Ontwikkelingen in de houtbouw

ir. J.G.M. Raadschelders c.i.
(Raadschelders Bouwadvies b.v. te Spaarndam)

Inleiding

De laatste tijd zien we in de houtbouw een aantal ontwikkelingen, waardoor meer mogelijkheden met bouwen in hout zich aandienen. Deze ontwikkelingen betreffen de toepassing van kruiselings gelamineerd hout als dragende wanden en vloeren. Dit zijn plaatachtige materialen of panelen. Door de voorbewerking in de fabriek is het mogelijk complete bouwpakketten te maken. Alle sponningen, sparingen en voorzieningen voor de verbindingen zijn reeds aangebracht. Op de bouw behoeft de constructie dan alleen nog maar in elkaar gezet te worden. Alle verbindingen worden uitgevoerd als traditionele houtverbindingen. Dit worden ook wel timmermansverbindingen genoemd. De krachten worden overgebracht van hout op hout zonder de bijdrage van stalen verbindingsmiddelen. Er worden alleen schroeven toegepast om de verbindingen te fixeren en voor het overdragen van schuifkrachten. Het ontwerpen en detailleren van dit soort constructies vergt een goed inzicht in het materiaalgedrag van hout, waarbij de nodige ervaring gewenst is.

Ook zien we dat er steeds meer traditionele houtconstructies worden ontworpen. Hierbij moet worden gedacht aan kapconstructies, welke volledig in het zicht komen. Boerderijachtige gebouwen, kapschuren, enz. dus staafachtige constructies. Het kenmerk hierbij is dat de vormgever graag de constructie wil laten zien, dus zoals men vroeger bouwde met traditionele houtverbindingen. Deze wijze van bouwen is in de vergetelheid geraakt omdat de vaardigheid en de kennis zijn verdwenen bij de timmerlieden. Dit betreft het maken van spantuitslagen en het aftekenen van verbindingen. Daartegenover staat dat door modern elektrisch handgereedschap weer veel meer mogelijk is. Ook wordt in het onderwijs nauwelijks aandacht meer aan besteed aan deze wijze van bouwen. Dit soort constructies zijn ouderwets en te duur. Echter door nieuwe

ontwikkelingen in het ontwerpen en door de geavanceerde mogelijkheden van de huidige werkplaatsmachines zijn dit soort constructies weer financieel haalbaar en uitvoerbaar.

In het navolgende zal aandacht worden besteed aan het ontwerpen en berekenen van deze "traditionele" houtconstructies.

Ontwerp

Het esthetische ontwerp wordt gemaakt door de architect of vormgever. Vervolgens wordt in overleg met de constructeur bepaald welke vorm de draagconstructie krijgt. Dit betreft de plaats en afmetingen van de kolommen en liggers en andere componenten, welke van belang zijn voor de krachtafdracht.

Ook de plaatsing van de overige elementen komt hierbij aan de orde. Dit betreft vierkantstijlen, korbeels, kreupele stijlen, blokkeels, hanenbalken, makelaars, koningsstijlen, dekbalken, wormplaten, haanhouten, kinderbinten, moerbinten, krommers, muurplaten, gordingen, sporen, nokgordingen, gootklossen, raveelbalken, raveelhouten, staartbalken, schoren, sleutelstukken, windschoren, strijkbalken, spantjukken, enz.

Van groot belang is dat de ontwerper op de hoogte is van de correcte naamgeving van de diverse componenten. Anders ontstaan in het overleg mogelijk allerlei misverstanden. De juiste naamgeving is te vinden in de bouwkundeboeken. Op basis van dit schetsontwerp wordt een voorlopige dimensionering gemaakt. Dit betreft de afmetingen van de diverse onderdelen en de wijze van verbinden. Vervolgens wordt een 3-D computermodel gemaakt ten behoeve van de berekening. Met de krachten, welke volgen uit deze berekening worden de dimensies bepaald resp. gecontroleerd. Daarna worden de verbindingen berekend. Veelal zijn de verbindingen maatgevend

voor de dimensies van de staven. Dit komt omdat de verbindingen meestal op die plaatsen aanwezig zijn, waar ook de grootste krachten optreden. Bij het maken van de verbindingen worden vaak inkepingen gemaakt, waardoor verzwakking van de doorsnede optreedt, of er is onvoldoende plaats beschikbaar voor het plaatsen van de verbindingsmiddelen, waardoor een grotere doorsnede is vereist. Indien de verbindingen bekend zijn en dus ook de benodigde dimensies van de staven, dan past men het model in het computerprogramma aan en wordt de constructie opnieuw berekend. Door het wijzigen van de dimensies veranderen ook de stijfheidsverhoudingen en dus de krachtsverdeling in de constructie. Op basis van de nieuwe krachtsverdeling wordt gecontroleerd of alle verbindingen nog voldoen. De berekening is dus een soort “trial and error” methode. Wanneer uiteindelijk de definitieve vorm en afmetingen van de constructie bekend zijn (bepaald door de berekening) dan wordt de complete constructie in een BIM-model gemodelleerd. Dit is een digitaal model van de constructie, waarin alle informatie is opgenomen. Dit betreft de afmetingen en plaats van de constructieve elementen, de verbindingen, de montage volgorde enz. Indien mogelijk of gewenst worden ook de bouwkundige informatie, de installaties, de afwerking en wat nog meer zij in het model opgenomen. Uit dit model worden tekeningen gegenereerd ten behoeve van de productie en montage. Deze tekeningen bevatten alle informatie ten behoeve van de productie van de componenten. Met deze digitale informatie zijn de machines (CNC = Computer Numeric Control) aan te sturen waarmee de componenten worden geproduceerd. Bij montage past alles dan perfect.

Een aspect, dat van groot belang is voor de montage, is het vochtgehalte in het hout. In principe moeten de onderdelen worden vervaardigd van hout, waarin reeds een vochtgehalte aanwezig is, dat gelijk is aan het vochtgehalte dat in de eindsituatie is te verwachten. Dit is niet altijd mogelijk omdat voor dit soort constructies vaak vers hout wordt gebruikt. Er is dan geen tijd beschikbaar om het hout te kunnen drogen. De houtconstructie moet direct, nadat het is gefabriceerd, vanaf de vrachtwagen worden gemonteerd zodat er geen tijd aanwezig is, waarin het vochtgehalte in het hout kan wijzigen. Het is zeer onverstandig om de houtconstructie een tijdje in opslag te houden op de bouw. Het zal de eerste keer niet zijn dat door een wijziging van het vochtgehalte en dus een wijziging van de doorsnede afmetingen de verbindingen niet meer passen.

De beschikbare computerprogramma's voor het berekenen van houtconstructies zijn er in vele soorten en leveranciers. Echter de programma's om een houtconstrctie te modelleren zijn er niet veel. Deze programma's zijn onder andere Strucad, Tekla en Bocad. Om goed te kunnen modelleren is een gedegen kennis van en de nodige ervaring met houtconstructie onontbeerlijk.

Houtsoort

Voor traditionele houtconstructies komen alleen houtsoorten in aanmerking, welke in voldoende mate en in voldoende afmetingen beschikbaar zijn. Dit betreft zowel de lengte als de kopmaten. Deze houtsoorten zijn in hoofdzaak eiken en douglas. De sterkteklasse van deze houtsoorten is D30 resp. C30. De benodigde doorsnedeafmetingen gaan tot 400x600 mm^2. Al het hout is bestekhout, dus het hout wordt op bestelling op maat gezaagd.

Verbindingen

De traditionele verbindingen bestaan uit de volgende typen:

- pen en gatverbinding
- liplas
- schuine liplas
- haaklas
- schuine haaklas
- zwaluwstaartverbinding
- wigverbinding
- halfhoutsoverkeping
- loefverbinding eventueel met voorloeven
- hielaansluiting
- tandaansluiting
- tand-hiel aansluiting

Een aantal verbindingen kan trekkrachten overdragen, echter de meeste verbindingen zijn alleen geschikt voor het overbrengen van drukkrachten. Het kenmerk van alle houtverbindingen is dat het noodzakelijk is om het hout voor te bewerken om een aansluiting mogelijk te maken. Bij dit voorbewerken wordt hout weggehaald en dus de doorsnede verzwakt. Om een goede verbinding te kunnen ontwerpen moet men weten welke verbindingen mogelijk en geschikt zijn en dan ook nog uitvoerbaar (montage) zijn.

Bij het dimensioneren van verbindingen is de eerste vraag, welke moet worden gesteld, is: **wat zijn de mogelijke bezwijkmechanismen?** In feite komen alleen de bezwijkmechanismen van hout in aanmerking. Deze mechanismen zijn;

- buigsterkte
- treksterkte
- druksterkte
- splijtsterkte
- afschuifsterkte en blokafschuifsterkte
- stuiksterkte
- sterkte van houten toognagels

De sterkte moet worden gecontroleerd evenwijdig en loodrecht op de vezelrichting en ook onder een hoek met de vezelrichting. Daarbij moet worden voldaan aan de randvoorwaarden volgens de voorschriften. Deze randvoorwaarden zijn gesteld om een aantal bezwijkmechanismen te elimineren. Dit houdt in dat, indien aan deze randvoorwaarden wordt voldaan, een aantal mechanismen niet zullen kunnen optreden. De berekening wordt daarmee vereenvoudigd. Een aspect dat van belang is bij verbindingen is het feit dat door uitdroging van het hout verbindingen open kunnen gaan staan en dat de krachtsoverdracht daardoor wijzigt. Daardoor ontstaan in de staven excentriciteiten en dus buigende momenten.

De verbindingen worden gedimensioneerd op basis van DIN 1052:2004-08. Dit is de

Raadschlagers Bouwadvies

aangepaste Eurocode 5 voor Duitsland. De oorspronkelijke Eurocode 5 is verder uitgebreid, zodat niet allerlei andere voorschriften noodzakelijk zijn. Dit voorschrift kan als het ware worden beschouwd als een handboek. Hierin staan artikelen en aanwijzingen, welke niet in de Nederlandse voorschriften voorkomen.

De dimensionering van de verbindingen wordt met de hand gedaan. Hiervoor zijn geen computer-programma's beschikbaar. Tenzij men deze zelf heeft gemaakt. Een handberekening gaat redelijk snel en de vraag is wat de meerwaarde is van een computer-programma. Om te kunnen dimensioneren is het handig om een spread-sheet tabel te maken, waarin voor oplopende hoeken de druksterkte wordt bepaald. Zie bijlage. Bij panelen moet ook de treksterkte onder verschillende hoeken worden bepaald. Deze treksterkte is afhankelijk van de opbouw van de panelen.

In het navolgende wordt een overzicht gegeven van de materiaalgegevens en de van toepassing zijnde formules.

Houtsoort:	**Douglas C30 (naaldhout)**		**Eiken D30 (loofhout)**	
buigsterkte	30,0	N/mm^2	30,0	N/mm^2
treksterkte	18,0	N/mm^2	18,0	N/mm^2
treksterkte	0,4	N/mm^2	0,5	N/mm^2
druksterkte	23	N/mm^2	23,0	N/mm^2
druksterkte	2,7	N/mm^2	8,0	N/mm^2
afschuifsterkte	2,7	N/mm^2	3,0	N/mm^2
rolschuifsterkte	1,0	N/mm^2	NVT	
elasticiteitsmodulus	12.000	N/mm^2	10.000	N/mm^2
elasticiteitsmodulus	400	N/mm^2	640	N/mm^2
afschuivingsmodulus	750	N/mm^2	600	N/mm^2
volumieke massa	380	kg/m^3	530	kg/m^3

Voor de druksterkte onder een hoek met de vezel moet de druksterkte evenwijdig aan de vezel worden gereduceerd met de volgende factor:

$$k_\alpha = \sqrt{[(\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2(\alpha))^2 + (\frac{f_{c,0,d}}{1{,}5.\, f_{v,d}} \sin(\alpha)\cos(\alpha))^2 + \cos^4(\alpha)]}$$

Dus de druksterkte is:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,o,d}}{k_\alpha}$$

Dit is de algemene formule volgens art. 10.2.5 (DIN 1052).
De aansluitlengte mag vergroot worden met 30 mm in de krachtrichting. Het geprojecteerde oppervlak geldt dan als aansluitvlak. Dit vlak is groter dan het werkelijke aansluitvlak, dus de spanning is lager. Ook geldt er een verhoging van 1,25 voor de druksterkte in het geval van opleggingen. Dit is van toepassing in de houtskeletbouw. Voor gelamineerd hout is er eveneens een verhoging variërend van 1,50 tot 1,75. Zie hiervoor de voorschriften.

Bij traditionele verbindingen (timmermans-) is de formule aangepast. Dan wordt volgens art. 15.1 (DIN 1052) de reductiefactor

$$k_\alpha = \sqrt{[(\frac{f_{c,0,d}}{2{,}0.\, f_{c,90,d}} \sin^2(\alpha))^2 + (\frac{f_{c,0,d}}{2{,}0.\, f_{v,d}} \sin(\alpha)\cos(\alpha))^2 + \cos^4(\alpha)]}$$

Doordat k_α kleiner wordt, wordt de sterkte groter en kunnen de verbindingen kleiner zijn.
De factoren uit art. 10.2.5 zijn dan niet meer van toepassing.

Vereniging Bouwadviesbureaus

De sterkte van eikenhouten toognagels is $R_k = 9{,}5 \times d^2$ (N). (art. 15.3) Deze waarde geldt per snede onafhankelijk van de hoek met de vezelrichting. De soortelijke massa van de aansluitende staven moet groter zijn dan 380 kg/m^3. De minimale houtdikte is 2 * d. De minimale rand- en tussenafstand is eveneens 2 * d.

Als voorbeeld worden een aantal verbindingen berekend uit het project Sara Lydia hoeve te Zoetermeer.

Korbeel

Een korbeel is een schuine schoor tussen een ligger en een kolom. De korbeel sluit aan via een tandverbinding. Korbelen worden nooit met een tand-hiel verbinding aangesloten. Dit in verband met montage. Deze tand-hiel verbinding wordt in hoofdzaak gebruikt bij de aansluiting van spantbenen. Aan de tand is een pen aanwezig voor het fixeren van de verbinding en tegen zijdelings verschuiven. De krachten worden overgebracht door contactdruk dus alleen drukkrachten. Het overbrengen van trekkrachten is niet mogelijk door de aard van de verbinding. Bij het berekenen, met behulp van een computerprogramma, van de krachtsverdeling in de draagconstructie moet voor de aansluiting daarom worden aangegeven dat deze uitvalt bij trekkrachten. Gerekend wordt dat de drukkrachten worden overgebracht door de geprojecteerde kopvlakken tegen de aansluitvlakken. In werkelijkheid is de situatie anders. Dit heeft te maken met de passing en de krimp van het hout. Door de krimp sluiten de vlakken niet meer volledig aan over het volle oppervlak, maar concentreren de krachten zich in de aansluithoek van de vlakken. Daardoor ontstaan in de korbeel buigende momenten omdat de werklijn van de drukkracht niet samenvalt met de hartlijn van de staaf.

Uit de krachtenberekening van de complete constructie volgt de grootste optredende drukkracht in de korbeel. Deze drukkracht wordt ontbonden in een kracht loodrecht op en een kracht evenwijdig aan de aansluitende staaf. Deze kracht wordt gelijkmatig verdeeld geacht over het geprojecteerd oppervlak van het aansluitvlak. Dit kan zijn de tandaansluiting of de kopaansluiting. Soms wordt ook de borst van de pen meegeteld. De optredende spanningen worden vergeleken met de sterkte. Voor de tand is dit de druk onder een hoek met de vezelrichting. Voor het kopse aansluitvlak is dit de druk loodrecht op de vezelrichting. Dit zijn de enige bezwijkmechanismen van deze verbinding. De berekeningswijze staat in art. 13 van NEN 6760 aangegeven.

Gegeven: korbeel 200x200 mm^2 sterkteklasse C30
$k_{mod} = 0,85$
$\gamma_m = 1,20$
$f_m = 30,0 \times 0,85 / 1,20 = 21,25\ N/mm^2$
$f_{c,0} = 23,0 \times 0,85 / 1,20 = 16,29\ N/mm^2$
$f_{c,90} = 2,7 \times 0,85 / 1,20 = 1,91\ N/mm^2$
aansluithoek 40° $f_{c,40} = 5,82\ N/mm^2$ (zie bijgevoegde spread-sheet)
$f_{c,90} = 3,83\ N/mm^2$ (zie bijgevoegde spread-sheet)
Deze druksterkte is 2x hoger dan de waarde volgens art. 10.2.3. Dit komt omdat in de formule bij de 1e term onder het wortelteken de factor 2 is toegevoegd. Dit geldt alleen voor dit type verbindingen.

Berekening: drukkracht in korbeel $N'_d = 150,0$ kN
drukspanning in korbeel $\sigma = 150.000/200x200 = 3,75\ N/mm^2 < 16,29$
krachten tegen aansluitvlakken
evenwijdig (tand) $F_{//} = 150,0 \times \cos 40 = 114,09$ kN
loodrecht (kopvlak) $F_{\perp} = 150,0 \times \sin 40 = 96,4$ kN

De optredende spanningen zijn:
tand $\sigma_{//} = 114.090 / 200 \times 75 = 7,60\ N/mm^2 > 5,82$
kop $\sigma_{\perp} = 96.400 / 200 \times 125 = 3,86\ N/mm^2 \sim 3,83$

De aangehouden tanddiepte is onvoldoende. De tanddiepte kan echter niet groter worden anders wordt de stijl te veel verzwakt. Ook productietechnisch is dit lastig. Daarom wordt eveneens een gedeelte van de pen meegeteld. Het totaal benodigde aansluitvlak is 114,090 / 5,82 = 19.603 mm^2. De oppervlakte van de tand is 200 x 75 = 15.000 mm^2. Dus de benodigde oppervlakte van de pen is 19.603 - 15.000 = 4.603 mm^2. De pendikte is 100 mm. Dus de penlengte is minimaal 4.603 / 100 = 46 mm. De gatdiepte bedraagt dan minimaal ca. 55 mm. Enige overruimte is noodzakelijk. Nu de benodigde afmetingen van de aansluiting bepaald zijn, kan de effectieve doorsnede van de aansluitende staaf(kolom) worden gecontroleerd. Door de aansluiting is deze staaf plaatselijk verzwakt. Dit is de plaats waar het grootste moment optreedt. Ook moet de korbeel worden gecontroleerd op een extra moment door de excentriciteit.

Verzwakte kolom doorsnede.
Gegeven: drukkracht N = 130,0 kN.
moment M = 155,0 kN.m

Bepaling van de zwaartelijn en het traagheidsmoment.

No	Doorsnede	A (mm^2)	y (mm)	A*y (mm^3)	e (mm)	A*e^2 (mm^4)	I (mm^4)
1	300*370	111000	185	20,5.e6	34	128,3.e6	1266.e6
2	200*55	11000	397,5	4,4.e6	178,5	350,3.e6	2,8.e6
3	100*75	7500	462,5	3,5.e6	243,5	444,7.e6	3,5.e6
		129,5.e3		28,4.e6		923,5.e6	1272.e6

Raadsmoble Bouwadvies

De zwaartelijn van de verzwakte doorsnede ligt op 28,4.e6/129,5.e3 = 219 mm. Zie doorsnede.
Het traagheidsmoment is 923,5.e6 + 1.272.e6 = 2196.e6 mm^4.
Het weerstandsmoment is W(min) = 2.196.e6 / (500-219) = 7813.e3 mm^3.
De drukspanning in de kolom is σ = 130,0.e3 / 129,5.e3 = 1,0 N/mm^2.
De buigspanning in de kolom is σ = 155,0.e6 / 7813.e3 = 19,8 N/mm^2.
De totale spanning in de verzwakte doorsnede is:
1,0 / 16,29 + 19,8 / 21,25 = 0,061 + 0,932 = 0,99 < 1,0 dus voldoet.

De invloed van de knik in het vlak is niet relevant omdat de geometrische niet-lineariteit is meegenomen in de berekening van de krachtsverdeling. Bovendien is het aandeel druk (0,061) in de totale spanning (0,99) verwaarloosbaar.

Door krimp van het hout zullen de borsten van de verbinding open gaan staan. Daardoor concentreert de over te brengen kracht zich ongeveer in het snijpunt van de 2 aansluitvlakken.
De druklijn van de normaalkracht in de korbeel komt niet overeen met de zwaartelijn. De excentriciteit is 200/2 – 75 = 25 mm.
Dientengevolge ontstaat een moment groot 130,0 x 0,025 = 3,25 kN.m.
Het weerstandsmoment is W = 1/6 x 200^3 = 1,33.e6 mm^3.
De buigspanning is σ = 3,25.e6 / 1,33.e6 = 2,44 N/mm^2.
De totale spanning is 3,75 / 16,29 + 2,44 / 21,25 = 0,230 + 0,115 = 0,345 <1,00.

Zijdelingse knik is niet relevant.

Zwaluwstaart

De zwaluwstaart is een verbinding, waarbij trekkrachten kunnen worden overgebracht van hout op hout. Een bekende verbinding is de verankering van houten sluisbodems aan de houten trekpalen. Daarbij werden de bodembalken door middel van een verborgen zwaluwstaart met wig verbonden aan de koppen van de houten palen. Deze verbinding wordt nu niet meer toegepast. Ook blokkeels worden door middel van een zwaluwstaart verbonden aan de kreupele stijl en de muurplaat. Aan deze verbindingen is nimmer gerekend. In de onderhavige spanten komen eveneens zwaluwstaarten voor. De vloerbalken worden op deze wijze verbonden aan de houten kolommen van het middendeel. In de vloerbalken treedt een trekkracht op ten gevolge van de spatkracht uit de schuine spantbenen. Om de verbinding te kunnen dimensioneren moeten eerst de bezwijkmechanismen worden vastgesteld. In dit geval is dat de treksterkte en de afschuifsterkte van de trekbalk en de rolschuifsterkte van de kolom.

Kolomafmeting 300 x 500 mm^2
Trekbalken 2 x 100 x 300 mm^2
Trekkracht in balken Nt = 35,0 kN
Dwarskracht/oplegreactie V = 35,0 kN
Trekspanning in trekbalken σ = 35.000 / (2 x 100 x 300) = 0,58 N/mm^2 < 12,75
Druksterkte loodrecht op vezel f_c = 3,74 N/mm^2

Drukspanning in zwaluwstaart, aanwezig totaal 4 zwaluwstaartvlakken. Het aansluitvlak/kopvlak is 50 x 50 = 2.500 mm^2. Σ =35.000 /(4 x 2500) = 3,50 N/mm^2 < 3,74
In de trekbalken treedt afschuiving op omdat de zwaluwstaarten willen afschuiven. De afschuifvlakken zijn 4 x 50 x 550 = 110.000 mm^2. De schuifspanning is 35.000 /110.000 = 0,31 N/mm^2. In verband met ongelijke verdeling moet de schuifsterkte worden gereduceerd met 0,8, dus f_v = 0,8 x 1,91 = 1,53 N/mm^2 < 0,31
In de kolom treedt rolschuifspanning op. De rolschuifsterkte is τ = 1,0 x 0,85 / 1,2 = 0,71 N/mm^2.

Het gebied, waar de rolschuifspanning optreedt, is groter dan het aansluitvlak. In DIN1052 wordt aangegeven dat men het gebied mag vergroten met 30 mm. Het totale vlak per zwaluwstaart, waar deze rolschuifspanning optreedt, is 50 x500 /2 + 30 x 500 = 27.500 mm^2. De rolschuifspanning is τ = 35.000 / (4 x 27.500) = 0,32 N/mm^2.

Verbinding met toognagels

Bij een penverbinding worden trekkrachten overgebracht doordat aan de houten balk een pen is gemaakt welke door een sleuf (gat) in de aansluitende balk steekt en wordt opgesloten met houten toognagels. De bezwijkmechanismen van deze verbinding zijn de afschuiving van de nagels, de stuik van de nagels op het hout, het afschuiven van het voorhout van de pen, het splijten van de pen en de treksterkte van de pen. In het algemeen zijn de toognagels maatgevend.
Pendikte 60 mm Penhoogte 300 mm.
Nageldikte 30 mm. Aantal nagels boven elkaar 4 stuks.
Controle plaatsing nagels: minimale hoogte 5 * 2 *d = 10 * 30 = 300 mm dus voldoet.

Toognagels
Afschuifsterkte toognagel $R_k = 9{,}5 * 30^2 = 8.550$ N
$R_d = 8.550 * 0{,}85 / 1{,}2 = 6.056$ N
Totaal 2 * 4 = 8 afschuifvlakken.
Totaal opneembaar door nagels $F_t = 8 * 6056 = 48.450$ N = 48,5 kN.

Druk door nagels op hout. Deze druk is loodrecht op de vezels. Hiervoor geldt in feite art. 10.2.4, dus geen verhoging van de sterkte. Aangenomen wordt dat de nagel over het volle vlak wordt gesteund. De nagellengte is 250 mm. Dus het draagvlak is 30 * (270 – 60) = 6300 mm^2.
De drukspanning bij gelijkmatige verdeling is 2 * 6056 / 6300 = 1,92 N/mm^2 ~ 1,91 N/mm^2

Berekening pen

Netto doorsnede pen ter plaatse van nagels is
Anetto = 60 * (300 – 4 * 30) = 10.800 mm^2
Trekspanning in pen
σ = 48.450 / 10.800 = 4,49 N/mm^2 < 12,75 N/mm^2

Afschuiven van het voorhout van de pen. In verband met de ongelijke verdeling van de schuifspanning moet de schuifsterkte worden gereduceerd met 0,8.
τ = 2,70 * 0,85 / 1,20 = 1,91 N/mm^2
De lengte wordt berekend per nagel. Per nagel zijn er 2 schuifvlakken aanwezig. De over te brengen schuifkracht is de totale nagelkracht dus 2 * 6.056 = 12.112 N.
De minimale lengte van het voorhout is
L = 12.112 / (2 * 60 * 0,8 *1,91) = 66 mm.
In het algemeen wordt aangehouden dat de lengte van het voorhout gelijk is aan 8 * d = 8 * 30 = 240 mm, bij 1 afschuifvlak. Zie de traditionele verbindingen. Hier zijn 2 afschuifvlakken aanwezig dus l = 4 * d = 4 * 30 = 120 mm > 66 mm. Deze randvoorwaarde dient om de kans op splijten te vermijden.

Raadschelder Bouwadvies

In het navolgende wordt de sterkte van gelijksoortige verbindingen bepaald op basis van de bezwijkmechanismen. Dit is de omgekeerde benadering van de berekening. Op deze wijze is beter te zien welke mechanismen maatgevend zijn. Dan kan men de verbinding optimaliseren.

Pen verbinding met toognagels.

Houtkwaliteit C 30

$k_{mod} = 0{,}85 \qquad \gamma_m = 1{,}20$

Treksterkte

Bezwijkmechanisme 1

Treksterkte pen..

$f_{t,d} = 10{,}0 \times 0{,}85 / 1{,}2 = 12{,}75 \ N/mm^2$

$A_{netto} = 400 \times 70 = 28.000 \ mm^2$

$F_u = 12{,}75 \times 28.000 = \underline{\underline{357 \ kN}}$

Bezwijkmechanisme 2.

Afschuifsterkte toognagels.

$R = 9{,}5 \cdot d^2 = 9{,}5 \times 30^2 = 8550 \ N$

$R_d = 8550 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 6056 \ N$

Aantal afschuifvlakken

$n = 2 \times 3 = 6$

$F_u = 6 \times 6056 = \underline{\underline{36{,}3 \ kN}}$

Bezwijkmechanisme 3

Oplegdruk toognagels

$f_{c,d} = 3{,}83 \ N/mm^2$ (spread-sheet)

$A = 3 \times (280 - 70) \times 30 = 18.900 \ mm^2$

$F_u = 3{,}83 \times 18.900 = \underline{\underline{72{,}4 \ kN}}$

Bezwijkmechanisme 4

Afschuiving van pen door toognagel.

$f_{v,d} = 2{,}7 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 1{,}91 \ N/mm^2$

$A = 2 \times 3 \times 70 \times (150 - 30) = 50.400 \ mm^2$

$F_u = 0{,}8 \times 1{,}91 \times 50.400 = \underline{\underline{77{,}0 \ kN}}$

reductie

Conclusie

Afschuifsterkte toognagels is maatgevend.

$F_u = 36{,}3 \ kN$

Krimp is nauwelijks van invloed.

Afschuifsterkte/oplegdruk

Bezwijkmechanisme 5

Afschuiving van balk

$f_{v,d} = 2{,}7 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 1{,}91 \ N/mm^2$

$F_u = \frac{2}{3} \times 1{,}91 \times 300 \times 400 = 153 \ kN$

Raadschelaar

Zwaluwstaartverbinding

Houtkwaliteit C30

$k_{mod} = 0{,}85$ $\gamma_m = 1{,}20$

Bezwijkmechanisme 1

Treksterkte staaf (trekplaten)

$f_{t,d} = 18{,}0 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 12{,}75$ N/mm²

$A_{netto} = 2(300 \times 100 - 50 \times 50) = 55.000$ mm²

$F_u = 12{,}75 \times 55.10^3 = \underline{701 \text{ kN}}$

Bezwijkmechanisme 2.

Druk loodrecht op vezel.

Dit is ter plaatse van aansluiting zwaluwstaartvlakken.

$f_{c,d} = 3{,}83$ N/mm² (spread-sheet)

$A = 4 \times 50 \times 50 = 10.000$ mm² (4 vlakken)

$F_u = 3{,}83 \times 10.000 = \underline{38{,}3 \text{ kN}}$

Bezwijkmechanisme 3

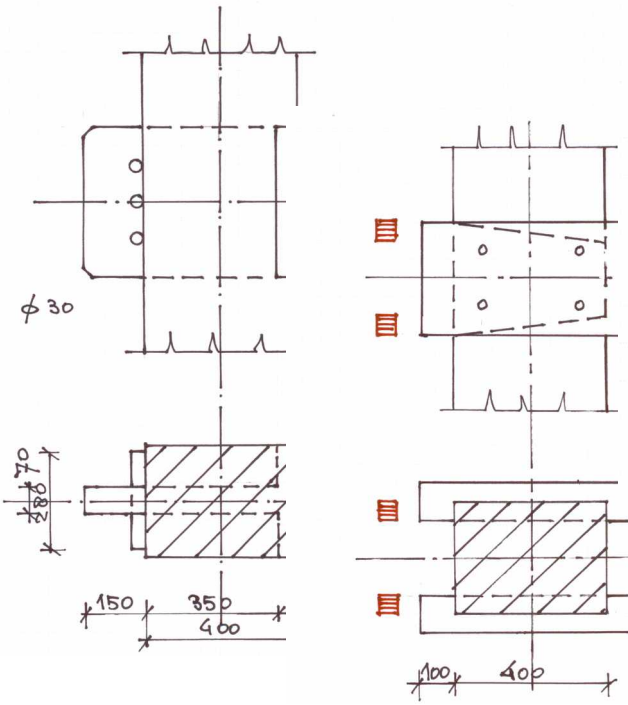
Afschuiving voorhout

Dit is de afschuiving van het voorhout

$f_{v,d} = 2{,}7 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 1{,}91$ N/mm²

$A = 4 \times (50 \times 500 + 50 \times 300) = 160.000$ mm²

$F_u = 0{,}8 \times 1{,}91 \times 160.000 = 244$ kN



Bezwijkmechanisme 4.

Afschuiving in kolom.

Hier treedt rolafschuiving op

$f_{v,d} = 1{,}0 \times 0{,}85 / 1{,}2 = 0{,}71$ N/mm²

Meewerkende breedte.

$b = \frac{50}{2} + 30 = 55$ mm

↳ art. 10.2.5

$A = 4 \times 400 \times 55 = 88.000$ mm²

$F_u = 0{,}8 \times 0{,}71 \times 88.000 = \underline{50{,}0 \text{ kN}}$

Conclusie

Druk loodrecht op vezel is maatgevend

$F_u = 38{,}3$ kN

Bouten toepassen om verbinding te fixeren.

Bij krimp van trekplaten treedt er verschuiving op.

Bezwijkmechanisme 6

Oplegdruk balk in kolom.

Gerekend wordt dat pen meedraagt.

$f_{c,d} = 3{,}83$ N/mm²

$A = 350 \times 70 + 50 \times 300 = 39.500$ mm²

$F_u = 3{,}83 \times 39.500 = 151$ kN

Conclusie

Oplegdruk is maatgevend.

$F_u = 151$ kN

Bij krimp ontstaat ruimte in de verbinding.

Bij wisselende belasting gaat verbinding verschuiven.

Geen rekening gehouden met ongelijke drukverdeling.

Tandverbinding

Houtkwaliteit C30

$k_{mod} = 0{,}85$ $\gamma_m = 1{,}20$

Bewijsmechanisme 1

Druksterkte staaf.

$f_{c,d} = 23{,}0 \times 0{,}85 / 1{,}20 = 16{,}30$ N/mm²

$A = 200 \times 200 = 40.000$ mm²

$F_u = 16{,}30 \times 40.000 = \underline{\underline{652 \text{ kN}}}$

Bewijsmechanisme 2.

Druksterkte aansluitvlak korbeel (tand)

Hierbij treedt druk onder hoek met vezel op in korbeel.

$\alpha = 40°$ $f_{c,\alpha} = 5{,}82$ N/mm² (spread-sheet)

A	tand	200 x 75	15.000	mm²
	pen	70 x 75	5250	"
		ΣA	20.250	mm²

$F_{//} = 5{,}82 \times 20.250 = 117{,}9$ kN

$F_u = \dfrac{117{,}9}{\cos 40°} = \underline{\underline{153{,}8 \text{ kN}}}$

Gerekend is dat de pen aansluit en meedraagt.

Bewijsmechanisme 3

Druksterkte aansluitvlak korbeel (voorvlak)

Hierbij treedt druk loodrecht op vezel op in kolom. Gerekend wordt dat alleen de borsten van de korbeel bijdragen.

$f_{c,90} = 3{,}83$ N/mm².

$l = \dfrac{200}{\sin 40°} = 311$ mm

$A = 311 \times (200 - 70) = 40.430$ mm².

$F_\perp = 3{,}83 \times 40.430 = 154{,}8$ kN

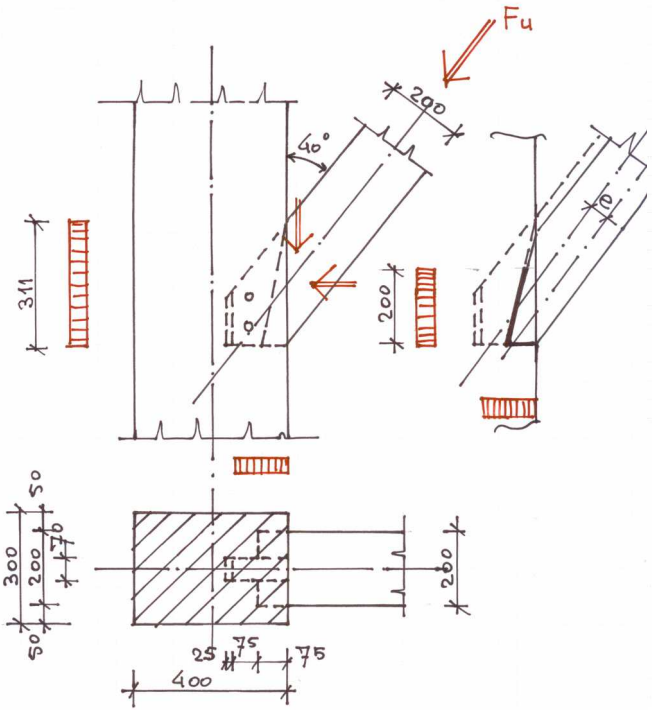
$F_u = \dfrac{154{,}8}{\sin 40°} = \underline{\underline{240{,}9 \text{ kN}}}$

Conclusie

Maatgevend is de druk op de tand.

$F_u = 153{,}8$ kN

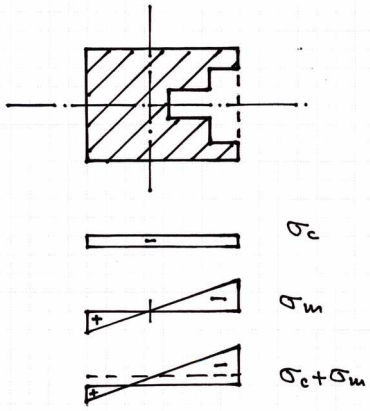
Let op: bij krimp van de korbeel gaan de borsten open staan, waardoor aangrijpingspunt krachten verplaats. Daardoor ontstaat excentriciteit in korbeel



Minimale hoogte drukvlak op basis van sterkte tand.

$h \geq \dfrac{153{,}8}{240{,}9} \times 311 = 200$ mm.

De kolom moet op druk en buiging worden gecontroleerd t.p.v. verzwakte doorsnede.



Ankers M30 8.8 $0{,}9d = 27$ mm

$W_{el} = \frac{\pi}{32} d^3 = \frac{\pi}{32} \cdot 27^3 = 1932$ mm³

$M_u = \frac{0{,}8}{\gamma_v} \times 800 \times 1932 = 1{,}24 \cdot 10^6$ N.mm

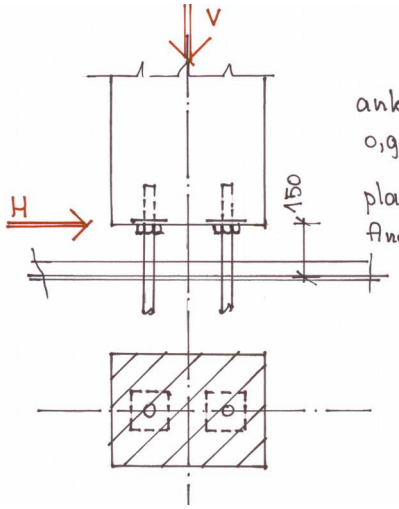
$H \leq 2 \times 1{,}24 \cdot 10^6 / 150 = 16{,}5$ kN

Kopplaat

Hout is maatgevend

$f_c = 23{,}0 \times 0{,}85 / 1{,}2 = 16{,}29$ N/mm²

$V \leq 2 \times 16{,}29 \times 9200 = 300$ kN



ankers M30 8.8

$0{,}9d = 27$ mm.

plaat ⌀ 100

$A_{netto} = 9200$ mm²

Raadschelders Bouwadvies