



Dwarskracht en scheurwijdte

ELISA STOLWIJK

17-6-2019

Begeleider 1: dr.ir.drs. C.R. Braam

Begeleider 2: dr.ir. P.C.J. Hoogenboom

Bachelor Eind Project – Civiele Techniek – TU Delft

Voorwoord

Dit rapport is het laatste project voor de bachelor civiele techniek van de TU Delft. Dit rapport is bedoeld voor geïnteresseerden in het vakgebied structural engineering, met name de richting beton en de scheurwijdte hiervan.

Specialisten die alleen geïnteresseerd zijn in het trekstaafmodel toegepast op dwarskracht, kunnen dit vinden in hoofdstuk 3 en hoofdstuk 4. Geïnteresseerden in de resultaten van het model kunnen deze vinden in hoofdstuk 5.

Voor de totstandkoming van dit rapport wil ik dr.ir.drs C.R. Braam bedanken voor het onderwerp en de begeleiding van het project samen met dr.ir. P.C.J. Hoogenboom.

Delft, juni 2019

Elisa Stolwijk

Samenvatting

Bij het doorrekenen van een betonnen balk in de bruikbaarheidsgrenstoestand wordt er berekend of de scheurwijdte van de buigscheuren niet het maximum overschrijdt. In een balk ontstaan echter niet alleen buigscheuren, maar ook dwarskrachtscheuren. De scheurwijdte van deze dwarskrachtscheuren wordt vooralsnog niet berekend. Er zijn al verschillende modellen opgezet om deze scheurwijdte te meten. Een van de suggesties is om de dwarskrachtscheuren met dezelfde methode te berekenen als de buigscheuren, namelijk het trekstaafmodel.

Om het trekstaafmodel toe te passen wordt als eerste de balk doorgerekend in de uiterste grenstoestand. Vervolgens kan ook de bruikbaarheidsgrenstoestand met de scheurwijdte uitgerekend worden. Hiertoe dient onder andere de effectieve oppervlakte van de doorsnede bepaald te worden.

Om het trekstaafmodel toe te passen op dwarskrachtscheuren moet het bovenaanzicht van de balk gebruikt worden om de effectieve hoogte en daarmee de effectieve oppervlakte te bepalen. Daarnaast dient er rekening mee gehouden te worden dat de hoofdspanningen in de bruikbaarheidsgrenstoestand niet in dezelfde richting als de wapening staan, en de scheuren dus ook niet loodrecht op de wapening ontstaan, maar schuin.

Bovendien is de scheurwijdte een bruikbaarheidsgrenstoestand. Het is hierom aannemelijk dat niet alleen het staal van de dwarskrachtwapening alle spanning van de dwarskracht op zich neemt, maar ook het beton meewerkt. Wanneer dit aandeel van beton wordt meegenomen in de berekening, neemt de spanning in de dwarskrachtwapening af waardoor de berekende scheur kleiner uitkomt dan wanneer het beton niet meegenomen wordt in de berekening. Ook dit wordt meegenomen in het model.

Om te bepalen of de dwarskrachtscheurwijdte maatgevend zou kunnen zijn wordt een parameterstudie gedaan. Verschillende parameters worden onderzocht. Met name de overspanning, betonsterkte, betondekking en het langswapeningspercentage blijken invloed te hebben. Bij een kleinere overspanning is de dwarskracht maatgevender en ook de dwarskrachtscheurwijdte neemt hierdoor toe. Een grotere betonsterkte zorgt voor kleinere scheurwijdte terwijl een grotere betondekking een grotere scheurwijdte veroorzaakt. Tot slot scheurt een zwaarder belast en gewapende balk ook meer. Er wordt geen situatie gevonden waarbij de dwarskrachtscheur maatgevend is ten opzichte van de buigscheur, ook niet in de praktijkvoorbeelden die getest zijn met het model.

Inhoudsopgave

Voorwoord	1
Samenvatting.....	2
1. Inleiding	5
2. Buigscheuren	6
2.1 Belastingen	6
2.2 Materiaalgegevens	7
2.3 Momentcapaciteit	8
2.3.1 Langswapening	8
2.3.2 normaalkracht en moment	9
2.4 Scheurwijdte met betrekking tot moment en axiale krachten	12
2.4.1 Maximale scheurwijdte	12
2.4.2 Minimale wapening SLS-situatie	14
3. Dwarskracht en scheurwijdte.....	15
3.1 Dwarskrachtcapaciteit.....	15
3.2 Scheurwijdte dwarskracht.....	16
3.2.1 Effectieve oppervlakte.....	16
3.2.2 Maximale scheurafstand	17
3.2.3 Berekening rek.....	20
3.2.4 Berekening scheurwijdte	20
4. Combinatie staal en beton	21
4.1 Theorie dwarskracht staal en beton.....	21
4.2 Van ULS naar SLS	22
4.3 Spanning in dwarskrachtwapening	23
5. Vergelijking scheurwijdte buigscheuren en dwarskrachtscheuren.....	24
5.1 Parameterstudie.....	24
5.1.1 Hoogte-breedte verhouding.....	24
5.1.2 Overspanning	26
5.1.3 Normaalkracht.....	28
5.1.4 Betonsterkte.....	30
5.1.5 Betondekking.....	32
5.1.6 Langswapeningspercentage	34
5.2 Praktijkvoorbeelden	36
6. Conclusie	37
Bronnen	38
Bijlage 1: symbolenlijst.....	40

Bijlage 2: Voorgestelde modellen voor scheurwijdteberekeningen	41
Bijlage 3: Rekenmodel mathcad.....	42
Bijlage 4: Resultaten parameterstudie.....	51
Bijlage 5: praktijkvoorbeelden	53
Bijlage 6: Besprekingsverslagen	59

1. Inleiding

Bij het doorrekenen van betonnen balken wordt niet alleen gekeken naar de uiterste grenstoestand (ULS, Ultimate Limit State), de sterkte, maar ook de bruikbaarheidsgrenstoestand (SLS, Serviceability Limit State). Onder de bruikbaarheidsgrenstoestand valt ook de scheurwijdte. Vooral nog worden alleen buigscheuren getoetst, al blijkt uit enkele vereenvoudigde berekeningen dat wellicht niet alleen de buigscheuren, maar ook de dwarskrachtscheuren maatgevend zouden kunnen zijn¹. In deze berekeningen wordt het trekstaafmodel, zoals ook voor buigscheuren, gebruikt. Voor het berekenen van dwarskrachtscheuren zijn reeds meerdere modellen ontworpen. In deze modellen gaat het met name om de afstand tussen de dwarskrachtscheuren. Er is nog geen aangenomen vast model hiervoor. Wel is dit het geval voor de buigscheuren, die volgens de eurocode met behulp van het trekstaafmodel doorgerekend kunnen worden. Daarnaast wordt er in deze onderzochte modellen geen rekening gehouden met het aandeel dat beton kan leveren in het dragen van de dwarskracht. (Zakaria, Ueda, en Wu, 2011). Naar het effect van de zogenaamde 'aggregate interlock' en de 'dowel action' is wel onderzoek gedaan maar niet in verband gebracht met het trekstaafmodel (Frenay, 1990). Het is van belang dat de scheuren in beton niet te wijd zijn, vanwege de wapening die aangetast kan worden en het water dat in de scheur kan komen en kan bevriezen. Om deze redenen zijn er in de eurocode verschillende milieuklassen gedefinieerd en is er voor elke milieuklasse bepaald wat de maximale scheurwijdte mag zijn. Voor de levensduur van de constructie is het dus van belang dat deze maximale scheurwijdte niet overschreden wordt. Het bepalen van de scheurwijdte van de dwarskracht is dus nog een probleem waar geen duidelijk model voor is gemaakt.

In dit rapport wordt de hoofdvraag beantwoord: Wat is de maximale scheurwijdte veroorzaakt door dwarskracht berekend met behulp van het trekstaafmodel en is deze dan maatgevend?

Deze vraag wordt beantwoord met behulp van literatuuronderzoek en het maken van een rekenmodel waarmee de dwarskrachtscheuren en buigscheuren vergeleken kunnen worden. Hiertoe zijn enkele deelvragen geformuleerd:

- Wat is het rekenmodel voor de maximale scheurwijdte van de balk met betrekking tot moment en axiale krachten?
- Wat is het rekenmodel voor het berekenen van de maximale scheurwijdte toegepast op dwarskracht?
- Hoe kan de combinatie van staal en beton worden meegenomen in de berekening van de dwarskrachtscheuren?
- Is de dwarskrachtscheur maatgevend ten opzichte van de buigscheur?

Het onderzoek en rekenmodel beperkt zich tot rechthoekige doorsneden en niet-voorgespannen beton. Er wordt uitgegaan van rekenmodellen zoals die zijn voorgeschreven in de eurocode. Het rekenmodel geldt niet voor hoge sterkte betonklassen en is alleen geldig voor betonsterkteklassen $\leq C50/60$.

De opbouw van dit rapport ziet er als volgt uit: hoofdstuk 2 beschrijft het doorrekenen van de balk met betrekking tot moment en buigscheuren. In hoofdstuk 3 wordt de dwarskracht en het model voor de scheurwijdte hiervan besproken. Hoofdstuk 4 beschrijft de samenwerking van beton en staal in de bruikbaarheidsgrenstoestand. Tot slot worden in hoofdstuk 5 de buigscheuren en de dwarskrachtscheuren vergeleken en een parameterstudie gedaan naar de invloeden van bepaalde parameters.

¹ Deze berekeningen zijn verkregen in overleg met de auteurs via dr.irs.drs. C.R. Braam.

2. Buigscheuren

Om de balk te dimensioneren wordt er berekend wat de maximale buigscheur is. Voor deze berekening wordt ten eerste de balk gedimensioneerd op spanningen door moment en axiale krachten. Vervolgens wordt de maximale scheurwijdte berekend en getoetst. De scheurwijdte is afhankelijk van de milieuklasse waarin de constructie zich bevindt. Een overzicht van de milieuklassen en de bijbehorende scheurwijdte is te vinden in figuur 1.

Tabel 7.101N — Aanbevolen waarden voor $w_{\max}$ en van toepassing zijnde combinatieregels

Milieuklasse	Gewapende en voorgespannen elementen met voorspanning zonder aanhechting	Voorgespannen elementen met voorspanning met aanhechting
	Quasiblijvende belastingscombinatie	Frequente belastingscombinatie
X0, XC1	0,3 ^a	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ^b
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		Decompressie
^a Voor de milieuklassen X0 en XC1 heeft de scheurwijdte geen invloed op de duurzaamheid; deze grens is gesteld om een in het algemeen aanvaardbaar uiterlijk te verkrijgen. Bij afwezigheid van voorwaarden ten aanzien van het uiterlijk, mag deze beperking worden afgezwakt.		
^b Voor deze milieuklassen behoort, aanvullend, decompressie onder de quasiblijvende belastingscombinatie te zijn gecontroleerd.		

Figuur 1: maximale scheurwijdten (NEN, 2011)

2.1 Belastingen

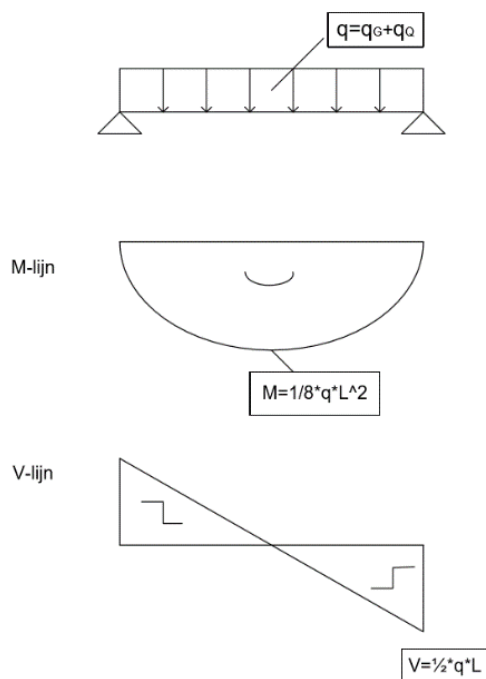
Voor het bepalen van zowel de momentcapaciteit als de buigscheuren dienen de belastingen op de balk bepaald te worden. Met behulp van deze belastingen kunnen in de ULS het maximaal optredende moment en dwarskracht bepaald worden (design values), en in de SLS het representatieve moment en de representatieve dwarskracht. Deze zijn benodigd voor de berekeningen van de sterkte en de scheurwijdte van de balk. Belangrijk hierbij is dat in de ULS de belastingfactoren en materiaalfactoren worden meegenomen. De belasting- en materiaalfactoren die meegenomen worden voor de berekening van de sterkte en scheurwijdte in dit rekenmodel zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: materiaal- en belastingfactoren (NEN, 2016)

Materiaalfactor beton	γ_c	1,5
Materiaalfactor staal	γ_s	1,15
Belastingfactor permanente belasting	γ_g	1,2
Belastingfactor variabele belasting	γ_q	1,5

Uiteindelijk kan het maximale moment voor een ligger, opgelegd op twee scharnieropleggingen, berekend worden met de formule: $M = \frac{1}{8} * q * l^2$. Hierbij wordt voor de rekenwaarde, de verdeelde belasting q vermenigvuldigd met de belastingfactoren. Voor de representatieve waarde wordt dit niet gedaan. In het opgestelde rekenmodel wordt uitgegaan van de schematische oplegging op twee

scharnieren, zoals weergegeven in figuur 2. In geval van andere typen opleggingen zou het rekenmodel zodanig aangepast worden dat het maximale moment en de maximale dwarskracht bij het nieuwe mechanicaschema aansluiten.



Figuur 2: Mechanicaschema met momentenlijn en dwarskrachtenlijn

2.2 Materiaalgegevens

Ook de materiaalgegevens van het beton en wapeningsstaal zijn van groot belang bij het doorrekenen van de balk. Deze dienen ook als input gegeven te worden in het rekenmodel. De materiaalgegevens die als input dienen gegeven te worden zijn weergegeven in tabel 2.

Tabel 2: materiaalgegevens

Beton

Karakteristieke druksterkte (f_{ck})
 Hoogte (h)
 Breedte (b)
 Overspanning/lengte (L)
 Dekking (c)
 Elasticiteitsmodulus (E_c)

Staal

Karakteristieke sterkte (f_{yk})
 Elasticiteitsmodulus (E_s)

Met behulp van deze gegevens kunnen enkele andere karakteristieken van het beton en staal worden uitgerekend. Deze zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3: karakteristieken van het materiaal (NEN, 2011)

BetonRekenwaarde druksterkte: f_{cd}

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

Treksterkte beton: f_{ctm}

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$$

Gemiddelde druksterkte

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

Staal

Rekenwaarde sterkte

$$f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$$

Met behulp van deze gegevens kunnen de berekeningen met betrekking tot moment, normaalkracht en dwarskracht worden uitgevoerd. Deze berekeningen zijn ingevoerd in het rekenprogramma Mathcad. Het rekenmodel in Mathcad is weergegeven in bijlage 3.

2.3 Momentcapaciteit

Ten eerste wordt de balk gedimensioneerd zodanig dat het opgelegde moment kleiner is dan de momentcapaciteit van de balk. Hiertoe wordt de hoeveelheid langswapening uitgerekend. Een gemiddeld wapeningspercentage ligt rond de 1%.

2.3.1 Langswapening

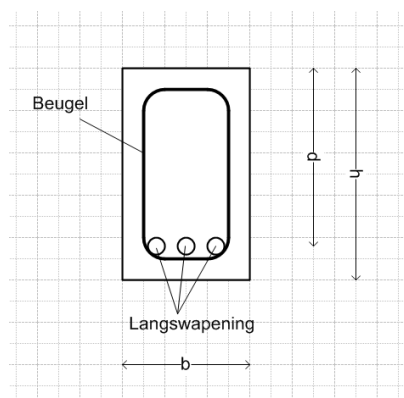
Het bepalen van de benodigde hoeveelheid langswapening kan gezien worden als een iteratief proces. Wanneer aan het begin een bepaalde hoeveelheid wordt aangenomen, kan doorgerekend worden hoe groot de momentcapaciteit van de balk bij deze hoeveelheid wapening is. Wanneer deze kleiner is dan de ontwerpwaarde van het moment, dient er meer wapening te worden gebruikt of een andere afmeting van de doorsnede, totdat de momentcapaciteit van de doorsnede groter is dan de ontwerpwaarde van het moment.

Voor het berekenen van de momentcapaciteit is als eerste de oppervlakte van het wapeningsstaal benodigd. Deze kan berekend worden door het aantal staven van de langswapening maal de oppervlakte van de doorsnede te doen. De formule hiervoor ziet er dan als volgt uit:

$$A_s = \text{aantal staven} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varphi_l^2$$

φ_l = diameter van de staaf van de langswapening.

Een overzicht van de doorsnede met daarin aangeduid onder andere de wapening, is weergegeven in figuur 3.



Figuur 3: doorsnede balk

Er zijn regels voor het bepalen van de hoeveelheid wapening. Volgens de eurocode zit hier namelijk een minimum en een maximum aan.

Er geldt dat de oppervlakte van de minimale wapening gelijk is aan de kleinste waarde van $A_{s, \min 1}$ en $A_{s, \min 2}$.

Voor $A_{s, \min 1}$ geldt dat deze de oppervlakte is om de $M_{E, \min}$ en de $N_{E, \min}$ op te nemen. Voor deze geldt:

$$M_{E, \min} = f_{ctm} \cdot W \cdot \frac{\eta}{\eta - 1} \text{ als } N_{E, \min} \text{ een drukkracht is}$$

$$M_{E, \min} = f_{ctm} \cdot W \cdot \frac{\eta}{\eta + 1} \text{ als } N_{E, \min} \text{ een trekkracht is}$$

$$M_{E, \min} = f_{ctm} \cdot W \text{ bij zuivere buiging}$$

$$N_{E, \min} = f_{ctm} \cdot A_c \cdot \frac{1}{\eta - 1} \text{ als } N_{E, \min} \text{ een drukkracht is}$$

$$N_{E, \min} = f_{ctm} \cdot A_c \cdot \frac{1}{\eta + 1} \text{ als } N_{E, \min} \text{ een trekkracht is}$$

(NEN, 2016)

Er geldt dat W het weerstandsmoment is. Dit is voor een vierkante doorsnede rond de y -as gelijk aan $\frac{1}{6}bh^2$. Voor η geldt de volgende vergelijking:

$$\eta = \frac{e \cdot A_c}{W}$$

Tot slot geldt simpelweg voor $A_{s, \min 2}$:

$$A_{s, \min 2} = 1,25 \cdot A_{s, ULS}$$

Er geldt dus dat $A_{s, \min 2}$ 1,25 keer zo groot moet zijn als de wapening die nodig is in de uiterste grens toestand. Deze uiterste grens toestand wordt gecontroleerd in paragraaf 2.3.2.

(NEN, 2016)

Er kan ook een maximale langswapening worden bepaald. Hier is echter de maximale betondrukzone voor nodig. Deze wordt uitgerekend in paragraaf 2.3.2. De formule voor de maximale langswapening luidt dan:

$$A_{s, \max} = \frac{0,75 \cdot b \cdot x_{u, \max} \cdot f_{cd}}{f_{yd}}$$

Daarnaast geldt ook:

$$A_{s, \max} = 0,04 \cdot A_c$$

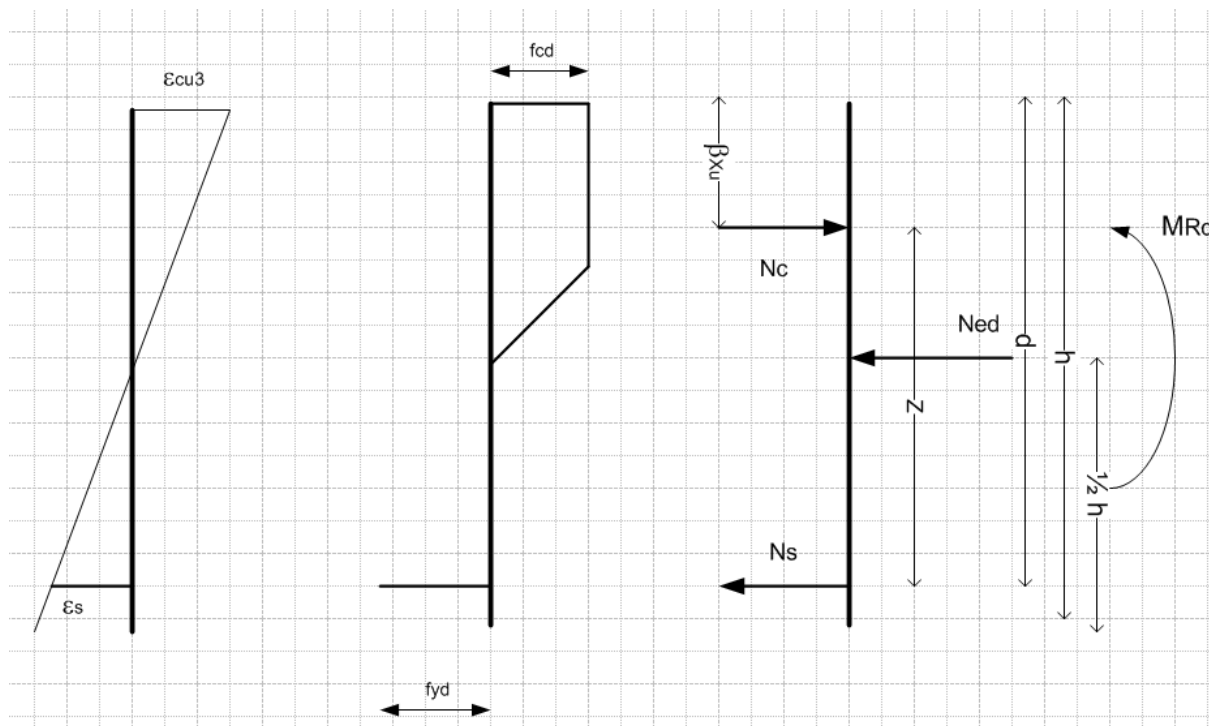
(NEN, 2011) (NEN, 2016)

2.3.2 normaalkracht en moment

Vervolgens kan de maximale trekkracht van het staal bepaald worden. Hiertoe wordt de volgende formule gebruikt:

$$N_s = A_s \cdot f_{yd}$$

Met behulp van het evenwicht kan nu ook de drukkracht in de betondrukzone berekend worden. Deze drukkracht in beton wordt aangeduid met N_c . Hiertoe wordt gebruik gemaakt van het rek- en spanningsdiagram voor het bezwijkmoment. Deze zijn weergegeven in figuur 4.



Figuur 4: rek, spanning en krachtendiagram van de doorsnede

Met behulp van horizontaal evenwicht kan de drukkracht N_c uit de figuur bepaald worden.

$$N_c = N_s + N_{ed}$$

Hierbij wordt voor N_{ed} een trekkracht als positief genomen en een drukkracht is negatief. Er wordt aangenomen dat de normaalkracht door de centrale as van de doorsnede loopt en dus niet voor een extra moment in de doorsnede zorgt.

Om de uiteindelijke momentcapaciteit te berekenen, dient de hefboomarm Z berekend te worden. Om deze te kunnen berekenen dient eerst de hoogte van de betondrukzone berekend te worden. Dit kan met behulp van de volgende formule:

$$N_c = \frac{3}{4} \cdot x_u \cdot f_{cd} \cdot b$$

Wanneer deze formule simpelweg wordt omgeschreven naar een uitdrukking voor x_u volgt hieruit de volgende formule:

$$x_u = \frac{N_c}{f_{cd} \cdot b \cdot \frac{3}{4}}$$

Er is echter ook een maximum aan de betondrukzone, deze luidt:

$$\frac{x_{u,max}}{d} \leq \frac{\varepsilon_{cu} \cdot 10^6}{\varepsilon_{cu} \cdot 10^6 + 7f}$$

Voor f geldt, omdat het geen voorgespannen beton is:

$$f = f_{yd}$$

Met behulp van dit maximum voor de betondrukzone kan ook nog de maximale langswapening bepaald worden zoals in paragraaf 2.3.1 beschreven is.

(NEN, 2016)

De hefboomarm volgt nu enkel nog uit de formule:

$$Z = d - \beta \cdot x_u$$

In deze formule is d de effectieve hoogte van de doorsnede en geldt $\beta=0,39$. De effectieve hoogte kan bepaald worden met behulp van de volgende formule en is weergegeven in de doorsnede in figuur 4:

$$d = h - \varphi_{beugel} - \frac{1}{2} \cdot \varphi_l$$

Hiertoe dient dus ook een diameter van de dwarskrachtwapening, de beugels, aangenomen te worden. Als het blijkt dat deze later toch veranderd is, verandert ook de effectieve hoogte en daarmee de hefboomarm en de momentcapaciteit.

Uiteindelijk kan nu de momentcapaciteit berekend worden, deze luidt in het geval dat de normaalkracht afwezig zou zijn:

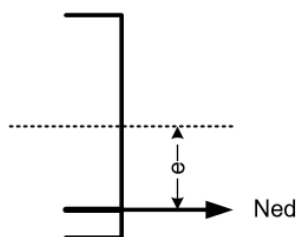
$$M_{Rd} = N_s \cdot Z = N_c \cdot Z$$

In het geval dat er echter wel normaalkracht aanwezig is, luidt de formule voor de momentcapaciteit:

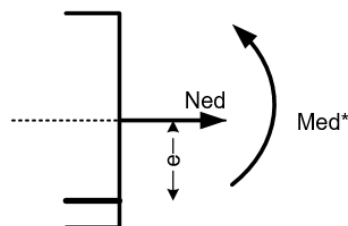
$$M_{Rd} = N_c \cdot \left(\frac{1}{2} h - \beta \cdot x_u \right) + N_s \cdot \left(\frac{1}{2} h - (h - d) \right)$$

Deze formule is afgeleid uit figuur 4 door gebruik te maken van het feit dat het moment berekend kan worden door kracht maal arm, gerekend ten opzichte van de centrale as, waar de normaalkracht N_{ed} in dit geval doorheen gaat. Als dit niet het geval is, zal de axiale kracht zorgen voor een extra moment, dat meegenomen moet worden in de berekening. Dit moment wordt aangegeven met M_{ed}^* . Een schets van deze situatie is weergegeven in figuur 5 en figuur 6. De spanning door deze axiale kracht wordt dan als volgt berekend:

$$M_{Ed}^* = e \cdot N_{ed} \quad \sigma_s = \frac{N_{Ed}}{A_s} + \frac{M_{Ed}^*}{z \cdot A_s}$$



Figuur 5: Excentrische normaalkracht



Figuur 6: Moment veroorzaakt door normaalkracht

Met behulp van deze waarden kan de totale trekspanning in het staal nog nagerekend worden. Deze moet in de ULS-situatie kleiner zijn dan f_{yd} .

2.4 Scheurwijdte met betrekking tot moment en axiale krachten

De scheurwijdte valt onder de SLS-situatie en het maximum hiervan kan berekend worden. Daarnaast geldt er ook voor de SLS-situatie een minimum wapening.

2.4.1 Maximale scheurwijdte

Voor het berekenen van de maximale scheurwijdte wordt gebruik gemaakt van het trekstaafmodel. De uiteindelijke formule om de maximale scheurwijdte als gevolg van een moment en axiale krachten te berekenen luidt:

$$w_{max} = S_{rmax} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Ten eerste wordt de maximale afstand tussen de scheuren, S_{rmax} , berekend. Deze luidt:

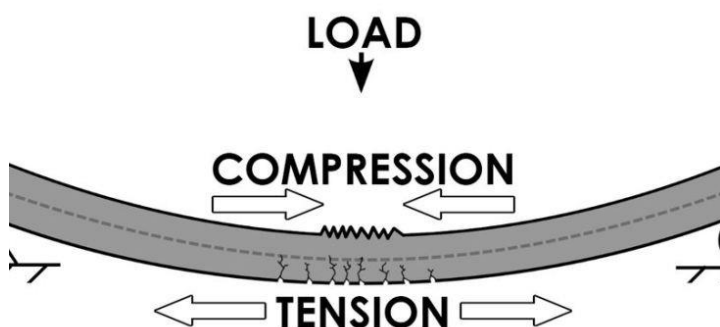
$$S_{rmax} = 3.4c + 0.425k_1k_2 \frac{\varphi_l}{\rho_{eff}}$$

Daarnaast geldt ook dat:

$$S_{rmax} \leq \max((50 - 0,8 * f_{ck}) * \varphi_l, 15 * \varphi_l)$$

(NEN, 2016), (NEN, 2011)

In deze formule wordt er echter aangenomen dat de richting van de hoofdspansingen en de richting waarin de langswapening ligt, gelijk zijn. Dit is voor het berekenen van de maximale scheurwijdte ten gevolge van moment en normaalkracht aannemelijk. In figuur 7 is te zien hoe de hoofdspansingen onderin de balk verlopen, waardoor de buigscheuren ontstaan. De langswapening ligt dus in dezelfde richting als de hoofdspansingen onderin de balk.



Figuur 7: richting van spanningen door buigend moment (Civilax, 2017)

In de formule voor S_{rmax} is alleen de ρ_{eff} nog onbekend. Deze kan echter berekend worden met behulp van de effectieve oppervlakte en de effectieve hoogte. Een weergave van de effectieve oppervlakte van een doorsnede van een balk is weergegeven in figuur 8.

Voor de effectieve hoogte gelden de volgende formules:

Er geldt voor buiging:

$$h_{c,eff} = 2,5 (h - d) \leq (h - x)/3$$

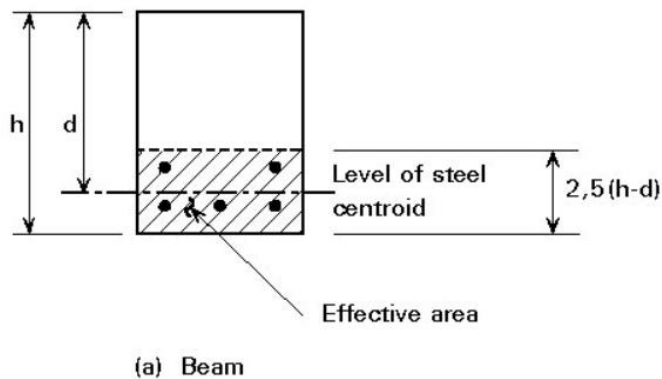
Er geldt voor trek:

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

Met de effectieve hoogte van de doorsnede van de balk en de breedte, kan de effectieve oppervlakte bepaald worden:

$$A_{c,eff} = b \cdot h_{eff}$$

(NEN, 2011)



Figuur 8: effectieve hoogte (ESDEP WG 10, n.d.)

Nu is het berekenen van ρ_{eff} simpelweg nog een kwestie van het delen van de oppervlakte van de wapening door de effectieve oppervlakte van het beton.

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

Met behulp van deze formules kan dus de maximale afstand tussen de scheuren bepaald worden.

Voor de maximale scheurwijdte hoeft nu alleen nog maar het verschil tussen de rek in staal en de rek in het beton berekend te worden. De formule uit de eurocode hiervoor luidt:

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

Voor α_e geldt:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

(NEN, 2011)

Een belangrijk verschil in vergelijking met de berekening van de spanning in staal, σ_s , in vergelijking met de berekening van de momentcapaciteit, is dat dit een SLS-berekening is. Hierbij wordt dus de representatieve waarde van het moment en de krachten genomen, zonder belastingfactoren.

$$\sigma_s = \frac{N_{rep}}{A_s} + \frac{M_{rep}}{z \cdot A_s}$$

Voor $f_{ct,eff}$ geldt wederom dat deze gelijk gesteld mag worden aan f_{ctm} zolang ook bij het berekenen van de wapening gerekend wordt met f_{ctm} (NEN, 2011).

Voor k_t geldt dat deze 0,6 is voor kortdurende belasting en 0,4 voor langdurende belasting. Overige componenten uit de vergelijking zijn allemaal bekend en de vergelijking kan dus uitgerekend worden en ook de maximale scheurwijdte kan dan uitgerekend worden.

2.4.2 Minimale wapening SLS-situatie

Niet alleen voor de ULS-situatie is een minimale wapening benodigd, maar ook voor de SLS-situatie. Deze luidt volgen de eurocode (NEN, 2011):

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

In deze formule staat $f_{ct,eff}$ gelijk aan f_{ctm} en geldt voor A_{ct} de oppervlakte van de trekzone. Deze wordt uitgelegd en uitgerekend in paragraaf 2.4.1. De spanning in staal, σ_s , mag worden aangenomen als f_{yd} . De factor k houdt rekening met de eigenspanningen. Hiervoor geldt:

$$k = 1,0 \text{ indien } h \leq 300 \text{ mm}$$

$$k = 0,65 \text{ indien } h \geq 800 \text{ mm}$$

(NEN, 2011)

Tussen deze waarden dient geïnterpoleerd te worden. Dit leidt tot de vergelijking:

$$k = \frac{0,65 - 1}{800 - 300} \cdot (h - 300) + 1 \text{ indien } 300 \text{ mm} < h < 800 \text{ mm}$$

De factor k_c houdt rekening met de spanningsverdeling en deze is voor enkel trek gelijk aan 1,0. Echter, wanneer er ook sprake is van een buigend moment, kan k_c voor een rechthoekige doorsnede worden uitgerekend met behulp van de volgende formule:

$$k_c = 0,4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h}{h^*} \cdot f_{ct,eff}}\right) \leq 1$$

(NEN, 2011)

Ook in deze formule zitten nog enkele onbekende factoren. Zo geldt er voor σ_c dat deze staat voor de gemiddelde betonspanning en dus kan worden uitgerekend met behulp van de formule $N/(b \cdot h)$. Het gaat hier om de normaalkracht in de bruikbaarheidsgrenstoestand en in dit geval is een drukkracht positief. Voor h^* geldt:

$$h^* = h, \text{ als } h < 1,0 \text{ m}$$

$$h^* = 1,0, \text{ als } h \geq 1,0 \text{ m}$$

Voor k_1 geldt:

$$k_1 = 1,5 \text{ als } N_{ed} \text{ een drukkracht is}$$

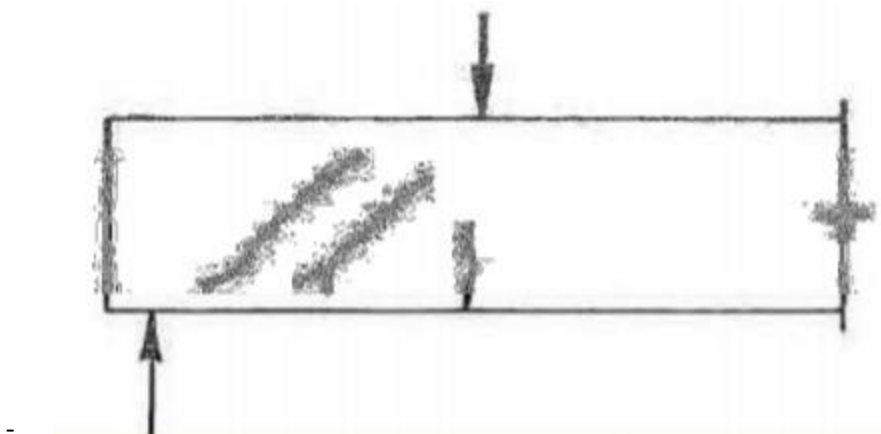
$$k_1 = \frac{2h^*}{3h} \text{ als } N_{ed} \text{ een trekkracht is}$$

(NEN, 2011)

Zo kan dus bepaald worden of de minimale wapening voor de SLS-situatie aanwezig is.

3. Dwarskracht en scheurwijdte

Door de dwarskracht kunnen er dwarskrachtscheuren ontstaan in de balk. Deze dwarskrachtscheuren zien er als volgt uit (figuur 9). Tot op de dag van vandaag worden deze dwarskrachtscheuren niet getoetst bij het ontwerpen van een balk. Er zijn al verschillende methoden ontwikkeld om de wijdte van deze dwarskrachtscheuren te bepalen (Zakaria, Ueda, en Wu, 2011). Deze modellen staan kort samengevat in bijlage 2. Opmerkelijk is dat in de modellen veel overeenkomsten zitten. Zo wordt er bij de meeste modellen, direct of indirect, rekening gehouden met de hoek tussen de hoofdspansingen en de wapening voor het berekenen van de maximale scheurafstand. Daarnaast is ook de dekking van het beton een veel terugkomende parameter. Daarom zou het beschouwen van een trekstaafmodel ook een van de opties kunnen zijn om de dwarskrachtscheuren volgens het trekstaafmodel te berekenen. Ook in dit model wordt er namelijk rekening gehouden met de hoek van de hoofdspansingen en de wapening en de dekking. Om het trekstaafmodel toe te passen zijn echter enkele aanpassingen nodig, aangezien de wapening en richting van de hoofdspansingen nu anders liggen en de effectieve hoogte ook anders bekeken moet worden. Om ten eerste te weten hoeveel wapening er überhaupt aanwezig moet zijn wordt ten eerste de ULS-berekening voor dwarskracht uitgevoerd. Daarna volgt de berekening voor het berekenen van de scheurwijdte.



Figuur 9: dwarskrachtscheuren (Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken Departement Mobiliteit en Openbare Werken Technisch Ondersteunende Diensten Expertise Beton en Staal (EBS), 2012)

3.1 Dwarskrachtcapaciteit

De dwarskrachtcapaciteit van het beton is in de situatie die hier bekeken wordt niet voldoende. Er is dus dwarskrachtwapening nodig. Hiertoe dient deze aanname eerst gecontroleerd te worden. De dwarskrachtcapaciteit van beton in de ULS-situatie is:

$$V_{Rd,c} = 0,12 k (100 \rho_l f_{ck})^{\frac{1}{3}} b d \quad (\text{NEN, 2005})$$

Aan deze vergelijking zit wel een minimum, welke is:

$$V_{min} = 0,035 k^{\frac{3}{2}} f_{ck}^{\frac{1}{2}} b d \quad (\text{NEN, 2005}) \quad (k = \min(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}; 2))$$

In de te bekijken situatie moet dus gelden:

$$V_{Rd,c} < V_{Ed}$$

In dit geval worden er beugels toegevoegd als dwarskrachtwapening. De dwarskrachtwapening voorkomt tevens dat er bros bezwijken kan voorkomen. Er moet gecontroleerd worden of de maximale dwarskracht die de doorsnede met wapening kan hebben, niet overschreden wordt. Anders heeft het geen nut om de dwarskrachtwapening uit te rekenen en dienen eerst de dimensies van de balk aangepast te worden. De formule om de maximale dwarskracht die de balk kan opnemen uit te rekenen luidt:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad (\text{NEN, 2011})$$

$$\text{Voor } v_1 \text{ geldt: } v_1 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$$

Voor α_{cw} mag 1,0 worden aangenomen (NEN, 2016)

De benodigde dwarskrachtwapening is te berekenen met behulp van de volgende formule:

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta} \quad (\text{NEN, 2005})$$

Belangrijk om te realiseren in deze formules is dat de θ in deze formule is gebaseerd op het vakwerkmodel en zoals beschreven in de eurocode wordt de hoek θ gedefinieerd als 'de hoek tussen de drukdiagonaal van het beton en de as van de ligger loodrecht op de dwarskracht' (NEN, 2011). Deze hoek moet tussen de $21,8^\circ$ en 45° zijn (NEN, 2016). In eerste instantie wordt er uitgegaan van een hoek van $21,8^\circ$. Hierbij komt de berekening uit op een minimale dwarskrachtwapening. In het rekenmodel wordt deze hoek aangeduid met θ_{ULS} om verwarring te voorkomen met een andere hoek θ die later voorkomt in de SLS-berekening.

(NEN, 2005), (NEN, 2011), (NEN, 2016)

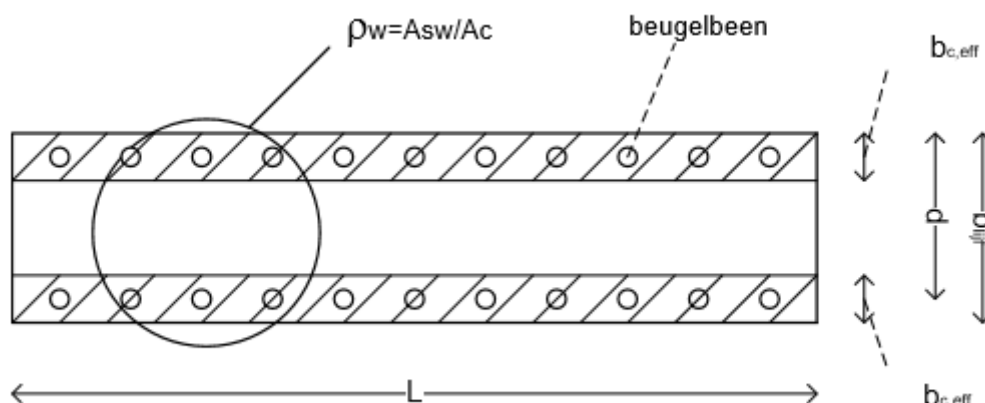
3.2 Scheurwijdte dwarskracht

Om de scheurwijdte door dwarskracht te kunnen bepalen via het trekstaafmodel, moet de effectieve oppervlakte bepaald worden, waarna de maximaal afstand tussen de scheuren en het verschil in rek berekend worden, vergelijkbaar met het trekstaafmodel voor buigscheuren.

3.2.1 Effectieve oppervlakte

Voor het bepalen van deze effectieve oppervlakte dient de balk als bovenaanzicht doorgesneden te worden, zodat de verborgen trekbanden zichtbaar worden (zie figuur 10). Aangezien de beugels aan weerszijde van de balk zitten, zijn er twee effectieve oppervlakten. Vergelijkbaar met de effectieve hoogte voor een buigscheur, kan de effectieve breedte voor een dwarskrachtscheur bepaald worden. Voor de effectieve breedte geldt:

$$b_{c,eff} = 2,5(b - d) \leq b/2$$



Figuur 10: bovenaanzicht doorsnede balk en trekband

De effectieve hoogte d dient bepaald te worden om de breedte van de trekband te kunnen berekenen. Zoals te zien in figuur 8=10 geldt voor deze d :

$$d = b - c - \frac{\varphi_{beugel}}{2}$$

Nu is het berekenen van de effectieve oppervlakte simpelweg volgens de volgende formule:

$$A_{c,eff} = L * b_{c,eff}$$

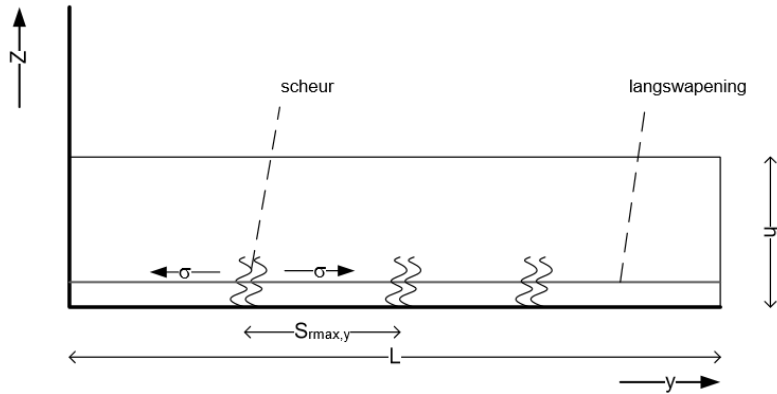
3.2.2 Maximale scheurafstand

Ook het berekenen van de maximale scheurafstand dient wat aangepast te worden in vergelijking met de berekening van de maximale buigscheuren. De reden hiertoe is dat de richting van de wapening niet in dezelfde richting als de hoofdspanningen staat en dus niet loodrecht op de scheur, maar onder een hoek. Om dit in de berekening mee te nemen is in de eurocode de volgende formule opgenomen:

$$S_{r,max} = \frac{1}{\frac{\cos\theta}{S_{r,max,y}} + \frac{\sin\theta}{S_{r,max,z}}} \quad (\text{NEN, 2011})$$

In deze formule staat de θ voor 'de hoek tussen de wapening in de y-richting en de richting van de hoofdspanningen' (NEN, 2011).

Wanneer de θ gelijk is aan 0° liggen de hoofdspanningen en de wapening in dezelfde richting en ontstaat de scheur hier loodrecht op. Dit is dus een zuivere buigscheur (zie figuur 11). De buigscheur wordt zuiver opgenomen door de langswapening (A_{sy}). Dit volgt ook uit de formule wanneer voor θ 0° wordt ingevuld.



Figuur 11: Zuivere buigscheur ($\theta = 0^\circ$)

Overeenkomstig met figuur 11 wordt voor een θ gelijk aan 0° de maximale scheurwijdte in y-richting gevonden in de formule:

$$S_{r,max} = \frac{1}{\frac{\cos(0)}{S_{r,max,y}} + \frac{\sin(0)}{S_{r,max,z}}} = \frac{1}{\left(\frac{1}{S_{r,max,y}}\right)} = S_{r,max,y}$$

Voor $S_{r,max,y}$ geldt dus:

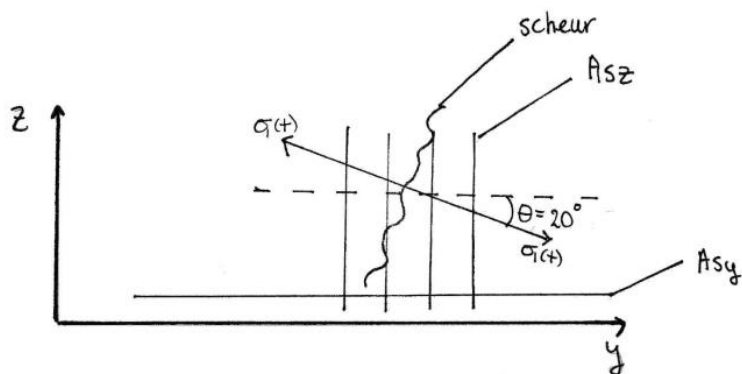
$$S_{r,max,y} = 3.4c + 0.425k_1k_2 \frac{\varphi_l}{\rho^{eff}_{langswapening}}$$

Echter, de hoek die de hoofdspansingen met de wapening in y-richting maakt, is niet altijd 0° en zeker niet in het geval van dwarskrachtscheuren. Nu gaat dus niet alleen de langswapening de scheurafstand beïnvloeden, maar ook de dwarskrachtwapening. Een voorbeeld van een nog relatief flauwe hoek is weergegeven in figuur 12. Dit lijkt nog veel op een buigscheur en de $S_{r,max,y}$ is dan ook nog maatgevend ten opzichte van de $S_{r,max,z}$ ($S_{r,max,z}$ wordt bepaald door de dwarskrachtwapening). Toch heeft de dwarskrachtwapening al wel invloed en wordt deze meegenomen in de formule. Naarmate de hoek θ groter wordt, gaat de dwarskrachtwapening een steeds grotere rol spelen. Er wordt geïnterpoleerd tussen de $S_{r,max,y}$ en $S_{r,max,z}$ met behulp van de formule uit de eurocode.

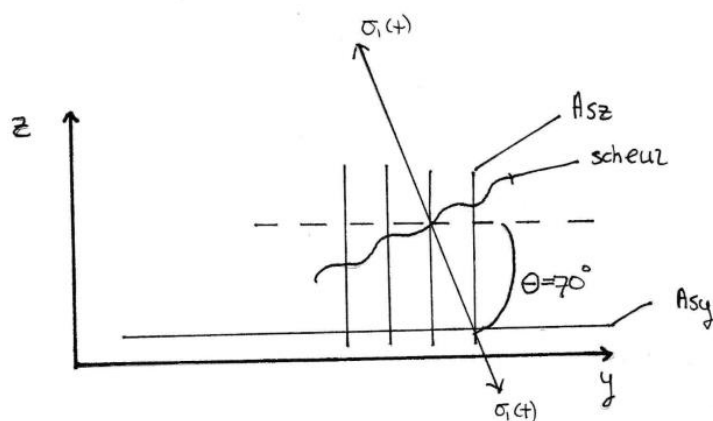
Voor $S_{r,max,z}$ geldt dus:

$$S_{r,max,z} = 3.4c + 0.425k_1k_2 \frac{\varphi_{beugel}}{\rho^{eff}_{dwarswapening}}$$

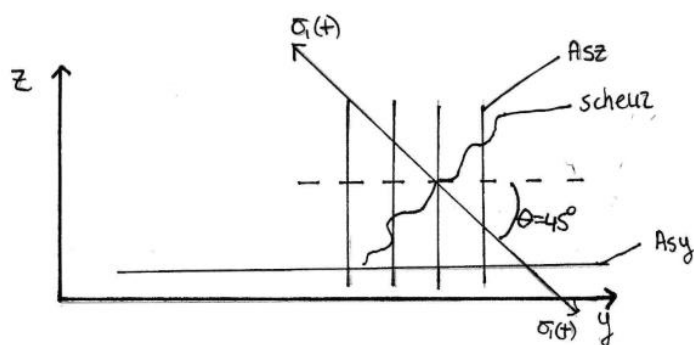
In figuur 13 is een scheur weergegeven met een grotere θ , namelijk 70° . In de schets is te zien dat nu de scheurrichting in z-richting bepalender is en dus de dwarskrachtwapening een belangrijker aandeel levert bij het bepalen van de maximale scheurafstand dan de langswapening.



Figuur 12: Scheur bij θ is 20°



Figuur 13: Scheur bij θ is 70°

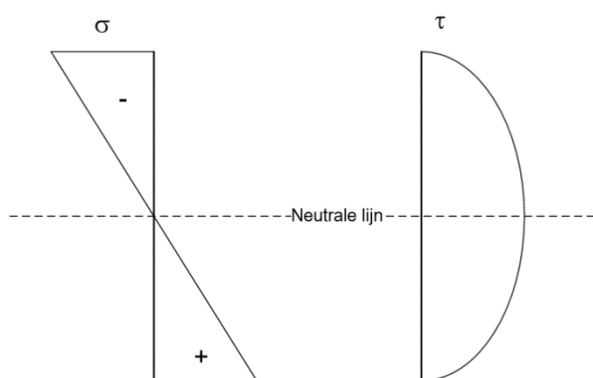


Figuur 14: Scheur bij θ is 45° (SLS-situatie)

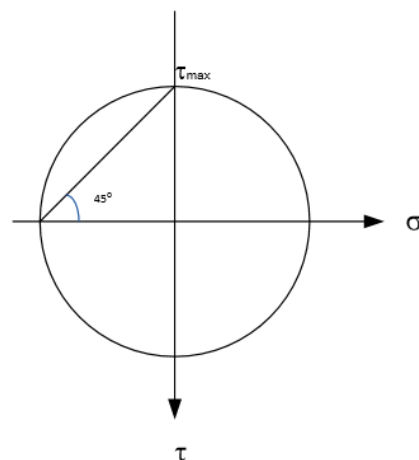
Omdat er wordt uitgegaan van een SLS-situatie, mag worden aangenomen dat in de maatgevende zone de θ gelijk is aan 45° . Dit wil zeggen dat de hoofdspanningen dus een hoek maken van 45° met de wapening. Deze situatie is weergegeven in figuur 14. Deze hoek θ wordt in het rekenmodel beschreven als θ_{SLS} .

Wanneer er wordt uitgegaan van een θ van 45° , betekent dit dat de maatgevende snede op de neutrale lijn zit waarbij de normaalspanning 0 is en de schuifspanning maximaal, voor het lineair-

elastisch model. Dit is weergegeven in figuur 15. De hoofdspanningen maken voor de situatie waarin enkel schuifkracht aanwezig is een hoek van 45° . Dit kan worden afgeleid uit de cirkel van Mohr zoals getekend in figuur 16. Om deze reden is dit dus een aannemelijke hoek.



Figuur 15: normaal- en schuifspanning van de doorsnede



Figuur 16: Cirkel van Mohr

De uiteindelijke maximale scheurafstand kan nu berekend worden en er is nu dus rekening gehouden met het feit dat de scheur en de richting van de hoofdspanningen een hoek maken met de wapening.

3.2.3 Berekening rek

Voor het berekenen van de maximale scheurwijdte is het verschil in rek tussen staal en beton nodig. Deze luidt volgens de formule:

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

(NEN, 2011)

Deze is vooralsnog gelijk aan de formule voor buigscheuren. De ρ_{eff} is reeds bekend, zoals beschreven in paragraaf 3.2.1. Echter dient er rekening mee gehouden te worden dat de berekening van de maximale scheurwijdte zich in SLS-situatie bevindt. Het is hierom aannemelijk dat niet alleen staal de krachten opneemt, maar ook beton hierin nog meewerkt. De precieze uitwerking hiervan wordt nader toegelicht in hoofdstuk 4.

3.2.4 Berekening scheurwijdte

Na het bepalen van de maximale scheurwijdte en het verschil in rek is het berekenen van de scheurwijdte enkel nog één stap: het invullen van onderstaande formule.

$$w_{max} = S_{rmax} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

(NEN, 2011)

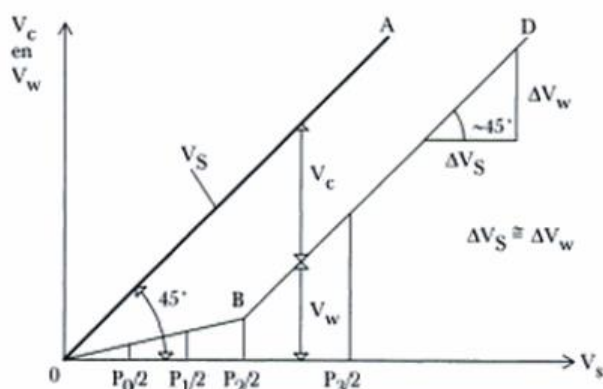
4. Combinatie staal en beton

Vanwege het feit dat het berekenen van de scheurwijdte onder de SLS-situatie valt, kan er worden aangenomen dat niet enkel het staal de dwarskracht opneemt, maar ook een deel van het beton hierin meewerkt.

4.1 Theorie dwarskracht staal en beton

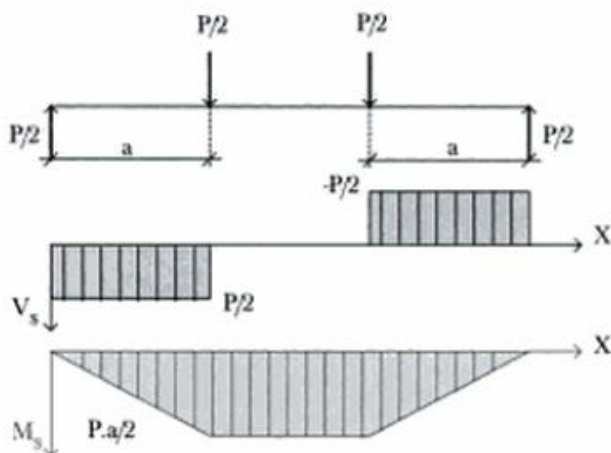
Zoals gezegd wordt een deel van de dwarskracht opgenomen door het beton. Dit is duidelijk zichtbaar in figuur 17.

$$V_S = V_c + V_w$$



Figuur 17: dwarskracht (Vanhooymissen, Spiegelare, Van Gysel en de Vylder, 1999)

Voor figuur 17 geldt dat P_0 de kracht is waarbij de balk nog ongescheurd blijft, bij P_1 er alleen buigscheuren ontstaan waar de dwarskracht gelijk aan 0 is en het moment maximaal, P_2 de kracht is waarbij de eerste dwarskrachtscheuren ontstaan en P_3 de kracht is waarbij breuken ontstaan. De dwarskracht in de balk is de helft van de kracht die op de balk komt te staan en hierop is figuur 17 gebaseerd, volgens het schema in figuur 18 (Vanhooymissen et al. 1999):



Figuur 158: dwarskrachtenverloop en momentenverloop (Vanhooymissen et al. 1999).

Er geldt:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \frac{N}{mm^2}$$

Om dus uiteindelijk de spanning in de dwarskrachtwapening in SLS-situatie te kunnen berekenen, dient deze V_c berekend te worden.

4.3 Spanning in dwarskrachtwapening

Met behulp van de in paragraaf 4.2 berekende V_c , kan de uiteindelijke spanning in de beugels van de dwarskrachtwapening berekend worden. De spanning in het staal in de SLS-situatie is gelijk aan de dwarskracht die het staal moet opnemen minus de dwarskracht die wordt opgenomen door het beton. In formulevorm ziet dit er als volgt uit:

$$V_s = V_{rep} - V_c$$

Om vervolgens de spanning in de beugels te kunnen berekenen, wordt er gebruik gemaakt van de formule die ook wordt gebruikt voor het berekenen van de hoeveelheid beugels die nodig zijn. Ook deze formule veranderd:

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta} \quad \rightarrow \quad \sigma_s = \frac{V_s}{\frac{A_{sw}}{s_w} \cdot z \cdot \cot \theta}$$

(NEN, 2011)

Er veranderen in de SLS-situatie een aantal componenten in deze vergelijking:

Ten eerste verandert de bekende f_{yd} naar de nog te berekenen σ_s . Daarnaast wordt er nu niet gerekend met V_{Ed} , maar met de kracht die door de beugels wordt opgenomen, V_s .

Uiteindelijk kan nu dus de spanning in het staal berekend worden en hiermee het verschil in rek tussen staal en beton en de uiteindelijke scheurwijdte door dwarskracht, volgens het trekstaafmodel. (zie paragraaf 3.2)

5. Vergelijking scheurwijdte buigscheuren en dwarskrachtscheuren

Om te bekijken of dwarskrachtscheuren maatgevend zijn moeten deze worden vergeleken met buigscheuren. Er wordt voor verschillende situaties met verschillende veranderende parameters gekeken naar de maximale scheurwijdten en de ratio (dwarskrachtscheurwijdte/buigscheurwijdte). Er wordt door het aanpassen en juist constant houden van verschillende parameters onderzocht welke van deze invloed hebben op de dwarskrachtscheurwijdte en de ratio. Ook worden in paragraaf 5.2 willekeurige praktijkvoorbeelden doorerekend om te kijken of hier maatgevende dwarskrachtscheuren in voorkomen.

5.1 Parameterstudie

Er worden verschillende parameters onderzocht. Er wordt gekeken naar verschillende hoogte- en breedteverhoudingen, de overspanning, aanwezigheid van normaalkracht, betonsterkte, betondekking en langswapeningpercentage.

5.1.1 Hoogte-breedte verhouding

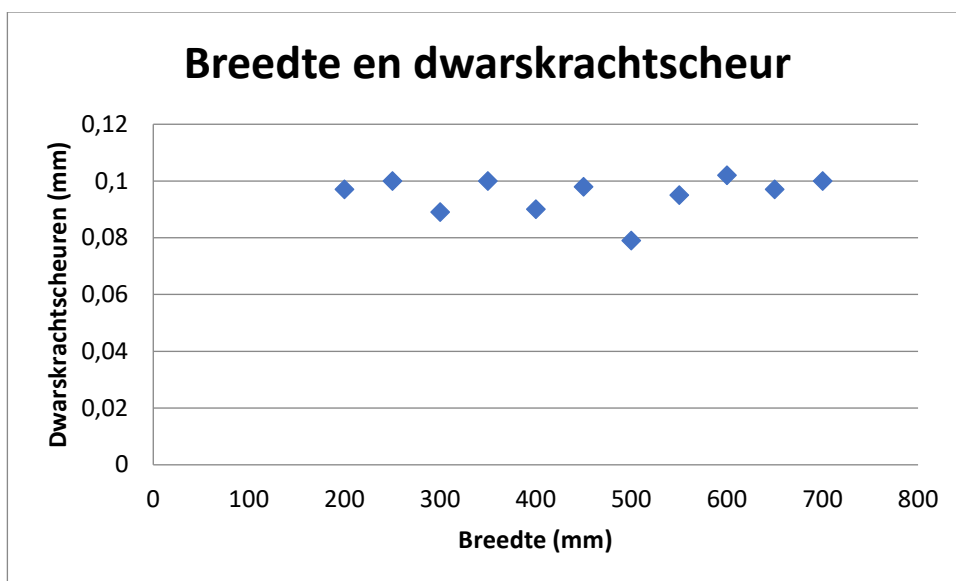
Voor beton met $f_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$, $c=35 \text{ mm}$, overspanning is 4m en staal B500B worden de buigscheuren en dwarskrachtscheuren berekend. In dit geval is de belasting en langswapeningspercentage gelijk gehouden bij verschillende afmetingen van de betonnen balk en is er geen normaalkracht aanwezig. De resultaten zijn te zien in tabel 4.

Tabel 4: buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende breedtes en gelijke belastingen

Hoogte (mm)	Breedte (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Wmax (buigscheur) (mm)	Wmax (dwarskrachtscheur) (mm)	Ratio
600	200	1,3	0,232	0,283	0,097	0,34
600	300	1,3	0,344	0,178	0,058	0,33
600	400	1,3	0,256	0,126	0,020	0,16
600	500	1,3	0,206	0,095	≈ 0	≈ 0

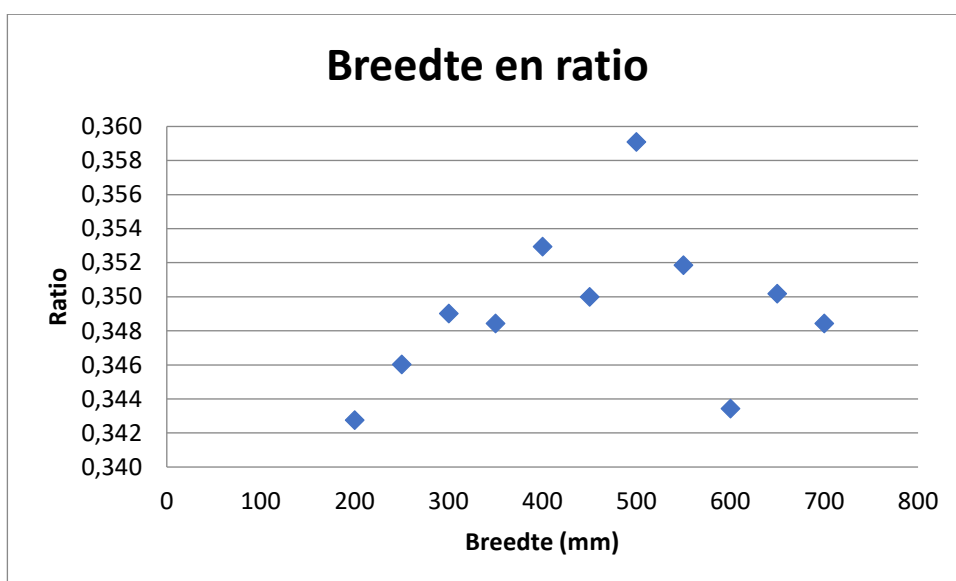
Uit deze eerste resultaten blijkt dat de dwarskrachtscheur in dit geval zeker niet maatgevend is. Wel neemt de dwarskrachtscheurwijdte en ratio toe wanneer de balk meer uitgenut wordt (dit is het geval bij de balken met de kleinere breedten). Het wapeningspercentage is namelijk constant gehouden. Dit betekent dat bij balken met grotere breedte er in absolute zin meer wapening is toegevoegd en de balken minder uitgenut waren. Vanaf nu wordt er dan ook alleen gekeken naar uitgenutte balken, aangezien niet uitgenutte balken onrealistische voorbeelden zijn en geen maatgevend resultaat zullen opleveren.

Voor een standaardbalk is de dwarskrachtscheur bij verschillende breedtes uitgerekend en ook is de ratio (dwarskrachtscheur/buigscheur) weergegeven. Deze zijn afgebeeld in de grafieken, respectievelijk figuur 20 en figuur 21. De precieze waarden van deze grafieken zijn weergegeven in bijlage 4, tabel 6.



h	$= 600 \text{ mm}$
c	$= 35 \text{ mm}$
f_{ck}	$= 35 \text{ N/mm}^2$
L	$= 4 \text{ m}$
Staal B500B	

Figuur 20: Grafiek breedte en dwarskrachtscheur



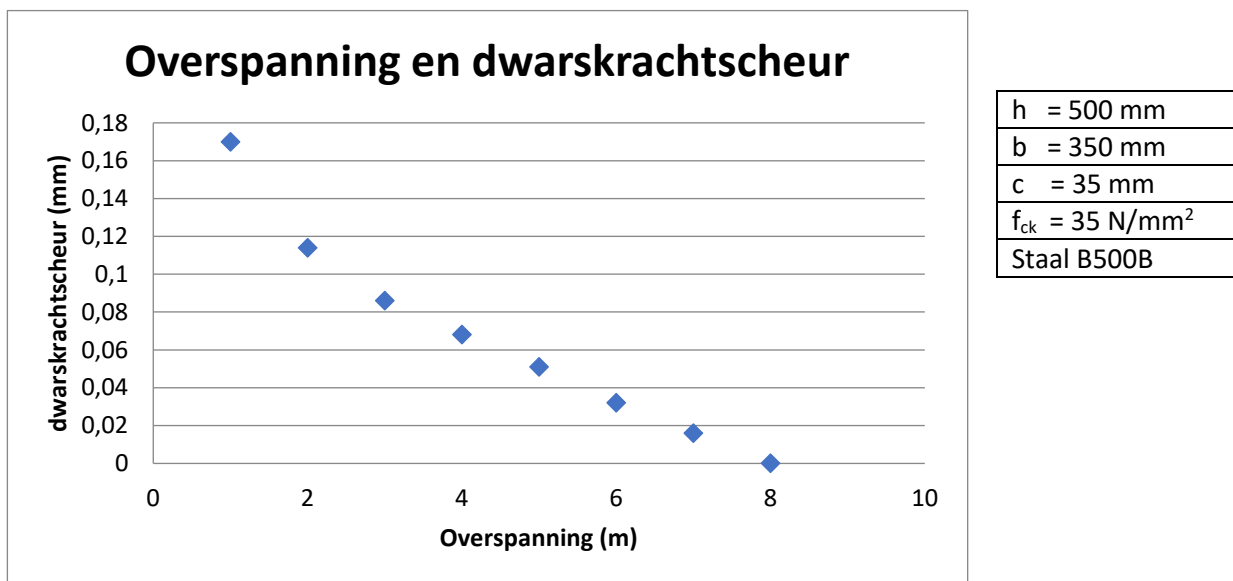
h	$= 600 \text{ mm}$
c	$= 35 \text{ mm}$
f_{ck}	$= 35 \text{ N/mm}^2$
L	$= 4 \text{ m}$
Staal B500B	

Figuur21: Grafiek breedte en ratio (dwarskrachtscheur/buigscheur)

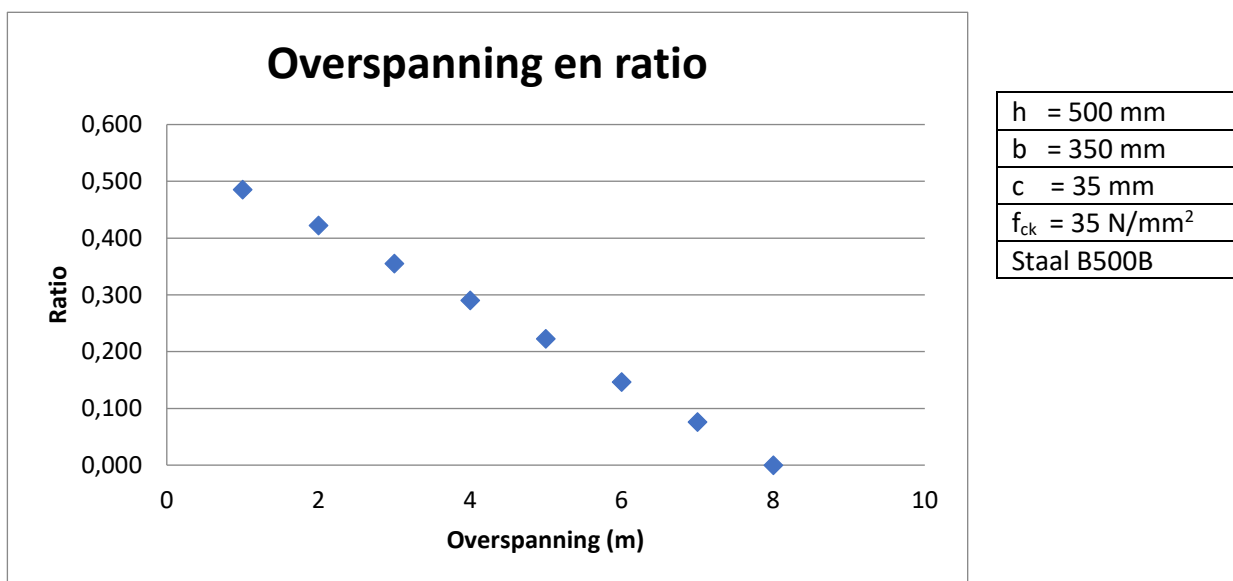
Uit deze resultaten blijkt dat een andere hoogte-breedte verhouding geen invloed heeft op de afmetingen van de dwarskrachtscheurwijdte. Ook de ratio van de dwarskrachtscheurwijdte tot de buigscheurwijdte blijft redelijk constant en ligt tussen de 0,34 en 0,36. Dat de breedte van de balk geen zichtbaar invloed heeft is ook naar verwachting, aangezien er bij de berekening van de scheurwijdte wordt gekeken naar de effectieve breedte, welke gelijk is aan $2,5 (b-d)$. Bij een grotere breedte neemt ook de d toe, waardoor de uiteindelijke effectieve oppervlakte gelijk blijft.

5.1.2 Overspanning

Ook de overspanning is een variabele die invloed zou kunnen hebben. Bij een grotere overspanning wordt het moment maatgevend ten opzichte van de dwarskracht. Dit is ook te zien in de resultaten. Ook hier wordt gebruik gemaakt van de standaardbalk, maar wordt de overspanning als veranderende parameter ingezet. De wapeningspercentages van de langwapening en dwarskrachtwapening verschillen en zijn per overspanning aangegeven in tabel 6. De reden hiertoe is dat bij een kleine overspanning de dwarskracht maatgevend is en bij een grote overspanning het moment maatgevend is. De grafieken (figuur 22 en figuur 23) geven de resultaten weer. De precieze waarden zijn weergegeven in tabel 7, bijlage 4.



Figuur 22: Grafiek overspanning en dwarskrachtscheurwijdte

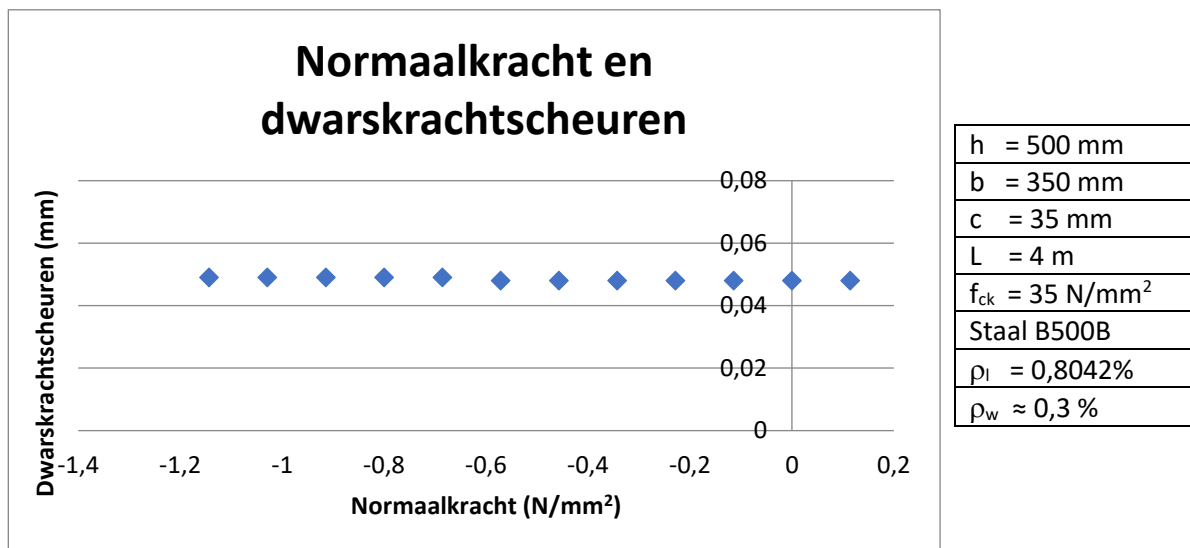


Figuur 23: Grafiek overspanning en ratio (dwarskrachtscheur/buigscheur)

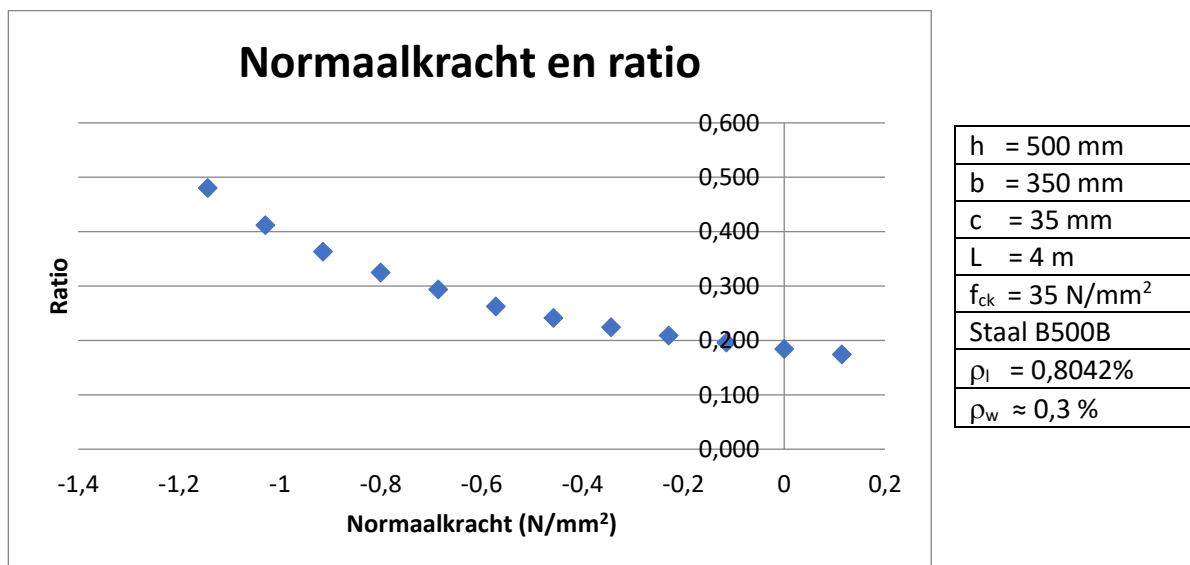
In overeenstemming met het feit dat bij een kleinere overspanning de dwarskracht ten opzichte van het moment maatgevender is dan bij een grote overspanning, zijn ook de dwarskrachtscheuren maatgevender bij een kleinere overspanning. Bij grote overspanningen kan zelfs, volgens het model, alle dwarskracht worden opgenomen door het beton en ontstaat er geen rek in de dwarskrachtwapening, aangezien de wapening niet op spanning komt. Dit leidt bij grote overspanningen tot een dwarskrachtscheurwijdte van 0 mm. Aangezien de buigscheuren precies het tegenovergestelde doen, smal bij kleine overspanningen en breed bij grote overspanningen, neemt de ratio dan ook zeer duidelijk af bij toename van de overspanning.

5.1.3 Normaalkracht

Ook wordt met een aantal voorbeelden onderzocht of de aanwezigheid van een uitwendige normaalkracht invloed heeft op de dwarskrachtscheurwijdte en de ratio. Het dwarskrachtwapeningpercentage verandert een klein beetje mee, maar blijft rond de 0,3 %. De precieze resultaten zijn aangegeven in tabel 8, bijlage 4 en de grafieken van de resultaten zijn te zien in figuur 24 en figuur 25.



Figuur 24: Grafiek normaalkracht en dwarskrachtscheurwijdte



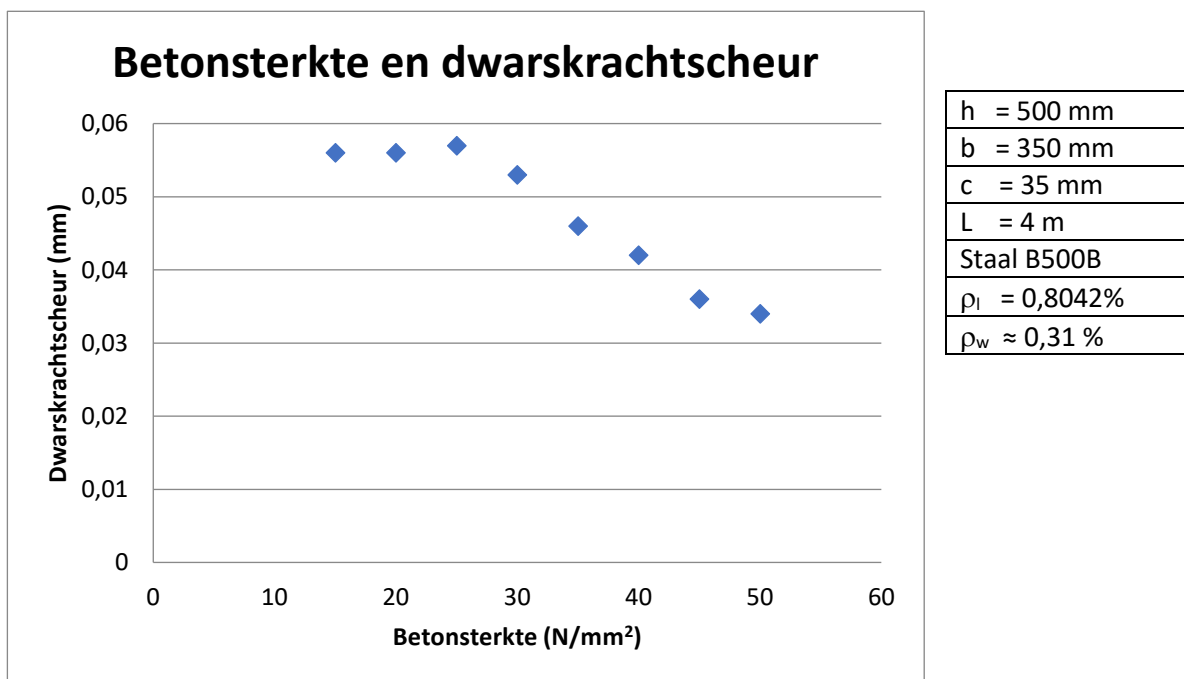
Figuur 25: Grafiek normaalkracht en ratio (dwarskrachtscheur/buigscheur)

Zoals blijkt heeft de normaalkracht geen invloed op de dwarskrachtscheurwijdte. De ratio verandert wel, doordat door de drukkracht de buigscheur smaller wordt door de drukkracht. Er is om deze reden met name drukkracht weergegeven, aangezien trekkracht geen maatgevend resultaat meer geeft.

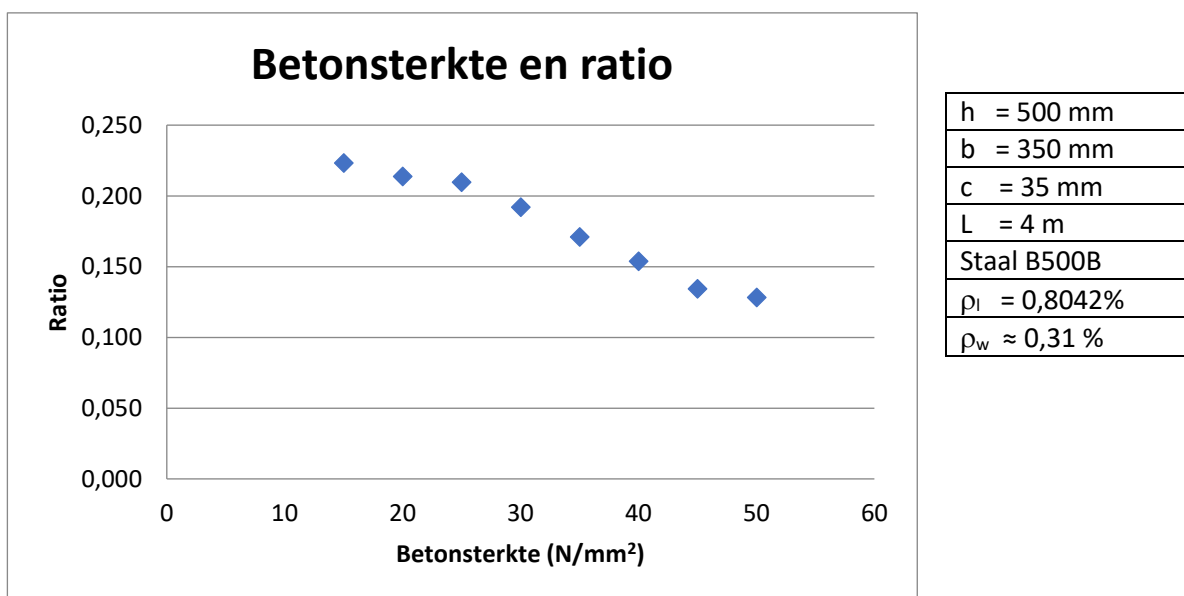
Een kanttekening bij deze controle van de normaalkracht is dat de hoek Θ nog steeds gelijk is gehouden aan 45° . Dit is echter wanneer een uitwendige normaalkracht wordt uitgeoefend, niet geheel correct en er zou per situatie een cirkel van Mohr getekend moeten worden om de hoek Θ te kunnen bepalen. Naar verwachting zullen de scheuren vlakker gaan lopen, doordat de hoofdspanningen een grotere hoek zullen gaan maken dan de aangenomen 45° . In een vervolgstudie zou dit beter en nauwkeuriger onderzocht kunnen worden.

5.1.4 Betonsterkte

Als variabele parameter wordt nu de betonsterkte genomen. Het rekenmodel geldt niet voor hoge sterkteklasse beton en deze zijn dan ook niet genomen in deze parameterstudie van de betonsterkte. De gevonden waarden staan in tabel 9 van bijlage 4 en in figuur 26 en figuur 27.



Figuur 2618: Grafiek betonsterkte en dwarskrachtscheur



Figuur 27: Grafiek betonsterkte en ratio

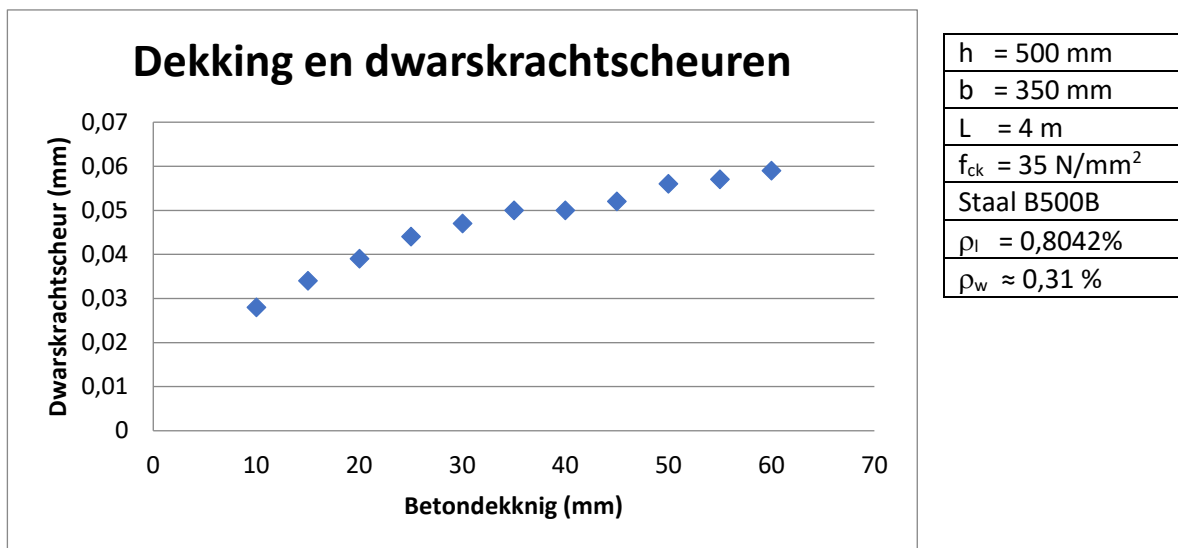
Zoals blijkt uit de figuren 26 en 27 heeft de betonsterkte wel degelijk invloed op de dwarskrachtscheurwijdte en ook de ratio. Dit kan ook verklaard worden aan de hand van de formules. Bij het berekenen van de dwarskrachtscheurwijdte in de SLS-situatie wordt namelijk het aandeel dat beton levert, zoals uitgelegd in paragraaf 4.1 en 4.2, van de kracht die door de wapening gaat, afgehaald. Bij een grotere sterkte van het beton, wordt het aandeel dat dit levert ook groter en de spanning de wapening dus kleiner. Dit komt voort uit de eerder gevonden formule:

$$V_c = 0,147 k (100\rho_l f_{cm})^{1/3} b_w d$$

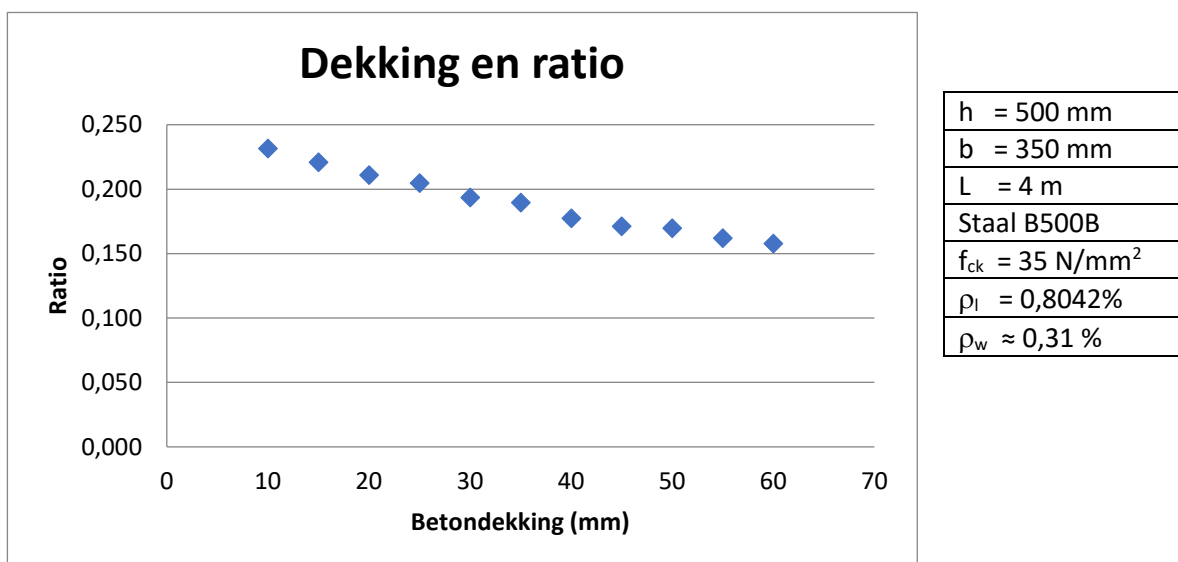
Aangezien de buigscheuren wel gelijk blijven, neemt de ratio ook af bij een toenemende betonsterkte.

5.1.5 Betondekking

Daarnaast is een belangrijke variabele ook de betondekking. Deze is onder andere afhankelijk van de milieuklasse. De minimale betondekking is sowieso 10 mm (NEN, 2016) Er wordt door gerekend tot een dekking van 60 mm. De precieze uitkomsten uit het rekenmodel zijn te vinden in bijlage 4, tabel 10 en weergegeven in de figuren 28 en 29.



Figuur 2819: Grafiek dekking en dwarskrachtscheuren



Figuur 2920: Grafiek dekking en ratio

Dat de dwarskrachtscheurwijdte toeneemt bij een toenemende dekking is ook te verklaren met behulp van de formules gebruikt voor het berekenen van de scheurwijdte. Ten eerste geldt voor de maximale scheurwijdteafstand de formule:

$$S_{rmax} = 3.4c + 0.425k_1k_2 \frac{\varphi}{\rho_{eff}}$$

Bij een toenemende dekking neemt de maximale scheurwijdte dus toe zoals rechtstreeks uit de formule volgt: Een toenemende dekking c veroorzaakt een grotere $S_{r,max}$.

Daarnaast verandert ook de component ρ_{eff} . Door de toenemende dekking wordt namelijk de effectieve hoogte, d , kleiner ($d = b - c - \frac{\varphi_{beugel}}{2}$).

Een kleinere d leidt tot een grotere effectieve breedte ($b_{c,eff} = 2,5(b - d)$).

Een grotere effectieve breedte leidt vervolgens weer tot een groter effectief oppervlakte ($A_{c,eff} = L * b_{c,eff}$).

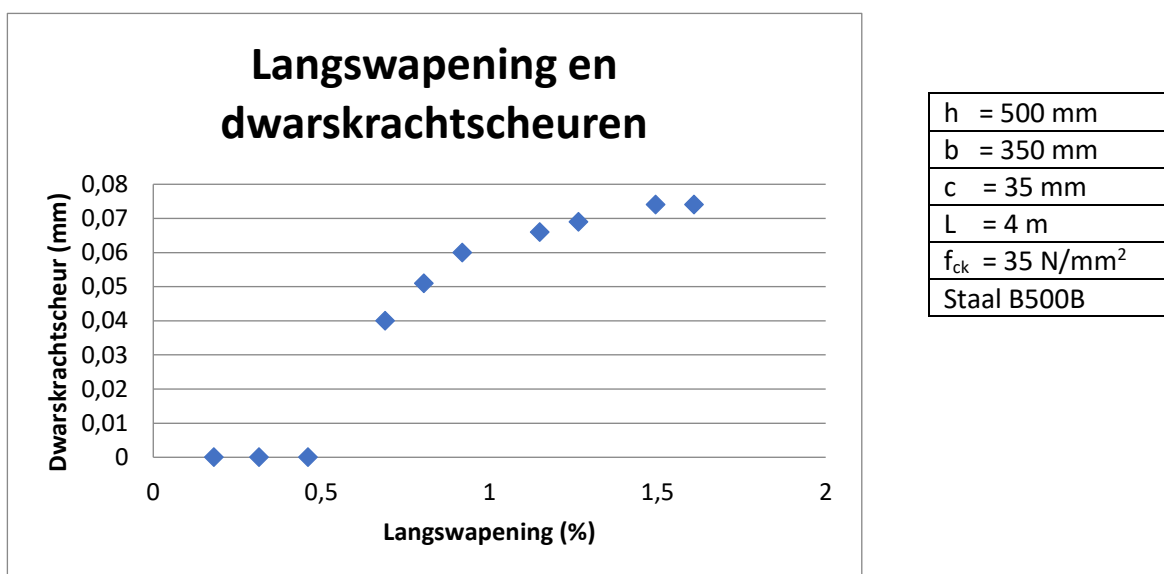
Wanneer dan uiteindelijk ρ_{eff} wordt berekend volgens de formule $\rho_{eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$, wordt deze component dus kleiner, waardoor wederom de maximale scheurwijdte afstand en daarmee de maximale scheurwijdte toeneemt.

Hetzelfde geldt voor de buigscheuren. Deze nemen in wijdte harder toe dan de dwarskrachtscheuren, waardoor de ratio daalt.

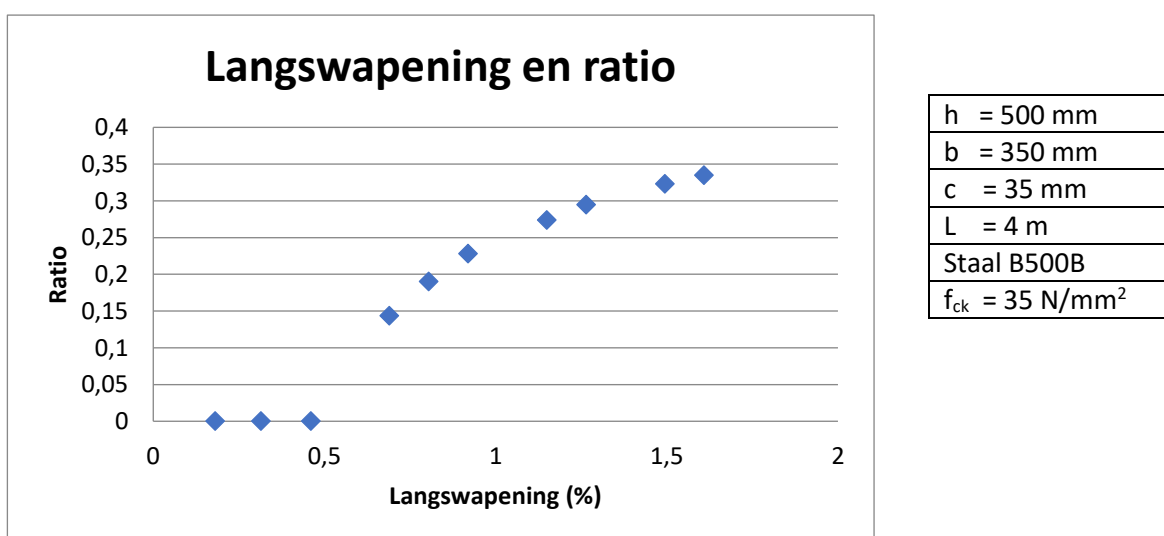
5.1.6 Langswapeningspercentage

Voor de langswapening wordt een gegeven minimum en maximum aangehouden. Deze zijn geformuleerd in de eurocode. De minimale wapening voor de SLS-situatie is beschreven in paragraaf 2.4.2. Daarnaast is er ook een regel in de eurocode voor het berekenen van de minimumwapening in de ULS-situatie. Deze is beschreven in paragraaf 2.3. Rekening houdend met deze waarden is de grafiek voor verschillende wapeningspercentages bepaald. De tabel hiervan is te vinden in bijlage 4, tabel 11 en de grafiek zijn weergegeven in figuur 30 en 31.

Hogere langswapeningspercentages worden niet bereikt, omdat de balk eerder al de maximale dwarskrachtcapaciteit met wapening heeft bereikt. Het dan nog toevoegen van extra langswapening heeft geen nut en zou daarom een onrealistisch voorbeeld zijn.



Figuur 3021: Grafiek langswapening en dwarskrachtscheuren



Figuur 3122: Grafiek langswapening en ratio (dwarskrachtscheur/buigscheur)

Wanneer een hoger langswapeningspercentage wordt toegepast kan de balk meer belasting hebben en neemt daardoor ook de dwarskracht toe. Dit leidt dan weer tot een grotere dwarskrachtscheur. Echter neemt ook de ratio toe. Dit betekent dat de dwarskrachtscheurwijdte harder toeneemt dan de buigscheurwijdte. Uit de formule zoals die het aandeel beton berekend, ook aangehaald bij betonsterkte (paragraaf 5.1.4), neemt het aandeel dat beton kan opnemen toe met de langswapening, maar zoals blijkt uit de grafieken niet voldoende om de dwarskrachtscheurwijdte niet te laten toenemen bij een uitgenutte balk.

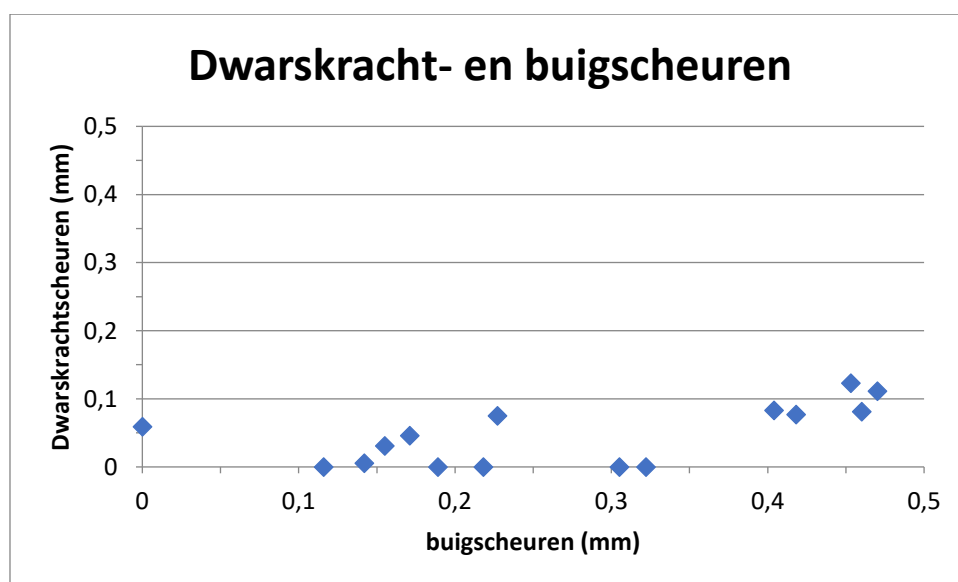
Zoals blijkt uit deze resultaten komt bij een kleine wapeningspercentage het staal van de dwarskrachtwapening niet op spanning en scheurt het beton met betrekking tot dwarskrachtscheuren niet volgens het model.

5.2 Praktijkvoorbeelden

Om nog meer zekerheid te krijgen over de verhouding buigscheurwijdte en dwarskrachtscheurwijdte worden verschillende praktijkvoorbeelden ingevuld. De ingevulde gegevens per voorbeeld zijn weergegeven in bijlage 5. De uiteindelijk gevonden dwarskrachtscheurwijdte wordt uitgezet tegen de bijbehorende buigscheurwijdte (zie figuur 32). Hiermee kan ook de ratio (dwarskrachtscheurwijdte/buigscheurwijdte) gevonden worden.

Tabel 5: Buig- en dwarskrachtscheurwijdte van praktijkvoorbeelden

Voorbeeldnummer	buigscheurwijdte (mm)	Dwarskrachtscheurwijdte (mm)	Ratio
1.	0	0,059	>1
2.	0,116	0	0
3.	0,142	0,0055	0,039
4.	0,155	0,031	0,200
5.	0,171	0,046	0,269
6.	0,189	0	0
7.	0,218	0	0
8.	0,227	0,075	0,330
9.	0,305	0	0
10.	0,322	0	0
11.	0,404	0,083	0,205
12.	0,418	0,077	0,184
13.	0,453	0,123	0,272
14.	0,460	0,081	0,176
15.	0,470	0,111	0,236



Figuur 3223: Grafiek praktijkvoorbeelden dwarskracht- en buigscheuren

Zoals blijkt uit de praktijkvoorbeelden worden ook hier geen maatgevende dwarskrachtscheuren gevonden. De ratio (dwarskrachtscheurwijdte/buigscheurwijdte) stijgt niet boven de 0,4 uit. In veel gevallen komt het staal van de dwarskrachtwapening volgens het model niet op spanning en blijft de dwarskrachtscheurwijdte zelfs 0 mm.

6. Conclusie

Doel van dit rapport was om een rekenmodel te maken voor dwarskrachtscheuren op basis van het trekstaafmodel en hiermee te bepalen of dwarskrachtscheuren volgens dit model maatgevend zijn ten opzichte van buigscheuren.

Wanneer het trekstaafmodel van buigscheuren wordt toegepast op dwarskrachtscheuren komt naar voren dat de wapening bij dwarskrachtscheuren niet zo effectief werkt als bij buigscheuren. Hier is in de berekening rekening mee gehouden. Daarnaast is er rekening mee gehouden dat in de bruikbaarheidsgrenstoestand niet alleen het wapeningsstaal kracht kan opnemen, maar ook het beton zelf.

Uit het rekenmodel blijkt dat onder normale omstandigheden de dwarskrachtscheuren niet maatgevend zijn. Verschillende parameters zijn hiertoe getest om te zoeken naar een maatgevende situatie. De parameters die onderzocht zijn, zijn de breedte, overspanning, normaalkracht, betonsterkte, betondekking en langswapening. Uit de parameterstudie bleek de breedte geen invloed te hebben op de dwarskrachtscheurwijdte. Bij een kleinere overspanning werd de dwarskracht en ook de dwarskrachtscheurwijdte maatgevender dan bij grote overspanningen. De normaalkracht vanuit het gebruikte model heeft ook geen invloed op de dwarskrachtscheurwijdte. De betonsterkte heeft wel een duidelijke invloed op de dwarskrachtscheurwijdte. Een toenemende betonsterkte zorgt voor een afnemende scheurwijdte. Een grotere betondekking zorgt juist weer voor een grotere scheurwijdte en tot slot zorgt een groter langswapeningspercentage ook voor een grotere dwarskrachtscheurwijdte, doordat de balk dan meer belasting kan opnemen en de dwarskracht dan ook toeneemt. Echter is bij geen enkele parameter een combinatie gevonden waarbij de dwarskrachtscheurwijdte maatgevend is. Ook bij de praktijkvoorbeelden is geen maatgevende dwarskrachtscheurwijdte gevonden.

Bronnen

Frenay (1990). *Theory and experiments on the behaviour of cracks in concrete subjected to sustained shear loading*. <http://heronjournal.nl/35-1/1.pdf>. Geraadpleegd op 27 mei 2019.

Jellema (2011). *Draagstructuur 3*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.

NEN (2005). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies – Bruggen*. NEN-EN 1992-2.

NEN (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. NEN-EN 1992-1-1+C2

NEN (2016). *Nationale bijlage bij NEN-EN 1992-1-1+C2 Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. NEN-EN 1992-1-1+C2/NB (nl)

Vanhooymissen, L., Spegelaere, M., Gysel, A. van, Vylder, W. de (1999). *Gewapend beton*. Gent: Academia Press.

Zakaria, M., Ueda, T., Wu, Z. (2011). Evaluating and proposing prediction models of shear crack width in concrete beams. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 67, 245-263.

Bronnen figuren

Figuur 1: NEN (2011). *Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen*. NEN-EN 1992-1-1+C2

Figuur 2 t/m 4: eigen werk

Figuur 5: Civilax (2017). <https://www.civilax.com/concrete-tension-tensile-strength-concrete/>. Geraadpleegd op 9 mei 2019.

Figuur 3 t/m 5: Vanhooymissen, L., Spegelaere, M., Gysel, A. van, Vylder, W. de (1999). *Gewapend beton*. Gent: Academia Press.

Figuur 6: ESDEP WG 10 (n.d.) <http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/esdep/master/wg10/l0520.htm>. Geraadpleegd op 10 mei 2019.

Figuur 7: [Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken Departement Mobiliteit en Openbare Werken Technisch Ondersteunende Diensten Expertise Beton en Staal \(EBS\) \(2012\). *Cursus bruginspecteur*. \[http://www.expertisebetonenstaal.be/sites/default/files/atoms/files/H%201.6%20%20betonschade_0.pdf\]\(http://www.expertisebetonenstaal.be/sites/default/files/atoms/files/H%201.6%20%20betonschade_0.pdf\). Geraadpleegd op 25 april 2019.](http://www.vlaamseministerievanmobiliteit.be/department-mobiliteit-en-openbare-werken/technisch-ondersteunende-diensten/expertise-beton-en-staal)

Figuur 8: eigen werk

Figuur 9 t/m 11: Vanhooymissen, L., Spegelaere, M., Gysel, A. van, Vylder, W. de (1999). *Gewapend beton*. Gent: Academia Press.

Bronnen praktijkvoorbeelden

Anteagroup (2014). *Engineering fiets/voetgangersbruggen*. <https://repository.officiële-overheidspublicaties.nl/externebijlagen/exb-2014-16584/1/Bijlage/exb-2014-16584.pdf>.

Geraadpleegd op 29 mei 2019.

Betonstaal.nl (2019). *De juiste maat wapeningskorven*. <https://www.betonstaal.nl/blog/de-juiste-maat-wapeningskorven/>. Geraadpleegd op 29 mei 2019.

Bouwkundig adviesbureau Schagen (2015). *Statische berekeningen*.

file:///C:/Users/Elisa%20Stolwijk/Downloads/09.%20Hoofdberekening_23-11-2015.pdf.

Geraadpleegd op 30 mei 2019.

Civil Engineering (2014). *Design of RC beams*.

[http://tycnw01.vtc.edu.hk/cbe2022/R4_Design%20of%20R%20C%20Beams%20\(2014-08-01\).pdf](http://tycnw01.vtc.edu.hk/cbe2022/R4_Design%20of%20R%20C%20Beams%20(2014-08-01).pdf).

Geraadpleegd op 29 mei 2019.

Infonu (2019). *Hoe reken je de doorbuiging van een betonnen balk door*.

<https://wetenschap.infonu.nl/techniek/113641-hoe-reken-je-de-doorbuiging-van-een-betonnen-balk-door.html>. Geraadpleegd op 30 mei 2019.

Maszura, (n.d.). *Design of beam (examples and tutorials)*

http://ocw.ump.edu.my/pluginfile.php/13577/mod_resource/content/1/OCW_RCD1_5E.pdf.

Geraadpleegd op 30 mei 2019.

SchöckCombar (2010). *Technische informatie*.

https://www.schock.nl/view/1053/Technische_Informatie_Schoeck_Combar_%5B1053%5D.pdf.

Geraadpleegd op 29 mei 2019.

Quickeurocode (2011). *Dwarskracht en wrijving op rechthoekige doorsneden: berekening volgens eurocode 2*.

http://www.quickeurocode.nl/pdf/Rekenbladen/2_Beton_B%20dwarskracht%20en%20wrijving%20EC_A_NL_NL.pdf. Geraadpleegd op 30 mei 2019.

Bijlage 1: symbolenlijst

γ_c	Materiaalfactor beton
γ_s	Materiaalfactor staal
γ_G	Belastingfactor permanente belasting
γ_Q	Belastingfactor variabele belasting
f_{ck}	Karakteristieke druksterkte beton
f_{cm}	Gemiddelde druksterkte beton
f_{cd}	Rekenwaarde druksterkte beton
f_{ctm}	Gemiddelde treksterkte beton
f_{yk}	Karakteristieke vloeigrens staal
f_{yd}	Rekenwaarde vloeigrens staal
E_s	Elasticiteitsmodulus staal
E_c	Elasticiteitsmodulus beton
h	Hoogte doorsnede balk
b	Breedte doorsnede balk
L	Overspanning/Lengte balk
c	dekking
M_{rep}	Representatieve waarde moment
M_{ed}	Rekenwaarde moment
M_{rd}	Opneembaar moment
N_s	Normaalkracht in het staal
N_c	Normaalkracht in het beton
N_{ed}	Rekenwaarde normaalkracht
$V_{rd,c}$	Dwarskracht opneembaar door beton
V_{min}	Minimale dwarskracht opneembaar door beton
$V_{rd,max}$	Maximaal opneembare dwarskracht door beton en staal
W	Weerstandsmoment
A_s	Oppervlakte langswapening
A_{sw}	Oppervlakte dwarskrachtwapening
ϕ_l	Diameter langswapening
ϕ_{beugel}	Diameter beugels
σ_s	Spanning in staal
d	Effectieve hoogte
e	excentriciteit
X_u	Hoogte drukzone van beton
ε_{cu}	Grenswaarde betonstuik
Z	Hefboomarm
$h_{c,eff}$	Effectieve hoogte
$A_{c,eff}$	Effectieve oppervlakte
w_{max}	Maximale scheurwijdte
S_{rmax}	Maximale scheurafstand

(NEN, 2011)

Bijlage 2: Voorgestelde modellen voor scheurwijdteberekeningen

Models	Proposed Equations	Definition of Parameters
CEP-FIP model 1978 ⁽¹⁷⁾	$w_k = 1.7k_w w_{avg}$; $w_{avg} = s_{rm} \epsilon_w$ $s_{rm} = 2 \left(c_s + \frac{s_y}{10} \right) + k_1 k_2 \frac{d_{by}}{\rho_y}$	w_k is the characteristic shear crack width; w_{avg} is the average shear crack width; k_w denotes a correction coefficient to take account of the effect of the slope of the stirrups on the spacing of the cracks [$k_w = 1.2$ for vertical stirrups ($\alpha = 90^\circ$), $k_w = 0.8$ for inclined stirrups ($\alpha = 45^\circ - 60^\circ$); α is the angle between shear reinforcement and longitudinal axis of the member; ϵ_w is the shear reinforcement strain; s_{rm} is the average crack spacing as discussed in CEB-FIP Model Code 1978 ^{(17), (21)} .
CEP-FIP model 1990 ⁽¹⁸⁾	$w_k = l_{s,max} \epsilon_w$; $w_{avg} = s_{m\theta} \epsilon_w$ $l_{s,max} = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{l_{sx,max}} + \frac{\cos \theta}{l_{sy,max}}}$	w_k is the characteristic shear crack width; w_{avg} is the average shear crack width; $l_{s,max}$ is the maximum shear crack spacing; $s_{m\theta}$ is the average shear crack spacing; ϵ_w is the shear reinforcement strain; $l_{sx,max}$ is the maximum vertical crack spacing; $l_{sy,max}$ is the maximum horizontal crack spacing; definitions of $s_{m\theta}$, $l_{sx,max}$ and $l_{sy,max}$ are given in CEB-FIP Model Code 1990 ^{(18), (21)} .
Hassan et al. model ⁽²⁰⁾	$w_{avg} = \frac{d_{by} k_1 k_2 S}{1000 k_{fc} k_p}$ $k_p = \left(\frac{\rho_w}{0.004} \right)^{1.3}$ $k_{fc} = \left(\frac{f_c}{19.6} \right)^{2/3}$	w_{avg} is the average shear crack width; d_{by} is the shear reinforcement diameter; k_p is a coefficient that takes into account the effect of shear reinforcement ratio (ρ_w); k_{fc} is a coefficient takes into account the effect of compressive strength of concrete (f_c); ϵ_w is the shear reinforcement strain; S is the modified slip, and $k_1 = 2.4$, $S = 4 \times 10^3 \epsilon_w + 20 \times 10^6 (\epsilon_w)^2$ for plain bar $k_1 = 2.0$, $S = 8 \times 10^3 \epsilon_w + 2 \times 10^6 (\epsilon_w)^2$ for deformed bar $k_2 = 1.2$ for vertical stirrup, $k_2 = 1.0$ for inclined stirrup
Fukuyama et al. model ⁽¹³⁾	$w_{avg} = 0.9 d_e \frac{\epsilon_w}{\sqrt{2}}$	w_{avg} is the average shear crack width; d_e is the effective depth of the beam section; ϵ_w is the shear reinforcement strain.
Piyamahant model ⁽¹⁴⁾	$w_{avg} = \frac{2 d_{by} S}{\left(f_c / 20 \right)^{2/3}}$ $S = \epsilon_w (6 + 3500 \epsilon_w)$	w_{avg} is the average shear crack width; d_{by} is the shear reinforcement diameter; S is the normalized slip; f_c is the compressive strength of concrete; ϵ_w is the shear reinforcement strain.
Shinomiya and Watanabe model ⁽¹⁵⁾	$w_{avg} = l_{av} \epsilon_w$ $l_{av} = 2 \left(\frac{c_s + c_a}{2} + \frac{s}{10} \right) + 0.1 \frac{d_{by}}{\rho_y}$	w_{avg} is the average shear crack width; l_{av} is the average crack spacing; c_s is the side concrete cover to the shear reinforcement; $c_a = (s_y - d_{by})/2$; s_y is the shear reinforcement spacing; d_{by} is the diameter of shear reinforcement; s is the distance between stirrup legs ($s = b_w - 2c_s - d_{by}$); ρ_y is the ratio of the amount of transverse reinforcement to the effective concrete area ($\rho_y = A_w / [(2c_s + d_{by})b_w]$); b_w is the beam width; ϵ_w is the shear reinforcement strain.
Witchukreangkrai et al. model ⁽⁹⁾	$w_{avg} = 0.75 k_w k_p s_{m\theta} \epsilon_w$ $k_w = \left(\frac{0.004}{\rho_w} \right)^{2/3}$ $k_p = \left(\frac{1}{1 + \sigma_{c,pt} / f_c} \right)$	w_{avg} is the average shear crack width; k_w is a coefficient that takes into account the effect of shear reinforcement ratio (ρ_w); k_p is a coefficient takes into account the effect of compressive stress at centroid of concrete section due to prestress ($\sigma_{c,pt}$); f_c is the compressive strength of concrete; ϵ_w is the shear reinforcement strain; $s_{m\theta}$ is the average shear crack spacing which can be calculated as given in the previous work ^{(9), (21)} .
De Silva et al. model ⁽¹⁰⁾	$w_{avg} = k_w s_{m\theta} \epsilon_w$ $s_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{s_{mx}} + \frac{\cos \theta}{s_{my}}}$	w_{avg} is the average shear crack width; k_w is a coefficient that represents the effect of the shear reinforcement angle [$k_w = 1.2$ for vertical stirrups ($\alpha = 90^\circ$), $k_w = 0.8$ for inclined stirrups ($\alpha = 45^\circ - 60^\circ$); α is the angle between shear reinforcement and longitudinal axis of the member; ϵ_w is the shear reinforcement strain; $s_{m\theta}$ is the average shear crack spacing as given in the previous studies ^{(10), (21)} .

(Zakaria,2011)

Bijlage 3: Rekenmodel mathcad

In deze bijlage wordt een voorbeeld van het rekenmodel in Mathcad weergegeven. Dit rekenmodel kan dus ook voor andere afmetingen, belastingen en betonsterktes gebruikt worden door de parameters aan te passen. De geel gearceerde uitdrukkingen dienen handmatig ingevuld te worden.

Materiaalgegevens

Beton	$f_{ck} := 35$	$\frac{N}{mm^2}$	$f_{ctm} := 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 3.21$	$\frac{N}{mm^2}$
	$\gamma_c := 1.5$		$f_{cm} := f_{ck} + 8 = 43$	$\frac{N}{mm^2}$
	$\varepsilon_{cu} := 3.5$	‰	$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 23.333$	$\frac{N}{mm^2}$
	$E_c := 30000$	$\frac{N}{mm^2}$		

Staal	$f_{yk} := 500$	$\frac{N}{mm^2}$		
	$\gamma_s := 1.15$			
	$E_s := 200000$		$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783$	$\frac{N}{mm^2}$

Gegevens balk	$h := 500$	mm
	$b := 350$	mm
	$c := 35$	mm
	$L := 4$	m

Belastingen	$\gamma G := 40$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
	$\gamma Q := 50$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}}$	
	$N_{\text{ed}} := 0$	kN	
	$N_{\text{rep}} := 0$	kN	
	$e := 0$	mm	
			$M_{\text{rep}} := \frac{1}{8} \cdot (\gamma G + \gamma Q) \cdot L^2 = 180 \quad \text{kNm}$
			$M_{\text{ed}} := \frac{1}{8} \cdot (\gamma G \cdot 1.2 + \gamma Q \cdot 1.5) \cdot L^2 = 246 \quad \text{kNm}$
			$V_{\text{rep}} := \frac{(\gamma G + \gamma Q) \cdot L}{2} = 180 \quad \text{kN}$
			$V_{\text{ed}} := \frac{(\gamma G \cdot 1.2 + \gamma Q \cdot 1.5) \cdot L}{2} = 246 \quad \text{kN}$
Overige constanten	$k_1 := 0.8$		
	$k_2 := 0.5$		
	$k_t := 0.4$		
	$\beta := 0.39$		

Na het algemene deel wordt als eerste de balk doorgerekend op het moment in de ULS-situatie, zoals in deelvraag één beschreven is.

Moment en axiale krachten

Langswapening:

$$\varphi_l := 32 \quad \text{mm}$$

dwarskrachtwapening:

$$\varphi_{\text{beugel}} := 16$$

(a=aantal staven)

$$a := 2$$

$$A_s := a \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \varphi_l^2 = 1.608 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\rho_l := \frac{A_s}{b \cdot h} = 9.191 \times 10^{-3}$$

$$d := h - c - \varphi_{\text{beugel}} - \frac{1}{2} \varphi_l = 433 \quad \text{mm}$$

$$N_s := \frac{f_{yd} \cdot A_s}{1000} = 699.346 \quad \text{kN}$$

$$N_c := N_s + N_{ed} = 699.346 \quad \text{kN}$$

$$X_u := \frac{N_c \cdot 1000}{0.75 \cdot f_{cd} \cdot b} = 114.179 \quad \text{mm}$$

$$X_{\text{umax}} := \frac{\varepsilon_{cu} \cdot 10^6 \cdot d}{\varepsilon_{cu} \cdot 10^6 + 7 \cdot f_{yd}} = 432.624 \quad \text{mm}$$

$$\underline{X_u} := \min(X_u, X_{\text{umax}}) = 114.179 \quad \text{mm}$$

$$Z := d - \beta \cdot X_u = 388.47 \quad \text{mm}$$

$$h_{\text{ceff}} := \min \left[2.5 \cdot (h - d), \frac{h - X_u}{3}, \frac{h}{2} \right] = 128.607 \quad \text{mm}$$

$$A_{\text{ceff}} := b \cdot h_{\text{ceff}} = 4.501 \times 10^4 \quad \text{mm}^2$$

ULS-berekening: moment en axiale kracht

$$M_{rd} := \frac{N_c \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot h - \beta \cdot X_u \right) + N_s \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot h - (h - d) \right]}{10^3} = 271.675 \text{ kNm}$$

$$M_{edster} := e \cdot N_{ed} = 0 \text{ kNm}$$

$$\underline{\underline{M_{ed}}} := M_{ed} + M_{edster} = 246 \text{ kNm}$$

$$\frac{M_{ed}}{M_{rd}} + \frac{N_{ed} \cdot 10^3}{A_s \cdot f_{yd}} = 0.905$$

$$\sigma_s := \frac{N_{ed} \cdot 10^3}{A_s} + \frac{M_{ed} \cdot 10^6}{Z \cdot A_s} = 393.693 \text{ N/mm}^2$$

Met behulp van bovenstaande uitgerekende parameters kan uitgerekend worden of de gekozen langwapening binnen de limieten valt van de minimale en maximale wapening.

Minimale wapening

$$A_c := b \cdot h = 1.75 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$\underline{\underline{W}} := \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2 = 1.458 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\eta := \frac{e \cdot A_c}{W} = 0$$

$$M_{min1} := f_{ctm} \cdot W \cdot \frac{\eta}{\eta - 1} = 0 \text{ Nmm}$$

$$M_{min2} := f_{ctm} \cdot W \cdot \frac{\eta}{\eta + 1} = 0 \text{ Nmm}$$

$$M_{min3} := f_{ctm} \cdot W = 4.681 \times 10^7 \text{ Nmm}$$

$$N_{min1} := f_{ctm} \cdot A_c \cdot \frac{1}{\eta - 1} = -5.617 \times 10^5 \text{ N}$$

$$N_{min2} := f_{ctm} \cdot A_c \cdot \frac{1}{\eta + 1} = 5.617 \times 10^5 \text{ N}$$

$$M_{\min} := \text{if}(\text{Ned} < 0, M_{\min 1}, \text{if}(\text{Ned} > 0, M_{\min 2}, M_{\min 3})) = 4.681 \times 10^7$$

$$N_{\min} := \text{if}(\text{Ned} < 0, N_{\min 1}, \text{if}(\text{Ned} > 0, N_{\min 2}, 0)) = 0$$

$$\sigma_{\min} = M_{\min} / (Z \cdot A_{\min}) + N_{\min} / A_{\min}$$

Aangezien A_s eigenlijk nog onbekend is en moet gaan voldoen, wordt de formule omgeschreven.

$$\sigma_{\max} := 435 \quad \text{N/mm}^2$$

$$A_{\min 1} := \frac{M_{\min}}{Z \cdot \sigma_{\max}} + \frac{N_{\min}}{\sigma_{\max}} = 277.019 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{\min 2} := 1.25 \cdot \left(\frac{M_{\text{ed}} \cdot 10^6}{Z \cdot \sigma_{\max}} + \frac{N_{\text{ed}} \cdot 10^3}{\sigma_{\max}} \right) = 1.82 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{\min} := \min(A_{\min 1}, A_{\min 2}) = 277.019 \quad \text{mm}^2$$

Daarnaast kan ook de **maximale langswapening** bepaald worden:

$$A_{\max 1} := \frac{0.75 \cdot b \cdot f_{\text{cd}} \cdot X_{\text{umax}}}{f_{\text{yd}}} = 6.095 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{\max 2} := 0.04 \cdot b \cdot h = 7 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{\max} := \min(A_{\max 1}, A_{\max 2}) = 6.095 \times 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\text{if} \left(\begin{array}{l} A_s \geq A_{\min} \\ A_s \leq A_{\max} \end{array}, 1, 0 \right) = 1$$

1: hoeveelheid wapening valt binnen boven-en ondergrens
0: hoeveelheid wapening valt buiten boven- en ondergrens

Zoals uit de unity check blijkt, voldoet de balk voor de momentcapaciteit en de minimale en maximale wapening in de ULS-situatie. Nu wordt ook de minimale wapening in de SLS-situatie en de afstand van de buigscheur doorgerekend.

Bepalen minimale langswapening SLS:

$$k := \text{if} \left[h < 300, 1.0, \text{if} \left[h > 800, 0.65, \text{if} \left[300 < h < 800, \frac{0.65 - 1}{800 - 300} \cdot (h - 300) + 1, 1 \right] \right] \right] = 0.86$$

$$h_{ster} := \text{if}(h < 1000, h, 1000) = 500 \quad \text{mm}$$

$$\sigma_c := \frac{N_{rep}}{b \cdot h} = 0 \quad \text{N/mm}^2$$

$$k_{lc} := \text{if} \left(N_{rep} < 0, 1.5, \frac{2 \cdot h_{ster}}{3 \cdot h} \right) = 0.667$$

$$k_c := 0.4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_{lc} \cdot \frac{h}{h_{ster}} \cdot f_{ctm}} \right) = 0.4$$

$$\underline{\underline{A_{smin}}} := \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ctm} \cdot A_{ceff}}{f_{yd}} = 114.319 \quad \text{mm}^2$$

$$\text{if}(A_s \geq A_{smin}, 1, 0) = 1$$

1: Wapening voldoet aan ondergrens SLS

0: Wapening voldoet niet aan ondergrens SLS

SLS-berekening: scheurwijdte buigscheuren

$$\rho_{\text{eff}} := \frac{A_s}{A_{\text{ceff}}} = 0.036$$

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_c}$$

$$\sigma_{s\text{rep}} := \frac{N_{\text{rep}} \cdot 10^3}{A_s} + \frac{M_{\text{rep}} \cdot 10^6}{Z \cdot A_s} = 288.068 \quad \text{N/mm}^2$$

$$s_{\text{max}} := \min \left[3.4 \cdot c + 0.425 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\varphi_l}{\rho_{\text{eff}}}, \max[(50 - 0.8 \cdot f_{ck}) \cdot \varphi_l, 15 \cdot \varphi_l] \right] = 271.234 \quad \text{mm}$$

$$\varepsilon_{s\text{m}\varepsilon\text{cm}} := \frac{\sigma_{s\text{rep}} - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{\text{eff}}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{\text{eff}})}{E_s} = 1.218 \times 10^{-3}$$

$$w_{\text{max}} := s_{\text{max}} \cdot \varepsilon_{s\text{m}\varepsilon\text{cm}} = 0.33 \quad \text{mm}$$

De scheurwijdte is groter dan 0,3 mm en dus eigenlijk te groot om toe te passen. Om te vergelijken met de dwarskrachtscheurwijdte wordt deze ook uitgerekend voor deze balk. Hiertoe dient eerst de hoeveelheid dwarskrachtwapening bepaald te worden in de ULS-situatie.

Dwarskracht en beugels

$$V_{\text{ed}} = 246 \quad \text{kN}$$

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}}, 2 \right) = 1.68$$

$$V_{\text{rdc}} := \frac{0.12 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d}{1000} = 97.148 \quad \text{kN}$$

$$V_{\text{minc}} := \frac{0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot f_{ck}^{0.5} \cdot b \cdot d}{1000} = 68.309 \quad \text{kN}$$

$$\theta_{\text{ULS}} := 21.8$$

$$\nu := 0.5 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) = 0.43$$

$$V_{rdmax} := \frac{b \cdot Z \cdot \nu \cdot f_{cd}}{\cot\left(\frac{\theta_{ULS}}{360} \cdot 2\pi\right) + \tan\left(\frac{\theta_{ULS}}{360} \cdot 2\pi\right)} = 470.382 \quad \text{kN}$$

$$A_{sw} := \frac{V_{ed}}{Z \cdot f_{yd} \cdot \cot\left(\frac{\theta_{ULS}}{360} \cdot 2\pi\right)} = 5.826 \times 10^{-4} \quad \text{m}^2$$

$$V_{rd} := A_{sw} \cdot Z \cdot \cot\left(\frac{\theta_{ULS}}{360} \cdot 2\pi\right) \cdot f_{yd} = 246 \quad \text{kN}$$

$$\rho_w := \frac{A_{sw} \cdot 10^6}{b \cdot h} = 3.329 \times 10^{-3}$$

Nu de hoeveelheid dwarskrachtwapening bekend is kan het trekstaafmodel, zoals beschreven in hoofdstuk 3 en 4 toegepast worden.

SLS - berekening scheurwijdte dwarskrachtscheuren

$$d_2 := b - c - \frac{\varphi_{beugel}}{2} = 307 \quad \text{mm}$$

$$heff := \min\left[2.5(b - d_2), \frac{b}{2}, \frac{b}{3}\right] = 107.5 \quad \text{mm}$$

$$A_{ceff} := L \cdot \frac{heff}{1000} = 0.43 \quad \text{m}^2$$

$$\rho_{eff} := \frac{A_{sw}}{A_{ceff}} = 1.355 \times 10^{-3}$$

$$S_{rmaxz} := \min\left[3.4 \cdot c + 0.425 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\varphi_{beugel}}{\rho_{eff}}, \max[(50 - 0.8 \cdot f_{ck}) \cdot \varphi_{beugel}, 15 \cdot \varphi_{beugel}]\right] = 352 \quad \text{mm}$$

$$S_{rmaxy} := S_{rmax} = 271.234 \quad \text{mm}$$

$$\theta_{SLS} := \frac{45}{360} \cdot 2 \cdot \pi = 0.785$$

$$S_{rmax} := \frac{1}{\frac{\cos(\theta_{SLS})}{S_{rmaxy}} + \frac{\sin(\theta_{SLS})}{S_{rmaxz}}} = 216.646 \quad \text{mm}$$

De spanning in staal in SLS-toestand wordt als volgt berekend:

$$V_c := \frac{0.147 \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_{cm})^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d}{1000} = 127.459 \quad \text{kN}$$

$$V_s := \max(V_{rep} - V_c, 0) = 52.541 \quad \text{kN}$$

$$\sigma_{sSLS} := \frac{V_s}{A_{sw} \cdot Z \cdot \cot\left(\frac{\theta_{ULS}}{360} \cdot 2 \cdot \pi\right)} = 92.862 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\varepsilon_{sm\text{cm}} := \max\left[\frac{\sigma_{sSLS} - k_t \cdot \frac{f_{ctm}}{\rho_{eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{eff})}{E_s}, 0.6 \cdot \frac{\sigma_{sSLS}}{E_s}\right] = 2.786 \times 10^{-4}$$

$$w_{max} := S_{max} \cdot \varepsilon_{sm\text{cm}} = 0.06 \quad \text{mm}$$

Bijlage 4: Resultaten parameterstudie

Tabel 6: buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende breedtes en maximale belastingen.

Hoogte (mm)	Breedte (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Wmax (buigscheur) (mm)	Wmax (dwarskrachtscheur) (mm)	Ratio
600	200	1,3	0,516	0,283	0,097	0,343
600	250	1,3	0,518	0,289	0,100	0,346
600	300	1,3	0,472	0,255	0,089	0,349
600	350	1,3	0,511	0,287	0,100	0,348
600	400	1,3	0,465	0,255	0,090	0,353
600	450	1,3	0,501	0,280	0,098	0,350
600	500	1,3	0,404	0,220	0,079	0,359
600	550	1,3	0,485	0,270	0,095	0,352
600	600	1,3	0,527	0,297	0,102	0,343
600	650	1,3	0,495	0,277	0,097	0,350
600	700	1,3	0,511	0,287	0,100	0,348

Tabel 7: Buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende overspanningen en maximale belastingen

Lengte (overspanning) (m)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	Wmax (buigscheur) (mm)	Wmax (dwarskrachtscheur) (mm)	Ratio
1	0,345	0,548	0,350	0,170	0,486
2	0,804	0,628	0,270	0,114	0,422
3	1,00	0,527	0,242	0,086	0,355
4	1,3	0,498	0,234	0,068	0,291
5	1,4	0,437	0,229	0,051	0,223
6	1,5	0,385	0,218	0,032	0,147
7	1,6	0,350	0,210	0,016	0,076
8	1,6	0,301	0,203	0	0,000

Tabel 8: Buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende normaalkrachten

Normaalkracht (kN)	ρ_w (%)	Buigscheurwijdte (mm)	Dwarskrachtscheurwijdte (mm)	Ratio
+20	0,307	0,276	0,048	0,174
0	0,306	0,261	0,048	0,184
-20	0,305	0,245	0,048	0,196
-40	0,304	0,230	0,048	0,209
-60	0,303	0,214	0,048	0,224
-80	0,302	0,199	0,048	0,241
-100	0,301	0,183	0,048	0,262
-120	0,300	0,167	0,049	0,293
-140	0,299	0,151	0,049	0,325
-160	0,298	0,135	0,049	0,363
-180	0,298	0,119	0,049	0,412
-200	0,297	0,102	0,049	0,480

Tabel 9: Buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende betonsterkten

Betonsterkte (N/mm ²)	ρ_w (%)	Buigscheurwijdte (mm)	Dwarskrachtscheurwijdte (mm)	Ratio
15	0,307	0,251	0,056	0,223
20	0,310	0,262	0,056	0,214
25	0,315	0,272	0,057	0,210
30	0,320	0,276	0,053	0,192
35	0,315	0,269	0,046	0,171
40	0,320	0,273	0,042	0,154
45	0,319	0,268	0,036	0,134
50	0,321	0,265	0,034	0,128

Tabel 10: Buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende betondekkingen

Betondekking (mm)	ρ_w (%)	Buigscheurwijdte (mm)	Dwarskrachtscheurwijdte (mm)	Ratio
10	0,3028	0,121	0,028	0,231
15	0,3064	0,154	0,034	0,221
20	0,3071	0,185	0,039	0,211
25	0,307	0,215	0,044	0,205
30	0,3076	0,243	0,047	0,193
35	0,3075	0,264	0,050	0,189
40	0,3043	0,282	0,050	0,177
45	0,3049	0,304	0,052	0,171
50	0,3080	0,330	0,056	0,170
55	0,3088	0,352	0,057	0,162
60	0,3087	0,374	0,059	0,158

Tabel 11.: Buig- en dwarskrachtscheuren bij verschillende langswapeningspercentages

ρ_l (%)	ρ_w (%)	Buigscheurwijdte (mm)	Dwarskrachtscheurwijdte (mm)	Ratio
0,18	0,06883	0,092	0	0
0,314	0,1214	0,191	0	0
0,460	0,1732	0,302	0	0
0,689	0,267	0,279	0,04	0,143
0,804	0,314	0,268	0,051	0,190
0,919	0,362	0,263	0,060	0,228
1,149	0,4461	0,241	0,066	0,274
1,264	0,490	0,234	0,069	0,295
1,494	0,595	0,229	0,074	0,323
1,608	0,630	0,221	0,074	0,335

Bijlage 5: praktijkvoorbeelden

1.

V	100 kN
M	20 kNm
h	500 mm
b	400 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{\text{langswaapening}}$	12 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	0,226 %
ρ_w	0,107 %
w_{buig}	0 mm
w_{dwars}	0,059 mm

(Quickeurocode, 2011)

2.

q_G	12,5 kN/m
q_Q	8 kN/m
L	5,5 m
h	400 mm
b	150 mm
c	25 mm
ϕ_{beugel}	6 mm
$\phi_{\text{langswaapening}}$	20 mm
Betonsterkte	C30/37
ρ_l	2,1 %
ρ_w	0,431 %
w_{buig}	0,116 mm
w_{dwars}	0 mm

(Maszura, n.d.)

3.

q_G	12,5 kN/m
q_Q	8 kN/m
L	5,5 m
h	350 mm
b	150 mm
c	25 mm
ϕ_{beugel}	6 mm
$\phi_{\text{langswaapening}}$	20 mm

Betonsterkte	C30/37
ρ_l	2,4 %
ρ_w	0,667 %
W_{buig}	0,142 mm
W_{dwars}	0,00551 mm

(Maszura, n.d.)

4.

q_G	42 kN/m
q_Q	50 kN/m
L	5 m
h	600 mm
b	450 mm
c	30 mm
ϕ_{beugel}	12 mm
$\phi_{langswaening}$	25 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	1,1 %
ρ_w	0,243 %
W_{buig}	0,155 mm
W_{dwars}	0,031 mm

(SchöckCombar, 2010)

5.

q_G	45,2 kN/m
q_Q	69,8 kN/m
L	1 m
h	300 mm
b	300 mm
c	55 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{langswaening}$	10 mm
Betonsterkte	C30/37
ρ_l	0,262 %
ρ_w	0,367 %
W_{buig}	0,171 mm
W_{dwars}	0,046 mm

(Anteagroup, 2014)

6.

q_G	5 kN/m
q_Q	10 kN/m
L	5 m
h	400 mm
b	300 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	8 mm
$\phi_{\text{langswapening}}$	10 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	0,524 %
ρ_w	0,127 %
W_{buig}	0,189 mm
W_{dwars}	0,0 mm

(Betonstaal.nl, 2019)

7.

q_G	12,5 kN/m
q_Q	8 kN/m
L	6 m
h	500 mm
b	200 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	8 mm
$\phi_{\text{langswapening}}$	20 mm
Betonsterkte	C30/37
ρ_l	0,943 %
ρ_w	0,189 %
W_{buig}	0,218 mm
W_{dwars}	0 mm

(Maszura, n.d.)

8.

q_G	84 kN/m
q_Q	135 kN/m
L	2 m
h	400 mm
b	400 mm
c	55 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{\text{langswapening}}$	16 mm

Betonsterkte	C30/37
ρ_l	1,1 %
ρ_w	0,632 %
W_{buig}	0,227 mm
W_{dwars}	0,075 mm

(Anteagroup, 2014)

9.

q_G	20 kN/m
q_Q	5 kN/m
L	5 m
h	500 mm
b	400 mm
c	30 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{langswapening}$	12 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	0,283 %
ρ_w	0,833 %
W_{buig}	0,305 mm
W_{dwars}	0 mm

(Infonu, 2019)

10.

q_G	5 kN/m
q_Q	30 kN/m
L	5 m
h	500 mm
b	350 mm
c	25 mm
ϕ_{beugel}	16 mm
$\phi_{langswapening}$	25 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	0,561 %
ρ_w	0,168 %
W_{buig}	0,322 mm
W_{dwars}	0

11.

V	270 kN
M	604 kNm
h	550 mm
b	300 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{\text{langwapening}}$	40 mm
Betonsterkte	$f_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$
ρ_l	2,3 %
ρ_w	0,482 %
W_{buig}	0,404 mm
W_{dwars}	0,083 mm

(Civil Engineering, 2014)

12.

V	270 kN
M	604 kNm
h	750 mm
b	300 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{\text{langwapening}}$	32 mm
Betonsterkte	$f_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$
ρ_l	1,1 %
ρ_w	0,181 %
W_{buig}	0,418 mm
W_{dwars}	0,077 mm

(Civil Engineering, 2014)

13.

V	450 kN
M	377 kNm
h	600 mm
b	350 mm
c	40 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{\text{langwapening}}$	40 mm
Betonsterkte	$f_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$
ρ_l	1,1 %
ρ_w	0,354 %
W_{buig}	0,453 mm

w_{dwars}	0,123 mm
-------------	----------

(Civil Engineering, 2014)

14.

V	270 kN
M	607,5 kNm
h	750 mm
b	300 mm
c	35 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{langswaapening}$	40 mm
Betonsterkte	$f_{ck}=35 \text{ N/mm}^2$
ρ_l	1,1 %
ρ_w	0,183 %
w_{buig}	0,46 mm
w_{dwars}	0,081 mm

(Civil Engineering, 2014)

15.

V_{rep}	636 kN
V_{ed}	981 kN
M_{rep}	400 kNm
M_{ed}	503,8 kNm
L	2,2 m
h	800 mm
b	600 mm
c	40 mm
ϕ_{beugel}	10 mm
$\phi_{langswaapening}$	20 mm
Betonsterkte	C20/25
ρ_l	0,327 %
ρ_w	0,265 %
w_{buig}	0,470 mm
w_{dwars}	0,111 mm

(Bouwkundig adviesbureau Schagen, 2015).

Bijlage 6: Besprekingsverslagen

Werkplan bespreking

Op 3-5-2019 is het werkplan besproken met begeleider dr.ir.drs. C.R.Braam. Tijdens deze bespreking zijn voor het bachelor eindproject de hoofdvraag, deelvraag, en de theorie benodigd om deze vragen te beantwoorden, besproken.

De hoofdvraag en deelvragen voldeden, maar er is voor gekozen om de laatste deelvraag optioneel te houden, aangezien voor deze deelvraag meetresultaten nodig zijn. Het kan te lang duren voordat deze daadwerkelijk binnen zijn en dit gaat waarschijnlijk niet binnen het tijdsbestek van het project vallen.

De theorie is doorgelopen en besproken en vervolgens zijn de te zetten stappen per deelvraag doorgesproken. Onduidelijkheden over formules en hoe deze te gebruiken zijn besproken.

De te zetten stappen zijn nu om de deelvragen uit te werken in een rekenprogramma. Geschikte rekenprogramma's zijn Mathcad en Excel. Belangrijk voor het uiteindelijke verslag is de lezer duidelijk mee te nemen in het verhaal en de berekening.

Tussenverslag bespreking

Op 24-5-2019 is het tussenverslag besproken met beide begeleiders, namelijk dr.ir.drs. C.R.Braam en dr.ir. P.C.J. Hoogenboom. Er is door het verslag heengelopen waarbij verbeterpunten en onduidelijkheden aangestipt zijn. Veelal kunnen deze verholpen worden met behulp van een schets of extra uitleg. Over het algemeen was het verslag verder duidelijk en helder.

Om de conclusie sterker te onderbouwen, kan er nog gezocht worden naar experimentele resultaten. Deze kunnen vergeleken worden met de resultaten uit het model.

Daarnaast kan er ook gekeken worden naar de verhoudingen van de dwarskrachtscheur ten opzichte van de buigscheur. Door random rekenvoorbeelden te gebruiken hiervoor kan gekeken worden of de dwarskrachtscheur een keer maatgevend wordt en dan ook bij welke eigenschappen van de balk dit dan het geval is.