

Nieuwe oplossing voor duurzame constructies

Glasvezelstaven voor toepassing als wapening in beton

ir. G.J. van Tol, Schöck Nederland

Wapening in beton wordt standaard vervaardigd uit betonstaal of voorspanstaal. In normen is nauwkeurig vastgelegd hoe moet worden geconstrueerd met deze materialen. Maar soms is de aanwezigheid van staal in beton ongewenst of is de alkalische bescherming van het beton niet voldoende duurzaam. In deze constructies is de toepassing van wapening met glasvezelstaven een goed alternatief.

1 | Voorbeelden van glasvezelwapening



2 | Brugrand te Ontario, Canada



3 | Waterkering in Blackpool, Engeland

Toepassing

Glasvezelstaven zijn bundels van glasvezels, omhuld met epoxyhars (GFRP=glass fibre reinforced polymer) die worden voorzien van een ruw oppervlak, bijvoorbeeld door zandkorrels of een aangebrachte profilering. Een van de voordelen van glasvezelstaven is dat het niet corrodeert. Dit biedt uitkomst bij:

- maritieme toepassingen;
- constructies die in aanraking komen met dooizouten;
- toepassingen met agressieve omgevingen;
- betonelementen met een zeer geringe dekking.

Glasvezelwapening kan ook worden toegepast als staal ongewenst is. Bijvoorbeeld:

- als wapening niet elektrisch geleidend mag zijn;
- situaties met zwerfstroom (spoorlijnen);
- constructies waar magnetische wapening ongewenst is (ziekenhuizen, laboratoria, elektrische generatoren etc.);
- constructies waar staalwapening signalen stoort (detectielussen etc.);
- constructies waarin eenvoudig door gewapend beton geboord moet kunnen worden (boortunnel);
- constructies waar de warmtegeleiding van staalwapening ongewenst is (hollewandsysteem met isolatie tussen de schillen).





De eerste onderzoeken naar glasvezelstaven als wapening in beton werden uitgevoerd in de Verenigde Staten in de zestiger jaren. De eerste grootschalige toepassing in Nederland vond plaats bij de bouw van de Noord-Zuidlijn in Amsterdam (2003). Hierbij is het gedeelte van de diepwand waar de tunnelboormachine (TBM) doorheen boort met glasvezelstaven gewapend. Hierdoor wordt het vastlopen of overmatige slijtage van de boorkop voorkomen. Enkele andere toepassingen in Nederland: Randstadrail, tramtracé (voorkomen storing signalen), trekanker onder spoorbaan (duurzaam i.v.m. zwerfstromen), fundatie onderzoeklaboratorium (niet-magnetisch).

Materiaaleigenschappen

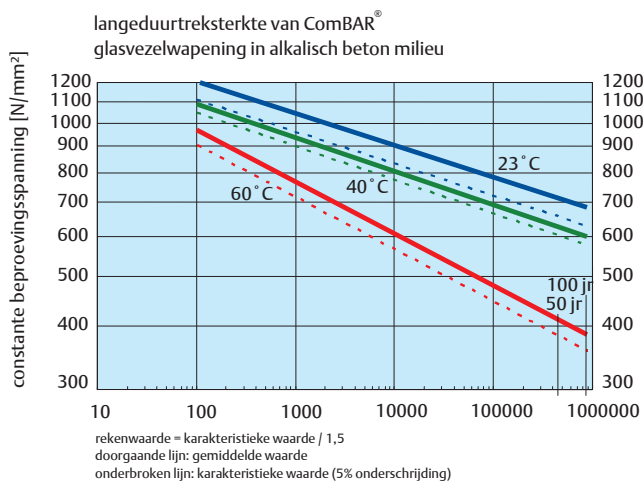
De eigenschappen van glasvezelstaven worden bepaald door de toegepaste materialen (glasvezels, epoxyharsen) en door de wijze van productie. Het percentage glasvezels in de doorsnede bepaalt de E-modulus en de sterkte van de staaf. Het toegepaste glas is meestal van het type ECR-glas (E-Glass Corrosion Resistant). Deze glassoort is namelijk zeer resistent tegen corrosie in alkalische milieus. Toepassing van standaard E-glas in beton leidt tot een snelle afname van de sterkte en is daarom niet duurzaam.

De toegepaste epoxyhars is bepalend voor de karakteristiek van de krachtoverdracht van de wapening op het beton, en voor de veroudering van de staven. De receptuur verschilt per producent. Vaak bestaat de basis uit vinyl-esters. Hiermee wordt een chemisch bestendig product verkregen, dat ook in agressieve milieus een duurzaam gedrag vertoont. De variatie in productiemethoden en materiaaleigenschappen heeft als gevolg dat de producteigenschappen per producent verschillend zijn. Hierdoor is ook de engineering van gewapend-betonconstructies productgebonden. De eigenschappen die hieronder worden beschreven (treksterkte, elasticiteitsmodulus, aanhechtingsgedrag, verankeringslengte, vermoeingsgedrag en sterkte bij brand) zijn dus indicatief.

Treksterkte

Bij de treksterkte moet onderscheid worden gemaakt tussen korte- en langduurtreksterkte. De kortduurtreksterkte wordt bepaald met trekproeven. De gemiddelde waarden variëren van ± 600 tot ± 1600 N/mm². De langduurtreksterkte wordt bepaald met versnelde verouderingsproeven. Onder invloed van temperatuur en spanning neemt de treksterkte van de glasvezelstaven af. Dit is een voorspelbaar gedrag dat in de

4 | Randstadrail, Voorburg



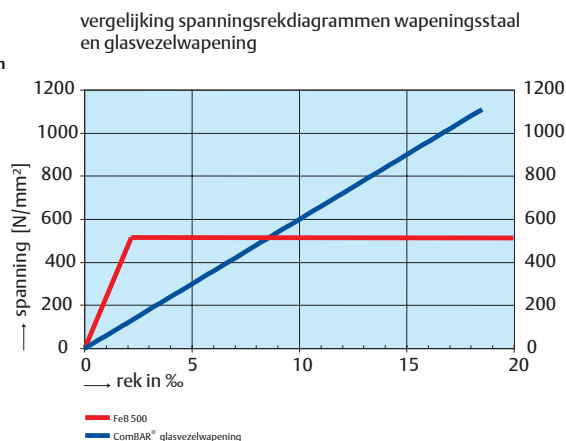
5 | Langeduurtreksterkte
glasvezelwapening

kunststofindustrie goed gedefinieerd is. Omdat de veroudering een logaritmisch karakter heeft, is het mogelijk om met testen bij een verhoogde temperatuur na een belasting van 5000 uur vast te stellen wat de langeduurtreksterkte voor een periode van 50 of 100 jaar is. Deze waarde geeft aan welke spanning constant aanwezig mag zijn gedurende de referentieperiode met inachtneming van de in het Bouwbesluit voorgeschreven betrouwbaarheidsindex. De waarde kan variëren van 200 tot 500 N/mm².

Elasticiteitsmodulus

De elasticiteitsmodulus van glasvezelstaven varieert van ± 35 000 N/mm² tot ± 60 000 N/mm². Deze waarde is aanzienlijk lager dan die van wapeningsstaal. Dit is vooral belangrijk bij het berekenen van de vervormingen en van de scheurwijdte van betonconstructies. In tegenstelling tot wapeningsstaal is de elasticiteitsmodulus van glasvezelstaven lineair tot aan breuk en kent het materiaal geen vloeitraject. Door de grotere treksterkte en de kleinere E-modulus is de rek bij breuk aanzienlijk, ± 1,5 tot ± 2,5%. Hierdoor zal de scheurwijdte bij bezwijken normaliter groter dan 2,5 mm zijn en zal een excessieve doorbuiging optreden. Dit gedrag waarborgt de gewenste ductiliteit, zodat eventueel bezwijken tijdig wordt aangekondigd.

6 | E-modulus
lineair elastisch



Aanhechtingsgedrag

Voor het goed functioneren van wapening is het aanhechtingsgedrag van wapening cruciaal. De scheurwijdte wordt hierdoor sterk beïnvloed. De verankering lengte van de staven wordt vergeleken met de aanhechtspanning van wapeningsstaal FeB 500, met een voorgeschreven profilering. De gevonden waarden voor de aanhechtingsfactor ξ variëren van 0,6 tot 1,0 (beproeving volgens methode van Janovic). Indien de aanhechting gelijk is aan geribd staal geldt $\xi=1$.

Verankeringslengte

De benodigde verankeringslengte van glasvezelstaven wordt vergeleken met de benodigde verankeringslengte van wapeningsstaal FeB 500, met een voorgeschreven profilering. De gevonden waarden voor de k_{an} (verhoudingsfactor) variëren van 1,0 tot 1,60 (beproeving volgens CUR-rapport 23). Indien de aanhechting gelijk is aan geribd staal geldt $k_{an} = 1$.

Vermoeiingsgedrag

Bij overwegend statisch belaste constructies (gelijk aan het toepassingsgebied van NEN 6720) ontstaan geen problemen door vermoeiing van glasvezelwapening. Uit proeven blijkt dat de prestaties die worden gevraagd van wapeningsstaal, ook geleverd kunnen worden door glasvezelwapening. Bij dynamisch belaste constructies moet de nodige voorzichtigheid in acht worden genomen en is meer specifiek onderzoek gewenst.

Sterkte bij brand

Sterkte van een betonconstructie bij brand wordt bij toepassing van glasvezelstaven bepaald door twee aspecten: de sterkte van de staaf en de aanhechting van de staaf aan het beton. De sterkte van de staaf wordt bepaald door de sterkte van de glasvezels. De aanhechting wordt bepaald door de eigenschappen van de epoxyhars. Uit proeven blijkt dat bij een verhoogde dekking en een vergrote verankeringslengte een brandwerendheid van 90 minuten realiseerbaar is. De controle kan plaatsvinden volgens NEN 6071, waarbij voor de eigenschappen van de wapening aangepaste parameters gebuikt moeten worden (productafhankelijk).

Toepassing

Rechte glasvezelstaven worden gemaakt door middel van pulltrusie, waarbij een bundel met glasvezels door een impregnatiebad van epoxyhars met een rondvormige sjabloon wordt getrokken. Hierna wordt de profilering of opruwing van de staaf aangebracht. Het plastisch buigen van glasvezelstaven na vervaardiging is niet mogelijk. Het maken van gebogen staven kan alleen fabrieksmatig. De vormen worden in een speciale mal gemaakt. Hierbij is de dichtheid van de vezels lager en ontstaat dus een minder sterke staaf. Een sterke kromming heeft ook negatieve invloed op de



sterkte. De productie van gebogen staven is een intensief proces. Indien dwarskrachtwapening noodzakelijk is, is een alternatief voor beugels of opgebogen wapening voorhanden door gebruik te maken van staven met een eindverankering in de vorm van een deuvelkop (dwarskrachtdeuvels). Hiermee kan men de dwarskrachtwapening in de knopen van de constructie verankeren. De productiewijze van deze dwarskrachtdeuvels is veel economischer dan die van gebogen staven.

Verwerking

Het verwerken van glasvezelstaven tot een wapeningsnet of -korf is mogelijk met binddraad, kunststof tie-rips of met speciale kunststof clips. Afkorten van staven kan eenvoudig door zagen. Voor het stellen van de wapening zijn kunststof afstandhouders beschikbaar. Voordeel van de verwerking van glasvezelstaven is het geringe eigengewicht ($\pm 2200 \text{ kg/m}^3$)

Normen en certificering

Internationaal is er een aantal landen waar de toepassing van glasvezelstaven is gereguleerd: In Canada (CSA 2002) en Japan (JSCE 1997b) zijn er normen, in de USA is er een richtlijn (ACI440). Toepassing van deze normen in Nederland is lastig, omdat er geen aansluiting is op de overige Nederlandse normen. In Nederland is op dit moment alleen toepassing op basis van gelijkwaardigheid mogelijk. Omdat dit vrij omslachtig werkt, wordt er gewerkt aan een beoordelingsrichtlijn (BRL). Hiermee wordt het voor producenten mogelijk om een KOMO®-attest-met-productcertificaat voor hun product te verkrijgen. In dit document zullen dan de eigenschappen van het product vastliggen (inclusief kwaliteitscontrole).

Dimensioneren met glasvezelwapening

7 | Geïsoleerde koppeling van sandwichwanden

Het dimensioneren van een betonconstructie gewapend met glasvezelwapening gaat grotendeels volgens dezelfde procedures als bij normaal wapeningsstaal. Er zijn echter twee belangrijke verschillen:

1. Glasvezelwapening kent geen vloeitraject: er is een lineair verloop tussen spanning en vervorming tot aan breuk. De normale rekenmethodieken voor betonstaal gaan uit van de rekenwaarde van de staalspanning en van het standaard stuikdiagram van beton. Door het ontbreken van het vloeitraject bij glasvezelwapening ligt de vervorming voor de hele doorsnede vast bij het berekenen van de rekenwaarde van de treksterkte van de wapening. Pas bij hogere wapeningsfracties treedt stuik van het beton op.
2. Glasvezelwapening heeft een beduidend lagere E-modulus dan staalwapening. Hierdoor zijn de scheurwijdten in een constructie met gelijke hoeveelheid wapening aanzienlijk groter. Omdat glasvezelwapening niet corrodeert is dit voor de duurzaamheid geen probleem. Praktisch gezien is een beperking van de maximale scheurwijdte tot 0,5 mm meestal gewenst. Bij de bepaling van de benodigde wapening is de scheurwijdte veelal bepalend. Ook bij toepassing van glasvezelstaven als dwarskracht, torsie of ophangwapening is een beperking van de spanning in verband met scheurwijdtebeperking wenselijk.

8 | Doorboren betonwand Amsterdam CS

Buiging en/of normaalkracht

De spanningen in de betondoorsnede worden bepaald conform NEN 6720: 8.1. Bij de bepaling van de momentencapaciteit M_u zal bij kleine normaalkrachten en/of wapeningsfracties geen volledig stuikdiagram ontstaan. De rek van de wapening bij de rekenwaarde van de treksterkte (f_{gl}/E_{gl}) bepaalt de spanningsdoorsnede. Bij minder lage wapeningsfracties ontstaat een diagram met gedeeltelijke stuik, totdat het volledige stuikdiagram wordt bereikt. In doorsneden zonder normaalkracht ontstaat deze volledige stuik bij de wapeningsfractie.

$$\rho_{gl, bu} = E_{gl} f_b \frac{2 \epsilon'_{bu} \epsilon'_{bpl} - \epsilon'_{bpl}{}^2}{f_{gl}{}^2 \epsilon'_{bu} + E_{gl} f_{gl} \epsilon'_{bu}{}^2} \quad (1)$$

Bij hogere wapeningsfracties kan bij de bepaling van de M_u niet meer de volledige rekenwaarde van de trekspanning worden aangehouden, omdat dan de rek van de staaf onvoldoende is.

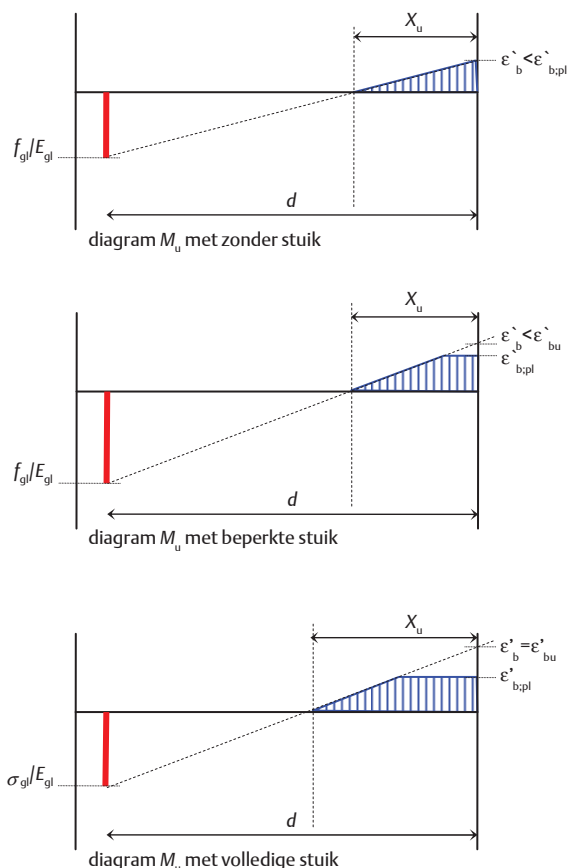
De bepaling van de hoogte van de betondrukzone met bijhorende momentencapaciteit M_u kan bij wapeningsfracties tot $\rho_{gl, bu}$ (A_{gl}/bd) worden bepaald met de formules:

$$x_u = d \frac{2 \rho_{gl} f_{gl}{}^2 + E_{gl} f_b \epsilon'_{bpl}}{2 f_{gl} f_b + E_{gl} f_b \epsilon'_{bpl}} \quad (2) \text{ en}$$

$$M_u = \rho_{gl} b d f_{gl} (d - 7/18 x_u) \quad (3)$$

9 | M_u spanningdiagrammen

bij verschillende wapeningsfracties



Bij een wapeningsfractie hoger dan $\rho_{gl, bu}$ kan de bepaling van de hoogte van de betondrukzone met bijhorende momentencapaciteit M_u worden vastgesteld met de formules:

$$x_u = d \frac{\sqrt{E_{gl}^2 \rho_{gl}^2 + 857 f_b E_{gl} \rho_{gl}} - E_{gl} \rho_{gl}}{428,5 f_b} \quad (4)$$

$$M_u = 3/4 x_u b f_b (d - 7/18 x_u) \quad (5)$$

Bij hogere wapeningsfracties neemt de effectiviteit toe indien een hogere betonsterkteklasse wordt toegepast.

De minimum toe te passen wapening moet het scheurmoment en/of de scheurkracht op kunnen nemen om brosse breuk te voorkomen, en kan worden bepaald volgens NEN 6720: 9.9.2.1.

Bij het bereiken van het volledige stuikdigram bij $\rho_{gl, bu}$ wordt de sterkte van de betondrukzone maatgevend, waarmee de kans op brosse bezwijken ontstaat. Dit is volgens NEN 6720: 8.1.3 niet gewenst. Het toepassen van drukwapening heeft nauwelijks effect omdat de E-modulus van glasvezelwapening en van beton te dicht bij elkaar liggen. Om toch het gewenste veilig-

heidsniveau te halen moet de momentencapaciteit bij een wapeningshoeveelheid boven 70% van $\rho_{gl, bu}$ worden gereduceerd tot 80% van de berekende capaciteit (analoog aan NEN 6720: 9.9.2.1). De waarde hoeft uiteraard niet kleiner te zijn dan de capaciteit bij een wapeningshoeveelheid van 70% van $\rho_{gl, bu}$.

Scheurvorming

Uitgangspunt van de toetsing van de scheurvorming is NEN 6720: 8.7. De materiaaleigenschappen worden verdisconteerd met de factoren ξ , $k_1 (= 0,0625 \cdot w_{max} \cdot E_{gl})$ (6), $k_2 (= 0,0125 \cdot w_{max} \cdot E_{gl})$ (7), $k_3 (= 1,00 \cdot w_{max} \cdot E_{gl})$ (8). Hierin is w_{max} de maximaal toegestane scheurwijdte.

Dwarskracht, pons en wringing

NEN 6720: 8.2. t.m. 8.5 worden gebruikt voor de toetsing van de dwarskracht-, pons- en wringingscapaciteit. Ook hier moet het rekgedrag van de glasvezelstaven worden verdisconteerd. Bij de waarde voor τ_1 gebeurt dit door het aan te houden wapeningspercentage te vermenigvuldigen met de factor $E_{gl} / 200\ 000$ N/mm². De door de wapening opneembare schuifspanning is beperkt. Om op het betonaandeel te kunnen rekenen moet de rek in de glasvezelwapening worden beperkt. Tot nader onderzoek is uitgevoerd wordt de maximale rek in dwarskrachtwapening beperkt tot $435/200\ 000 = 0,00217$ (aansluitend op bestaande onderzoeken met staalwapening). De maximale spanning in de dwarskrachtwapening wordt hiermee $0,00217 E_{gl}$. Let op: bij beugels is vaak de E-modulus lager dan bij rechte staven.

Vervormingen

De stijfheid van een betonconstructie kan worden bepaald met NEN 6720: 8.6.2. De bepaling van de momenten M_e en M_{et} met bijhorende krommingen κ_e en κ_{et} moet geschieden met het spanning-rekdiagram van glasvezelstaven. Gebruik van artikel NEN 6720: 8.6.3. is niet mogelijk, omdat de bijhorende tabellen specifiek voor wapeningsstaal zijn vastgesteld.

Verankeringslengte

De verankeringslengte van glasvezelwapening wordt bepaald volgens artikel 9.6.2. De aanhechtingseigenschappen van een glasvezelstaaf worden in rekening gebracht door factor k_{an} die de verhouding in aanhechting geeft ten opzichte van een geribde wapeningsstaaf. Hiernaast geldt voor elk type glasvezelstaaf ook een maximaal in rekening te brengen waarde voor f'_b : $f'_{b, an, max}$ omdat bij hogere waarden de profilering van de staaf afschuift. In formule:

$$\alpha_1 = k_{an} \cdot 0,40 (1 - 0,1 \cdot c/\varnothing_{gl}) \leq k_{an} \cdot 0,24$$

Voorbeeldberekening

Ter verduidelijking een eenvoudige voorbeeldberekening van een ligger op twee steunpunten. De gebruikte afkortingen zijn conform NEN 6720.

Afmetingen van de constructie

$l_{rep} = 4500 \text{ mm}; h = 450 \text{ mm}; d = 390 \text{ mm}; b = 600 \text{ mm}; w_{max} = 0,4 \text{ mm}.$

Eigenschappen beton

C28/35; $f_b = 21 \text{ N/mm}^2; f_{brep} = 25,2 \text{ N/mm}^2;$
 $f_b = 1,4 \text{ N/mm}^2; f_{bm} = 2,74 \text{ N/mm}^2$

Eigenschappen glasvezelwapening

$f_{gl} = 445 \text{ N/mm}^2; E_{gl} = 60\,000 \text{ N/mm}^2; \xi_{gl} = 1,0; k_{an} = 1,0$

Belastingen

Permanent inclusief eigen gewicht: 52 kN/m
 Veranderlijk: 20 kN/m

Buiging, toetsing scheurvorming

Omdat bij glasvezelwapening de scheurvorming normaal maatgevend is, wordt hieraan het eerst gerekend.

$$M_{rep} = 0,125 (1,0 \cdot 52 + 1,0 \cdot 20) \cdot 4,52 = 182 \text{ kNm}$$

Gemiddeld scheurmoment volgens NEN 6720: 8.7.1:

$$1/6 b h^2 f_{bm} = 56 \text{ kNm}$$

Dus volledig ontwikkeld scheurenpatroon: toetsing volgens artikel NEN 6720: 8.7.2.

Eerste schatting van buigtrekwapening:

$$A_{gl} = 6 \cdot \emptyset 25 = 2945 \text{ mm}^2, \rightarrow \rho_{gl} = 0,0126$$

Uitgaande van diagram zonder volledige stuik

volgens NEN 6720, fig 75: $\epsilon'_{bpl} = 0,0021, \epsilon'_{bu} = 0,0035.$

Met (2):

$$x = 390 \frac{2 \cdot 0,0126 \cdot 445^2 + 60000 \cdot 25,2 \cdot 0,0021}{2 \cdot 445 \cdot 25,2 + 60000 \cdot 25,2 \cdot 0,0021} = 124 \text{ mm}$$

Met (3):

Toetsing volgens NEN 6720: 8.7.2a: (6):

$$\sigma_{gl} = \frac{182 \cdot 10^6}{0,0126 \cdot 600 \cdot 390 \cdot (390 - 7/18 \cdot 124)} = 181 \text{ N/mm}^2$$

$$k_1 = 0,0625 \cdot 0,4 \cdot 60000 = 1500 \text{ N/mm}$$

$$\emptyset_{gl} \leq \frac{1500 \cdot 1,0}{181} = 8,3 \text{ mm}$$

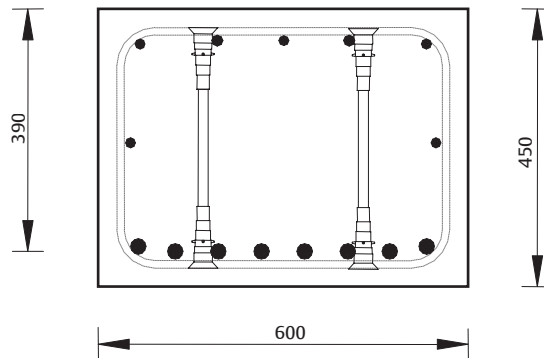
Toetsing volgens NEN 6720: 8.7.2b (7):

$$k_2 = 0,0125 \cdot 0,4 \cdot 60000 = 300 \text{ N/mm}$$

$$s_{gl} \leq 100 (300 \cdot 1,0 / 181 - 1,3) = 35,8 \text{ mm}$$

$$s_{gl} = b/6 = 100 \text{ mm}$$

dus voldoen beide niet.



Na iteratie:

$$A_{gl} = 8\emptyset 25 = 3927 \text{ mm}^2$$

$$\rho_{gl} = 0,0168$$

$$x = 150 \text{ mm}$$

$$\sigma_{gl} = 140 \text{ N/mm}^2$$

$$\emptyset_{gl} \leq 10,7 \text{ mm (voldoet niet) óf}$$

$$s_{gl} \leq 84,3 \text{ mm, dus voldoet}$$

Hiermee wordt voldaan aan de eis van $w_{max} = 0,4 \text{ mm}.$

Buiging, controle sterkte

$$M_d = 0,125 \cdot (1,2 \cdot 52 + 1,5 \cdot 20) \cdot 4,5^2 = 234 \text{ kNm}$$

Volgens (1) met $\epsilon'_{bpl} = 0,00175, \epsilon'_{bu} = 0,0035$

$$\rho_{gl:bu} = 60000 \cdot 21 \cdot \frac{2 \cdot 0,0035 \cdot 0,00175 - 0,00175^2}{445^2 \cdot 0,0035 + 60000 \cdot 445 \cdot 0,0035^2} = 0,0114 < 0,0168$$

Dus volledige stuik.

Volgens (4)

$$x_u = 390 \frac{\sqrt{60000^2 \cdot 0,0168^2 + 857 \cdot 21 \cdot 60000 \cdot 0,0168} - 60000 \cdot 0,0168}{428,5 \cdot 21} = 146 \text{ mm en (5)}$$

$$M_u = 0,8 \cdot 3/4 \cdot 146 \cdot 600 \cdot 21 \cdot (390 - 7/18 \cdot 146) = 368 \text{ kNm}$$

(inclusief extra veiligheid t.o.v. bezwijken betondrukzone) > 234 kNm, dus voldoet.

Dwarskracht, controle sterkte:

Voor het opnemen van de dwarskracht worden dwarskrachtdeuvels $\emptyset 16$ toegepast, $E_{gl:dd} = 60.000 \text{ N/mm}^2.$

Praktisch worden ook beugels $\emptyset 12$ toegepast. Omdat de E-modulus van beugels veel lager is, zijn deze niet meegerekend voor de dwarskrachtcapaciteit.

$$V_d = 0,5 \cdot (1,2 \cdot 52 + 1,5 \cdot 20) \cdot 4,5 = 208 \text{ kN}$$

$$\tau_d = 208 \cdot 10^3 / (600 \cdot 390) = 0,89 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_1 = 0,4 \cdot 1,4 = 0,56 \text{ N/mm}^2 \text{ (minimum waarde van } \tau_1)$$

$$\tau_{gl} = 0,89 - 0,56 = 0,33 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 90^\circ, \theta = 45^\circ:$$

$$A_{sv:gl} = (0,33 \cdot 600 \cdot 1000) / (0,9 \cdot 0,00217 \cdot 60000) = 1690 \text{ mm}^2/\text{m}.$$

Keuze 2 dwarskrachtdeuvels $\emptyset 16$ h.o.h. 200 mm = 2011 mm²/m. ■

10 | Doorsnede van voorbeeldberekening