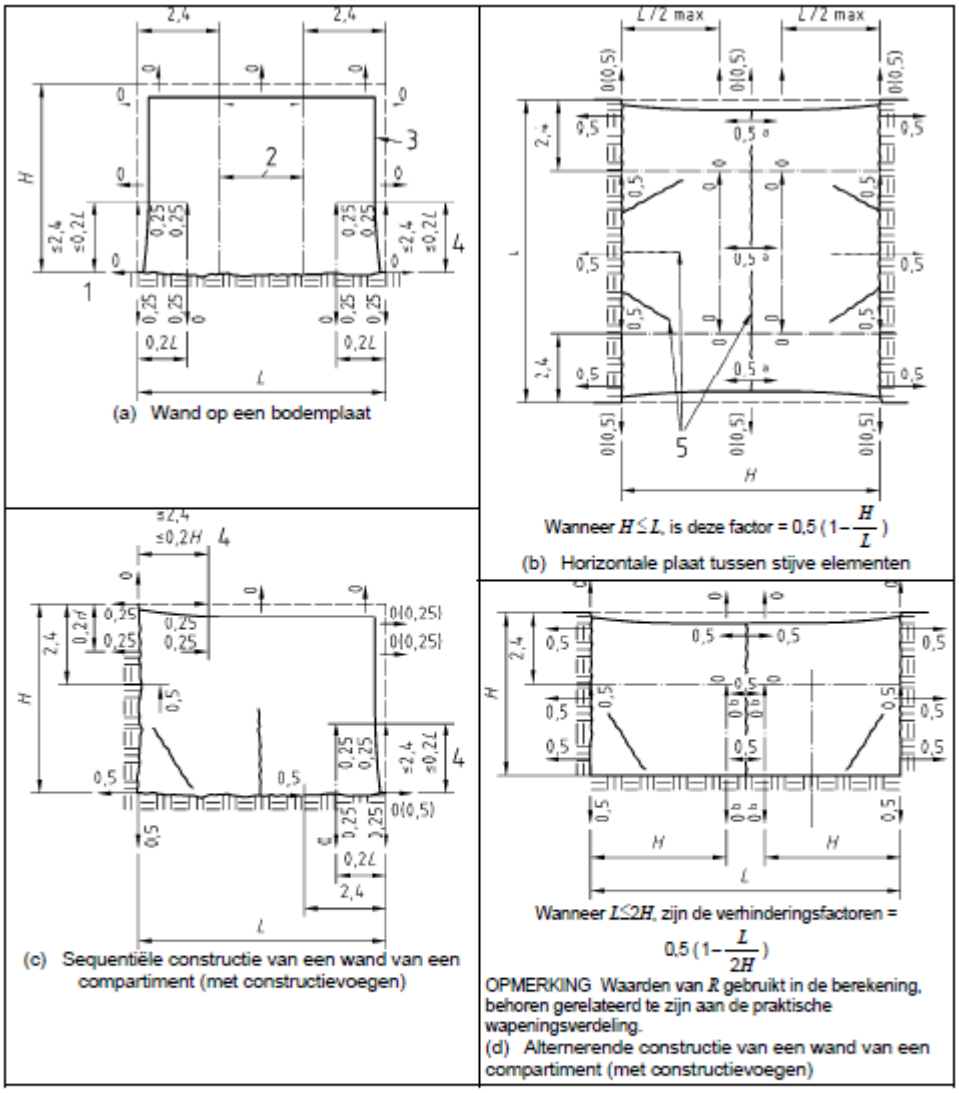
[1] TV 247. Ontwerp en uitvoering van vloeistofdichte betonconstructies. WTCB.
[2] NBN EN 1992-1-1 ANB.
[3] NBN EN 1992-1-1.
[4] NBN EN 1992-3 ANB.
[5] NBN EN 1992-3.
[6] CUR 85. "Scheurvorming door krimp en temperatuurwisselingen in wanden".
[7] K. van Breugel, "Betonconstructies onder temperatuur- en krimpvervormingen", 2006.
[8] C.R. Braam, "Ontwerpen en dimensioneren van vloeistofkerende constructies", 2001.
[9] M. van den Bosch, "Wat met scheuren in beton?" 1 oktober 2016; http://www.architectura.be/nl/nieuws/13697/wat-met-scheuren-in-beton.
[10] P. B. Bamforth, "early-age thermal crack control", 2007, pp. 30-40.
[11] Mathijs Bostyn, Frederck Demuenyck, "Invloed van de reologie op de mechanische eigenschappen van zelfverdichtend beton". Geraadpleegd 18 oktober 2016 http://lib.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/033/443/RUG01-002033443_2013_0001_AC.pdf, pp. 41-43.
[12] René Braam, "Scheurvorming volgens Eurocode 23". Artikel Cement.
[13] NBN EN 1991-1-5 NL.
[14] NBN EN 1991-1-5 ANB.

BIJLAGE

Bijlage 1: Sterkte- en vervormingeigenschappen voor beton

Sterkteklassen voor beton														Vergelijking/Verklaring
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck}+8$(MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm}=0,30\cdot f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm}=2,12\cdot\ln(1+(f_{cm}/10))$ $> C50/60$
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5	$f_{ctk;0,05} = 0,7\times f_{ctm}$ 5 % fractiel
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6	$f_{ctk;0,95} = 1,3\times f_{ctm}$ 95 % fractiel
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44	$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0,3}$ (f_{cm} in MPa)
ε_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8	zie figuur 3.2 $\varepsilon_{c1}(^0/_{00}) = 0,7\ f_{cm}^{0,31} < 2.8$
ε_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8	zie figuur 3.2 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu1}(^0/_{00})=2,8+27[(98-f_{cm})/100]^4$
ε_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2, 5	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c2}(^0/_{00})=2,0+0,085(f_{ck}-50)^{0,53}$
ε_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.3 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu2}(^0/_{00})=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4	voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $n=1,4+23,4[(90- f_{ck})/100]^4$
ε_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	zie figuur 3.4 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{c3}(^0/_{00})= 1,75+0,55[(f_{ck}-50)/40]$
ε_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6	zie figuur 3.4 voor $f_{ck} \geq 50$ MPa $\varepsilon_{cu3}(^0/_{00})=2,6+35[(90-f_{ck})/100]^4$

Bijlage 2: Verhinderingsfactoren voor typische situaties



(a) Wand op een bodemplaat

Wanneer $H \leq L$, is deze factor = $0{,}5\,(1-\frac{H}{L})$

(b) Horizontale plaat tussen stijve elementen

(c) Sequentiële constructie van een wand van een compartiment (met constructievoegen)

Wanneer $L \leq 2H$, zijn de verhinderingsfactoren = $0{,}5\,(1-\frac{L}{2H})$

OPMERKING Waarden van R gebruikt in de berekening, behoren gerelateerd te zijn aan de praktische wapeningsverdeling.

(d) Alternerende constructie van een wand van een compartiment (met constructievoegen)

Verklaring

1 Vertikale verhinderingsfactoren
2 Horizontale verhinderingsfactor (gegeven in Tabel L.1 voor dit centraal deel)
3 Uitzettingsvoegen of vrije krimpvoegen
4 (de grootste van de twee waarden)
5 Potentiële primaire scheuren

Figuur L.1 — Verhinderingsfactoren voor typische situaties

Tabel L.1 — Verhinderingsfactoren voor het centrale deel van de wanden voorgesteld in Figuur L.1

Verhouding L/H (zie Figuur L.1)	Verhinderingsfactor onderaan	Verhinderingsfactor bovenaan
1	0,5	0
2	0,5	0
3	0,5	0,05
4	0,5	0,3
> 8	0,5	0,5

Bijlage 3: Milieuklasse

Omgeving			Milieuklassen	
Klasse	Omschrijving	Voorbeelden	OB(1)	GB(2) en VB(3)
E0	Niet schadelijk		X0	Niet
EI	Binnenomgeving	Binnenkant van woningen en kantoren	X0	XC1
EE	Buitenomgeving			
EE1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens	X0	XC2
EE2	Vorst, geen contact met regen	Overdekte open parkeer-garage, kruipkelder, open doorgang in gebouw	XF1	XC3, XF1
EE3	Vorst, contact met regen	Buitenmuur, in contact met regen	XF1	XC4, XF1
EE4	Vorst en dooizouten (met ter plaatse ontdooid of opspattend of aflopend dooizouthoudend water)	Delen van weginfrastructuur	XF4	XC4, XD3, XF4
Gebruiksdomein: (1) OB = ongewapend beton (2) GB = gewapend beton (3) VB = voorgespannen beton				

Omgeving			Milieuklassen	
Klasse	Omschrijving	Voorbeelden	OB(1)	GB(2) en VB(3)
ES	Zeeomgeving			
	Geen contact met zeewater;	*wel contact met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of brak water*		
ES1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens in contact met brak water	XA1	XC2, XS2, XA1
ES2	Vorst	Buitenmuur van gebouw aan kust in contact met regen	XF1	XC4, XS1, XF1
	Contact met zeewater			
ES3	Ondergedompeld		XA1	XC1, XS2, XA1
ES4	Getijden- en spatzone	Kaaimuren	XF4,XA1	XC4, XS3, XF4,XA1
Gebruiksdomein: (1) OB = ongewapend beton (2) GB = gewapend beton (3) VB = voorgespannen beton				

Omgeving		Milieuklassen	
Klasse	Omschrijving	OB(1)	GB(2) en VB(3)
EA	Agressieve omgeving		
EA1	Zwak agressieve chemische omgeving	XA1	XA1
EA2	Middelmatig agressieve chemische omgeving	XA2	XA2
EA3	Sterk agressieve chemische omgeving	XA3	XA3
Gebruiksdomein: (1) OB = ongewapend beton (2) GB = gewapend beton (3) VB = voorgespannen beton			

Bijlage 4: Tabellen ontwerpprotocol

Bijlage 4.1: Geval a

						c=	25	mm	
						k1=	0,8		
Ecm=	32836,57	N/mm²				k2=	1	trek	
fctm=	2,90	N/mm²				k3=	3,4		
						k4=	0,425		
fck=	30	N/mm²				kc=	1	trek	
fcm=	fck + 8 MPA	38	N/mm²			αe=		wordt berekend	
s	0,38	CEM 32,5 N		t > 28 dagen		Es=	200000	N/mm²	
			α	1,00		k=	1		

- Voor t = 3 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	42		30		19		7	
200	26		19		12		4	
240	18		13		8		-	
280	13		9		5		-	
320	10		7		-		-	
360	8		5		-		-	
400	6		4		-		-	
450	5		-		-		-	

- Voor t = 6 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	58		42		26		10	
200	37		26		16		6	
240	25		18		11		-	
280	18		13		7		-	
320	14		9		5		-	
360	10		7		-		-	
400	8		6		-		-	
450	6		4		-		-	

- Voor t = 9 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	66		48		30		11	
200	42		30		18		6	
240	29		21		12		-	
280	21		15		9		-	
320	16		11		6		-	
360	12		8		5		-	
400	10		7		-		-	
450	7		5		-		-	

- Voor t = 12 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	72		52		32		12	
200	46		33		20		7	
240	31		22		13		4	
280	23		16		9		-	
320	17		12		7		-	
360	13		9		5		-	
400	10		7		-		-	
450	8		5		-		-	

- Voor t = 15 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	76		55		34		13	
200	49		35		21		7	
240	33		24		14		4	
280	24		17		10		-	
320	18		13		7		-	
360	14		10		5		-	
400	11		8		-		-	
450	9		6		-		-	

- Voort t = 18 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	80		58		36		14	
200	51		36		22		8	
240	35		25		15		5	
280	25		18		10		-	
320	19		13		7		-	
360	15		10		5		-	
400	12		8		4		-	
450	9		6		-		-	

- Voor t = 21 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	82		60		37		14	
200	52		38		23		8	
240	36		26		15		5	
280	26		18		11		-	
320	20		14		8		-	
360	15		10		6		-	
400	12		8		4		-	
450	9		6		-		-	

- Voort t = 24 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	84		61		38		15	
200	54		39		23		8	
240	37		26		16		5	
280	27		19		11		-	
320	20		14		8		-	
360	16		11		6		-	
400	12		8		4		-	
450	9		6		-		-	

- Voor t = 27 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	86		62		39		15	
200	55		39		24		8	
240	38		27		16		5	
280	27		19		11		-	
320	21		14		8		-	
360	16		11		6		-	
400	13		9		5		-	
450	10		6		-		-	

- Voort t = 28 dagen:

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4	w_k [mm]=	0,3	w_k [mm]=	0,2	w_k [mm]=	0,1
[N/mm²]	model 0,4	aanp	model 0,3	aanp	model 0,2	aanp	model 0,1	aanp
160	87		63		39		15	
200	55		40		24		8	
240	38		27		16		5	
280	28		19		11		-	
320	21		14		8		-	
360	16		11		6		-	
400	13		9		5		-	
450	10		6		-		-	

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	5	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	5	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	5	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	5
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	137	140	150	174	237	102	104	112	130	177	67	69	74	86	117	32	33	36	42	57
200	109	112	120	139	189	82	84	90	104	142	54	55	59	69	94	26	27	29	33	46
240	91	93	100	116	158	68	70	75	87	118	45	46	49	57	78	22	22	24	28	38
280	78	80	86	100	135	58	60	64	74	101	38	39	42	49	67	19	19	20	24	33
320	68	70	75	87	118	51	52	56	65	88	34	34	37	43	59	16	17	18	21	29
360	61	62	67	77	105	45	46	50	58	79	30	31	33	38	52	14	15	16	19	26
400	55	56	60	70	95	41	42	45	52	71	27	28	30	34	47	13	13	14	17	23
450	49	50	53	62	84	36	37	40	46	63	24	24	26	31	42	12	12	13	15	20

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	15	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	15	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	15	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	15
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	77	78	81	88	102	57	58	60	65	76	37	38	39	43	50	17	18	19	20	24
200	62	62	65	70	81	46	46	48	52	61	30	30	32	34	40	14	14	15	16	19
240	51	52	54	59	68	38	39	40	44	51	25	25	26	29	33	12	12	12	13	16
280	44	45	46	50	58	33	33	34	37	43	21	22	23	24	28	10	10	11	12	14
320	38	39	41	44	51	29	29	30	33	38	19	19	20	21	25	9	9	9	10	12
360	34	35	36	39	45	25	26	27	29	34	17	17	18	19	22	8	8	8	9	11
400	31	31	32	35	41	23	23	24	26	30	15	15	16	17	20	7	7	7	8	9
450	27	28	29	31	36	20	21	21	23	27	13	13	14	15	18	6	6	7	7	8

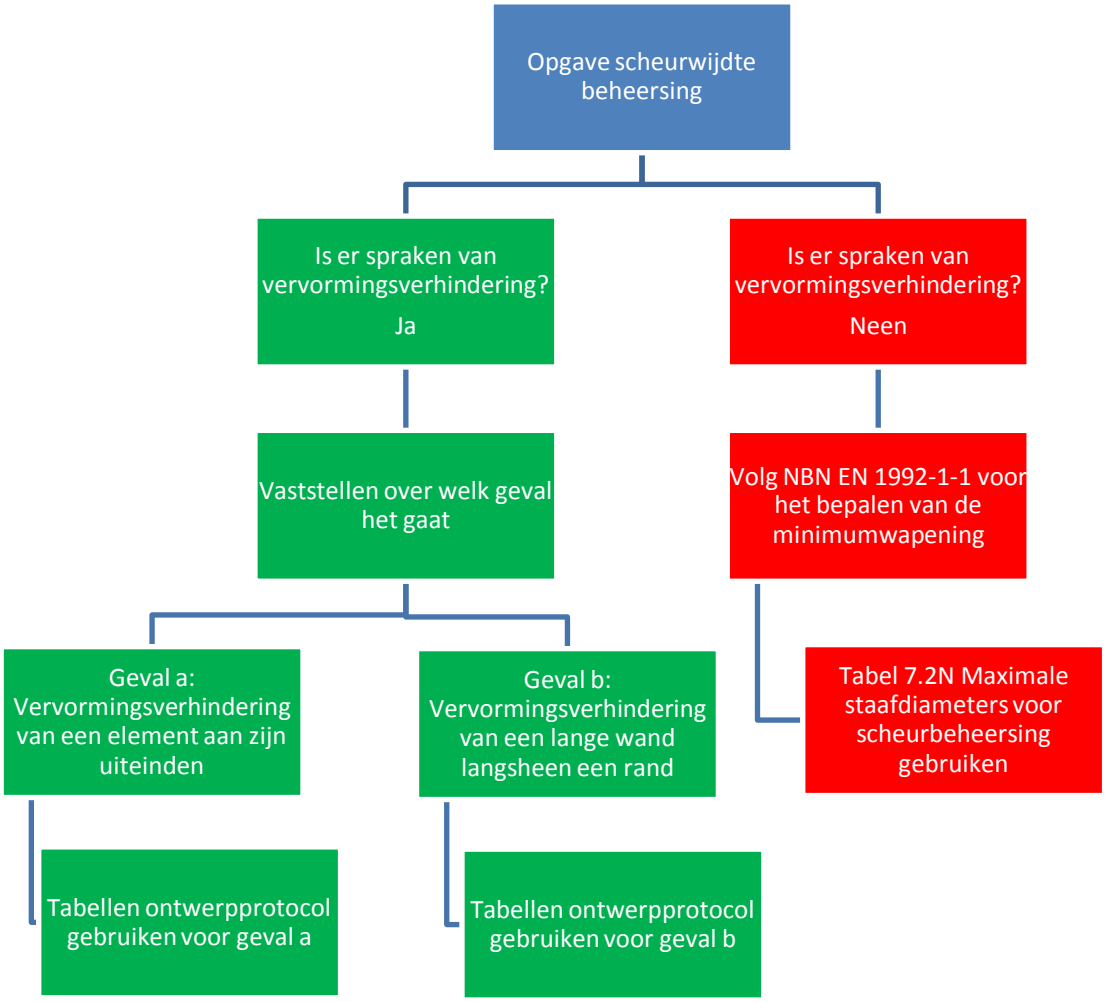
Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	35	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	35	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	35	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	35
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	40	41	41	43	47	30	30	31	32	34	19	19	20	20	22	8	8	9	9	10
200	32	32	33	35	37	24	24	24	25	27	15	15	16	16	18	7	7	7	7	8
240	27	27	28	29	31	20	20	20	21	23	13	13	13	14	15	6	6	6	6	7
280	23	23	24	25	27	17	17	17	18	20	11	11	11	12	13	5	5	5	5	6
320	20	20	21	22	23	15	15	15	16	17	9	10	10	10	11	4	4	4	5	5
360	18	18	18	19	21	13	13	14	14	15	8	9	9	9	10	4	4	4	4	4
400	16	16	17	17	19	12	12	12	13	14	8	8	8	8	9	3	3	3	4	4
450	14	14	15	15	17	11	11	11	11	12	7	7	7	7	8	3	3	3	3	4

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	50	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	50	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	50	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	50
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	29	29	30	31	33	21	22	22	23	24	13	14	14	14	15	6	6	6	6	6
200	23	24	24	25	26	17	17	18	18	19	11	11	11	11	12	4	4	5	5	5
240	20	20	20	21	22	14	14	15	15	16	9	9	9	10	10	4	4	4	4	4
280	17	17	17	18	19	12	12	13	13	14	8	8	8	8	9	3	3	3	3	4
320	15	15	15	15	16	11	11	11	11	12	7	7	7	7	8	3	3	3	3	3
360	13	13	13	14	15	10	10	10	10	11	6	6	6	6	7	2	2	3	3	3
400	12	12	12	12	13	9	9	9	9	10	5	5	6	6	6	2	2	2	2	3
450	10	10	11	11	12	8	8	8	8	8	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	60	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	60	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	60	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	60
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	25	25	25	26	27	18	18	18	19	20	11	11	11	12	12	4	4	5	5	5
200	20	20	20	21	22	14	14	15	15	16	9	9	9	9	10	4	4	4	4	4
240	16	17	17	17	18	12	12	12	13	13	7	7	8	8	8	3	3	3	3	3
280	14	14	14	15	15	10	10	10	11	11	6	6	7	7	7	3	3	3	3	3
320	12	12	13	13	14	9	9	9	9	10	6	6	6	6	6	2	2	2	2	3
360	11	11	11	11	12	8	8	8	8	9	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2
400	10	10	10	10	11	7	7	7	8	8	4	4	5	5	5	2	2	2	2	2
450	9	9	9	9	10	6	6	6	7	7	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2

Staalspanning	w_k [mm]=	0,4		ΔT=	70	w_k [mm]=	0,3		ΔT=	70	w_k [mm]=	0,2		ΔT=	70	w_k [mm]=	0,1		ΔT=	70
[N/mm²]	model 0,4					model 0,3					model 0,2					model 0,1				
RH =	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
160	21	21	22	22	23	15	15	16	16	17	9	9	10	10	10	4	4	4	4	4
200	17	17	17	18	18	12	12	12	13	13	8	8	8	8	8	3	3	3	3	3
240	14	14	14	15	15	10	10	10	11	11	6	6	6	7	7	2	2	2	3	3
280	12	12	12	13	13	9	9	9	9	10	5	5	5	6	6	2	2	2	2	2
320	11	11	11	11	12	8	8	8	8	8	5	5	5	5	5	2	2	2	2	2
360	9	9	10	10	10	7	7	7	7	7	4	4	4	4	5	2	2	2	2	2
400	8	9	9	9	9	6	6	6	6	7	4	4	4	4	4	1	1	1	2	2
450	8	8	8	8	8	5	5	6	6	6	3	3	3	4	4	1	1	1	1	1

Bijlage 5: Flowchart



Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:
Ontwerp protocol voor gewapend beton onder invloed van verhinderde vervorming

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**
Jaar: **2017**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

Buteneers, Andries

Datum: **3/06/2017**