# Constructieve eigenschappen van schuimbeton

M.S.S. ten Have

4310306

Delft, 2016

TU Delft

Begeleiders:

Dr. Ir. Drs. C.R. Braam

Dr. Ir. P.C.J. Hoogenboom

# Voorwoord

Dit rapport is tot stand gekomen in het kader van het BSc Eindwerk. Daarnaast heeft dr.ir.drs. C.R. Braam mij de mogelijkheid geboden om onder zijn begeleiding dit onderzoek tot een goed einde te brengen. Daarnaast ben ik Ing. H. ter Welle, hoofd technologie en ontwikkeling, van de Betoncentrale Twenthe BV dankbaar voor zijn medewerking om het schuimbeton te verkrijgen.

Delft, november 2016.

Mark ten Have

# Inhoud

Voorwoord ..... 2
Samenvatting ..... 6
Inleiding ..... 7
H1 Onderzoeksplan ..... 8
H1.1 Inleiding ..... 8
H1.2 Introductie schuimbeton ..... 8
H1.3 Samenvatting BSc Eindwerk L. Ronteltap ..... 9
H1.4 Opzet onderzoek ..... 11
H2 Dwarskrachtcapaciteit ..... 13
H2.1 Inleiding ..... 13
H2.2 Onderzoeksvraag ..... 13
H2.3 Beschrijving vakterm ..... 13
H2.4 Benadering dwarskrachtcapaciteit door middel van steekproefgemiddelde ..... 14
H2.5 Benadering dwarskrachtcapaciteit door middel van de British Standard ..... 15
H2.6 Haakweerstand ..... 15
H2.7 Conclusies dwarskrachtcapaciteit ..... 16
H2.8 Discussie dwarskracht ..... 17
H3 Scheurwijdte ..... 18
H3.1 Inleiding scheurwijdte ..... 18
H3.2 Onderzoeksvraag ..... 18
H3.3 Beschrijving vakterm ..... 18
H3.4 Verschillen ..... 19
H3.5 Benadering volgens S.H. Chowdhury en Y.C. Loo ..... 19
H3.6 Conclusie scheurwijdte ..... 20
H3.7 Discussie scheurwijdte ..... 20
H4 Aanhechtspanning ..... 21
H4.1 Inleiding aanhechtspanning ..... 21
H4.2 Onderzoeksvraag ..... 21
H4.3 Beschrijving vakterm ..... 21
H4.4 Berekening van de verankeringslengte ..... 22
H4.5 Berekening ondergrens verankeringslengte ..... 22
H4.6 Andere technieken ..... 23
H4.7 Conclusie aanhechtspanning ..... 23

H4.8 Discussie aanhechtspanning ..... 24
H5 Wapening ..... 25
H5.1 Inleiding ..... 25
H5.2 Onderzoeksvraag ..... 25
H5.3 Beschrijving vakterm ..... 25
H5.4 Uitwerking deelvraag ..... 26
H5.5 Alternatieven ..... 26
H5.6 Conclusie wapening ..... 26
H6 Glasvezelwapening ..... 27
H6.1 Inleiding ..... 27
H6.2 Beschrijving glasvezelwapening ..... 27
H6.3 Deelvraag glasvezelwapening ..... 28
H6.4 Proefopzet glasvezelwapening ..... 28
H6.5 Voorspelling proefresultaat ongewapende ligger ..... 29
H6.6 Voorspelling proefresultaten gewapende liggers ..... 29
H6.6.1 Voorspellingen op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' ..... 29
H6.6.2 Voorspellingen op basis van de BLR0513 ..... 30
H6.7 Resultaat beproeving inclusief vergelijking met voorspelling ..... 30
H6.7.1 Inleiding resultaten ..... 30
H6.7.2 Vergelijking (kracht) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' ..... 30
H6.7.3 Vergelijking (kracht) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van de BLR0513 ..... 31
H6.7.4 Vergelijking (scheurwijdte) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' ..... 31
H6.7.5 Vergelijking dwarskracht resultaten met de voorspelling ..... 32
H6.7.6 Resultaat en berekening van de aanhechtspanning ..... 32
H6.7.7 Resultaten blanco proef ..... 33
H6.8 Conclusie glasvezelwapening ..... 34
H6.9 Discussie glasvezelwapening ..... 34
H7 Conclusies ..... 36
Referenties ..... 37
Bijlage 1: Berekening dwarskracht met steekproefresultaten ..... 38
Bijlage 2: Berekening dwarskrachtcapaciteit met de British Standard ..... 40
Bijlage 3: Berekening scheurwijdte met S.H. Chowdhury en Y.C. Loo ..... 42

Bijlage 4: Berekening van de verankeringslengte ..... 43
Bijlage 5: Wapening omrekenen van staaf naar net ..... 47
Bijlage 6: Voorspelling capaciteiten ongewapend schuimbeton ..... 48
Bijlage 7: Voorspelling capaciteiten gewapend schuimbeton op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' ..... 50
Bijlage 8: Voorspelling capaciteiten gewapend schuimbeton op basis van de BLR0513 ..... 57
Bijlage 9: Vervaardigen proefstukken ..... 64
Bijlage 10: Beschrijving beproeving van de proefstukken ..... 70
Bijlage 11: Berekening aanhechtspanning glasvezelwapening ..... 77

# Samenvatting

In dit BSc Eindwerk is onderzoek gedaan naar de constructieve eigenschappen van schuimbeton. Dit onderzoek is gedaan door middel van een literatuurstudie en daarnaast zijn er ook proefstukken vervaardigd om de constructieve eigenschappen van schuimbeton in combinatie met glasvezelwapening te onderzoeken.

In de eerste plaats is getracht de benadering van proefresultaten van de heer L. Ronteltap te verbeteren door andere formules toe te passen. Het blijkt dat de dwarskracht met steekproefgemiddelden een andere conclusie geeft dan voorheen. Voor de scheurwijdte in liggers blijken de formules opgesteld door S.H. Chowdhury en Y.C. Loo een verbeterde benadering te geven.

Vervolgens blijkt dat de aanhechtlengte op basis van de Eurocode vele malen langer is dan de lengte van het proefstuk en dat hiervoor naar een oplossing gezocht moet worden.

Bij het toepassen van wapening wordt er gekeken naar het toepassen van staven of netten. Netten blijken onder andere op het gebied van aanhechting voordeel te hebben ten opzichte van staven.

Tot slot wordt de mogelijkheid tot het toepassen van glasvezelwapening onderzocht. De proefstukken gemaakt van glasvezelwapening bezwijken allen op buiging. Glasvezelwapening zorgt er echter wel voor dat de bezwijkscheur van een van de proefstukken binnen de getolereerde waarde voor scheurwijdte blijft. Daarmee is glasvezelwapening een mogelijke optie voor een constructieve toepassing in schuimbeton.

# Inleiding

Schuimbeton is een lichtgewicht beton. De betonsoort wordt vaak toegepast in de infrastructuur. Een van de mogelijke toepassingen zit in zettingsgevoelige gebieden waarin lichtgewicht fundering vereist is. In 2014 heeft de heer Ronteltap onderzoek gedaan naar de constructieve eigenschappen van schuimbeton. Dit heeft hij onder andere gedaan door middel van onderzoek naar zelf geconstrueerde proefstukken. De uitwerking van deze proeven had echter nog uitgebreider mogen zijn. Dit is de reden dat dit BSc Eindwerk een vervolg zal zijn op het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap.

Dit rapport zal verder onderzoek doen naar de benadering van de proefresultaten door middel van (literatuur)onderzoek en daarbij behorende berekeningen. Het doel daarin zal zijn om de constructieve eigenschappen van schuimbeton beter te kunnen beschrijven. Daarmee kunnen in de toekomst meer nauwkeurige voorspellingen gedaan worden voordat men zal starten met de constructieve fase.

In het eerste hoofdstuk zal het voormalig BSc Eindwerk, een korte introductie van het materiaal schuimbeton en de opzet van het onderzoek besproken worden, daarna zullen de deelproblemen aan bod komen. In de hoofstukken 2 tot en met 5 zullen de deelproblemen een voor 1 behandeld worden. Het zesde hoofdstuk zal een vervolg zijn van het vijfde hoofdstuk en zich toespitsen op glasvezelwapening. Daarna zullen de conclusies volgen in het laatste hoofdstuk.

# H1 Onderzoeksplan

## H1.1 Inleiding

Voordat wordt terug geblikt op het onderzoek van de heer Ronteltap zal er een korte introductie van het materiaal schuimbeton worden gegeven. Nadat het onderzoek gedaan door de heer Ronteltap zal zijn beschreven zal de opzet van het onderzoek worden toegelicht.

## H1.2 Introductie schuimbeton[1]

Schuimbeton is een bouwmateriaal dat in zijn meest simpele vorm uit 4 componenten bestaat: water, cement, schuimmiddel en lucht. Water en cement vormen samen cementlijm, terwijl het schuim wordt samengesteld uit water en lucht.

Op het moment dat het schuim en de cementlijm samen komen vormt dit een geheel dat schuimbetonspecie wordt genoemd. Aan de cementlijm kunnen ook vulstoffen als: poederkoolvliegas, kalksteenmeel en zand worden toegevoegd.

Hoewel schuimbeton in de naam laat zien dat het een soort beton is, verschilt de structuur van het schuimbeton enorm met die van normaal grindbeton. Normaal grindbeton bestaat uit een zand/grind-skelet bij elkaar gehouden door cementlijm. De belasting wordt voornamelijk afgedragen via dit skelet. Schuimbeton heeft een luchtbel-skelet dat door cementlijm bijeen wordt gehouden. De belastingafdracht vindt voornamelijk plaats via het cement. Na verharding ontstaat echter in beide gevallen een samenhangend geheel.

Kenmerkende eigenschappen zijn: de vloeibaarheid van de schuimbeton specie, de massa (volumiek gewicht), de samenhang van het (verharde) materiaal en de structuur. De vloeibaarheid is vergelijkbaar met yoghurt, de massa varieert tussen de 400-1600 kg/m$^3$.

Deze eigenschappen hebben als voordeel dat zij zorgen voor een goede vorst-dooi weerstand, de warmtegeleiding is laag en absorptiecapaciteit van bewegingsenergie is hoog.

Schuimbeton kent vele toepassingen. De belangrijkste toepassingen zijn: plaatfundatie wegen, plaatfundatie gebouwen, vullichaam kade, vullichaam ophoging en overige toepassingen als vullichaam.

[1] BSc Eindwerk L. Ronteltap

## H1.3 Samenvatting BSc Eindwerk L. Ronteltap

De heer Ronteltap heeft onderzoek gedaan naar de mogelijkheden om de toepassingen van schuimbeton te vergroten. Om de eigenschappen van schuimbeton te onderzoeken heeft de heer Ronteltap literatuuronderzoek gedaan. Daarnaast is er ook onderzoek gedaan naar de toepassing van buigwapening.

Gewapende balken bezweken op dwarskracht terwijl de ongewapende balk in dit onderzoek op buiging bezweek. In het onderzoek bleek dat de liggers op een lagere (dwars)kracht bezweken dan dat de Eurocode heeft berekend.

De probleemstelling werd gevonden in de beperkte informatie over de sterkte eigenschappen van schuimbeton. Om de eigenschappen te bepalen van schuimbeton werden kubussen door middel van een vijzel met een drukkracht tot bezwijken gebracht. Daarnaast werden er kubussen door middel van een Braziliaanse splijtproef tot bezwijken gebracht.

Het doel van het onderzoek lag op het bepalen van de kubusdruksterkte en de kubussplijtsterkte van schuimbeton. Daarnaast zijn er ook proeven gedaan met liggers om de buigkrachtcapaciteit te bepalen, evenals de dwarskrachtcapaciteit.

Het doel van de proeven was om te bepalen of de buigkrachtcapaciteit en de dwarskrachtcapaciteit van schuimbeton zou toenemen indien er wapening toegepast zou gaan worden. Er is getracht door het schuimbetonmengsel aan te passen de kubusdruksterkte te verhogen naar 3,0 $N/mm^2$. Het schuimbeton SB500 dat gebruikt is heeft normaal gesproken een druksterkte van 1,0 $N/mm^2$. Om de kubusdruksterkte te verhogen werd een lager watercement factor gebruikt, normaal: 0,5 tot 0,6; in dit geval 0,4. Om ondanks de mindere verwerkbaarheid door de lagere watercementfactor toch een goed te verwerken schuimbetonmengsel te krijgen werd er superplastificeerder toegevoegd (500 g op 100 liter schuimbetonmortel). Om de negatieve effecten van plastische krimp op te vangen werd er 91 g aan polypropyleen vezels per 100 liter schuimbetonmortel toegevoegd.

De proeven werden uitgevoerd volgens CUR 59.2012. Voor de liggers zijn 3 verschillende wapeningspercentages gebruikt. Elk percentage in 2 liggers: 2 staven, 3 staven en 4 staven. Elk van de staven had een diameter van 8 mm.

De beproeving van de liggers vond plaats door middel van een driepunts buigproef. De praktijk resultaten werden vergeleken met de Eurocode 2 voor grindbeton. Voor de dwarskracht werd ook de dwarskrachtformule van Rafla ($V_{u,m}$) gebruikt.

Uiteindelijk werden de volgende resultaten behaald.

| Kubus | Bijzonderheden | Opgelegde vervorming | Begrenzing op belasting | Bezwijkvorm | Bezwijkbelasting [kN] | Spanning [N/mm$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | Kubus uit balkenbekisting | 1 mm/s | Geen | Volledige inzakking | 29,17 | 1,3 |
| S2 | Kubus uit balkenbekisting | 1 mm/s | Begrensde vervorming | Zijdelings bezwijken | 24,23 | 1,08 |
| S3 | Kubus uit balkenbekisting | 1 mm/s | Begrensde vervorming | Zijdelings bezwijken | 24,5 | 1,09 |
| S4 | Kubus werd uit emmer gezaagd | 1 mm/s | Begrensde vervorming | Gelijkmatig verzakt. | 15,29 | 0,68 |
| S5 | Kubus werd uit emmer gezaagd | 1 mm/s | Begrensde vervorming | Volledige inzakking. | 24,9 | 1,107 |
| S6 | Kubus uit balkenbekisting | 1 mm/s | Begrensde vervorming | Gelijkmatig verzakt. | 26,86 | 1,19 |

Tabel 1: resultaten drukproeven

| Kubus | Bijzonderheden | Opge-legde kracht [kN/s] | Wijze van opleggen | Bezwijk-vorm | Bezwijkbelasting [kN] | Spanning ($\sigma_{spl}$) [N/mm$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S7 | Kubus uit balkenbekisting | 0,061 | 2 x 1 lat (b=15mm) | Pons. De splijtproef werd daarna gestopt. | 3,86 (Pons) | Geen waarde |
| S8 | Kubus werd uit emmer gezaagd | 0,061 | 2 x 1 lat (b=15mm) | Pons. De splijtproef werd daarna gestopt. | 7,00 (Pons) | Geen waarde |
| S9 | Kubus uit balkenbekisting | 0,061 | 2 x 5 latten (b=15mm) | Pons, daarna splijten | 4,03 | 0,115 |
| S10 | Kubus uit balkenbekisting | 0,061 | 2 x 5 latten (b=15mm) | Pons, daarna rechte splijtscheur | 4,15 | 0,118 |
| S11 | Kubus werd uit emmer gezaagd | 0,061 | 2 x 1 lat (b= 40 mm) | Totaal bezweken op splijten. Geen pons. | 12,1 | 0,34 |
| S12 | Kubus uit balkenbekisting | 0,061 | 2 x 1 lat (b= 40 mm) | Korte pons. Splijten over de gehele hoogte | 8,30 | 0,24 |

Tabel 2: resultaten splijtproeven

| SB | Bezwijklast [kN] | V [kN] | Percentage van $V_{u,m}$ [%] | Percentage van $V_{Rd,c}$ [%] | Percentage van min $V_{Rd,c}$ [%] | Wijdte bezwijkscheur [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2A | 4,1 | 2,05 | 35 | 57,4 | 44 | 0,8 |
| 2B | 4,8 | 2,4 | 41 | 67,2 | 51,5 | 2 |
| 3A | 5,1 | 2,55 | 38 | 62,3 | 54,8 | 0,8 |
| 3B | 4,5 | 2,25 | 41 | 67,1 | 48,3 | 0,5 |
| 4A | 5,8 | 2,9 | 40 | 64,4 | 62,3 | 0,8 |
| 4B | 5,5 | 2,75 | 37 | 61,0 | 59,0 | 3,5 |

Tabel 3: resultaten buigproeven

Uiteindelijk werd geconcludeerd dat het draagvermogen toeneemt als gevolg van de toepassing van buigwapening. De balk kan verder belast worden en bezwijkt op dwarskracht. De bezwijklast bij de gewapende liggers is 5-6,5 keer hoger dan bij de ongewapende balk (0,8 kN).

Een toename van de bezwijklast kan gevonden worden in de mogelijkheden van dwarskrachtwapening in schuimbeton.

## H1.4 Opzet onderzoek

Om het onderzoek dat al verricht is verder te kunnen uitwerken heb ik een aantal aandachtspunten opgesteld naar aanleiding van het onderzoek

Het eerste en meest belangrijke aandachtspunt zal de dwarskrachtcapaciteit vormen.

Het tweede aandachtspunt wordt gevormd door de scheurwijdte. Er is in de Eurocode namelijk geen norm gegeven voor de scheurwijdte van schuimbeton. Hier zal verder onderzoek naar gedaan moeten worden.

Het derde aandachtspunt is de aanhechtspanning. De aanhechtspanning werd tijdens de beproeving overschreden of er was niet voldoende aanhechting.

Een vierde aandachtspunt is de wapening. De firma Faber Betonpompen B.V. geeft op haar website aan dat het gebruik van een wapeningsnet nuttiger is dan het gebruik van losse wapeningsstaven. Ook is er mogelijk een andere manier van wapenen beschikbaar.

Hoofdprobleem

Het hoofdprobleem wordt gevormd door het combineren van de aandachtspunten. De aandachtspunten hebben allen verband met de constructieve eigenschappen van schuimbeton. De aandachtspunten zullen het kader vormen van de onderzoeksvraag. Het hoofdprobleem heeft de volgende onderzoeksvraag.

Wat zijn de constructieve eigenschappen van schuimbeton onder belasting?

Deelproblemen

Het hoofdprobleem wordt onderverdeeld in 4 deelproblemen die voortkomen uit de aandachtspunten die reeds gegeven zijn. Daarnaast heb ik bij ieder probleem de mogelijke oplossingsstrategie gegeven.

Dwarskrachtcapaciteit:

Op welke manier kan de dwarskrachtcapaciteit van schuimbeton benaderd worden?

Voor de dwarskrachtcapaciteit zal er gezocht moeten worden naar andere formules (als de Eurocode) die beter bij schuimbeton aansluiten. Ik zal hiervoor in gesprek gaan met dr. Ir. Y. Yang. Dit kwam naar voren in het verkennende gesprek met dr.ir.drs. C.R. Braam. Ook zal ik andere methodes zoeken, bijvoorbeeld de British Standard.

Scheurwijdte:

Is er een betere benadering mogelijk voor de scheurwijdte in schuimbeton dan de Eurocode?

Om de scheurwijdte opnieuw te bepalen wil ik de nieuwe formule ontwikkeld door S.H. Chowdhury en Y.C. Loo gaan gebruiken om te bepalen of deze nauwkeuriger is en een betere schatting kan geven dan de formule die in de Eurocode is opgenomen. Indien dit niet het geval is zal ik verder zoeken naar andere mogelijkheden om de scheurwijdte te voorspellen. Ook zal ik literatuuronderzoek doen naar de haakweerstand van schuimbeton.

Aanhechtspanning:

Wat is de aanhechtspanning op wapeningsstaal in schuimbeton?

Om de aanhechtspanning nauwkeurig te kunnen bepalen wil ik de berekening van de aanhechtlengte gaan uitvoeren door het wapeningsstaal als glad staal te benaderen in verband met de verminderde haakweerstand van schuimbeton. Daarbij zal ik kijken of er mogelijkheden zijn om de hechting te verbeteren.

Wapening:

Wat zijn de constructieve sterkte verschillen bij de toepassing van wapening in schuimbeton?

Bij de Firma Faber zal ik navraag doen naar de verschillen (in cijfers) van wapening in staven of in roosters in schuimbeton. Daarnaast zal ik naar dit deelonderwerp ook een literatuurstudie uitvoeren.

# H2 Dwarskrachtcapaciteit

## H2.1 Inleiding

De dwarskrachtcapaciteit had in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap uitgebreider beschreven kunnen worden. Om de benadering van de dwarskrachtcapaciteit te verbeteren is er een andere formule nodig dan de formules die gegeven zijn de Eurocode 2.

## H2.2 Onderzoeksvraag

Het verbeteren van de benadering van de dwarskrachtresultaten is bij dit deelprobleem de doelstelling. De vraag luidt dan ook:

Op welke manier kan de dwarskrachtcapaciteit van schuimbeton benaderd worden?

Hiertoe behoort ook literatuuronderzoek naar de haakweerstand.

## H2.3 Beschrijving vakterm

Wanneer er wordt gesproken over dwarskrachten, dan bedoelt men de krachten die zowel loodrecht als verticaal staan op de as, u kunt hier bijvoorbeeld denken aan een brug.

De opname van dwarskrachten in een betonnen constructie gebeurt zowel in het beton als in het betonstaal.

Indien er onvoldoende betonwapening in de constructie is aangebracht, dan wordt de levensduur van het object aanzienlijk korter. Er treedt dan scheurvorming dan wel corrosie op, de constructie kan daardoor uiteindelijk gaan bezwijken.

Sinds 1974 moet er meer wapening aangebracht worden om de dwarskracht te kunnen opnemen.[2]

De situatie dat $v_{Ed}>v_{Rd,c}$ treedt vaak al snel op. Hierin is $v_{Ed}$ de gemiddelde spanning ten gevolge van de dwarskracht en $v_{Rd,c}$ is het afschuifdraagvermogen van een balk zonder dwarskrachtwapening. De opname van dwarskracht kan geregeld worden door gebruik te maken van schuine opgebogen wapening of men kiest voor verticale wapening in de vorm van beugels. De dwarskrachtwapening loopt door het gebied van de dwarskrachtscheuren.

Door de extra kosten die gebonden zijn aan schuine opgebogen wapening gebruikt men deze soort wapening tegenwoordig nog maar sporadisch.[3]

[2] Rijkswaterstaat, Inventarisatie kunstwerken

## H2.4 Benadering dwarskrachtcapaciteit door middel van steekproefgemiddelde

De eerste mogelijkheid om de benadering van de proefresultaten te verbeteren is gelegen in het gebruik van steekproefgemiddelden[4]. Een volledige berekening treft u aan in bijlage 1. Dit resulteert in de capaciteiten $V_{Rm}$ en $V_{Rm,min}$ in plaats van $V_{Rd,c}$ en $V_{Rd,c\ min}$.

| SB | $V_{Rm}$[N] | $V_{Rm,\ min}$ [N] |
|---|---|---|
| 2A | 4363 | 1735 |
| 2B | 4363 | 1735 |
| 3A | 5005 | 1735 |
| 3B | 5005 | 1735 |
| 4A | 5497 | 1735 |
| 4B | 5497 | 1735 |

**Tabel 4: Resultaat dwarskrachtcapaciteit steekproef**

Dan volgt hieronder een vergelijking met behaalde waarden in de proeven van de heer Ronteltap.

| SB | Bezwijklast [kN] | V [kN] | Percentage van $V_{Rm}$ [%] | Percentage van $V_{Rm,\ min}$ [%] | $V_{Rm}$[N] | $V_{Rm,\ min}$ [N] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2A | 4,1 | 2,05 | 47,0 | 118,2 | 4363 | 1735 |
| 2B | 4,8 | 2,4 | 55,0 | 138,3 | 4363 | 1735 |
| 3A | 5,1 | 2,55 | 50,9 | 147,0 | 5005 | 1735 |
| 3B | 4,5 | 2,25 | 45,0 | 129,7 | 5005 | 1735 |
| 4A | 5,8 | 2,9 | 52,8 | 167,1 | 5497 | 1735 |
| 4B | 5,5 | 2,75 | 50,0 | 158,5 | 5497 | 1735 |

**Tabel 5: Vergelijking theoretische waarden met praktijkwaarden**

[3] Constructieleer Gewapend Beton
[4] Formules hiervoor zijn verkregen bij dr. ir. Y. Yang

## H2.5 Benadering dwarskrachtcapaciteit door middel van de British Standard

De tweede mogelijkheid om de waarde van de proefresultaten (dwarskracht) beter te benaderen is het gebruik van een andere norm. De British Standard is hiervoor gebruikt. Hieronder volgt het verkregen resultaat. Een gedetailleerde uitwerking is in bijlage 2 beschikbaar.

Hierin is $v_c$ de design concrete shear stress [N/mm$^2$].

De waarde van $v_c$ is voor twee wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,34 N/mm$^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: $V=v_c*b*d=6360,6$ N.

De waarde van $v_c$ is voor drie wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,59 N/mm$^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: $V=v_c*b*d= 11091,0$ N.

De waarde van $v_c$ is voor vier wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,65 N/mm$^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: $V=v_c*b*d=12207,3$ N.

Opmerkelijk in het resultaat is het feit dat de $v_{max}$ waarde lager is dan de waarde van $v_c$ die wordt gevonden bij 4 wapeningsstaven. Dit kan er op duiden dat de waardes van schuimbeton te veel verschillen met de waardes van lichtgewicht beton om de formules goed te kunnen toepassen.

## H2.6 Haakweerstand

In deze paragraaf wordt ingegaan op de literatuur rondom de haakweerstand.

De weerstandbiedende dwarskracht ($V_c$) van een gescheurde balk (inclusief wapening voor buiging) wordt gevormd door de haakweerstand, afschuifweerstand in de drukzone en deuvelweerstand van de langswapening. De formule van de weerstandbiedende dwarskracht wordt gegeven door:

$V_c=0,18*k*(100*\rho_l*f_{ck})^{1/3}*b_w*d$

$k= 1+\sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2$

d = de effectieve hoogte. Dat is de afstand van de meest gedrukte vezel tot de zwaartelijn van de buitenste laag trekwapening.

$b_w$ = de minimale breedte van de dwarsdoorsnede (kleiner dan d)

$f_{ck}$ = de karakteristieke betondruksterkte

$\rho_l$ = het wapeningspercentage (geometrisch) van de trekwapening

$\rho_l= \frac{A_{sl}}{b_w*d} \leq 0,02$

$A_{sl}$= de oppervlakte van de trekwapeningsdoorsnede.

In de berekening van $V_c$ wordt een correctiefactor k toegepast. De correctiefactor is omgekeerd evenredig met d. Dit hangt samen met de afname van de haakweerstand. De haakweerstand neemt af wanneer een scheur groter wordt. Schaalvergroting wordt niet toegepast op de granulaten in bijvoorbeeld balken waardoor de scheurvertanding minder effectief zal zijn.

De haakweerstand wordt echter behouden op het moment dat het wapeningspercentage toeneemt[5].

Bij toename van het wapeningspercentage zal de scheurwijdte worden beperkt. Indien de scheurwijdte dusdanig wordt beperkt is de invloed van de haakweerstand op dat moment minder groot maar bij bezwijken van de wapening zal de haakweerstand nog steeds dezelfde invloed behouden.

De haakweerstand van schuimbeton zal naar verwachting zeer beperkt zijn. Door de holle structuur van het schuimbeton zal bij wrijving het schuimbeton knappen en zullen er dus geen haakmogelijkheden ontstaan. Ook ontstaan er bij het knappen van verbindingen weinig hoekige breuken. Tevens speelt de ruwheid een rol in de haakweerstand, schuimbeton is relatief gezien minder ruw dan grindbeton[6].

Dr. ir. C.R. Braam stelt dat de haakweerstand voor 40% van invloed is op de weerstandbiedende dwarskracht. Daarmee kan de aanname worden gedaan dat er een reductiefactor van 0,6 mag worden toegepast op de weerstandbiedende dwarskracht. De haakweerstand wordt hierbij op nul gesteld.

## H2.7 Conclusies dwarskrachtcapaciteit

Uit deze vergelijking van praktijk en theorie op basis van steekproefgemiddelden volgt een andere conclusie in vergelijking met de waardes die berekend zijn in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap. De waardes van $V_{Rm,\,min}$ worden met 18-67 procent overschreden. De echte waardes van de dwarskracht V zijn 47-55 procent van de theoretische capaciteit $V_{Rm}$.

Dwarskrachtwapening is, op basis van de berekening van steekproefgemiddelden, dus wel nuttig gezien het feit dat $V_{Rm,min}$ ruimschoots wordt overschreden. Het is, zakelijk gezien, echter niet realistisch om extra wapening te gaan toevoegen zodat deze krachten waarbij de ligger nu bezwijkt wel opgenomen zouden kunnen worden.

De gevonden dwarskrachtcapaciteit ligt met de formules van de British standard 2 à 3 keer hoger dan de gevonden dwarskrachtcapaciteit die wordt behaald met de Eurocode 2. De benadering met de British standard is dus slechter dan de benadering met de Eurocode.

De Haakweerstand is voor 40% van invloed op de weerstandbiedende dwarskracht.

[5] Constructieleer Gewapend Beton
[6] Haakweerstand, Joost de Vree

## H2.8 Discussie dwarskracht

Een deel van de bezwijkingsoorzaak zal zitten in de aanhechting. De aanhechting tussen de wapening in het schuimbeton is namelijk erg slecht.

Daarnaast is de Eurocode 2 van normaal grindbeton uitgegaan en de test is hier gedaan met schuimbeton. Dit verklaart mede waarom de benadering niet heel nauwkeurig is.

Voor de British Standard is in de formule heb is de gamma-m factor blijven staan. Dit in verband met de benadering van de dwarskrachtcapaciteit die op deze manier lager zou uitvallen. Omdat de waardes van $f_{cu}$ zijn verkregen uit proefstukken had de factor van gamma-m eigenlijk gelijk gesteld moeten worden aan 1,0.

# H3 Scheurwijdte

## H3.1 Inleiding scheurwijdte

De scheurwijdte is een van de aspecten die aan bod kwam in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap. Echter zijn er mogelijkheden om de benadering die hij heeft gedaan van de scheurwijdte te verbeteren. De benadering was maar liefst een factor 1000 te klein. Om deze benadering te verbeteren heb ik de nieuwe formule ontwikkeld door S.H. Chowdhury en Y.C. Loo toegepast om te bekijken of deze benadering beter is dan bijvoorbeeld de Eurocode 2.

## H3.2 Onderzoeksvraag

De deelvraag bij dit onderwerp is als volgt:

Is er een betere benadering mogelijk voor de scheurwijdte in schuimbeton dan de Eurocode?

## H3.3 Beschrijving vakterm

De scheurwijdte van beton is de afstand tussen de wanden van de scheur. Deze afstand wordt gemeten op het betonoppervlak.

In schuimbeton kan net als in normaal grindbeton constructies scheurvorming optreden. Scheurvorming hoeft niet meteen een reden te vormen voor ongerustheid. De wapening kan immers zijn werk pas doen op het moment dat er scheurvorming is opgetreden. Dan kan de wapening de trekbelasting overnemen.

Op het moment dat de wapening juist is gedimensioneerd zullen de scheuren in het beton zich gelijkmatig gaan verdelen. De scheurwijdte zal zich dan beperken tot enkele tienden van millimeters. De maximale scheurwijdte wordt bepaald door de belasting van de constructie en daarnaast wordt een koppeling gemaakt met de milieuklasse.[7]

[7] Scheurwijdte, Betonlexicon.

## H3.4 Verschillen

Voor de scheurwijdte is door middel van Eurocode 2 in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap een benadering gedaan. De voorspelde waarden varieerden tussen 0 en $4{,}61*10^{-3}$ mm. De werkelijke waarden van de proeven lagen tussen de 0,5 en 3,5 mm.[8]

Het verschil tussen de geschatte waarden en de werkelijke waarden is dus een factor duizend veroorzaakt door de extreem lage waarde van $f_{ctm}$ (0,116 N/mm$^2$). Een nauwkeurige schatting is op deze manier slecht mogelijk. Dit terwijl de scheurwijdte berekening een belangrijke stap uit maakt van het design van beton voor de bruikbaarheidsgrenstoestand en de uiterste grenstoestand.

## H3.5 Benadering volgens S.H. Chowdhury en Y.C. Loo

Om de waarden nauwkeuriger te kunnen schatten zal een alternatief van de Eurocode worden gebruikt. Deze is ontwikkeld door S.H. Chowdhury en Y.C. Loo. Deze formule is origineel bedoeld om scheurwijdten te berekenen in gewapende liggers en gedeeltelijk voorgespannen betonnen liggers. Het schuimbeton dat beproefd is voorzien van wapening, op een enkele ligger na.

Na de berekening met de gegeven formules (gedetailleerde berekening in bijlage 3) volgt het onderstaande resultaat.

De waardes van $W_{cr,\,max}$ volgen uit een vermenigvuldiging van $W_{cr}$ met 1,5.

Dit levert het volgende resultaat:

| | $W_{cr}$ [mm] | $W_{cr,max}$ [mm] |
|---|---|---|
| 2 staven | 0,18 | 0,26 |
| 3 staven | 0,14 | 0,21 |
| 4 staven | 0,11 | 0,17 |

**Tabel 6: Resultaat scheurwijdte op basis van formule S.H. Chowdhury en Y.C. Loo**

[8] BSc Eindwerk L. Ronteltap

## H3.6 Conclusie scheurwijdte

De waardes van de formule van S.H. Chowdhury en Y.C. Loo komen al aardig in de buurt van de waardes die ook uit de proeven kwamen (0,5 – 3,5 mm). De orde van grootte is zeker vergelijkbaar. Echter moet hierbij wel aangemerkt worden dat proef 4B uit het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap enige afwijking vertoont. Zowel in de rest van de proeven als in de berekening neemt de scheurwijdte steeds verder af terwijl de scheurwijdte bij proef 4B enorm stijgt naar 3,5 mm. De lage waardes uit de proeven verschillen 0,55 mm (2 staven), 0,30 mm (3 staven) en 0,64 mm (4 staven). Een verklaring voor proef 4B zou de slechte hechting van de wapening kunnen zijn.

## H3.7 Discussie scheurwijdte

Uiteraard moet men bij deze voorspelling rekening houden met het feit dat er is uitgegaan van het volledig bereiken van de vloeispanning. In de praktijk zal dit niet gebeuren.

# H4 Aanhechtspanning

## H4.1 Inleiding aanhechtspanning

Een ander punt dat in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap besproken is de aanhechtspanning van het betonstaal. In de benadering van de aanhechtspanning en daarmee de verankeringslengte had het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap nog wat uitbreiding verdiend. Dat is een reden dat hieronder nader uitwerking wordt gedaan van dit specifieke onderwerp.

## H4.2 Onderzoeksvraag

Deze deelvraag wordt daarmee beantwoord: wat is de aanhechtspanning op wapeningsstaal in schuimbeton?

De aanhechtspanning zal ik gaan beschrijven door middel van de benadering voor glad staal. Daarnaast zal ik gaan onderzoek of er mogelijkheden zijn om de aanhechting van wapening aan schuimbeton te verbeteren.

## H4.3 Beschrijving vakterm

Krachten die in het beton optreden moeten aan de wapening kunnen worden overgedragen zonder dat de wapening wordt losgetrokken.

Indien er aan een ingestorte wapeningsstaaf met een kracht N getrokken zal worden moet de kracht in de wapeningsstaaf worden overgedragen aan het beton. Dit zal gebeuren langs de omtrek van de staaf. De lengte waarover de aanhechtkracht aanwezig is wordt de overdrachtslengte $l_o$ genoemd.

De aanhechtspanning neemt af over de diepte. Voor de eenvoud wordt aangenomen dat de aanhechtspanning $f_b$ (bond) gelijkmatig is verdeeld over de lengte waarover de wapeningsstaaf vast zit in het beton, $l_{bond}$. Door middel van integratie over het oppervlak wordt de aanhechtspanning als volgt gegeven:

$$f_b = \frac{0{,}25 * d * \sigma_{s,max}}{l_{bond}}$$

$f_b$ : aanhechtsterkte van het beton

d : diameter van de wapeningsstaaf

$l_{bond}$ : de afstand waarover de wapeningsstaaf in het beton zit

$\sigma_{s,max}$ : de maximale staalspanning van de uittrekproef

De aanhechtkracht wordt bepaald door meerdere factoren.

- de mogelijke geribdheid van de wapeningsstaaf
- de staafpositie tijdens het storten en de kwaliteit van aanhechting
- de diameter van de wapeningsstaaf
- de betondekking van de staaf
- de sterkteklasse van het beton

## H4.4 Berekening van de verankeringslengte

In de berekening van de verankeringslengte wordt gewerkt met de waarden die beschikbaar zijn uit de proeven gedaan door de heer Ronteltap.

Dit resulteert in de volgende waarden voor $l_{b,rqd}$ en $l_{bd}$:

| **SB** | **$l_{b,rqd}$ =$l_{bd}$ [mm]** |
|---|---|
| 2A | 504 |
| 2B | 612 |
| 3A | 415 |
| 3B | 335 |
| 4A | 355 |
| 4B | 380 |

**Tabel 7: Verankeringslengte wapening.**

Een gedetailleerde berekening is opgenomen in bijlage 4.

## H4.5 Berekening ondergrens verankeringslengte

Daarnaast is het mogelijk de ondergrens van de optredende spanning te berekenen door middel van de formule voor variantie binnen een steekproef.

De steekproef heeft 6 waardes voor $\tau_{bm}$ (uit de proeven). $x_i$= 0,50; 0,54; 1,06; 0,81; 0,70; 0,67.

Het gemiddelde van de steekproefwaardes wordt gegeven door: $x = \frac{0,50+0,54+1,06+0,81+0,70+0,67}{6} = 0,71$

n = 6

$s^2=\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^{n}(x_i - x)^2$ = 0,041

$s= \sqrt{0,041}$= 0,204

Op het moment dat de standaard deviatie twee maal van het gemiddelde x wordt afgetrokken geeft dit de ondergrens van de steekproef: 0,71-(2*0,204)=0,31 N/mm$^2$.

Ook de aanname van glad staal wordt in beschouwing genomen. De waarde van 0,31N/mm$^2$ moet dan gedeeld worden door 2. Dit geeft een waarde van 0,16 N/mm$^2$.

De basisverankeringslengte kan daarna berekend worden.

$l_{b,rqd}$= (8/4)*435/0,16 = 5438 mm.

## H4.6 Andere technieken

Een van de mogelijkheden om de hechting van betonstaal te verbeteren in het toepassen van wapeningsverlijming.

Lijm hecht zich namelijk in de holle ruimtes die in schuimbeton aanwezig zijn. Er zijn twee soorten verlijming van betonwapening te onderscheiden. De injectiemortels en de expoxyharsen.

Het verschil tussen de injectiemortels en expoxyharsen is vooral gelegen in de toepassing. Omdat verlijming van wapening alleen achteraf plaats vindt, zullen er gaten geboord moeten worden. Na het boren van de gaten kan de wapening ingebracht worden. Daarna wordt het gat afgevuld met de injectiemortel of expoxyhars. Indien de inbrengingsdiepte groot is dan zal de injectiemortel op het diepste punt al zijn verhard terwijl het uiteinde nog niet is bereikt zorgt dit voor verminderde stevigheid. De verhardingstijd van injectiemortel is ongeveer 20 minuten. Als alternatief kan dan worden gekozen voor de expoxyhars. De epoxyhars heeft een uithardingstijd van enkele uren zodat deze over een grotere diepte ingebracht kan worden. De epoxyhars kan slechter het reliëf van het geboorde gat volgen waardoor het een minder goede optie is wanneer het geboorde gat erg ruw is.

Het grote nadeel van verlijming van betonwapening is gelegen in de toepassing. Verlijming kan alleen achteraf toegepast worden. Verlijming wordt dus alleen toegepast wanneer er wapening is vergeten of bij het versterken van bijvoorbeeld overstekken.[9]

De constructieve eigenschappen van schuimbeton waarbij er eerst gaten worden geboord waarna er wapening met lijm wordt ingezet verschild weinig met de toepassing van normale wapening die is ingegoten in het beton.[10]

## H4.7 Conclusie aanhechtspanning

De berekende waarden voor de verankeringslengten zijn enorm veel groter dan de gemeten waarden in de proefstukken. Echter komt de ondergrens waarde van de data redelijk in de buurt van de basisverankeringslengte van waaruit de benodigde verankeringslengtes zijn bepaald voor de proefstukken. Hieruit kan men concluderen dat de benadering van glad staal in de buurt komt van de eigenschappen van schuimbeton. Echter is de verankeringslengte van het schuimbeton te groot.

[9] Interview met L. Teunissen
[10] Interview met J. Nederstigt

## H4.8 Discussie aanhechtspanning

Ook bij de aanhechtspanning moet rekening gehouden worden met het feit dat in de praktijk de vloeispanning van de wapening niet bereikt zal worden. Het is echter bij een voorspelling wel verklaarbaar dat er wordt uitgegaan van de volledige benutting van de wapening.

# H5 Wapening

## H5.1 Inleiding

De geringe treksterkte van schuimbeton maakt het toepassen van wapening in sommige gevallen noodzakelijk. Over de wapening van schuimbeton is op dit moment weinig bekend. Echter wordt in schuimbeton de wapening vaak alleen toegepast in de vorm van wapeningsnetten. Het onderzoek met betrekking tot de wapening van schuimbeton zal zich voornamelijk richten op de verschillen tussen wapeningsnetten en wapeningsstaven in schuimbeton. Daarnaast is er ook een literatuurstudie naar wapening uitgevoerd.

## H5.2 Onderzoeksvraag

De onderstaande deelvraag is voor de wapening geformuleerd.

Wat zijn de constructieve sterkte verschillen bij de toepassing van wapening in schuimbeton?

## H5.3 Beschrijving vakterm

Drukkrachten kunnen worden opgenomen door beton. Trekkrachten kunnen echter in beperkte mate door het beton worden opgenomen. Bij belasting buigen constructieve elementen echter door en ontstaan er in de bovenzijde van het element drukkrachten terwijl er aan de onderzijde van het element trekkrachten ontstaan. De wapening bepaald dus het gedrag onder belasting.

Gewapend beton werkt volgens dit principe: als een plaat of balk van beton wordt belast zal er buiging optreden en treden tegelijkertijd trekspanningen en drukspanningen op. Door aan de onderzijde wapening aan te brengen zal de wapening de trekspanningen overnemen op het moment dat het beton wil scheuren.

Wapening wordt daarnaast ook gebruikt om de spanningen veroorzaakt door schuifkrachten en dwarskrachten op te nemen. [11]

[11] Wapening, Betonlexicon.

## H5.4 Uitwerking deelvraag

Bij de Firma Faber Betonpompen is de vraag gesteld waarom in schuimbeton voornamelijk netten worden toegepast in plaats van wapeningsstaven. Schuimbeton heeft mede door zijn poreuze structuur slechte hechting aan wapening. Dit is de reden dat Faber wapeningsnetten gebruikt omdat het contactoppervlak van de wapening dan toeneemt zowel voor de aanhechting als door steundruk die wordt veroorzaakt door de staven die in het net in een hoek van 90 graden op de langswapeningsstaven van het net liggen. Door toename van het contactoppervlak kan het schuimbeton beter hechten aan de wapening.

Het omrekenen van wapeningsstaven naar wapeningsnetten geschied op basis van de gezamenlijke wapeningsdoorsnede. Daarnaast worden er tabellen gebruikt om de maaswijdte die hieraan gekoppeld is te bepalen. Helaas is deze tabel niet voorzien van de achterliggende berekening. Een voorbeeld hiervan met toelichting wordt in bijlage 5 uiteengezet.

## H5.5 Alternatieven

Naast de toepassing van betonwapening van staal is de toepassing van andere soorten wapening een mogelijkheid om te onderzoeken in de literatuurstudie. Hierbij wordt gedacht aan de toepassing van vezels, kunststof vezels en stalen vezels. Daarnaast kan er gedacht worden aan de toepassing van een polymeer of de toepassing van kunststof (matras)wapening.[10]

## H5.6 Conclusie wapening

De hechting van de buigwapening aan het schuimbeton was in de proeven van de heer Ronteltap dus niet optimaal. Hieruit kan men concluderen dat de capaciteit van het schuimbeton in de proeven gedaan door de heer Ronteltap lager is uitgevallen dan wanneer men wapeningsnetten toe had gepast.

De voordelen van wapeningsnetten uiten zich naast het verhoogde contactoppervlak in de kosten, tijds- en arbeidsbesparing ten opzichte van normale wapening.[12]

[12] Concrete Reinforcing Mesh

# H6 Glasvezelwapening

## H6.1 Inleiding

In het voorgaande hoofdstuk is gesproken over de alternatieven van betonwapening. Een van de alternatieven, glasvezelwapening is in dit hoofdstuk verder uit gewerkt. Hiermee kunnen de sterkteverschillen van schuimbeton ten opzichte van betonwapening worden bepaald.

Glasvezelstaven worden toegepast wanneer de aanwezigheid van staal ongewenst is. Het kan ook zijn dat de alkalische werking van het beton niet voldoende duurzaam is.

In dit specifieke geval wordt er gewerkt met glasvezel wapening omdat de werking tussen schuimbeton en staalwapening erg slecht is. Daarnaast is het natuurlijk goed mogelijk dat er (schuim)betonrot kan optreden door de open structuur. Dit zal niet het geval zijn wanneer een materiaal als glasvezel wordt toegepast.

In dit hoofdstuk zal eerst een beschrijving worden gegeven van het materiaal, glasvezelwapening, waarna de proefopzet beschreven zal worden om de constructieve eigenschappen van glasvezelwapening in combinatie met schuimbeton te bepalen.

## H6.2 Beschrijving glasvezelwapening[13]

Wapeningsstaven van glasvezel zijn geconstrueerd uit bundels van glasvezel, daaromheen zit een expoxyhars. De buitenkant van de staaf kan worden voorzien van een ruw oppervlak.

Een van de grote voordelen is het feit dat glasvezelstaven niet corroderen. In een aantal gevallen is dit een echte uitkomst. Dit zal zijn in maritieme toepassingen, bij constructies met een geringe dekking, in agressieve omgevingen en daarnaast in constructies die in aanraking komen met dooizouten.

Het laatste geval kan van toepassing zijn voor schuimbeton, gezien het feit dat schuimbeton ook zijn toepassing vindt in de wegenbouw. In perioden van ijs en sneeuw wordt er op wegen veelvuldig gebruik gemaakt van zout.

Daarnaast heeft glasvezelwapening nog vele andere toepassingen. Er valt hier te denken aan de eis dat wapening niet elektrisch mag geleiden of bijvoorbeeld het feit dat staal wapening er voor zorgt dat signalen worden verstoord.

[13] Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton, ir. G.J. van Tol

De specifieke eigenschappen van de glasvezelwapening wordt onder andere bepaald door de toegepaste materialen in de glasvezelstaven. Het percentage glasvezels bepaalt de E-modulus van het materiaal. ECR-glas (E-Glass Corrosion Resistant) is meestal toegepast in de wapening. Wanneer men standaard E-glas zou gebruiken leidt dit tot afname van de sterkte. Dit is niet duurzaam.

De toegepaste epoxyhars is heeft invloed op de krachtsoverdracht. De diverse producenten hebben allen door verschillende samenstellingen van hun producten en verschillende productiemethoden. Dit zorgt voor veel variatie.

Op het gebied van de treksterkte variëren de waarden van 600 tot 1200 N/mm$^2$. Dit zijn de waarden voor de korte duur. De lange duur treksterkte varieert tussen de 200 en 500 N/mm$^2$.

De glasvezelstaven hebben een elasticiteitsmodulus die varieert van 35000 tot 60000 N/mm$^2$. De rek die optreedt is bij glasvezelwapening aanzienlijk. Door de grotere treksterkte en de elasticiteitsmodulus die lager is, zal de rek 1,5 tot 2,5 % zijn. De scheurwijdte zal normaal gesproken dus groter zijn dan 2,5 mm bij bezwijken. Glasvezelstaven kennen echter geen vloeitraject voordat ze bezwijken.

## H6.3 Deelvraag glasvezelwapening

Als gevolg van de literatuurstudie in wapening is glasvezelwapening een onderdeel geworden van dit BSc Eindwerk. De verwachting is door het contact met de heer Nederstigt dat glasvezelwapening een goede optie kan zijn als constructieve toepassing in schuimbeton. Hierop is de volgende onderzoeksvraag dan ook gebaseerd.

Is glasvezelwapening geschikt voor constructieve toepassing in schuimbeton?

## H6.4 Proefopzet glasvezelwapening

Als proefopzet voor glasvezelwapening is voor een vergelijkbare proefopzet gekozen als in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap. Dit omdat het materiaal waarmee gewerkt wordt ook nu schuimbeton is. De CUR-aanbeveling 59:2012 zit uiteen hoe de beproeving en vervaardiging van schuimbeton gedaan dient te worden. Het vervaardigen van de proefstukken is opgenomen in bijlage 9.

Voor de proeven is er gekozen om 5 liggers op een buiging te belasten. Zodat daarmee de dwarskrachtcapaciteit en momentcapaciteit bepaald kunnen worden. Daarnaast wordt hiermee de maximale toegestane puntlast berekend en wordt er gekeken of de scheurwijdte beperkt kan worden. Hierbij had 1 ligger geen wapening, (ligger 1), 2 liggers waren voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 3 mm, (ligger 2 en 3), de overige 2 liggers waren voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 4 mm, (ligger 4 en 5).

## H6.5 Voorspelling proefresultaat ongewapende ligger

Als eerst is er een fundamentele benadering gekozen om een voorspelling te doen van de bezwijklast van de ligger. In deze voorspelling is gebruik gemaakt van vergeet-mij-nietjes uit de constructiemechanica. De tweede benadering is op basis van het rekdiagram in het boek: Constructieleer Gewapend Beton.

Volgens de eerste methode resulteert dit in een bezwijklast van 4,1 kN.

De tweede methode geeft een maximaal opneembaar moment van 0,056 KNm met daaraan gekoppeld een bezwijklast van 0,28 kN.

## H6.6 Voorspelling proefresultaten gewapende liggers

De proefresultaten worden op 2 verschillende manieren voorspeld. De eerste is op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'. De tweede voorspelling is op basis van de beoordelingsrichtlijn BRL0513.

### H6.6.1 Voorspellingen op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'

Hieronder volgen de resultaten die worden verwacht op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'. In bijlage 5 is de berekening opgenomen.

| Proefstuk | Last capaciteit F [kN] | $V_{Rd,c}$ [kN] | $M_u$ [kNm] |
|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 1,80 | 0,9 | 0,32 |
| Ligger 3 | 1,80 | 0,9 | 0,32 |
| Ligger 4 | 2,20 | 0,9 | 0,39 |
| Ligger 5 | 2,20 | 0,9 | 0,39 |

**Tabel 8: Voorspelling sterktecapaciteiten op basis van artikel: 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'**

Volgens de berekeningen wordt de maximaal aanvaardbare scheurwijdte van 0,5 mm ook gehandhaafd. Hierin is $V_{Rd,c}$ de dwarskrachtcapaciteit en $M_u$ het uiterst opneembare moment.

### H6.6.2 Voorspellingen op basis van de BLR0513

| Proefstuk | Last capaciteit F [kN] | Momentcapaciteit [kNm] |
|---|---|---|
| Ligger 2 | 1,24 | 0,22 |
| Ligger 3 | 1,24 | 0,22 |
| Ligger 4 | 1,50 | 0,27 |
| Ligger 5 | 1,50 | 0,27 |

Tabel 9: Voorspelling last capaciteit F en momentcapaciteit op basis van de BLR0513

Voor proefstukken die geen dwarskrachtwapening vereisen geldt: $\rho_l \leq 0{,}02$.

- $\rho_l = 1{,}1 * 10^{-4}$ (Ligger 2 en 3)
- $\rho_l = 1{,}9 * 10^{-4}$ (Ligger 4 en 5)

Om deze reden zijn er geen verdere berekeningen gedaan naar de dwarskrachtcapaciteit volgens de BLR0513. Hierin is $\rho_l$ het wapeningspercentage.

Met de bovenstaande voorspelde waarden is ook de scheurwijdte voorspeld. De maximale scheurwijdte voor ligger 2 en ligger 3 is 2,2 mm en voor ligger 4 en ligger 5 1,4 mm.

Naar verwachting zal het scheurwijdte criterium dus worden overschreden.

## H6.7 Resultaat beproeving inclusief vergelijking met voorspelling

### H6.7.1 Inleiding resultaten

In deze paragraaf zullen de resultaten gevonden tijdens de beproevingen besproken worden. De beschrijving van de beproeving, inclusief krachtsverloop over de tijd is opgenomen in bijlage 10.

### H6.7.2 Vergelijking (kracht) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'

De resultaten van de gewapende liggers zullen worden vergeleken met de berekende waarden van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'.

| Proefstuk | Bezwijklast [kN] | V [kN] | Last capaciteit F [kN] | $V_{Rd,c}$ [kN] | Bezwijklast/Last-capaciteit [%] | $V/V_{Rd,c}$ [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 0,61 | 0,31 | 1,80 | 0,9 | 34 | 34 |
| Ligger 3 | 0,87 | 0,44 | 1,80 | 0,9 | 48 | 49 |
| Ligger 4 | 1,09 | 0,65 | 2,20 | 0,9 | 50 | 72 |
| Ligger 5 | 0,81 | 0,41 | 2,20 | 0,9 | 37 | 46 |

Tabel 10: Resultaat proeven en resultaat/voorspelling percentage

De belasting uit de proefresultaten bedraagt dus 34 tot 50 procent van de capaciteit die berekend is. In het geval van de dwarskracht wordt de score iets beter, daar bedraagt de werkelijke belasting 34 tot 72 procent van de berekende capaciteit.

### H6.7.3 Vergelijking (kracht) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van de BLR0513

De berekeningen gedaan volgens de BLR0513 richtlijn gaven aan dat er geen aanvullende berekeningen voor de dwarskrachtcapaciteit benodigd waren. Met andere woorden, de ligger zou op buiging bezwijken en niet op dwarskracht. De liggers zijn inderdaad op buiging bezweken, hierin heeft de BLR0513 richtlijn dus juist geadviseerd.

| Proefstuk | Bezwijklast [kN] | Last capaciteit F [kN] | Bezwijklast/Last-capaciteit [%] |
|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 0,61 | 1,24 | 49 |
| Ligger 3 | 0,87 | 1,24 | 70 |
| Ligger 4 | 1,09 | 1,50 | 73 |
| Ligger 5 | 0,81 | 1,50 | 54 |

Tabel 11: Resultaat proeven en resultaat/voorspelling percentage

De belasting uit de proefresultaten bedraagt 49 tot 73 procent van de capaciteit. De benadering van de proefresultaten met de BLR0513 is dus 15 tot 23 procent beter dan de benadering met het artikel. Hieraan moet worden toegevoegd dat het artikel dateert uit 2008. Dit was voordat de BLR0513 is opgesteld. Voordat de BLR0513 werd gepubliceerd was er nog geen richtlijn op het gebied van glasvezelwapening. Daarom is het niet erg verwonderlijk dat de BLR0513 richtlijn beter aansluit dan het artikel.

### H6.7.4 Vergelijking (scheurwijdte) resultaten met de voorspelling gedaan op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'

In het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' werd een maximale scheurwijdte van 0,5 mm aangehouden. Omdat de kans op scheurwijdte overschrijding aanwezig was gezien de proeven gedaan door de heer Ronteltap zijn de scheurwijdtes op 2 momenten gemeten.

Het eerste moment was wanneer de scheurwijdte het maximum van 0,5 mm had bereikt. Het tweede moment was bij voltooiing van de proef. De resultaten zijn weergegeven in de onderstaande tabel. Om zichtbaar te maken of aan de eis voor scheurwijdte is voldaan is de maximum scheurwijdte in combinatie met de op dat moment aanwezige last vergeleken met de bezwijklast.

| Proefstuk | $w_{max}$ [mm] | Last bij $w_{max}$ [kN] | Bezwijklast [kN] | Last bij $w_{max}$/bezwijk-last [%] | Scheur einde proef [mm] |
|---|---|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 0,5 | 0,61 | 0,61 | 100 | 48 |
| Ligger 3 | 0,5 | 0,55 | 0,87 | 63 | 47 |
| Ligger 4 | 0,5 | 1,1* | 1,1 | 100 | 43 |
| Ligger 5 | 0,5 | 0,72 | 0,81 | 89 | 36 |

**Tabel 12: Last bij maximale scheurwijdte en percentage van de bezwijklast bij maximale scheurwijdte**

*Gemeten bij een scheur van 1 mm.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat er op één geval na (ligger 2) niet is voldaan aan de scheurwijdte eis. Wel kan worden geconcludeerd dat de scheurwijdte beheersing toeneemt bij toename van het wapeningspercentage, dit uit zich onder andere in de scheur op het einde van de proef.

Op het moment dat de scheurwijdte eis boven de buigsterkte eis wordt gesteld bezwijken ligger 3,4 en 5 bezwijken op scheurwijdte en niet op buiging. Hierbij moet worden aangetekend dat voor ligger 4 en ligger 5 er ook een grotere scheurwijdte werd voorspeld dan de 0,5 mm die als maximale scheurwijdte wordt gebruikt. Dit is een heldere verklaring voor het feit dat de scheurwijdte eis in het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' als eerst getest wordt.

### H6.7.5 Vergelijking dwarskracht resultaten met de voorspelling

In het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' is de dwarskrachtcapaciteit wel bepaald. Ondanks dat de liggers allen op buiging zijn bezweken. Is er wel een berekening te maken in hoeverre de dwarskracht capaciteit is bereikt. De dwarskracht V die optreedt is gelijk aan een half keer de bezwijklast en q last.

| Proefstuk | $V_{Rd,c}$ [kN] | V bij bezwijken [kN] | V bij bezwijken/$V_{Rd,c}$ [%] |
|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 0,9 | 0,43 | 48 |
| Ligger 3 | 0,9 | 0,57 | 63 |
| Ligger 4 | 0,9 | 0,67 | 74 |
| Ligger 5 | 0,9 | 0,53 | 59 |

**Tabel 13: Resultaten dwarskracht en optredende dwarskracht gedeeld door de dwarskrachtcapaciteit**

### H6.7.6 Resultaat en berekening van de aanhechtspanning

De berekening van de aanhechtspanning vindt bij glasvezelstaven plaats volgens de Eurocode[14]. Wel zijn de invoerwaarden door de verschillende methoden net iets verschillend waardoor er een resultaat is voor het artikel en een resultaat voor de BRL0513. Een gedetailleerde berekening is in bijlage 11 opgenomen.

[14] Motivatie door Schöck Nederland B.V.

| Proefstuk | $\tau_{gl}$ [N/mm$^2$] |
|---|---|
| Ligger 2 | 0,16 |
| Ligger 3 | 0,22 |
| Ligger 4 | 0,23 |
| Ligger 5 | 0,17 |

Tabel 14: Resultaat aanhechtspanning artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'

De waarde die volgens de Eurocode wordt aangehouden is gelijk aan $\tau_{gl} = 2*f_{ctm} = 2*0,15 = 0.3$ N/mm$^2$. De aanhechtspanning zal dus worden onderschreden.

| Proefstuk | $\tau_{gl}$ [N/mm$^2$] |
|---|---|
| Ligger 2 | 0,69 |
| Ligger 3 | 1,00 |
| Ligger 4 | 1,00 |
| Ligger 5 | 0,73 |

Tabel 15: Resultaat aanhechtspanning BLR0513

Volgens de BLR0513 wordt de aanhechtspanning dus overschreden. De aanhechtspanning waar bij beton vanuit wordt gegaan: $\tau_{gl} = 2*f_{ctm} = 2*0,15 = 0.3$ N/mm$^2$ wordt dus overschreden. Dit is aannemelijk gezien de lange aanhechtlengte.

Het is aannemelijk dat de waarde uit het artikel de werkelijke waarde het best benaderd. Dit wordt ondersteund door de proefresultaten. In de beproeving van ligger 4 werd de scheur in de laatste centimeter zakking 0,8 cm groter. Dit gebeurde vrijwel in een keer, de wapeningsstaven schoven toen uit het beton. De aanhechtspanning was dus overschreden.

### H6.7.7 Resultaten blanco proef

**Resultaat met vergeet mij nietjes**

Dat de ligger zonder wapening ging bezwijken op buiging was reeds bekend doordat de liggers met wapening van een diameter van 3 mm ook op buiging bezweken, gezien het feit dat de liggers met wapening in theorie sterker moeten zijn dan zonder wapening.

De bezwijklast bedroeg 0,33 kN.

Dit is 0,33/4,1*100 = 8% van de voorspellingswaarde.

**Resultaat rekdiagram**

Het resultaat van 0,33 kN is hoger dan de berekende 0,28 kN. Oorzaak daarvan is onder andere het verloop van het rekdiagram. Het rekdiagram heeft dus niet volgens de aanname de middellijn precies in het midden van de doorsnede maar deze ligt verder naar boven. Naar de rekontwikkeling zijn helaas geen specifieke metingen gedaan.

## H6.8 Conclusie glasvezelwapening

Glasvezelwapening is een uitstekende manier om bros bezwijken van beton te voorkomen.

De glasvezelwapening heeft helaas niet kunnen voorkomen dat de liggers niet op scheurvorming bezwijken. In een geval is dat wel gelukt. Dit is een verbetering ten opzichte van de proeven gedaan door de heer Ronteltap. Bij de heer Ronteltap is dit gelukt.

De aanhechtspanning is welleswaar lager dan bij de betonstaalwapening (gemiddeld 0,2 N/mm$^2$ voor glasvezelwapening tegenover gemiddeld 0,5 N/mm$^2$) in situaties met 2 wapeningsstaven. De aanhechting zal waarschijnlijk beter zijn bij geribde glasvezelwapeningsstaven waardoor dit probleem mogelijk wordt opgelost.

De theoretisch berekende capaciteit van de dwarskracht werd in de beproeving gemiddeld voor 61% gebruikt. In het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap was deze benadering met een gemiddelde van 63,2 % vergelijkbaar. Gezien de BLR0513 richtlijn zijn basis in de Eurocode heeft is dit ook niet erg verwonderlijk. Hierin moet men rekening houden met het feit dat de liggers beproefd werden na 14 dagen en de sterkte van het schuimbeton toen 90% van de uiteindelijke sterkte bedroeg[15].

In totaal kan worden geconcludeerd dat de toepassing van glasvezelwapening vanwege de beperktere scheurvorming interessant is ten opzichte van de toepassing van betonstaalwapening. De constructielast per mm$^2$ wapening is van glasvezel hoger dan die van betonwapening.

## H6.9 Discussie glasvezelwapening

De kracht die werd opgenomen door ligger 1 had een hogere waarde kunnen hebben. De krachtsafdracht rondom de rechter oplegging werd echter beperkt door het missen van een deel van de ligger.

De proefstukken konden niet erg gemakkelijk ontkist worden. Dit werd veroorzaakt doordat er water in het hout van de mal is getrokken en het beton daardoor aan de wand vast is gaan plakken. Dit had voorkomen kunnen worden door de mal zorgvuldig met een klein beetje olie in te smeren. De ontkisting heeft plaats gevonden door middel van het lostikken van de proefstukken met plamuurmessen. Hierdoor is een minimaal stukje van de huid van het proefstuk op de mal blijven zitten. De dekking was hierdoor dus net iets lager dan origineel vervaardigd. Dit kan invloed hebben op de proefresultaten.

[15] Bouwen met betonmortel

Voor de wapening is ijzerdraad gebruikt om de wapening op afstand te houden maar ook om de wapening op de juiste plaats in de ligger te houden. De wapening zakte wanneer het ijzerdraad niet gebruikt zou worden weg in de proefstukken. De draden omhoog die na 6 dagen afgeknipt zijn waren echter geen standaardtoevoeging in schuimbeton en mogelijk worden de resultaten dus beïnvloed door die draden. Het kan door de verticale richting van de draden ook mogelijk zijn dat de draden dwarskracht hebben opgenomen waardoor de proefstukken op een later moment bezweken dan vooraf werd aangenomen.

De draden kunnen er wel voor hebben gezorgd dat de verankering van de wapeningsstaven in het schuimbeton beter was dan wanneer er alleen losse staven toegepast zouden zijn. Dit omdat de draden om de staven waren gezet en verticaal in het beton zaten. Het wegtrekken van de ijzerdraden heeft dus de nodige kracht gekost.

Voor de aanhechtlengte is een de afstand van de kop van de ligger tot de bezwijkscheur aangenomen. Deze lengte kan 5 tot 10 mm korter zijn doordat de glasvezelstaven 10 mm korter zijn dan de lengte van de ligger. Hierdoor kan de aanhechtspanning dus ook lager uitvallen. De gemiddelde aanhechtlengte is echter (317+327+340+340)/4=331 mm. De afwijking zal dus maximaal (10/331)*100 = 3% bedragen.

In de grafiek van ligger 2 (in de bijlage) is een $2^e$ piek te zien. Deze werd veroorzaakt omdat de test door problemen met de proefopstelling korte tijd gestopt moest worden.

In de grafiek van ligger 3 (in de bijlage) is een dikke lijn te zien. Dit zijn erg veel meetpunten die kort na elkaar fluctueren. Dit is ook veroorzaakt door problemen met de proefopstelling. De exacte oorzaak is helaas niet bekend maar de meest voor de hand liggende oorzaak is spanning veroorzaakt door andere instrumenten in het Stevinlab.

# H7 Conclusies

In de opzet van het onderzoek werd gesteld dat de constructieve eigenschappen van schuimbeton bepaald dienden te worden. De volgende zaken zijn na onderzoek gebleken.

Indien betonwapening is toegepast kan de capaciteit van de dwarskracht het best worden benaderd door de theorie en berekening op basis van steekproefgemiddelden. Hierdoor is duidelijk geworden dat de waardes van $V_{Rm,\,min}$ met 18-67 procent worden overschreden en dwarskrachtwapening wel benodigd was omdat de liggers met betonwapening op dwarskracht bezweken. Een benadering van de dwarskrachtcapaciteit met de British Standard wordt afgeraden.

De haakweerstand is voor 40% van invloed op de weerstandbiedende dwarskracht. De capaciteit van de dwarskracht werd echter bij de proeven met betonwapening en glasvezelwapening maar voor ongeveer 60% behaald (63,2% en 61%). Hieruit zou men de conclusie kunnen trekken dat de haakweerstand van schuimbeton gereduceerd mag worden tot 0% waardoor de weerstandbiedende dwarskracht ongeveer gelijk is aan de praktijkwaarde. Helaas kan dit in deze thesis niet verder uiteen worden gezet.

De scheurwijdte is van invloed op de sterkte van de constructie. De scheurwijdte kan in het geval van betonstaalwapening met de formule van S.H. Chowdhury en Y.C. Loo ongeveer 100 keer beter worden benaderd en is daarmee geschikter om de waardes van deze eigenschap (scheurwijdtebeheersing) te bepalen.

De verankeringslengte van wapening in schuimbeton is ruim onvoldoende. Er zal dus gekeken moeten worden hoe dit verbeterd kan worden.

Wapeningsnetten zijn in staat de constructieve eigenschappen te verbeteren. Dit uit zich onder andere in een groter aanhechtingsoppervlak.

De toepassing van glasvezelwapening is vanwege de scheurwijdtebeheersing interessant ten opzichte van de toepassing van betonstaalwapening. De constructielast per $mm^2$ wapening is van glasvezel hoger dan die van betonwapening (0,87/14,1=0,06 $kN/mm^2$ voor glasvezel tegen 4,8/100,5 = 0,05 $kN/mm^2$).

Aanbevolen wordt om bij een volgend onderzoek naar dit onderwerp gebruik te maken van wapeningsnetten in de proefstukken zodat het verschil tussen wapeningsstaven en wapeningsnetten in schuimbeton gekwantificeerd kan worden.

# Referenties


Braam, C.R. & Lagendijk, P. (2011). *Constructieleer Gewapend Beton.* 7e gewijzigde dr. Boxtel: Aeneas.

Britsh Standards Institution (1997). *BS 8110*. London.

CEN members, *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1:General rules and rules for buildings.*Brussel:CEN

Chowdhury, S.H. & Loo, Y.C. (2001). A New formula for Prediction of Crack Widths in Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams. *Advances in Structural Engineering,* 4,101-110.

Concrete Reinforcing Mesh. http://www.reinforcingsteelbar.com/reinforcingbar/concrete-reinforcing-mesh.html. Geraadpleegd 19 september 2016

Haakweerstand. http://www.joostdevree.nl/shtmls/haakweerstand.shtml. Geraadpleegd 15 september 2016.

Kiwa (2014). *BRL 0513.* Rijswijk.

(z.j.). [internet]. Geraadpleegd van http://www.nijwapompen.nl/.

Rijkswaterstaat (2007). *Inventarisatie kunstwerken.* Utrecht.

Ronteltap, L. (2014). *Construeren met schuimbeton.* Delft: TU Delft.

Rots, J. (2014). *Vergeet mij nietjes bij CTB2210 Constructiemechanica 2*. Delft: TUD, Faculteit CITG.

Scheurwijdte. http://betonlexicon.nl/S/Scheurwijdte/. Geraadpleegd 25 september 2016.

Schöck Combar, technische informatie. http://www.schock.nl/upload/files/download/Technische_Informatie_Schoeck_ComBAR_%5B1053%5D.pdf. Geraadpleegd op 6 oktober 2016.

Tabel met materiaaleigenschappen schuimbeton. http://www.schuimbetoninfo.nl/data/downloads/24_Tabel+met+materiaaleigenschappen+schuimbeton.pdf Geraadpleegd 8 september 2016.

Van Tol, G.J. (2008). *Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton. Cement,* 3, 34-39.

Vanhooymissen, L., Spegelaere, M., De Vylder, W., Van Gysel, A. (2002). *Gewapend Beton: berekening volgens NBN B 15-002 (1999).* Gent: Academia Press.

VOBN (2012), *Bouwen met betonmortel: betonbouwgids 2012.* Veenendaal

Wapening. http://betonlexicon.nl/W/Wapening%20in%20beton/. Geraadpleegd 19 september 2016.

# Bijlage 1: Berekening dwarskracht met steekproefresultaten

In het specifieke geval waarvoor nu berekeningen gedaan worden gaat men uit van gemiddelden behaald uit proefresultaten. Daarom wordt de $V_{Rm}$ bepaald in plaats van de $V_{Rd,c}$. De formules zijn op basis van de Eurocode 2 en verkregen bij dr.ir. Y. Yang.

De waarde van $f_{cm}$ wordt bepaald uit het gemiddelde van de drukproeven: (1/6)*(1,3+1,08+1,09+0,68+1,107+1,19)= 1,0745 N/mm$^2$. Deze waarde wordt gecorrigeerd voor de kubusvorm. Dit wil zeggen dat de waarde vermenigvuldigd wordt met 0,8: 0,8*1,0745=0,8596 N/mm$^2$.

De waarde van $V_{Rm}$ wordt bepaald middels de volgende formule: $V_{Rm}=0,15*k*(100*\rho_l*f_{cm})^{1/3}*b*d$.

De waarde van $V_{Rm,\,min}$ wordt bepaald middels de volgende formule: $V_{Rm,\,min}=0,035*k^{3/2}*f_{cm}{}^{1/2}$.

Voor de berekening worden de bekende waarden gebruikt uit het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap.

| SB | Aantal Staven | k | $\rho_l$ [$10^{-2}$] | $f_{cm}$ [N/mm$^2$] | b [mm] | d [mm] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2A | 2 | 2,0 | 0,53 | 0,86 | 150 | 126 |
| 2B | 2 | 2,0 | 0,53 | 0,86 | 150 | 126 |
| 3A | 2 | 2,0 | 0,8 | 0,86 | 150 | 126 |
| 3B | 2 | 2,0 | 0,8 | 0,86 | 150 | 126 |
| 4A | 2 | 2,0 | 1,06 | 0,86 | 150 | 126 |
| 4B | 2 | 2,0 | 1,06 | 0,86 | 150 | 126 |

Tabel 16: Waarden dwarskrachtparameters BSc Eindwerk L. Ronteltap

Met deze waarden worden de volgende uitkomsten berekend:

| SB | $V_{Rm}$[N] | $V_{Rm,\ min}$ [N] |
|---|---|---|
| 2A | 4363 | 1735 |
| 2B | 4363 | 1735 |
| 3A | 5005 | 1735 |
| 3B | 5005 | 1735 |
| 4A | 5497 | 1735 |
| 4B | 5497 | 1735 |

**Tabel 17: Resultaat dwarskrachtcapaciteit steekproef**

# Bijlage 2: Berekening dwarskrachtcapaciteit met de British Standard

Om de dwarskrachtcapaciteit te bepalen kan er ook gebruik worden gemaakt van de British Standard.

Met de British Standard kunnen we de design shear stress bepalen. De design shear stress is de toelaatbare spanning die mag optreden zonder dat de constructie bezwijkt onder andere ongunstige omstandigheden. Hierdoor wordt er dus getest op de uiterste grenstoestand.

Om de design shear stress te berekenen wordt er gebruik gemaakt van de volgende formule:

$v = \frac{V}{A_{cv}}$ [N/mm$^2$]

V is hierin de totale dwarskracht. $A_{cv}$ is het oppervlak van de breedte (b) van de betondoorsnede vermenigvuldigd met de nuttige hoogte (d) van de betondoorsnede.

De waarde van $v_{max}$ wordt berekend door middel van de volgende vergelijking: $v_{max}$= min{0,8*$R_{LW}$*$\sqrt{f_{cu}}$; 5,0 MPa}.

$R_{LW}$ is hierin een reductiefactor voor de schuifsterkte. Deze heeft een waarde van 1,0 bij normaal beton. Bij licht gewicht beton heeft deze factor een waarde van 0,75. Gezien schuimbeton een laag soortelijk gewicht heeft, is het realistisch de factor waarde van 0,75 mee te nemen in de berekening.

De factor $f_{cu}$ is de kubusdruksterkte van het materiaal dat wordt toegepast.

De waarde van $v_{max}$= min{0,8*0,75*$\sqrt{1,0745}$, 5MPa}=0,62MPa.

De waarde van de design concrete shear stress ($v_c$) wordt als volgt bepaald.

$v_c = R_{LW} * \frac{0,79 * k1 * k2}{\gamma_m} * \sqrt[3]{\frac{100 * A_s}{b * d}} * \sqrt[4]{\frac{400}{d}}$

Waarbij de waarde van k1 standaard gelijk is aan 1,0.

De waarde van $\gamma_m$ is gelijk aan 1,25.

De waarde van k2 wordt als volgt gegeven: $k2 = \sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{25}} \geq 1$. Dit geeft een waarde van 1,0 voor k2.

$A_s$ is hierin de oppervlakte van de doorsnede van de wapening.

De waarde van b = 150 mm en d = 126 mm. (Bep lars)

De waarde van $v_c$ wordt hiermee voor twee wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,34 N/mm$^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: V=$v_c$*b*d=6360,6 N.

De waarde van $v_c$ wordt hiermee voor drie wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,59 N/mm$^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: V=$v_c$*b*d= 11091,0 N.

De waarde van $v_c$ wordt hiermee voor vier wapeningsstaven, met een diameter van 8 mm, 0,65 $N/mm^2$. De dwarskrachtcapaciteit wordt daarmee: $V=v_c*b*d=12207,3$ N.

# Bijlage 3: Berekening scheurwijdte met S.H. Chowdhury en Y.C. Loo

De formule voor de scheurwijdte wordt volgens S.H. Chowdhury en Y.C. Loo in beginsel als volgt gegeven: $W_{cr} = \varepsilon_s * l_{cr} - \varepsilon_c * l_{cr}$. $W_{cr}$ is de gemiddelde scheurwijdte, $l_{cr}$ is de gemiddelde scheurafstand, $\varepsilon_s$ is de gemiddelde rek in het wapeningsstaal en $\varepsilon_c$ is de gemiddelde rek in het beton. De rek in beton is echter zo minimaal dat deze verwaarloosd kan worden. Hierdoor wordt een conservatieve schatting gemaakt. De gemiddelde scheurlengte wordt dus gegeven door $w_{cr} = \varepsilon_s * l_{cr}$. Wanneer we dit uitdrukken in termen van gemiddelde staalspanning dan wordt de formule als volgt gegeven: $w_{cr} = (f_s/E_s) * l_{cr}$. $E_s$ is hierin de elasticiteitsmodulus, $f_s$ de steelstress (= $\sigma_s$ in Nederland). De waarde van $l_{cr}$ wordt bepaald door: 1. $\phi/\rho$ ratio, 2. c en 3. s. Hierin staat $\phi$ voor de gemiddelde wapeningsstaaf diameter en $\rho$ voor het wapeningspercentage. De waarde van c staat voor de dekking en s staat voor de ruimte tussen de wapeningsstaven. Wanneer deze waarden met hun coëfficiënten worden gecombineerd levert dit voor de gemiddelde scheurafstand: $l_{cr} = 0{,}6*(c-s) + 0{,}1*(\phi/\rho)$. De waarde van $f_s$ wordt bepaald door de vloeispanning van het wapeningsstaal (435 N/mm$^2$), wanneer wordt aangenomen dat de wapening volledig wordt belast in de bruikbaarheidsgrenstoestand, te vermenigvuldigen met een factor 0,6. $E_s$ van staal heeft een waarde van 200000 N/mm$^2$.[16]

Om de waarde van s te bepalen moet een aanname worden gedaan. De waardes van de tussenliggende wapeningsafstand waren namelijk niet bekend uit het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap. De dekking rondom de wapeningsstaven is echter wel bekend. Daarnaast is de diameter van de wapeningsstaven bekend. De diameter van de wapening is 8 mm en de dekking is 20 mm. De liggers die beproefd zijn hebben een doorsnede afmeting van 150 mm * 150 mm. De waarde van s voor 2 wapeningsstaven wordt daarmee aangenomen als: 150-(2*20)-(2*8)=94 mm. Voor 3 staven: (150-(2*20)-(3*8))/2=43mm. Voor 4 staven: (150-(2*20)-(4*8))/3=26mm.

De waardes van $W_{cr,\,max}$ volgen uit een vermenigvuldiging van $W_{cr}$ met 1,5.

Dit levert het volgende resultaat:

| | $W_{cr}$ [mm] | $W_{cr,max}$ [mm] |
|---|---|---|
| 2 staven | 0,18 | 0,26 |
| 3 staven | 0,14 | 0,21 |
| 4 staven | 0,11 | 0,17 |

Tabel 18: Voorspelling scheurwijdte volgens S.H. Chowdhury en Y.C. Loo

[16] Artikel S.H. Chowdhury en Y.C. Loo.

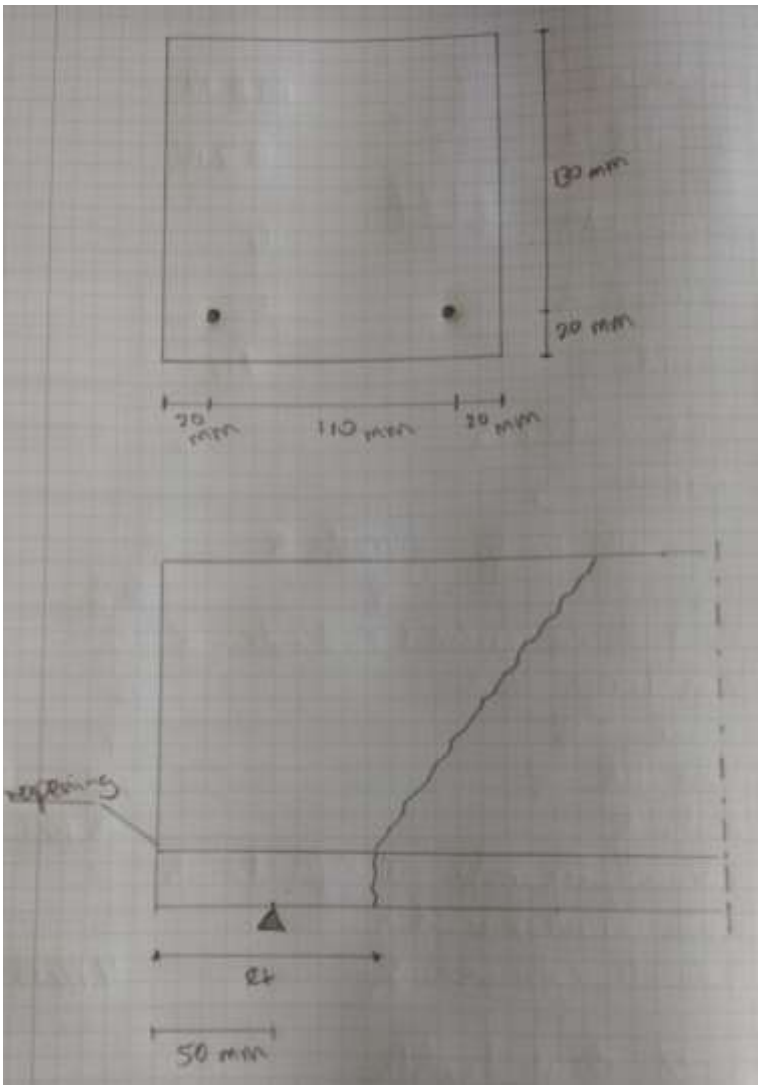
# Bijlage 4: Berekening van de verankeringslengte

In de berekening van de verankeringslengte wordt gewerkt met de waarden die beschikbaar zijn uit de proeven gedaan door de heer Ronteltap.

| SB | Bezwijk-last [kN] | V [kN] | $N_s$ [N] | $l_t$ (mm) | m | $\tau_{bm}$ [N/mm$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2A | 4,1 | 2,05 | 4271 | 170 | 2 | 0,50 |
| 2B | 4,8 | 2,4 | 5189 | 190 | 2 | 0,54 |
| 3A | 5,1 | 2,55 | 5279 | 66 | 3 | 1,06 |
| 3B | 4,5 | 2,25 | 4267 | 70 | 3 | 0,81 |
| 4A | 5,8 | 2,9 | 6018 | 85 | 4 | 0,70 |
| 4B | 5,5 | 2,75 | 6441 | 95 | 4 | 0,67 |

Tabel 19: Eigenschappen proefstukken schuimbeton. [17]

[17] BSc Eindwerk L. Ronteltap




**Figuur 1: Indicatie doorsnedes**

Om een berekening te kunnen maken van de verankeringslengte zal de wapening benaderd worden door middel van glad staal. Een gladde staaf hecht namelijk niet zo goed met beton dan een geribde staaf. Schuimbeton hecht ook slecht met de wapening, daarom is gekozen om de wapening als glad staal te benaderen. Bij de benadering als glad staal wordt aan de waardes van $\alpha_1$ en $\alpha_2$ een waarde van 1,0 toegekend. De factor $\alpha_1$ is immers afhankelijk van de vorm van de balk. De balken die de heer Ronteltap beproefde waren allen rechthoekig. Hiervoor hoeft geen reductie toegepast te worden. De waarde van $\alpha_2$ zal ook gelijk staan aan 1,0 , deze factor hangt af van de betondekking. De verwachting is echter dat de dikte van de dekking weinig invloed zal hebben door de slechte hechting. Daarom is in dit geval gekozen om de waarde van $\alpha_2$ ondanks de aanwezigheid van voldoende dekking op 1,0 te stellen. [18]

Om de rekenwaarde van de verankeringslengte te bepalen wordt de formule uit NEN-EN 1992-1-1, vgl. (8.4) gebruikt.[19] Deze formule wordt als volgt gegeven: $l_{bd}=\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{b,\,min}$

De waardes van $\alpha_3$, $\alpha_4$ en $\alpha_5$ mogen benaderd worden met de waarde van 1,0.

[18] Interview met dr. ir.drs. C.R. Braam
[19] Constructieleer Gewapend Beton

$l_{b,rqd}$ is de basisverankeringslengte, $l_{bd}$ is de rekenwaarde van de verankeringslengte. Tot slot is $l_{b,\,min}$ de mininumverankeringslengte.

De basis verankeringslengte wordt bepaald middels de volgende formule: $l_{b,rqd} = \frac{ø * \sigma_{sd}}{4 * f_{bd}}$

$\sigma_{sd}$= de staalspanning [N/mm$^2$]

$f_{bd}$= de rekenwaarde van de uiterst opneembare aanhechtspanning. [N]

Ø = de doorsnede [mm]

De waarde van $f_{bd}$ wordt berekend met de volgende formule: $f_{bd}$= $\eta_1$* $\eta_2$*2,25*$f_{ctd}$.

De waarde van $\eta_1$ is gelijk aan 1,0. Deze factor is afhankelijk van de ligging van de staven in de doorsnede. De staven zijn onderin de balk geplaatst. Dit is een goede locatie voor de wapening dus de waarde van $\eta_1$ is gelijk aan 1,0.

De waarde van $\eta_2$ is gelijk aan 1 omdat de wapeningsstaven kleiner of gelijk zijn aan 32 mm ø.

De waarde van $f_{ctd}$ is bekend, er wordt SB 500[20] schuimbeton gebruikt, dat geeft een waarde van $f_{ctd} = 0{,}15 \frac{N}{mm2}$

$f_{bd}$ wordt op die manier: 2,25*1,0*0,15 = 0,34 N/mm$^2$.

Echter moet de keuze voor glad staal nog in behandeling worden genomen. Daarbij is er gekozen om volgens Eurocode 2[21]. Daarin wordt in vergelijking 7.11 de factor k2 gebruikt. De factor k2 staat voor de distributie van de rekken. De waarde van k2 is gelijk aan 0,5 voor binding tussen beton en wapening en gelijk aan 1,0 voor complete krachtsoverdracht. Gezien het feit dat de hechting slecht is bij glad staal zal er alleen sprake zijn van binding waardoor de waarde van k2 gelijk zal zijn aan 0,5. Hierin wordt aangenomen er geen verschil is tussen Ultimate Limit State en Servicability Limit State voor de waarde van invloedsfactor k2. De waarde van $f_{bd}$ is namelijk in Ultimate Limit State terwijl k2 in Servicability Limit State is. Deze aanname maakt het mogelijk toch uitspraken te doen over de haakweerstand in geval van glad staal.

Nu kan glad staal meegenomen worden in de berekening van $f_{bd}$. De waarde van $f_{bd}$ wordt daarmee: 0,34/2=0,17 N/mm$^2$.

De basisverankeringslengte kan daarna berekend worden.

$l_{b,rqd}$= (8/4)*435/0,17 = 5156 mm.

Dit geeft voor de rekenwaarde van de verankeringslengte: 1,0*1,0*5156 =5156 mm.

[20] Tabel met materiaaleigenschappen schuimbeton
[21] Eurocode 2

De spanning die optreedt in het betonstaal is echter vele malen lager. Voor $\sigma_{sd}$ wordt dan de waarde van Ns/As ingevoerd. Dit resulteert in de volgende waarden voor $l_{b,rqd}$ en $l_{bd}$:

| SB | $l_{b,rqd} = l_{bd}$ [mm] | $N_s/A_s$ [$N/mm^2$] |
|---|---|---|
| 2A | 504 | 42,5 |
| 2B | 612 | 51,6 |
| 3A | 415 | 35,0 |
| 3B | 335 | 28,3 |
| 4A | 355 | 29,9 |
| 4B | 380 | 32,0 |

**Tabel 20: Verankeringslengte wapening en verhouding $N_s/A_s$.**

# Bijlage 5: Wapening omrekenen van staaf naar net[22]

Het omrekenen van wapeningsstaven naar netten kan gedaan worden door middel van het doorsnede oppervlak.

Door het doorsnede oppervlak van de wapeningsstaven gelijk te houden kan de hoeveelheid wapening hetzelfde blijven terwijl het contact oppervlak toe neemt.

Zo is de gezamenlijke doorsnede van 3 staven met een diameter van 12 mm gelijk aan 339 $mm^2$. Dit is ongeveer gelijk aan de gezamenlijke doorsnede van 7 staven met een diameter van 8 mm, dat is namelijk 352 $mm^2$. Het contact oppervlak is met 3 staven gelijk aan 3*(2*pi*r*l) = 3*2*pi*6*l=36*pi*l. Het contact oppervlak met 7 staven is gelijk aan 7*(2*pi*r*l)=7*2*pi*4*l=56*pi*l. Dit betekent dat de toename in contactoppervlak (56/36=1,56) gelijk is aan 56%.

De hoeveelheid wapening toegepast in netten is mede afhankelijk van de maaswijdte. Om de berekening van een wapeningsnet te doen zijn er tabellen beschikbaar om de verhouding te bepalen. Hiermee kan ook de benodigde wapening per strekkende meter worden bepaald. Een voorbeeld wordt hieronder gegeven. Zo valt af te lezen dat staven van 7 mm met een hart op hart afstand van 70mm tot ongeveer dezelfde hoeveelheid wapening per strekkende meter leidt dan staven met een diameter van 9 mm met een hart op hart afstand van 115 mm.

| DOORSNEDE VAN BETONSTAALSTAVEN [mm | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | diameter [mm] | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| | staaf [mm2/m] | 28,3 | 38,5 | 50,3 | 63,6 | 78 |
| h.o..h | aantal staven [m2] | | | | | |
| 50 | 20,00 | 566 | 770 | 1006 | 1272 | 15 |
| 55 | 18,18 | 515 | 700 | 915 | 1156 | 14 |
| 60 | 16,67 | 472 | 642 | 838 | 1060 | 13 |
| 65 | 15,38 | 435 | 592 | 774 | 978 | 12 |
| 70 | 14,29 | 404 | 550 | 719 | 909 | 11 |
| 75 | 13,33 | 377 | 513 | 671 | 848 | 10 |
| 80 | 12,50 | 354 | 481 | 629 | 795 | 9 |
| 85 | 11,76 | 333 | 453 | 592 | 748 | 9 |
| 90 | 11,11 | 314 | 428 | 559 | 707 | 8 |
| 95 | 10,53 | 298 | 405 | 529 | 669 | 8 |
| 100 | 10,00 | 283 | 385 | 503 | 636 | 7 |
| 105 | 9,52 | 270 | 367 | 479 | 606 | 7 |
| 110 | 9,09 | 257 | 350 | 457 | 578 | 7 |
| 115 | 8,70 | 246 | 335 | 437 | 553 | 6 |
| 120 | 8,33 | 236 | 321 | 419 | 530 | 6 |
| 125 | 8,00 | 226 | 308 | 402 | 509 | 6 |

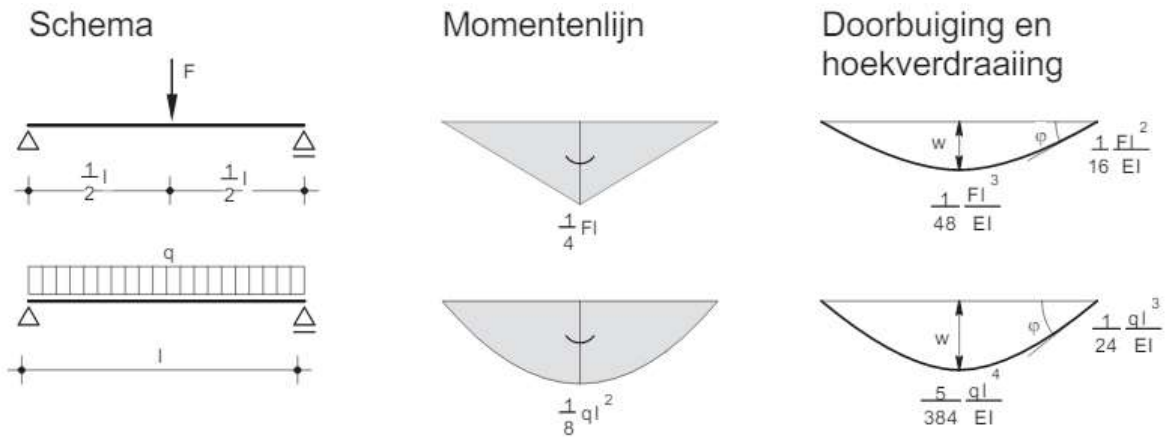
Tabel 21: Rekentabel wapeningsnetten

[22] Resultaat op basis van mailconversatie met A. van Wijngaarden

# Bijlage 6: Voorspelling capaciteiten ongewapend schuimbeton

**Voorspelling op basis van vergeet mij nietjes**

De capaciteiten van de ligger zonder wapening worden voorspeld op basis van de vergeet mij nietjes uit de constructiemechanica.




Figuur 2: Vergeet mij nietjes[23]

w = 1,06 mm

q = 0,12 kN/m

E = 650 N/mm$^2$

I = (1/12)*b*h$^3$ = 42187500 mm$^4$.

De q-last en de F-last worden gecombineerd, dan volgt:

$$w = \frac{5}{384} * \frac{q * l^4}{E * I} + \frac{1}{48} * \frac{F * l^3}{E * I}$$

Dit geeft een last F van 4,1 kN.

**Voorspelling op basis van rekdiagram**

Naast de voorspelling op basis van vergeet mij nietjes is er een voorspelling van de bezwijklast gedaan op basis van het rekdiagram.

Hierin is de aanname gedaan dat de rek op de middellijn van de doorsnede gelijk is aan 0.

$\varepsilon_c = \sigma_c / E$

Hierin is $\varepsilon_c$ de rek van het schuimbeton. Sigma is de rekspanning van het schuimbeton. En E is de elasticiteitsmodulus van het schuimbeton.

Dan volgt:

$\varepsilon_c$ = 0,1/650 = 1,54 * 10$^{-4}$ mm/mm.

[23] Vergeet mij nietjes, Ir. J.W. Welleman

De momentcapaciteit is gelijk aan de oppervlakte van het spanningsdiagram.

$M = (1/6)*150^3 * 0,1 = 56$ kNmm

$M = (1/4)*F*L + (1/8)*q*L^2$.

$q = 0,12$ kN/m

$L = 700$ mm

Dan volgt dat $F = 0,28$ kN.

# Bijlage 7: Voorspelling capaciteiten gewapend schuimbeton op basis van het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton'[24]

Over de toepassing van glasvezelstaven voor de toepassing als wapening heeft ir. G.J. van Tol van Schöck Nederland een artikel geschreven. Hierin wordt ook een uitwerking gedaan waarin de capaciteiten van proefstukken bepaald worden.

De aanpak om de capaciteiten te bepalen zal ook hieronder gebruikt worden.

**Parameters**

Als eerst worden de parameters van de proefstukken vastgesteld.

b = 150 mm

h = 150 mm

d = 150-20-(1/2)*3= 128,5 mm

$l_{rep}$=700 mm

$w_{max}$ = 0,5 mm

**Eigenschappen beton**

In de tweede plaats worden de parameters van het beton bepaald.

$E'_b$ = 650 N/mm$^2$

$f'_b$ = (1/1,67)=0,6 N/mm$^2$ (NEN 6720)

$f'_{ck}$= 1 N/mm$^2$

$f_b$ = 0,1 N/mm$^2$

$f_{bm}$= 0,2 N/mm$^2$

$f_{b,rep}$ = 0,7*(1,05 + 0,05 * $f'_{ck}$) = 0,8 N/mm$^2$

Hierin is $f'_b$ de rekenwaarde van de druksterkte, $f_b$ de rekenwaarde van de treksterkte, $f_{bm}$ de gemiddelde treksterkte, $f'_{ck}$ de karakteristieke kubus druksterkte en $E'_b$ is de elasticiteitsmodulus.

**Eigenschappen glasvezelwapening**

Alvorens aan de berekeningen begonnen kan worden moeten de parameters op het gebied van de wapening bekend zijn.

$f_{gl}$ = 625 N/mm$^2$

[24] Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton, ir. G.J. van Tol

$E_{gl}$ = 30000 N/mm$^2$

$\xi_{gl}$ = 1,0

$k_{an}$ = 1,0

**Belasting**

Voor de belasting is de variabele last nog onbekend.

Het eigen gewicht van het schuimbeton is echter al wel bekend.

Het toegepaste SB 500 schuimbeton heeft een soortelijk gewicht van 549 kg/m$^3$.

Dit levert een last van 549*9,81 = 5385,7 N/m$^3$.

Het oppervlak van de proefstuk doorsnede is 0,15*0,15 = 0,0225 m$^2$

Hieruit volgt een last van 0,0225*5385,7 = 0,12 KN/m

De bezwijklast F is op dit moment nog onbekend.

**Buiging, toetsing scheurvorming met Ø 3 mm wapening**

De scheurvorming is bij glasvezelwapening normaal gesproken maatgevend. Daarom wordt hieraan als eerst gerekend.

Als eerst wordt het gemiddelde scheurmoment bepaald volgens NEN 6720: 8.7.1:

$(1/6)*b*h^2*f_{bm}$= (1/6)*150*150*150*0,2 = 562500 Nmm = 0,56 KNm

Voor het representatieve moment worden de belastingfactoren gelijk gesteld aan 1,0 gezien het hier een proefopstelling betreft.

Het representatieve moment voor het eigengewicht is gelijk aan: (1/8)*0,12*0,7$^2$ *1,0 = 0,01 KNm.

Het representatieve moment voor de last F is gelijk aan: (1/4)*F*0,7*1.

**Resultaat buigtrekwapening, scheurvorming met Ø 3 mm wapening**

Er worden 2 staven met een diameter van 3 mm toegepast.

De gezamenlijke oppervlakte van de wapeningsstaaf doorsnedes is gelijk aan: 2 * pi * 1,5$^2$ = 14,1 mm$^2$.

Het wapeningspercentage $\rho_{gl}$= $A_{gl}$/(b*d) = 14,14/(150*128,5) = 7,3 * 10$^{-4}$.

In het artikel worden voor het diagram zonder volledige stuik de volgende waarden gegeven voor de rekken.

$\varepsilon'_{bpl}$= 0,0021

$\varepsilon'_{bu}$= 0,0035

De waarde van de betrondrukzone $x_u$ wordt bepaald middels de volgende formule:

$x_u = d* \frac{2*\rho_{gl}*f_{gl}^2+E_{gl}*f'_{b,rep}*\varepsilon'_{bpl}}{2*f_{gl}*f'_{b,rep}+E_{gl}*f'_{b,rep}*\varepsilon'_{bpl}}$ = 76,3 mm

**Toetsing voorwaarden met Ø 3 mm wapening**

Vervolgens vindt de toetsing volgens NEN 6720 plaats.

$$\sigma_{gl} = \frac{M}{\rho_{gl} * b * d * (d - \frac{7}{18} * x_u)}$$

Omdat M nog onbekend is kan de waarde van $\sigma_{gl}$ nog niet berekend worden.

Ook moet de wapening nog getoetst worden aan de volgende voorwaarde:

$$\emptyset_{gl} \leq \frac{k_1 * \xi_{gl}}{\sigma_{gl}}$$

De factor k1 is een van de factoren waar de materiaaleigenschappen mee worden verdisconteerd.

De waarde van k1 wordt berekend door: $0{,}0625*w_{max}*E_{gl}$ = 0,0625*0,5*30000= 937,5.

Daarnaast is er een eis aangaande de (hart op hart) afstand tussen de wapeningsstaven.

$$s_{gl} \leq 100 * (k_2 * \frac{\xi_{gl}}{\sigma_{gl}} - 1{,}3)$$

$s_{gl}$ = 150-20-20 = 110 mm

$k_2 = 0{,}0125 * w_{max} *E_{gl}$ = 0,0125*0,5*30000 = 187,5

**Buiging controle sterkte met Ø 3 mm wapening**

Om de sterkte te controleren wordt er voor het wapeningspercentage de volgende formule gebruikt:

$$\rho_{gl,bu} = E_{gl} * f'_b * \frac{2 * \varepsilon'_{bu} * \varepsilon'_{bpl} - \varepsilon'_{bpl} * \varepsilon'_{bpl}}{f_{gl}^2 * \varepsilon'_{bu} + E_{gl} * f_{gl} * \varepsilon'_{bu} * \varepsilon'_{bu}}$$

De parameters zijn gelijk aan de waarden voor toetsing van de scheurvorming, echter is de waarde van $\varepsilon'_{bpl}$ nu gelijk aan 0,00175.

Dit geeft voor $\rho_{gl,bu}$ een waarde van $1{,}04 * 10^{-4}$.

De waarde van $\rho_{gl,bu}$ is dus ongeveer zeven keer kleiner dan de waarde van $\rho_{gl}$ dus er treed volledige stuik op.

Om de waarde van $x_u$ te berekenen bij volledige stuik wordt er gebruik gemaakt van de volgende formule:

$$x_u = d * \frac{\sqrt{{E_{gl}}^2 * {\rho_{gl}}^2 + 857 * {f'}_b * E_{gl} * \rho_{gl}} - E_{gl} * \rho_{gl}}{428{,}5 * {f'}_b}$$

De waarden van alle parameters zijn bekend.

De nieuwe waarde van $x_u$ is gelijk aan: 43,8 mm.

De waarde van de betondrukzone is dus de helft kleiner geworden. Het maximaal opneembare moment zal dus enorm afnemen.

$M_u = (3/4)*x_u*b*f'_b*(d-(7/18)*x_u)$

$M_u$ = 0,32KNm.

**Last F met Ø 3 mm wapening**

De last F kan nu ook bepaald worden.

0,25*F*0,7 = 0,32-0,01

Hieruit volgt dat F gelijk is aan 1,8 KN

**$\sigma_{gl}$ met Ø 3 mm wapening**

Nu het uiterst opneembare moment bekend is kan ook de spanning $\sigma_{gl}$ worden berekend.

De waarde van $\sigma_{gl}$ wordt berekend met de $x_u$ voor buiging en het moment voor buiging.

Dit levert een $\sigma_{gl}$ van 204,0 N/mm$^2$, een kleinere waarde dan 625 N/mm$^2$ dus de wapening is in staat de kracht op te nemen.

**Toetsingsvoorwaarden met Ø 3 mm wapening**

Voor de scheurwijdte zijn twee voorwaarden gesteld zoals hierboven vermeld. Nu het uiterst opneembare moment bekend is en daarmee de spanning in de wapeningsstaven kan worden getest of er wordt voldaan aan de voorwaarden. Er hoeft echter maar aan 1 van de twee voorwaarden te worden voldaan.

Als eerst wordt de wapeningsdiameter getest.

$3 \leq 937{,}5*1/204{,}0$

$3 \leq 4{,}6$

Aan de eerste voorwaarde wordt dus voldaan.

$110 \leq 100*(187{,}5*1/204{,}0 - 1{,}3)$

$110 \leq -38{,}1$

Aan de tweede voorwaarde wordt niet voldaan.

Omdat er aan de eerste voorwaarde wordt voldaan is voldaan aan de toetsing op scheurvorming.

**Dwarskracht met Ø 3 mm wapening**

Naast de belasting op buiging zoals hierboven berekend wordt er ook een toetsing op dwarskracht gedaan.

De optredende dwarskracht wordt vergeleken met de capaciteit van het schuimbeton om de dwarskracht op te nemen.

De dwarskracht die optreed ($V_d$) is gelijk aan 0,5*(q+F). (geen belastingfactoren omdat we hier te maken hebben met een steekproef.

$V_d$ = 0,5*(0,12+1,80) = 0,96 KN

De spanning die door $V_d$ ontstaat is gelijk aan: F/A. De dwarskrachtspanning $\tau_d$ = 0,96*$10^3$/(150*150) = 0,043 N/$mm^2$.

De minimaal op te nemen spanning $\tau_1$ door het schuimbeton is gelijk aan 0,4 *$f_b$. De waarde van $f_b$ is gelijk aan 0,1 N/$mm^2$.

Dus $\tau_1$ = 0,4*0,1 = 0,04 N/$mm^2$. De dwarskrachtcapaciteit is daarmee gelijk aan 0,04*150*150 = 900 N.

De ligger zal dus bezwijken op dwarskracht.

**Proefstukken met Ø 4 mm wapening**

Hieronder volgt de beknopte uitwerking van de toepassing van wapeningsstaven met een diameter van 4 mm. Indien waarden veranderen wordt de variabele opnieuw benoemd.

**Buiging, toetsing scheurvorming met Ø 4 mm wapening**

d = 150-20-2 = 128 mm

$A_{gl}$ is nu gelijk aan 2*pi*$2^2$ = 25,1 $mm^2$.

$\rho_{gl}$= $A_{gl}$/(b*d) = 1,3 * $10^{-3}$.

$x_u = d* \frac{2*\rho_{gl}*f_{gl}^2+E_{gl}*f'_{b,rep}*\varepsilon'_{bpl}}{2*f_{gl}*f'_{b,rep}+E_{gl}*f'_{b,rep}*\varepsilon'_{bpl}}$ = 130,8 mm

**Toetsing voorwaarden met Ø 4 mm wapening**

Op dit punt kan er nog geen berekening worden gedaan naast de gedeeltelijke toetsingsberekeningen die al gedaan zijn.

**Buiging controle sterkte met Ø 4 mm wapening**

Gezien de waarde voor $\rho_{gl,bu}$ gelijk is aan 1,04 * $10^{-4}$ en deze waarde kleiner is dan 1,3*$10^3$ mag $x_u$ bij volledige stuik berekend worden.

$x_u = d * \frac{\sqrt{E_{gl}{}^2 * \rho_{gl}{}^2 + 857 * f'_b * E_{gl} * \rho_{gl}} - E_{gl} * \rho_{gl}}{428{,}5 * f'_b}$ = 53,8 mm

$M_u = (3/4) * x_u * b * f'_b * (d-(7/18) * x_u)$ = 0,39 KNm

**Last F met Ø 4 mm wapening**

De last F kan nu ook bepaald worden.

0,25*F*0,7 = 0,39-0,007

Hieruit volgt dat F gelijk is aan 2,2 KN

**$\sigma_{gl}$ met Ø 4 mm wapening**

Nu het uiterst opneembare moment bekend is kan ook de spanning $\sigma_{gl}$ worden berekend.

De waarde van $\sigma_{gl}$ wordt berekend met de $x_u$ voor buiging en het moment voor buiging.

Dit levert een $\sigma_{gl}$ van 145,9 N/mm$^2$, een kleinere waarde dan 625 N/mm$^2$ dus de wapening is in staat de kracht op te nemen.

**Toetsingsvoorwaarden met Ø 4 mm wapening**

Als eerst wordt de wapeningsdiameter getest.

$4 \leq 937{,}5 * 1/145{,}9$

$4 \leq 6{,}4$

Aan de eerste voorwaarde wordt dus voldaan.

$110 \leq 100 * (187{,}5 * 1/145{,}9 - 1{,}3)$

$110 \leq -1{,}5$

Aan de tweede voorwaarde wordt niet voldaan.

Omdat er aan de eerste voorwaarde wordt voldaan is voldaan aan de toetsing op scheurvorming.

**Dwarskracht met Ø 4 mm wapening**

Naast de belasting op buiging zoals hierboven berekend wordt er ook een toetsing op dwarskracht gedaan.

De optredende dwarskracht wordt vergeleken met de capaciteit van het schuimbeton om de dwarskracht op te nemen.

De dwarskracht die optreed ($V_d$) is gelijk aan 0,5*(q+F). (geen belastingfactoren omdat we hier te maken hebben met een steekproef.

$V_d$ = 0,5*(0,12+2,20) = 1,16 KN

De spanning die door $V_d$ ontstaat is gelijk aan: F/A. De dwarskrachtspanning $\tau_d$ = 1,16*$10^3$/(150*150) = 0,05 N/$mm^2$.

De minimaal op te nemen spanning $\tau_1$ door het schuimbeton is gelijk aan 0,4 *$f_b$. De waarde van $f_b$ is gelijk aan 0,1 N/$mm^2$.

Dus $\tau_1$ = 0,4*0,1 = 0,04 N/$mm^2$. De dwarskrachtcapaciteit is daarmee gelijk aan 0,04*150*150 = 900 N.

De ligger zal dus bezwijken op dwarskracht.

# Bijlage 8: Voorspelling capaciteiten gewapend schuimbeton op basis van de BLR0513[25]

Om een voorspelling te doen van de kracht waarbij de liggers gaan bezwijken tijdens de 3 punts buigingsproef is ervoor gekozen om de beoordelingsrichtlijn voor glasvezelwapening te gebruiken.

De beoordelingsrichtlijn die is gebruikt is gebaseerd op de Eurocode 2. De beoordelingsrichtlijn voor het KOMO attest-met-productcertificaat voor glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton is vastgesteld door het College van Deskundigen van Kiwa ''wapeningsmaterialen'' op 1 februari 2014. De beoordelingsrichtlijn BRL 0513 wordt iedere 5 jaar opnieuw vastgesteld.

In eerste instantie is getracht de bezwijklast van de proefstukken te bepalen.

In de BRL 0513, 5.1.2. wordt gesteld dat de scheurwijdte in het beton tot 0,5 mm is toegestaan. Er moet dan wel worden aangetoond dat de duurzaamheid is gegarandeerd, dit wil zeggen dat de glasvezelstaaf niet beschadigd moet zijn. Er kunnen ook strengere eisen worden gesteld indien dit wordt vereist door omstandigheden. Er kan hierbij onder andere aan de esthetiek gedacht worden.

**Buiging 3 mm staven**

Bij de berekening voor glasvezelstaven met een diameter van 3 mm waren de volgende waarden bekend. Hierin is l de lengte van het proefstuk, h is de hoogte van het proefstuk, d is de nuttige hoogte (h – de dekking c – de helft van de diameter van de wapening), b is de breedte van het proefstuk, $w_{max}$ is de toegestane scheurwijdte, r is de straal van de wapeningsstaaf.

l = 700 mm

h = 150 mm

d = 150-20-2 = 128,5 mm

b = 150 mm

$w_{max}$ = 0,5 mm

Andere waarden die gebruikt worden:

$A_{gl}$ = de oppervlakte van de glasvezelwapening

$f_{yld}$ = de rekenwaarde van de langeduursterkte van glasvezel

$f_{cd}$ = de rekenwaarde van de betondruksterkte

$A_{gl}$ = 2*pi *$r^2$ = 14,1 $mm^2$.

[25] BLR 0513

De waarde van $f_{yld}$ is geschat op basis van de treksterkte op korte duur. De korteduursterkte van de toegepaste glasvezelstaven is gelijk aan 1250 N/mm$^2$.[26] De firma Schöck Nederland b.v. geeft voor haar glasvezelwapeningsstaven een waarde van ongeveer 50% van de korteduursterkte voor de langeduursterkte. Voor de langeduursterkte van glasvezelwapening is dus een waarde van 625 N/mm$^2$ aangehouden.

De waarde van $f_{cd}$ is al volgt berekend: $f_{cd}=f_{ck}/1,5 = 1/1,5=0,67$ N/mm$^2$. De waarde van $f_{ck}$ is uit de tabel met eigenschappen van schuimbeton verkregen.

Als eerste is de betondrukzone $x_u$ berekend.

$x_u = \frac{A_{gl} * f_{gld}}{0,75 * b * f_{cd}}$ = 117,8 mm

De proefstukken zijn niet-gedrongen liggers belast op buiging. Er is ook geen sprake van normaalkracht. In dit geval moet uit het oogpunt van de rotatiecapaciteit de hoogte van de betondrukzone worden beperkt.

Er moet daarom worden voldaan aan de volgende voorwaarde:

$$k_{xu} = \frac{x_u}{d} \leq k_{xmax} = \frac{0,0025 * E_{gl}}{(0,0025 * E_{gl} + f_{gld})}$$

Hierin is $k_{xmax}$ de maximaal toelaatbare verhouding tussen de hoogte van de betondrukzone en de nuttige hoogte van de doorsnede van het proefstuk.

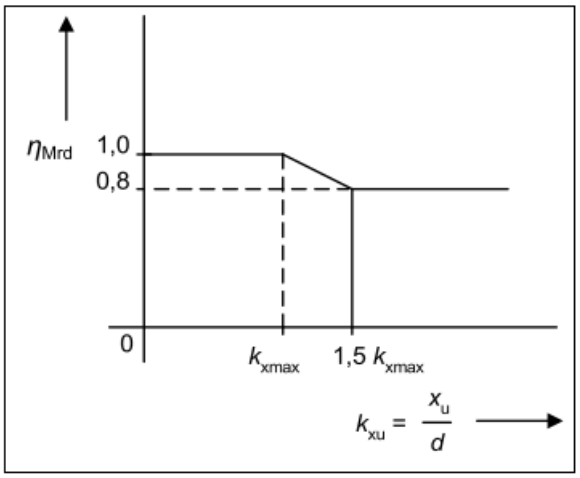
De waarde van $E_{gl}$ is gelijk aan 30000 N/mm$^2$.

De waarde van $k_{xmax}$ is dan gelijk aan 75/700=0,11.

Het resultaat van $x_u/d$ is 117,8/128,5=0,92.

Er wordt dus niet voldaan aan de voorwaarde. Een reductiefactor van 0,8 wordt toegepast op het uiterst opneembare moment. Een grafiek met de grootte van de reductiefactor is hieronder afgebeeld.

[26] Waarde verkregen van de leverancier Ceemo Engineering B.V.




Figuur 3: Waarde reductiefactor afhangend van $k_{xmax}$

Omdat $x_u/d > 1{,}3 * k_{xmax}$ wordt de waarde van $M_{Rd,\,gl}$ bepaald volgens:

$$M_{Rd,gl} = \left(\frac{\mu_1 \cdot \mu_2}{1040000 \cdot f_{cd}} - \frac{{\mu_1}^2}{400000 * f_{cd}} - \frac{\mu_1}{402} + \frac{\mu_2}{1890}\right) \cdot b \cdot d^2$$

Mu1 is gelijk aan: $E_{gl} * \rho_{gl}$

Mu1 = 30000*14,1/(150*128,5) = 22,0

Mu2 is gelijk aan: $\sqrt{7 * \mu_1^2 + 6000 * f_{cd} * \mu_1}$ = 302,3

$M_{Rd,gl}$ is met deze waarden gelijk aan 279891,4 Nmm. Dit is gelijk aan 0,28 KNm.

Wanneer de reductiefactor van 0,8 wordt toegpast geeft dit een waarde van 0,22 KNm.

Gezien deze voorspelling gemaakt wordt voor een proef worden de belastingfactoren voor de belasting op 1,0 gezet.

Het toegepaste schuimbeton SB500 heeft een massa van 549 kg/m$^3$. Wanneer dit wordt omgezet naar de last die het proefstuk ten gevolge van het eigengewicht ondervindt dan resulteert dit in: 549*9,81*0,15*0,15 = 121,3 N/m.

De vergelijking die leidt tot de maximaal aanvaardbare last is de volgende:

(1/8)*0,12*0,7$^2$ + 0,25*F*0,7 = 0,22 KNm.

De maximaal aanvaardbare last zal dus 1,24 KN bedragen.

**Buiging 4 mm staven**

De waarde van $A_{gl}$ is gelijk aan 2*pi*2*2 = 25,13 mm$^2$.

De waarde van d is nu gelijk aan 150-20-2=128 mm.

De waarde van de betondrukzone $x_u$ is nu gelijk aan: (25,13*625)/(0,75*150*(2/3)) = 209,4 mm. Omdat de betondrukzone groter is dan de hoogte van het proefstuk zou er normaal gesproken drukwapening worden toegepast. De firma Schöck, een van de producenten van glasvezelwapening, geeft aan dat dit bij glasvezelwapening niet effectief is door de lage elasticiteitsmodulus. De reductiefactor $k_{max}$ wordt nu bepalend.

De waarde van $k_{x,max}$ is gelijk voor de staven van 3 en 4 mm: $k_{x,max}$ = 0,11.

Het resultaat van $x_u/d$= 209,4/128 = 1,6; dit is groter dan $k_{x,max}$ dus dezelfde formule voor $M_{rd,gl}$ wordt gebruikt als bij de staven met een diameter van 3 mm.

$\boldsymbol{\mu}_1 = E_{gl} * \rho_{gl}$ = 30000*25,13/(150*128) = 39,3

De waarde van $\boldsymbol{\mu}_2$ wordt met de bovenstaande formule gelijk aan: 409,7.

De waarde van $M_{rd,gl}$ kan daarna met de bovenstaande formule berekend worden, dit geeft: $M_{rd,gl}$=0,34 KNm.

Gezien het feit dat de waarde van $d/x_u$ meer dan 1,5 keer zo groot is als $k_{x,max}$ zal er een reductiefactor van 0,8 toegepast worden.

$M_{rd,gl}$ wordt dan 0,8 * 0,34 = 0,27 KNm.

Gezien het een proef is worden er geen belastingfactoren in rekening gebracht.

$(1/8)*0,12*0,7^2 + 0,25*F*0,7 = 0,27$

Wanneer de vergelijking wordt opgelost levert dit de bezwijklast F. F = 1,5 KN.

**Dwarskracht 3 mm**

Voor de opname van de dwarskracht wordt volgens de BLR 0513 gebruik gemaakt van het wapeningspercentage. Voor proefstukken die geen dwarskrachtwapening vereisen geldt: $\rho_l \leq 0,02$.

$\rho_l = \frac{E_{gl} * A_{gl}}{E_s * b * d} = 1,1 * 10^{-4}$

Er wordt dus voldaan aan de eis van het wapeningspercentage. Verdere berekeningen zijn dus niet benodigd gezien er geen dwarskrachtwapening aanwezig is.

**Dwarskracht 4 mm**

Voor de wapeningsstaven met een diameter van 4 mm wordt ook het wapeningspercentage $\rho_l$ berekend. Met de bovenstaande formule en de bekende parameters levert dit een waarde van $1,9*10^{-4}$ voor $\rho_l$. De gevonden waarde is kleiner dan 0,02. Er wordt dus voldaan aan de eis indien er geen dwarskrachtwapening benodigd is.

**Wringing 3 mm**

Ook is er gekeken naar de mogelijkheden van bezwijken op wringing. Hiervoor wordt de rekenwaarde van het wringend moment bepaald ($T_{Ed}$).

Als eerst wordt het effectieve oppervlak van de doorsnede ($A_k$) bepaald. De effectieve dikte van de wand wordt hiervoor als eerst bepaald. De effectieve wanddikte ($t_{eff}$): A/u waarin u de omtrek van de doorsnede is. Dus $t_{eff}$=(150*150)/(2*(150+150))=37,5mm. $A_k$ heeft dan een breedte en hoogte gelijk aan: 150 – 2*0,5*37,5 = 112,5 mm.

Daarna kan $u_k$, de omtrek van $A_k$ worden berekend: 2*(1125,5+112,5) = 450 $mm^2$.

Vervolgens kan de waarde van $T_{Ed}$ worden berekend met de volgende formule:

$$\frac{\sum A_{gll} * 2{,}2 * 10^{-3} * E_{gl}}{u_k} = \frac{T_{Ed}}{2 * A_k} * \cot\theta$$

Voor de afschuivingshoek theta is een hellingshoek van 45 graden aangenomen. Deze waarde is gekozen op basis van het scheurpatroon dat zich heeft afgetekend op de proefstukken van de heer Ronteltap.

Hiermee komt de waarde van $T_{Ed}$ na oplossen van de bovenstaande formule op 52396,9 Nmm, of 0,05 KNm.

**Wringing 4 mm**

De waarden van $A_k$, A, u, $u_k$, theta en $t_{eff}$ zijn gelijk aan de waarden voor de staven met een diameter van 3 mm. Alleen de som van de wapeningsstaaf doorsnedes verschilt. Deze is gelijk aan 25,1 $mm^2$.

Wanneer dezelfde vergelijking wordt opgelost wordt een moment van 0,09 KNm voor $T_{Ed}$ gevonden.

**Scheurwijdte staven 3mm**

Volgens de BLR 0513 mag de scheurwijdte worden benaderd met:

$w_k = s_{r,max,gl} * (\varepsilon_{glm} - \varepsilon_{cm})$

Hierin mag het verschil tussen de gemiddelde rek in de glasvezelwapening en de gemiddelde rek in het beton worden berekend door middel van de volgende formule:

$$(\varepsilon_{glm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_{gl} - k_t * \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} * (1 + \alpha_{gl} * \rho_{p,eff})}{E_{gl}} \geq 0{,}6 * \frac{\sigma_{gl}}{E_{gl}}$$

$$\rho_{p,eff} = A_{gl}/A_{c,eff}$$

$$\alpha_{gl} = E_{gl}/E_{cm}$$

De waarde van $f_{ct,eff}$ is gelijk aan de gemiddelde axiale treksterkte, is gelijk aan $f_{ctm}$: de buigtreksterkte van schuimbeton. Dus $f_{ct,eff}$ is 0,15 N/$mm^2$.

$A_{c,eff}$ is het effectieve beton oppervlak. Het effectieve beton oppervlak wordt berekend door de minimumwaarde te nemen van de volgende 3 formules. Hierin is x de hoogte van de betondrukzone.

1. b*2,5*(h-d)
2. b*(h-x)/3
3. b*h/2

Dit geeft: 1 = 8062,5 $mm^2$, 2 = 1610 $mm^2$ en 3 = 11250 $mm^2$.

De waarde van 2 is dus het laagst en zal gebruikt worden in de berekening.

De waarde van $\rho_{p,eff}$ = 14,1/1610 = 0, 01.

Factor alpha = 30000/650=46,15.

In deze formule is $\sigma_{gl}$ de getalswaarde van de grootst berekende spanning in de wapening.

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Sigma = (0,224*$10^6$)/((1/6)*150*150*150)= 0,4 N/$mm^2$. 150*150*0,4 = 8960 Newton. Wanneer alle spanning in de doorsnede wordt opgenomen door de glasvezelstaven levert dit een spanning $\sigma_{gl}$ gelijk aan: 8960/(2*pi*1,5*1,5) = 633,8 N/$mm^2$.

In de formule voor scheurwijdte is $s_{r,max}$ gelijk aan de maximale radiale afstand tussen perimeters van de dwarskrachtwapening. Gezien het feit dat er geen specifieke dwarskrachtwapening aanwezig is in de proefstukken heb ik ervoor gekozen om voor $s_{r,max}$ de radiale afstand tussen de aanwezige langswapeningsstaven te nemen. Het schuimbeton is in beperkte mate in staat om de dwarskrachten op te nemen. Het is in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap gebleken dat de proefstukken op dwarskracht zijn bezweken. Echter zijn de proefstukken op een hogere belasting bezweken dan de dwarskrachtcapaciteit van het schuimbeton.

De waarde van $s_{r,max}$ is maximaal:

$$\frac{\sigma_{glr} * \emptyset_{gl}}{3{,}6 * \xi_{gl} * f_{ctm}}$$

$\emptyset_{gl}$ is de diameter van de glasvezelstaven. Deze is gelijk aan 3 mm.

$\xi_{gl}$ is de factor van de hechting tussen beton en het glasvezel. De firma Schöck geeft aan voor COMBAR glasvezelwapening een factor van 1,2 te kunnen realiseren. Dit is dus 0,2 hoger dan gemiddeld. De glasvezelstaven die ik heb kunnen verkrijgen waren echter niet geribd, daarom is er gekozen voor een waarde van 1,0 als schatting voor deze proefopstelling.

De waarde van $f_{ctm}$ is al eerder besproken en is gelijk aan 0,15 N/$mm^2$.

De waarde van $\sigma_{glr}$ is de getalswaarde van de grootste berekende trekspanning in de glasvezestaven in de buigtrekzone. Die waarde is hierboven berekend: 633,8 N/$mm^2$.

Met de bekende waarden levert dit voor $\varepsilon_{glm}$-$\varepsilon_{cm}$ = 0,021.

0,6 * 633,8/30000=0,013. Er wordt dus aan de eis voldaan.

De maximale waarde van $s_{r,max}$ is met de berekende formule gelijk aan 3521,1 mm. De waarde van $s_{r,max}$ is gelijk aan 150-2*20-2*3=104mm. Deze lengte valt dus binnen de maximale waarde.

Hiermee komt de waarde van $w_k$ op 2,2 mm. De scheurwijdte zal dus naar alle waarschijnlijkheid worden overschreden.

**Scheurwijdte staven 4 mm**

Voor de staven van 4 mm worden uiteraard dezelfde formules gebruikt.

$\sigma = M/W = (0{,}27*10^6)/((1/6)*150*150*150) = 0{,}48$ N/mm$^2$.

De totale kracht in de doorsnede komt hiermee op:

150*150*0,48=10880 N.

$\sigma_{gl}$= 10880/(2*pi*2*2) = 432,9 N/mm$^2$.

Ook bij staven met een diameter van 4 mm is $k_t$ gelijk aan 0,4 en de waarde van $f_{ct,eff}$ = 0,15 N/mm$^2$. Ook de waarde van $\alpha_{gl}$ is nog gelijk.

De betondrukzone is gelijk aan 209,4 mm, bij de berekening van $A_{c,eff}$ worden alleen vergelijking 1 en 3 uitgewerkt. Formule 2 leidt tot een negatieve oppervlakte (niet mogelijk).

Het resultaat: 1 = 8250 mm$^2$ en 3 = 11250 mm$^2$. $A_{c,eff}$ is gelijk aan 8250 mm$^2$.

$\rho_{p,eff}$ = 25,13/8250=0,003

Met de nieuwe waardes leidt dit tot: $\varepsilon_{glm}$-$\varepsilon_{cm}$ = 0,014

0,6*432,9/30000=0,009. De waarde van $\varepsilon_{glm}$-$\varepsilon_{cm}$ is dus voldoende groot omdat het groter is dan 0,009.

Voor $s_{r,max}$ mag geen grotere waarde dan (432,9*4)/(3,6*1*0,15) = 3206,1 mm worden genomen. Hierin is 432,9 gelijk aan $\sigma_{gl} = \sigma_{glr}$.

De waarde van $s_{r,max}$ die gebruikt wordt is gelijk aan: 150-2*20-2*4=102 mm.

De waarde van de scheurwijdte $w_k$ wordt hiermee: 102*0,014 = 1,4 mm.

# Bijlage 9: Vervaardigen proefstukken

De proefstukken werden vervaardigd te Zeist. Op projectlocatie (Weeshuislaan nabij de rotonde Markt/Voorheuvel) werd door Betonpompbedrijf Nijwa BV een tunnelbak gestort met schuimbeton.

Ontwerp mengsel.

In dit onderzoek waren er helaas geen mogelijkheden om zelf een betonmengsel samen te stellen. Er is daarom gekozen voor de schuimbetonklasse SB 500 die werd gebruikt op de projectlocatie.

De samenstelling van SB 500 schuimbeton wordt bepaald door de bestanddelen cement, water en schuimmiddel.

Voor de basismortel die bestaat uit water en cement wordt de volgende samenstelling toegepast.

Cement 1285 kg/$m^3$. De hoeveelheid water bedraagt 550 kg/$m^3$.

Naast de basismortel wordt er schuim toegepast in het schuimbeton SB500. Per kubieke meter schuimbeton bestaat 717 liter uit schuim en 282 liter uit de basismortel.

Dit maakt dat voor één kubieke meter schuimbeton SB500, 362 kg cement, 155 liter water en 32 kg schuim benodigd is.

Het schuimbeton werd op locatie geproduceerd in een mixinstallatie. In de mixinstallatie wordt door middel van een controlepaneel de klasse schuimbeton bepaald en op locatie gemixt waarna het verwerkt kan worden.




Figuur 4: Schuimbeton menginstallatie[27]

Om het schuimbeton te kunnen storten was er een mal benodigd. Deze mal is vervaardigd te Harreveld op 10 oktober 2016.

Er werd een grote mal vervaardigd waarin de 5 liggers van 0,70*0,15*0,15 m kunnen worden gegoten. Over de mal is een schoor geplaatst, deze schoor is er overheen gezet om de het mogelijke uitbollen van de mal ten gevolge van de kracht die het schuimbeton op de wand van de mal zet te beperken. Hieronder is de mal afgebeeld.

[27] Nijwa BV



Figuur 5: Mal proefstukken

Van de 5 mallen die werden gemaakt was er een bestemd als blanco proef. Hierin werd geen wapening gelegd.

De wapening die werd gebruikt bestond uit glasvezelstaven met een diameter van 3 mm en glasvezelstaven met een diameter van 4 mm. Er is voor een proefopstelling gekozen waarbij er in elke ligger twee wapeningsstaven zijn toegepast.

De glasvezelstaven hebben een vezelvolumegehalte van 65%. Het type weefsel in de glasvezelstaven is volledig uni-directioneel. De staven met een diameter van 3 mm hebben een gewicht van 14 gram per meter. De staven met een diameter van 4 mm hebben een gewicht van 25 gram per meter.

De staven werden verkregen bij Ceemo Engineering BV, Industrieweg 32-03 te Maarssen. De staven werden na ontvangst te Maarssen in stukken van 690 mm gezaagd. Door de lengte van de staven 1 centimeter korter te nemen dan de lengte van de liggers waren de staven gemakkelijker te verwerken in de bekisting.

Net als in het BSc Eindwerk van de heer Ronteltap werden de mallen conform de CUR-aanbeveling 59:2012 gemaakt. Dit houdt in dat er een dekking van 20 mm werd toegepast. Evenals de randafstand van 20 mm.

Om de afstand tussen de wapeningsstaven (parallel) op 150-2*20-2*staafdiameter te houden heb ik de staven met elkaar verbonden door middel van ijzerdraad. Het ijzerdraad heeft een diameter van 1 mm. Dit ijzerdraad is tevens gebruikt om de wapening in de mallen te hangen zodat de dekking aan de onderzijde (20 mm) werd gegarandeerd. Er bestond namelijk een kans dat de wapening, ook bij zorgvuldig storten, in het schuimbeton zou wegzakken.

Het resultaat van de mal met de wapeningsstaven is hieronder afgebeeld.



Figuur 6: Mal voorzien van wapening

De mal werd vervolgens zorgvuldig gevuld met schuimbeton SB500 op de stortlocatie te Zeist. Een afbeelding van het resultaat is hieronder weergegeven.



Figuur 7: Gestorte mal direct na het storten op locatie te Zeist

Voordat de mal gevuld met beton weer naar Delft gebracht kon worden heeft deze eerst 2 dagen op de projectlocatie uitgehard. Op 14 oktober is de mal te Zeist opgehaald.

Op 18 oktober jongstleden heeft de ontkisting plaatsgevonden. Dit vond plaats in het Stevinlab III van de TU Delft.

De ontkisting van de proefstukken ging niet geheel zonder opstakels. Doordat de mal met spijkers in elkaar was gezet is er voor gekozen om met een beitel de ruimte om de spijkers los te hakken waardoor de spijkers er uit getrokken konden worden met een nijptang.

Doordat het materiaal nog te bros was is er voor gekozen om niet meer dan de buitenste randen er af te halen. De blanco proef heeft bij een poging om deze er al vast uit te halen helaas schade opgelopen. In een van de uiteinden trad een breuk op.

De ontkisting van de mal is in onderstaande afbeeldingen te zien.



Figuur 8: Mal na 6 dagen, schoor is al verwijderd

Als eerst is de schoor verwijderd. Daarna zijn de ijzerdraden doorgeknipt zodat de wapening geheel lost is gekomen van de bekisting.



Figuur 9: Proefstukken na ontkisting

Bij de ontkisting is balk nummer 1 gebroken aan het uiteinde. Omdat de stevigheid van de balken nog wat te wensen over liet is er voor gekozen om tot de beproeving die plaats vond na 14 dagen de balken op deze manier op te slaan.  De balken voorzien van een 3 bevatten wapening met een diameter van 3 mm. De balken voorzien van een 4 bevatten wapening met een diameter van 4 mm.

De beproeving vond plaats op 26 oktober 2016. De proefstukken werden hiertoe verder ontkist. Op de onderstaande afbeelding kan men waarnemen dat de kleur van het schuimbeton lichter is geworden. Dit komt door de uitharding en de verdamping van het water.



Figuur 10: Proefstukken voor de laatste fase van ontkisting (na 14 dagen)

Ondanks dat de proefstukken niet geheel ontkist konden worden na 6 dagen is de uitharding redelijk gelijkmatig verlopen. Er waren geen duidelijk vochtigere plekken aanwezig in het schuimbeton. Zie onderstaande afbeelding. Uiteraard zit deze doorsnede niet midden in het proefstuk en kan de samenstelling daar mogelijk afwijken.



Figuur 11: Zijaanzicht proefstukken van 14 dagen oud

# Bijlage 10: Beschrijving beproeving van de proefstukken

De beproeving van de liggers vond plaats op 26 oktober 2016 in het Stevinlab van de TU Delft. De uitvoering was gelijk aan die van de heer Ronteltap.

Tussen de opleggingen werd 600 mm afstand gehouden. De proefopstelling is op 25 oktober 2016 op de juiste wijze afgesteld door de heer K. Mouthaan van de TU Delft.

Daartoe werd een houten ligger beproefd tot een last van 4 kN. Er werd voor een last van 4 kN gekozen omdat de verwachtingswaarden voor de schuimbeton liggers niet groter waren dan 3 kN met daarbij een veiligheidsfactor.

De liggers werden belast door middel van een verplaatsings gestuurde buigproef.

De belasting van de ongewapende ligger werd met 0,01 mm/s gedaan. Dit omdat de verwachting is (ondersteund door de berekeningen) dat de ligger zonder wapening in een veel eerder stadium zal bezwijken.

Als eerst werd het blanco proefstuk, de ligger zonder wapening, beproefd. Op de onderstaande afbeelding is het proefstuk voor aanvang van de beproeving te zien.



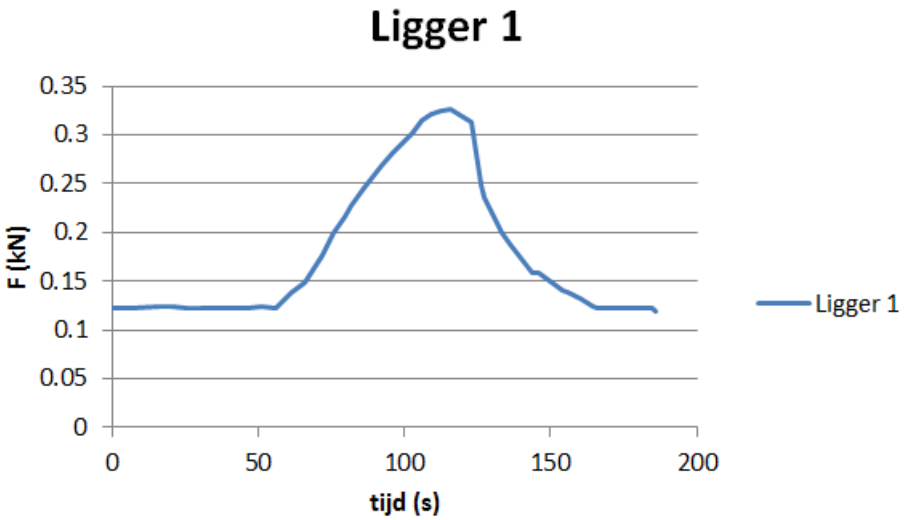
Figuur 12: Proefopstelling met ongewapende ligger



Figuur 13: Scheurvorming in ligger 1

Aan scheurpatroon in het midden van de balk valt af te leiden dat de ligger op buiging is bezweken. De bezwijklast bedroeg 0,33 kN. De scheurwijdte was op dat moment gelijk aan 0,8 mm. In de bovenstaande afbeelding is de ligger afgebeeld met de scheur enkele seconden voordat de ligger bezweek.

Het krachtsverloop over de tijd is hieronder afgebeeld.




Figuur 14: Ligger 1, kracht uitgezet over de tijd

Nadat het blanco proefstuk aan beproeving was onderworpen werden de proefstukken met glasvezelwapening beproefd. De verplaatsingssnelheid van de vijzel was 0,05 mm/s. Al deze proefstukken bezweken op buiging. De liggers vertoonden een scheur in het midden van de ligger en deze ontwikkelde zich naar het punt waar de belasting aangreep. Daarna nam de scheur verder toe.

Ligger 2 was voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 3 mm en bezweek op buiging.



Figuur 15: Ligger 2, scheurvorming



Figuur 16: Ligger 2, bezweken

Ligger 3 was voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 3 mm en bezweek op buiging.



Figuur 17: Ligger 3, scheurvorming



Figuur 18: Ligger 3, bezweken

Ligger 4 was voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 4 mm en bezweek op buiging.



Figuur 19: Ligger 4, scheurvorming



Figuur 20: Ligger 4, bezweken

Ligger 5 was voorzien van 2 wapeningsstaven met een diameter van 4 mm en bezweek op buiging.



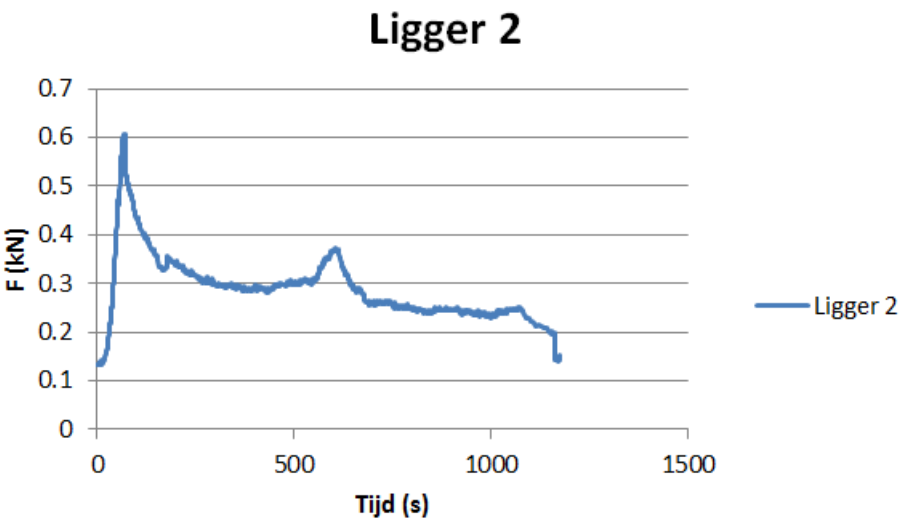
Figuur 21: Ligger 5, scheur gevormd over bijna de gehele liggerdoorsnede



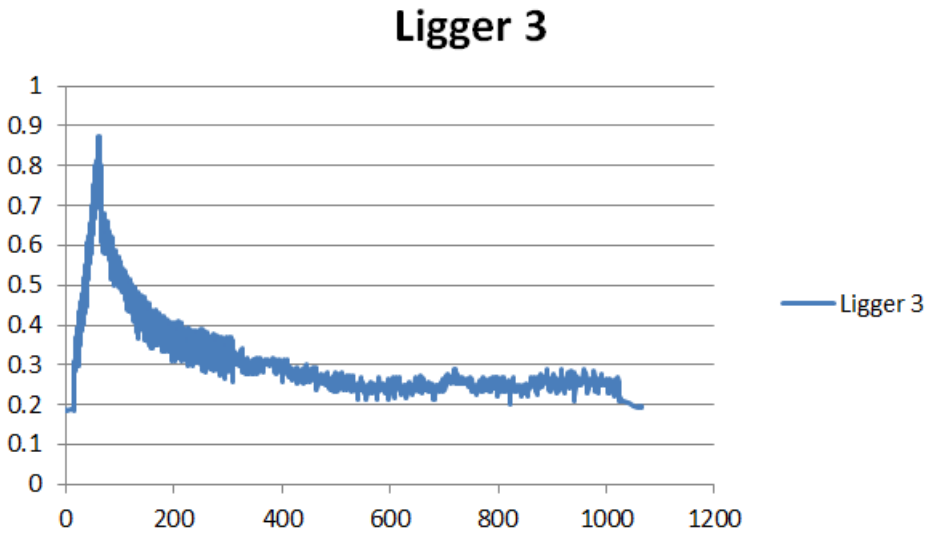
Figuur 22: Ligger 5, bezweken

**Resultaten**

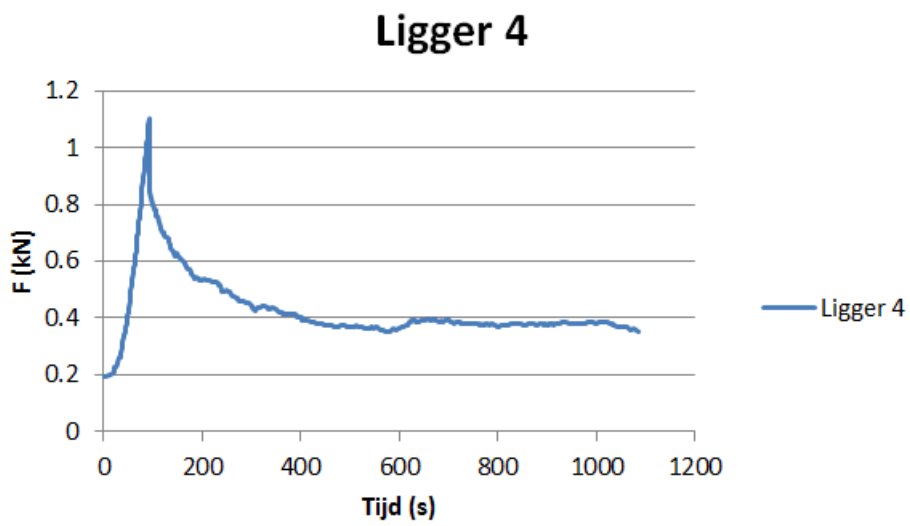
Hieronder zijn de grafieken van de gewapende proefstukken afgebeeld. De kracht is hier uitgezet over de tijd.



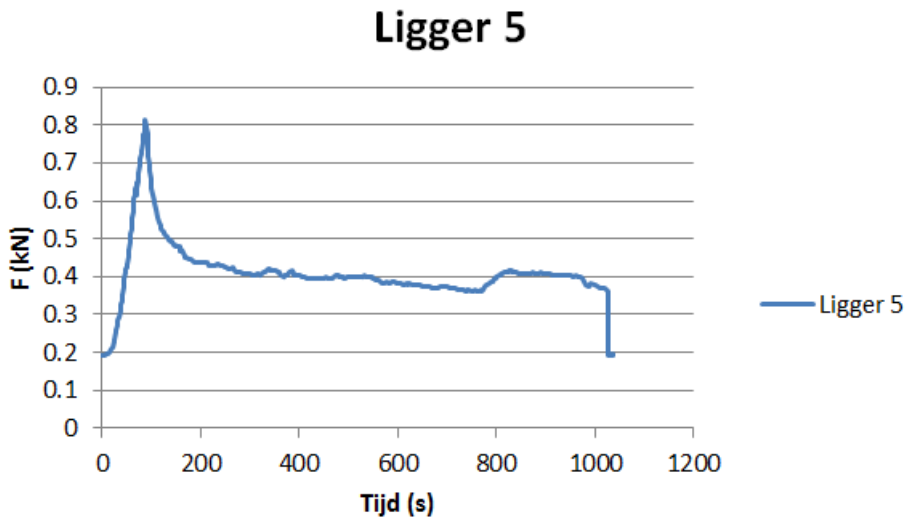

Figuur 23: Ligger 2, kracht uitgezet over de tijd




Figuur 24: Ligger 3, kracht uitgezet over de tijd




Figuur 25: Ligger 4, kracht uitgezet over de tijd




Figuur 26: Ligger 5, kracht uitgezet over de tijd

Zoals op de grafieken is afgebeeld is ligger 2 bezweken bij een belasting van 0,61 kN, ligger 3 bezweken bij een belasting van 0,87 kN, ligger 4 bezweken bij een belasting van 1,09 kN en ligger 5 bezweken bij een belasting van 0,81 kN.

# Bijlage 11: Berekening aanhechtspanning glasvezelwapening

**Berekening aanhechtingsspanning**

De firma Schöck Nederland geeft aan dat de berekening van de aanhechtspanning op dezelfde wijze kan geschieden als de berekening voor normaal betonstaal. De Eurocode 2 zal dus gevolgd worden.

Om de aanhechtspanning te berekenen wordt de volgende formule gebruikt:

$\tau_{gl} = N_{gl} / (l_t * Ø * m * pi)$

m = het aantal staven

Ø = de staafdiameter

$N_{gl}$ = de totale spanning in de glasvezelstaven

De waarde van $N_{gl} = \sigma_{gl} * A_s$

Hierin is:

$$\sigma_{gl} = \frac{M}{\rho_{gl} * b * d * (d - \frac{7}{18} * x_u)}$$

b = 150 mm

d = 128,5 mm (staven met een diameter van 3 mm)

d = 128,0 mm (staven met een diameter van 4 mm)

Voor de waarden van $l_t$ zijn de proefstukken opgemeten.

De waarden van het moment M worden bepaald met de bezwijklasten en de bekende q voor het eigen gewicht. $M = (1/8)*q*l^2 + (1/4)*F*l$, q = 0,12 kN/m.

Voor de waarden uit het artikel 'Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton' volgt dan:

| Proefstuk | $l_t$ [mm] | Ø [mm] | F [kN] | M [kNm] | m | $X_u$ [mm] | $\sigma_{gl}$ [N/mm$^2$] | $N_{gl}$ [N] | $\tau_{gl}$ [N/mm$^2$] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ligger 2 | 340 | 3 | 0,61 | 0,11 | 2 | 43,8 | 72,7 | 1027,8 | 0,16 |
| Ligger 3 | 340 | 3 | 0,87 | 0,16 | 2 | 43,8 | 101,8 | 1439,2 | 0,22 |
| Ligger 4 | 316 | 4 | 1,09 | 0,20 | 2 | 53,8 | 74,1 | 1862,3 | 0,23 |
| Ligger 5 | 327 | 4 | 0,81 | 0,15 | 2 | 53,8 | 55,8 | 1402,4 | 0,17 |

Tabel 22: Aanhechtspanning inclusief de benodigde variabelen

De waarde die volgens de Eurocode wordt aangehouden is gelijk aan $\tau_{gl} = 2*f_{ctm} = 2*0,15 = 0.3$ N/mm$^2$. De aanhechtspanning zal dus worden onderschreden. De lagere aanhechtspanning kan verklaard worden door de kleine diameter van de wapening en de kracht in de wapeningsstaven van maximaal 1,09 kN.

**Resultaten op basis van BLR0513**

Uit de BLR0513 volgt:

$N_{gl} = (M/W)*b*h$

$W= 1/6*b*h^2$

Met de bekende waarden uit de bovenstaande tabel volgt dan de aanhechtspanning met de bovenstaande formule.

| Proefstuk | $N_{gl}$ [N] | $\tau_{gl}$ [N/mm$^2$] |
|---|---|---|
| Ligger 2 | 4400 | 0,69 |
| Ligger 3 | 6400 | 1,00 |
| Ligger 4 | 8000 | 1,00 |
| Ligger 5 | 6000 | 0,73 |

**Tabel 23: Aanhechtspanning en $N_{gl}$**

Volgens de BLR0513 wordt de aanhechtspanning dus overschreden. De aanhechtspanning waar bij beton vanuit wordt gegaan: $\tau_{gl} = 2*f_{ctm} =2*0,15 = 0.3$ N/mm$^2$ wordt dus overschreden. Dit is aannemelijk gezien de lange aanhechtlengte.