

Vermoeiing van bouten en van geboute verbindingen

door ir. L.P. Bouwman

CENTRUM
STAAL



Staalbouwkundig
Genootschap

**Vermoeiing van bouten
en van
geboute verbindingen**

januari 1989
3e druk

ir L.P. Bouwman

VOORWOORD

De laatste jaren is in het Stevin-laboratorium van de Technische Hogeschool te Delft veel onderzoek verricht op het gebied van vermoeiing van geboute verbindingen.

De resultaten en ervaringen die door deze onderzoeken zijn verkregen hebben geleid tot een beter inzicht in het gedrag van geboute verbindingen waarbij vermoeiing maatgevend is.

Meer inzicht in het gedrag van constructies onder invloed van vermoeiingsbelastingen zal in bepaalde gevallen kunnen leiden tot een meer verantwoorde uitvoering van berekening en ontwerp.

Het leek daarom nuttig, de verkregen resultaten en inzichten in deze brochure vast te leggen, zodat een bredere kring van geïnteresseerden hiervan kennis kan nemen.

Prof.ir A.A. van Douwen,
voorzitter Technische Commissie
Staalbouwkundig Genootschap.

In deze brochure zijn resultaten verwerkt die door veel proeven zijn verkregen. Verschillende medewerkers van de vakgroep "Staalconstructies" hebben een belangrijk aandeel gehad in de uitvoering van de proeven en in het verwerken en interpreteren van de proefresultaten.

Ook zijn in deze brochure verschillende nuttige suggesties verwerkt die ik van collega's mocht ontvangen.

Voor bovengenoemde vruchtbare samenwerking wil ik allen hartelijk danken.

De redactiecommissie van het Staalbouwkundig Genootschap wil ik graag danken voor hun bereidheid toestemming en medewerking te verlenen voor het uitgeven van deze brochure.

Een apart woord van dank wil ik richten aan mevr. I. den Edel, medewerkster van het Staalbouwkundig Genootschap, voor het vele werk dat zij enthousiast en zeer zorgvuldig heeft verricht bij de verzorging van deze brochure.

Bij deze tweede druk is hoofdstuk 5, welke handelt over de uitvoering van constructiedetails, met enkele voorbeelden uitgebreid.

Delft, april 1982

ir. L.P. Bouwman
Stevin-Laboratorium TH-Delft

Bij de derde druk is aan paragraaf 3.2 toegevoegd een stuk over de invloed van de verdeling van de contactkrachten (Appendix A).

Delft, januari 1989

INHOUD

	<u>Blz.</u>
1. INLEIDING	2
2. VERMOEIING VAN OP TREK BELASTE BOUTEN	3
2.1. De vermoeiingssterkte van <u>niet</u> aangedraaide bouten	3
2.1.1. De invloed van de grootte van de minimum spanning	3
2.1.2. De invloed van de grootte van de spannings-amplitude σ_a	5
2.1.3. De invloed van het tijdstip van de warmte-behandeling	5
2.2. De vermoeiingssterkte van aangedraaide bouten	7
2.2.1. De invloed van de wringspanning ontstaan door het aandraaien	7
2.2.2. De invloed van de grootte van de voorspanning	10
3. VERMOEIING VAN OP TREK BELASTE BOUTVERBINDINGEN	13
3.1. Enkele beschouwingen	13
3.2. Resultaten van proeven met op trek belaste bout-verbindingen	21
3.3. Conclusies proeven met op trek belaste boutverbindingen	30
3.4. Practische aanwijzingen voor het construeren van op trek belaste boutverbindingen	31
3.5. Vergelijking van de uitkomsten van een berekenings-methode met de resultaten van vermoeiingsproeven	45
3.6. Getallenvoorbeeld voor de dimensionering van een flensverbinding	48
4. VERMOEIING VAN OP SCHUIF BELASTE BOUTVERBINDINGEN	50
4.1. Breukpatronen van op schuif belaste boutverbindingen	50
4.2. Resultaten van vermoeiingsproeven op dubbele overlap verbindingen	54
4.3. Conclusies met betrekking tot vermoeiingsproeven op dubbele overlap verbindingen	56
4.4. Aanbevelingen voor het ontwerpen van geboute verbin-dingen in dynamisch belaste constructies	57
5. UITVOERING VAN CONSTRUCTIEDETAILS MET BETREKKING TOT VERMOEIING	59
5.1. Op trek belaste verbindingen	59
5.2. Op schuif belaste verbindingen	82
APPENDIX A	86

1. INLEIDING

In dit boekje worden onder andere resultaten beschreven van vermoeiingsproeven die in het Stevin-laboratorium van de Technische Hogeschool te Delft op bouten en op boutverbindingen zijn uitgevoerd.

De vermoeiingssterkte van op trek belaste bouten is in vergelijking met de statische sterkte bijzonder laag. Bij vermoeiingsproeven van op trek belaste boutverbindingen is echter komen vast te staan dat, indien de constructieve uitvoering van de verbindingen goed wordt gekozen, de bouten niet op vermoeiing worden belast.

Een voordeel van een goede constructieve uitvoering is bovendien dat de berekening van de verbindingen overzichtelijk en eenvoudig wordt.

De volgende onderwerpen worden in dit boekje behandeld:

- bouten dynamisch op trek belast;
- verbindingen met bouten dynamisch op trek belast;
- verbindingen met bouten dynamisch op schuif belast.

Van dynamisch op trek belaste bouten wordt onder andere vermeld de invloed van de materiaalkwaliteit van bouten, de invloed van het aandraaien van bouten, de invloed van het verzinken van bouten, etc.

Van dynamisch op trek belaste verbindingen met bouten wordt het gedrag besproken waarbij de nadruk ligt op de invloed van de plaats van het contactvlak.

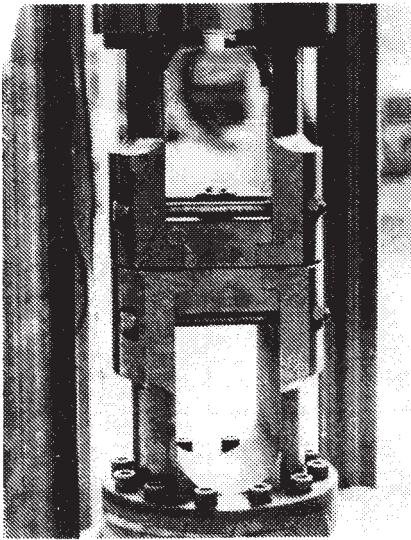
Van op schuif belaste verbindingen wordt de vermoeiingssterkte behandeld zowel van verbindingen met voorspanbouten als van verbindingen met bouten belast op stuijk en afschuiving. Hoewel de vermoeiingssterkte van op schuif belaste verbindingen in het algemeen niet zo kritisch is, moet vooral bij materialen met een hoge treksterkte toch worden gelet op de kans op vermoeiing van de constructiedelen.

Tenslotte worden met betrekking tot vermoeiing van geboute verbindingen enkele uitvoeringen van constructiedetails besproken.

2. VERMOEIING VAN OP TREK BELASTE BOUTEN

2.1. De vermoeiingssterkte van niet aangedraaide bouten

Voor het bepalen van de vermoeiingssterkte van bouten onder diverse omstandigheden, zijn bouten met behulp van speciale inspanbekken ingespannen in een 60tf's servo-hydraulische trekbank, fabriikaat Schenck, zie afbeelding 1.



afb. 1

De bouten zijn niet aangedraaid in de inspanbekken. Zowel de minimum spanning ($\sigma_{\min}$) als de maximum spanning ($\sigma_{\max}$) zijn in de bouten opgewekt door de servo-hydraulische trekbank.

Aan de hand van enkele proefresultaten zullen de invloeden van sommige grootheden worden nagegaan.

2.1.1. De invloed van de grootte van de minimum spanning

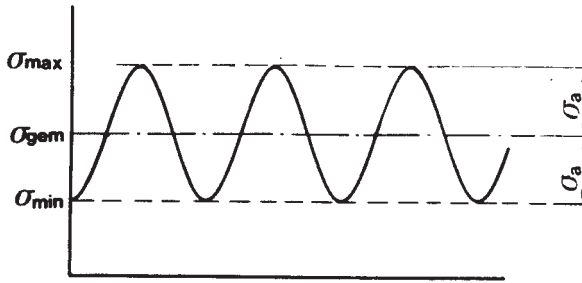
Om deze invloed te onderzoeken zijn met de servo-hydraulische trekbank in de diverse bouten onderstaande minimumspanningen opgewekt:

$$\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$$

$$\sigma_{\min} = 0,4 \sigma_{0,2}$$

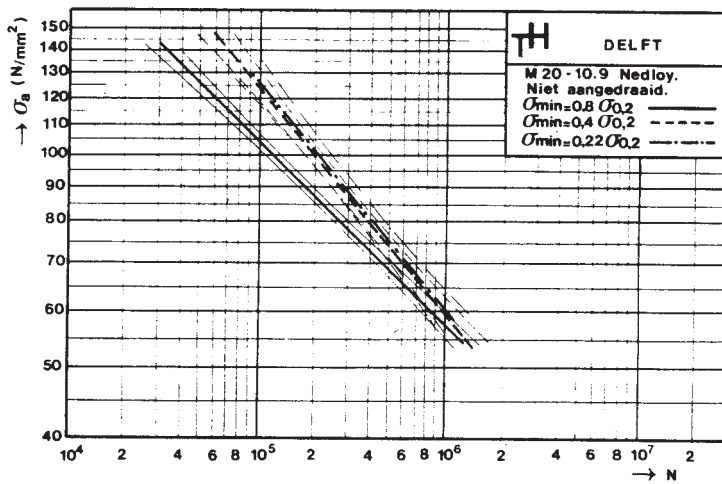
$$\sigma_{\min} = 0,22 \sigma_{0,2}$$

Op deze minimumspanningen is met de trekbank een spanningsrange $= 2 \sigma_a$ aangebracht, zie afbeelding 2.



afb. 2

In afbeelding 3 zijn de resultaten uitgezet voor bouten van één bepaald fabrikaat.



afb. 3

Uit afbeelding 3 blijkt dat bij de hoge amplitude spanningen σ_a er een invloed is van de grootte van de minimum spanning. Bij dezelfde amplitude spanning σ_a is het aantal wisselingen totdat breuk optreedt bij $\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$ duidelijk kleiner dan bij $\sigma_{\min} = 0,22 \sigma_{0,2}$.

Bij de lagere amplitude spanningen σ_a is de invloed praktisch verdwenen en worden bij de minimum spanningen $\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$, $\sigma_{\min} = 0,4 \sigma_{0,2}$ en $\sigma_{\min} = 0,22 \sigma_{0,2}$ nagenoeg hetzelfde aantal wisselingen verkregen voordat breuk optreedt.

2.1.2. De invloed van de grootte van de spanningsamplitude σ_a

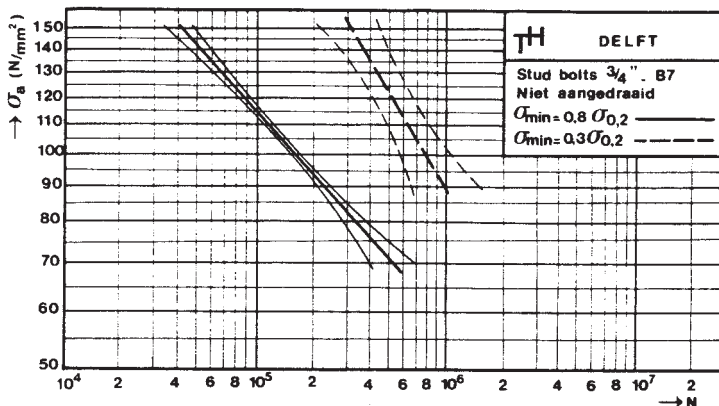
De invloed van de spanningsamplitude σ_a blijkt duidelijk uit afbeelding 3. Naarmate de spanningsamplitude σ_a hoger is kunnen minder wisselingen verdragen worden voordat breuk optreedt.

2.1.3. De invloed van het tijdstip van de warmtebehandeling

Het is gebruikelijk om bij bouten de warmtebehandeling (veredelen) te laten plaats vinden nadat de schroefdraad gerold is. Bij "stud bolts" daarentegen wordt de schroefdraad gerold nadat de warmtebehandeling reeds heeft plaats gevonden. De invloed van het tijdstip van de warmtebehandeling is onderzocht door in de servo-hydraulische trekbank studs te beproeven die gerold zijn na de behandeling (normale werkwijze) en tevens studs te beproeven die gerold zijn vóór de warmtebehandeling.

In afbeelding 4 zijn de resultaten uitgezet van proeven op stud-bolts $\frac{3}{4}$ " waarbij de draad gerold was na de warmtebehandeling (normale uitvoering).

Vergelijking met afbeelding 3 toont dat de invloed van de minimum spanning bij studs veel groter is dan bij bouten.

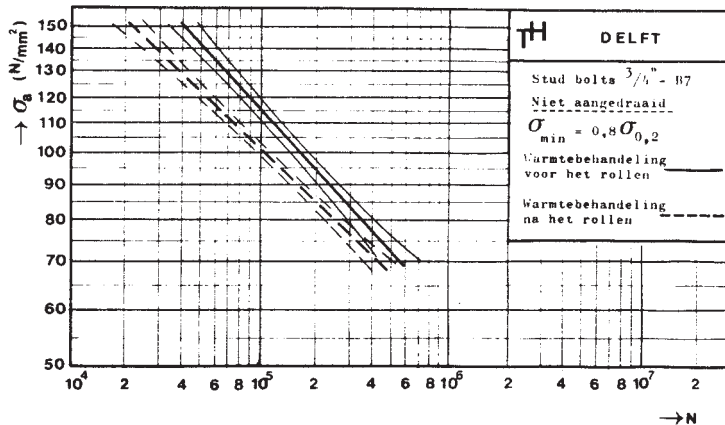


afb. 4

De oorzaak dat bij studs de invloed van de minimum spanning groter is moet gezocht worden in het feit dat door het rollen in de grond van de draad een zekere drukspanning wordt opgewekt. Deze restdrukspanning heeft vooral een gunstige invloed bij lage minimum spanningen.

Indien de warmtebehandeling na het rollen geschiedt, dan worden de restdrukspanningen die door het rollen zijn opgewekt door de warmtebehandeling weer opgeheven.

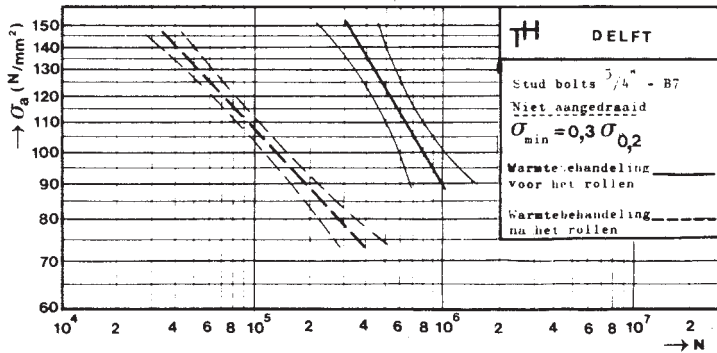
Bij hoge waarden van $\sigma_{\min}$ is de gunstige invloed van de restdrukspanningen niet meer merkbaar. Hierbij maakt het niet meer uit of de draad gerold wordt vóór of na de warmtebehandeling. Door de hoge minimum spanning is na één belastingswisseling in de grond van de draad altijd een gunstige restdrukspanning aanwezig. Dat het tijdstip van de warmtebehandeling dan weinig invloed heeft blijkt duidelijk uit afbeelding 5. Uitgezet zijn hierin de resultaten van proeven op studs met de warmtebehandeling vóór het rollen (normaal) en studs met de warmtebehandeling na het rollen.



afb. 5

Zoals uit afbdeeling 5 blijkt is er bij een hoge minimum spanning ($\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$) inderdaad weinig verschil tussen normale studs (warmtebehandeling vóór het rollen) en studs waarbij de warmtebehandeling heeft plaats gevonden na het rollen.

Bij een lage minimum spanning is er daarentegen een duidelijk verschil zie afbeelding 6. Hierbij is $\sigma_{\min} = 0,3 \sigma_{0,2}$ aangehouden. In dit geval bezitten de studs die na de warmtebehandeling gerold zijn wel een belangrijke restdrukspanning in de grond van de draad, terwijl bij de studs die na het rollen een warmtebehandeling hebben ondergaan deze spanning verdwenen is. De spreiding in de resultaten was bij de proeven met lage minimum spanningen duidelijk groter dan bij de proeven met hoge minimum spanningen.



afb. 6

2.2. De vermoeingssterkte van aangedraaide bouten

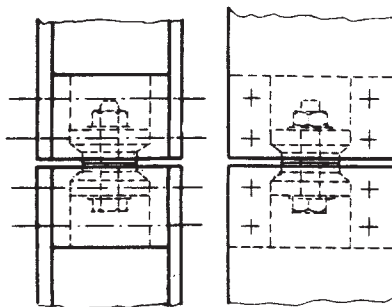
2.2.1. De invloed van de wringspanning ontstaan door het aandraaien

Voor het onderzoeken van de invloed van de wringspanning die door het aandraaien in de bouten ontstaat, zijn de bouten, nadat deze in de inspanstukken (zie afbeelding 7) waren geplaatst, aangedraaid tot een bepaalde trekspanning was opgewekt.

Voor de grootte van de trekspanning die door het aandraaien werd opgewekt is gekozen:

$$\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2} = 720 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\min} = 0,4 \sigma_{0,2} = 360 \text{ N/mm}^2$$



afb. 7

De inspanstukken zijn met behulp van een servo-hydraulische trekbank, fabrikaat Schenck, belast tot een spanningsamplitude van een bepaalde grootte in de bouten werd opgewekt.

Om de grootte van de wringspanning te variëren zijn bouten beproefd met verschillende condities van de schroefdraad, namelijk:

- a. nieuwe bouten, in de conditie als geleverd, $K \approx 0,16$
- b. moeren ontvet, gedompeld in bijenwas, $K \approx 0,12$
- c. moeren ontvet, $K \approx 0,22$

$$(M_a = K \cdot d \cdot F_v)$$

In afbeelding 8 zijn de resultaten uitgezet van proeven op bouten M20 - 10.9 met als K-waarden:

$K = 0,12$; $K = 0,16$ en $K = 0,22$.

De bouten zijn vóór de beproeving aangedraaid tot:

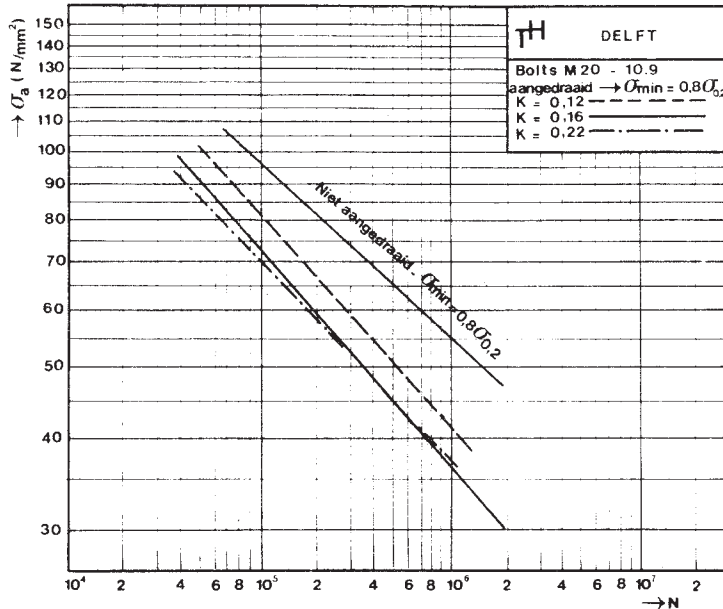
$$\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$$

Ter vergelijking zijn in afbeelding 8 ook resultaten uitgezet van niet aangedraaide bouten; hierbij is door de trekbank steeds

$\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$ in de bouten opgewekt.

Zoals uit afbeelding 8 blijkt heeft de wringspanning die door het aandraaien wordt opgewekt een invloed op de vermoeiingssterkte.

Tussen de bouten met $K = 0,22$ en $K = 0,16$ is er een klein verschil. De bouten met $K = 0,12$ zijn belangrijk gunstiger dan de bouten met $K = 0,22$ en $K = 0,16$ maar zijn echter duidelijk ongunstiger dan de niet aangedraaide bouten.

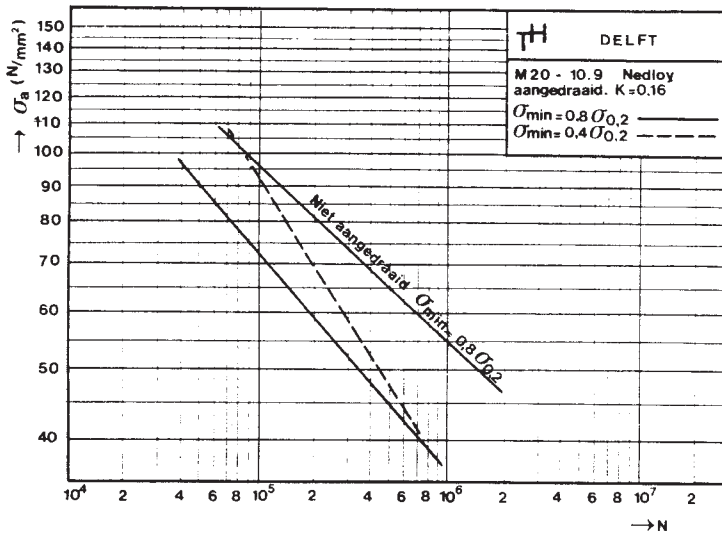


afb. 8

In afbeelding 9 zijn de resultaten uitgezet van proeven op bouten M20 - 10.9 met $K = 0,16$ waarbij door het aandraaien minimum spanningen

van $\sigma_{\min} = 0,8 \sigma_{0,2}$ en $\sigma_{\min} = 0,4 \sigma_{0,2}$ zijn opgewekt.

Tevens is ook weer de lijn voor niet aangedraaide bouten getekend. Uit afbeelding 9 blijkt dat voor de bouten waarbij hoge amplitude spanningen aangehouden zijn, de bouten met de lage voorspanning (dus ook een lage wringspanning) de hoogste vermoeiingssterkte leveren.

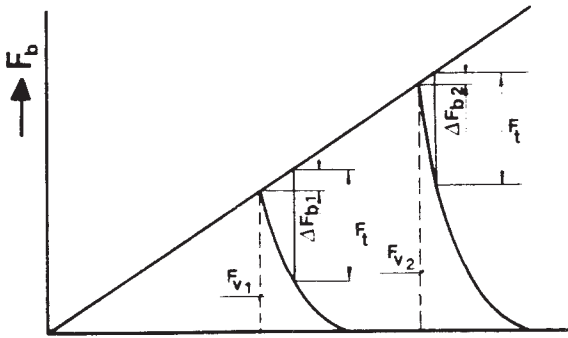


afb. 9

2.2.2. De invloed van de grootte van de voorspanning

Zoals in paragraaf 3.3. op blz. 30 geconcludeerd wordt, moet bij een verbinding die op trek wordt belast, de voorspankracht zo groot mogelijk worden gekozen om een gunstige vermoeiingssterkte van de verbinding te verkrijgen. Dit lijkt in strijd met de resultaten in afbeelding 9. Niet vergeten moet worden dat bij de proeven, waarvan de resultaten in afbeelding 9 zijn uitgezet, de belasting zodanig gekozen is dat in de verschillende bouten dezelfde amplitude spanning σ_a werd opgewekt.

Indien echter de uitwendige belasting die op een verbinding werkt voor de verschillende verbindingen gelijk gehouden wordt, dan zullen de bouten met de laagste voorspanning de hoogste amplitude spanning te verduren krijgen. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de indrukking van het pakket niet lineair verloopt met de kracht. Met behulp van afbeelding 10 kan dit worden aangetoond.



afb. 10

Zoals uit afbeelding 10 blijkt is bij eenzelfde uitwendige belasting (F_t) de variatie in boutkracht (ΔF_b) bij de bouten met de kleinste voorspankracht (F_{v1}) het grootst.

Is het aanspannen tot in het plastisch gebied van de bouten van invloed op de vermoeingssterkte?

De vraag kan worden gesteld of het tot een hoge voorspanning, bijvoorbeeld tot in het plastisch gebied, voorspannen van bouten een nadelige invloed heeft op de vermoeingssterkte van de bouten.

Om op deze vraag een antwoord te krijgen zijn bouten in pakketjes aangedraaid tot grote verlengingen van de bouten optraden en zijn de pakketjes met de bouten daarna dynamisch op trek belast.

Beproefd zijn de bouten M20 x 100 - 10.9.

Door het aandraaien zijn de volgende verlengingen in de bouten opgewekt:

$$\Delta l = 240 \times 10^{-3} \text{ mm}, \quad \text{deze verlenging komt overeen met de verlenging die optreedt bij de vereiste voorspankracht}$$

$$F_v = 0,8 \sigma_{0,2} \cdot A_s = 176 \text{ kN}$$

$$\Delta l = 300 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

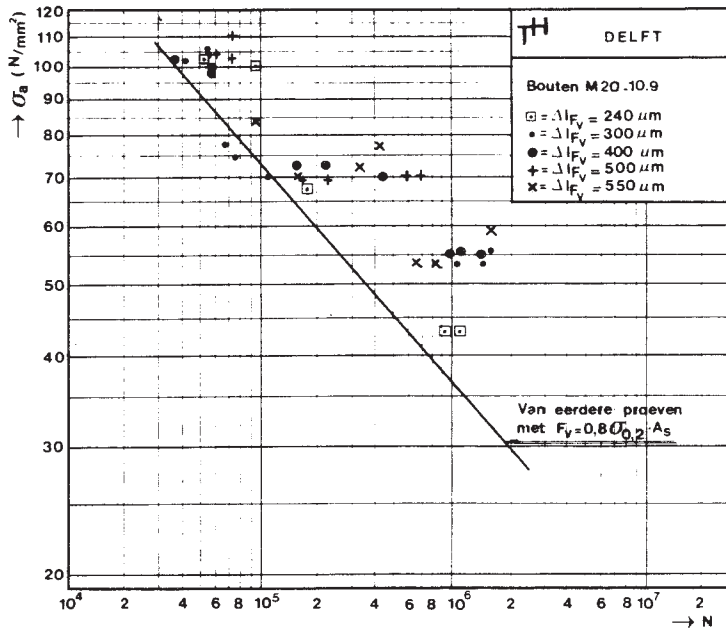
$$\Delta l = 400 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l = 500 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\Delta l = 550 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

Na het aandraaien zijn de pakketjes zodanig dynamisch belast dat de verlenging van de bouten gelijk was aan: 65×10^{-3} , 45×10^{-3} en 35×10^{-3} mm. Deze verlengingen corresponderen met de spanningen 100, 70 en 55 N/mm² op de spanningsdoorsnede.

De resultaten van de vermoeilingsproeven zijn uitgezet in afbeelding 11.



afb. 11

Uit afbeelding 11 blijkt duidelijk dat het voorspannen tot grote voorspankrachten, zelfs tot in het plastisch gebied van de bouten, niet nadelig is voor de vermoeilingssterkte van de bouten.

3. VERMOEIING VAN OP TREK BELASTE BOUTVERBINDINGEN

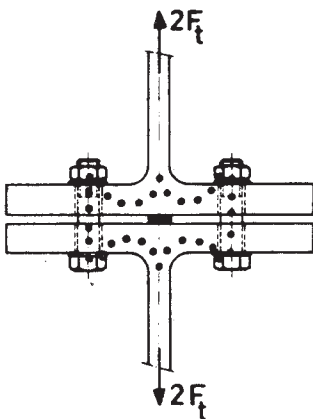
3.1. Enkele beschouwingen

Voor het beoordelen of een op trek belaste verbinding gunstig of ongunstig is ten opzichte van de kans op vermoeiing van de bouten, moeten de stijfheden van de wegen worden beschouwd die de uitwendige trekkracht ter beschikking staan om van het ene constructiedeel naar het andere deel over te gaan.

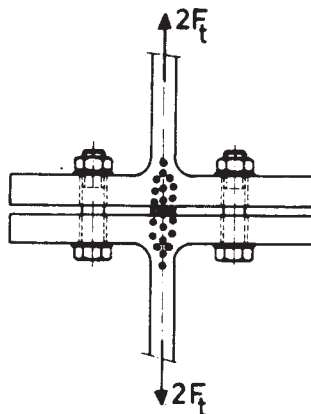
Bij de in de afbeeldingen 12a en 12b getekende verbinding is er door het aanbrengen van een vulstrip voor gezorgd dat de contactdruk, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, optreedt in het midden van de verbinding (in het verlengde van de uitwendige trekkracht $2F_t$).

In de afbeeldingen zijn met stippen de wegen aangegeven die een uitwendige trekkracht in principe ter beschikking staan om van het ene constructiedeel naar het andere over te gaan.

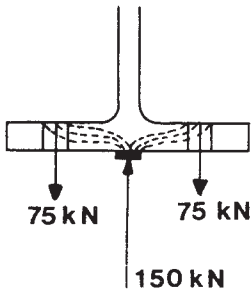
In afbeelding 12a is de weg aangegeven waarbij de overdracht geschiedt door middel van vermeerdering van boutkracht, terwijl afbeelding 12b de weg geeft indien de krachtsoverdracht geschiedt door middel van vermindering van contactkracht.



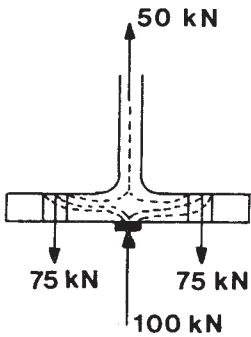
afb. 12a



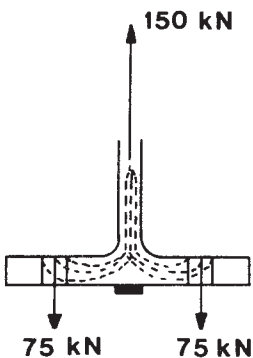
afb. 12b



afb. 13a



afb. 13b



afb. 13c

Door de vermindering van contactkracht vindt eigenlijk geen krachtsoverdracht plaats. Aan de hand van de afbeeldingen 13a, 13b en 13c zal worden aangetoond dat de krachts-overdracht wel via de bouten gaat, maar doordat gelijktijdig vermindering van contactkracht optreedt, de boutkracht niet hoeft toe te nemen.

Is de voorspankracht van de bouten gelijk aan 75kN, dan zal, als er geen uitwendige trekkracht op de verbinding werkt, t.p.v. het contactvlak een contactkracht van 150kN werken. In afbeelding 13a is met streeplijnen aangegeven welke weg de krachten in de flens lopen om evenwicht met elkaar te maken.

Wordt nu een uitwendige trekkracht van 50kN aangebracht dan zal het lijf zich iets in verticale richting verplaatsen, met als gevolg dat de contactkracht snel zal afnemen. Met streeplijnen is in afbeelding 13b ook nu weer aangegeven welke weg de krachten in de flens lopen om evenwicht met elkaar te maken. Elke streeplijn geeft hier de weg aan van een kracht van 25kN.

De uitwendige kracht van 50kN vindt, via de flens, reactie bij de bouten waarbij gelijktijdig een contactkracht van 50kN weg valt, zodat de boutkracht niet in grootte verandert. Zou de uitwendige trekkracht worden opgevoerd tot bijvoorbeeld 150kN, dan vindt de reactie van deze kracht volledig plaats t.p.v. de bouten waarbij gelijktijdig de contactkracht afneemt met 150kN en dus gelijk aan nul wordt, zie afb. 13c.

De grootte van de boutkrachten verandert hierbij niet.

In afbeelding 13c is duidelijk te zien dat de kracht van 150kN via de bouten wordt overgedragen.

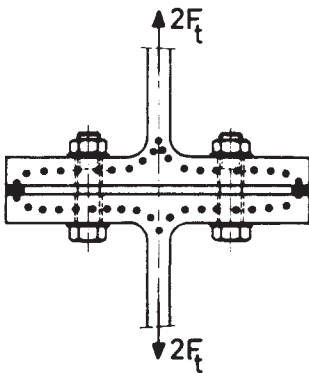
Voor het gemak zal hierna, naast de overdracht via de bouten, toch worden gesproken over krachtsoverdracht via vermindering van contactkracht.

Bij overdracht van een bepaalde uitwendige kracht via de in de afbeeldingen 12a en 12b getekende wegen, zal overdracht via de bouten met een veel grotere vervorming gepaard gaan dan overdracht via vermindering van contactkracht.

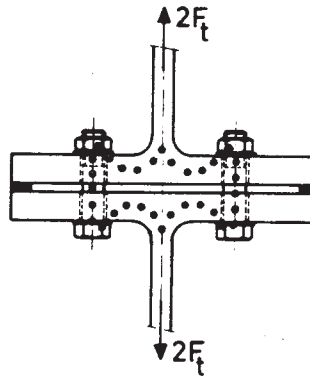
De weg waarbij pas bij grotere vervormingen krachten van enige betekenis worden overgedragen zal in eerste instantie niet de kans krijgen om aan de overdracht mee te doen.

Het is duidelijk dat in dit geval dus in eerste instantie voornamelijk de weg volgens afbeelding 12b gekozen zal worden, totdat de contactkracht opgeheven is; pas daarna zal de weg via de bouten gebruikt worden en zullen de vervormingen en de boutkrachten belangrijk gaan toenemen.

In de afbeeldingen 14a en 14b is een verbinding van twee T-stukken getekend waarbij tussen de flenzen vulstripjes aangebracht zijn langs de randen. Ook hierin zijn met stippen weer de twee wegen aangegeven die in principe voor de krachtsoverdracht ter beschikking staan.



afb. 14a



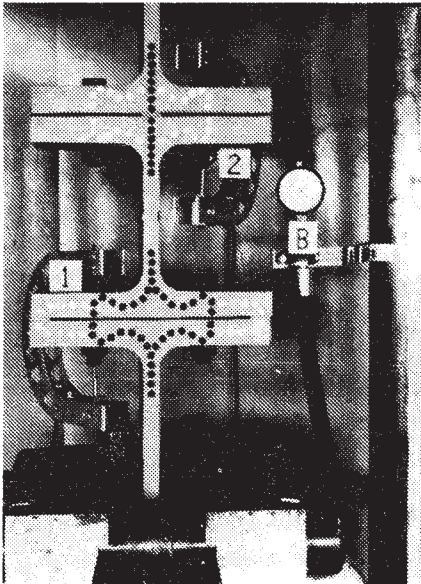
afb. 14b

Daar de overdracht via vermeerdering van boutkracht met de kleinste vervorming gepaard gaat, zal in dit geval deze weg gekozen worden en niet de weg via vermindering van contactkracht.

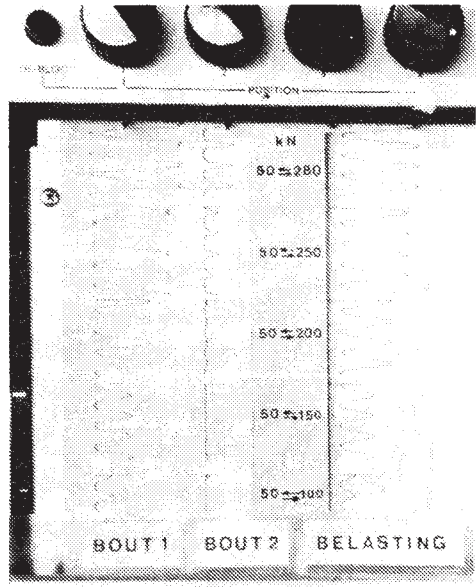
Voor de kans op vermoeiing van de bouten is dit, in verband met de grote variatie in boutkracht (ΔF_b), een uitermate ongunstige situatie. In dit geval maakt het zelfs geen verschil of de bouten wel of niet zijn aangedraaid.

De invloed van de plaats van het contactvlak op de grootte van de variatie in boutkracht is ook duidelijk aangetoond met het in afbeelding 15 gegeven demonstratieproefstuk. In dit proefstuk zijn twee verbindingen verwerkt welke bij belasting in de trekbank dus dezelfde belasting moeten overbrengen. Bij de bovenste verbinding ligt het contactvlak in het verlengde van de lijven, bij de onderste verbinding liggen de contactvlakken langs de randen.

Met zwarte stippen is op dit proefstuk de weg aangegeven die voor de krachtsoverdracht gekozen wordt. Met witte stippen is de weg aangegeven die wel beschikbaar is, maar die niet aan bod komt omdat deze met grotere vervormingen gepaard gaat.



afb. 15



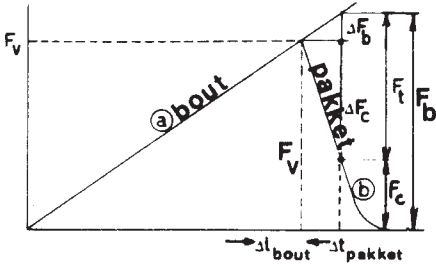
afb. 16

In afbeelding 16 zijn de met een schrijver gemeten variaties in boutkrachten gegeven bij de verschillende belastingstrappen. De ondergrens van de belasting is steeds gelijk gehouden aan 50kN, terwijl de bovengrens eerst in stappen van 50kN is verhoogd en de laatste stap met 30kN.

De bout in de verbinding met het contactvlak in het midden (bout 2) blijkt aanvankelijk niets te merken van de variërende uitwendige trekkracht.

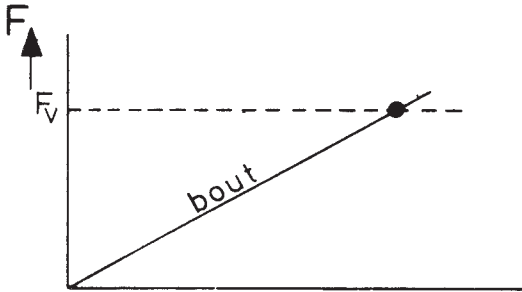
De bout in de onderste verbinding (bout 1) krijgt direct al een belangrijke variatie in kracht te verduren. Deze bout zou reeds in een vroeg stadium breken als gevolg van vermoeiing. De voorspankracht van de bouten bedroeg 100kN, zodat de contactkracht 200kN was. Bij de bovenste verbinding moest deze contactkracht eerst worden opgeheven alvorens de bout enige variatie in kracht vertoonde. Bij de bovenste verbinding moeten de uitwendige trekkrachten dus groter zijn dan de voorspankrachten om ooit breuk t.g.v. vermoeiing te kunnen krijgen.

Voor het bepalen van de variatie in boutkracht (ΔF_b) is in het verleden vaak gebruik gemaakt van de in afbeelding 17 getekende driehoekjes.



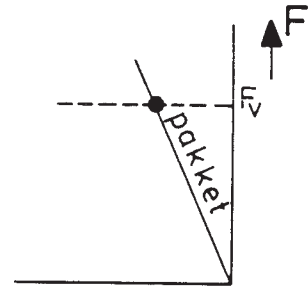
afb. 17

Met behulp van de afbeeldingen 18a en 18b kan worden aangegeven hoe deze driehoekjes tot stand komen.



afb. 18a

→ Δl



afb. 18b

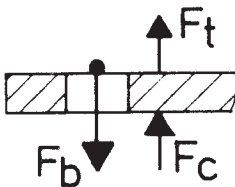
Δt ←

Afbeelding 18a geeft het verband tussen boutkracht en boutverlenging.

Afbeelding 18b geeft het verband tussen pakketkracht en pakketindrukking.

Als de bout is aangespannen tot F_v dan heerst deze kracht in de bout en ook in het pakket. Worden de afbeeldingen 18a en 18b nu naar elkaar toe geschoven dan ontstaat afbeelding 17.

Bij beschouwing van het evenwicht van de plaat in afbeelding 18c volgt uit



afb. 18c

$$\Sigma V = 0$$

dat: $F_b = F_t + F_c$

Waarin: F_b = boutkracht

F_t = uitwendige trekkkracht

F_c = contactkracht

Wordt nu de uitwendige trekkkracht in afbeelding 17 uitgezet tussen de boutlijn en de pakketlijn, dan blijkt inderdaad te worden voldaan aan:

$$F_b = F_t + F_c.$$

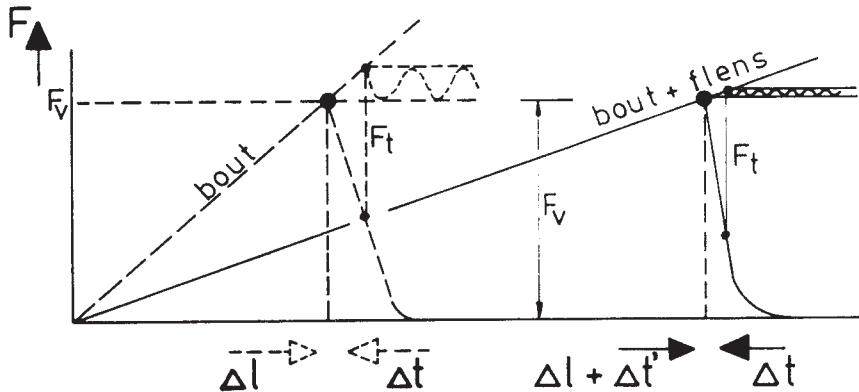
Indien de uitwendige trekkkracht varieert tussen 0 en F_t , dan zal daardoor de boutkracht variëren met ΔF_b , zie afbeelding 17.

Bij deze beschouwingen werd gesteld dat lijn (a) in afbeelding 17 het verband weergaf tussen boutkracht en boutverlenging en lijn (b) het verband tussen pakketkracht en pakketindrukking.

Gebleken is dat deze beschouwing onvoldoende is.

In afbeelding 18d zijn met een streeplijn de driehoekjes getekend voor het geval wordt uitgegaan van bovenstaande beschouwing.

Tevens zijn met een getrokken lijn de driehoekjes getekend voor het geval wordt uitgegaan van een beschouwing welke vollediger is.



afb. 18d

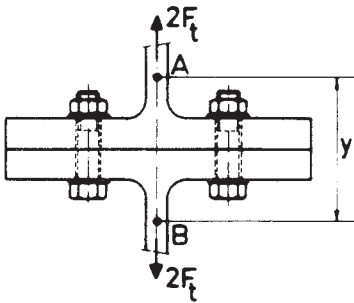
Bij het tekenen van de driehoekjes kan niet worden volstaan met enerzijds de stijfheid van de bout en anderzijds de stijfheid van het pakket, maar moet worden beschouwd:

- de totale vervorming die optreedt als krachtsoverdracht via de bouten plaats vindt, dus *vervorming bout + vervorming flens*.
- de vervorming die optreedt als "krachtsoverdracht" plaats vindt via vermindering van contactkracht; hierbij moet dus rekening worden gehouden met de *plaats van de contactkracht t.o.v. de plaats van de uitwendige trekkkracht*.

Bij krachtsoverdracht via de bouten zal de vervorming van de flens vaak aanzienlijk zijn omdat dit voornamelijk buigingsvervormingen zijn. Bij een gunstige ligging van de contactkracht kan de flensvervorming bij krachtsoverdracht via contactkrachtvermindering klein zijn omdat dit dan normaalkrachtvervormingen zijn. Hieruit volgt dat als goed geconstrueerd wordt, de krachtsvariatie in de bout zeer klein blijft en voor vermoeiing van de bouten niet gevreesd behoeft te worden; zie ook afbeelding 18d.

In onderstaande beschouwing zal worden aangegeven hoe de grafieken voor het bepalen van ΔF_b tot stand kunnen komen.

Voor deze beschouwing wordt bij de in afbeelding 19 getekende verbinding een punt A gekozen op het bovenste T-stuk en een punt B op het onderste T-stuk; beide punten liggen op de werklijn van de uitwendige trekkkracht $2F_t$.

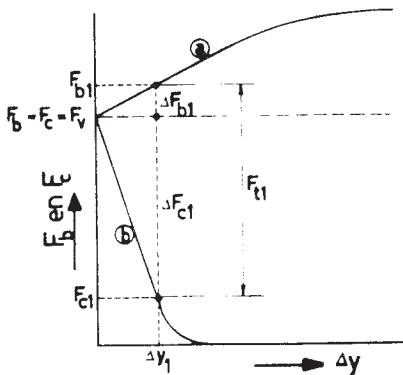


afb. 19

Nadat de bouten aangedraaid zijn is de onderlinge afstand van de punten A en B gelijk aan y . Indien nu de uitwendige belasting $2F_t$ gaat werken dan zal de afstand y toenemen met een zekere afstand Δy .

De vraag die nu gesteld moet worden luidt:
Welke verandering treedt op in de boutkracht en welke verandering in de contactkracht, indien tussen de punten A en B een bepaalde afstandsverandering Δy optreedt.

In afbeelding 20 zijn voor een bepaalde verbinding de verandering in boutkracht en de verandering in contactkracht, als functie van de afstandsverandering Δy , in een grafiek weergegeven.



afb. 20

Nadat de bouten aangedraaid zijn is de contactkracht F_c gelijk aan de boutkracht F_b en zijn beide gelijk aan de voorspankracht F_v .

De afstand tussen de punten A en B is dan gelijk aan y .

Uitgaande van deze uitgangstoestand stellen nu de lijnen a en b in afbeelding 20 het volgende voor:

lijn a : deze geeft de toename van de boutkracht als functie van de afstandsverandering Δy .

lijn b : deze geeft de afname van de contactkracht als functie van de afstandsverandering Δy .

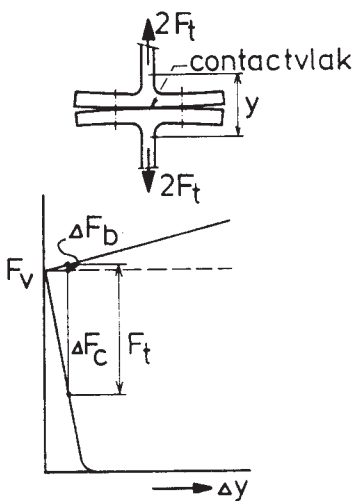
Wordt de verbinding belast door een uitwendige kracht $2F_{t1}$ dan neemt de afstand y toe met Δy_1 .

Bij deze afstandsverandering neemt de boutkracht toe met ΔF_{b1} en neemt de contactkracht af met ΔF_{c1} .

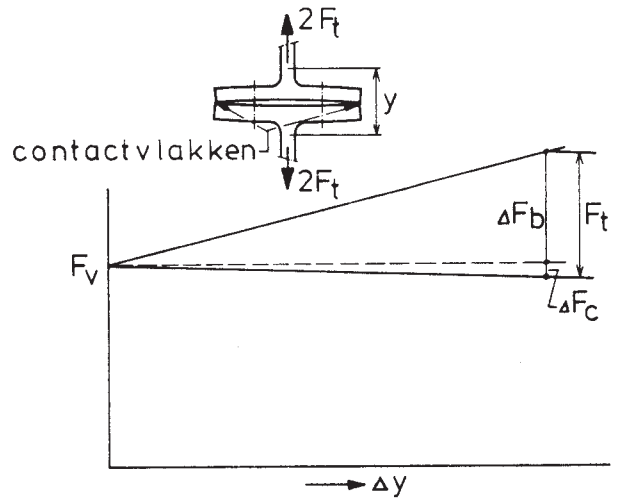
De toename van de boutkracht en de afname van de contactkracht zijn samen gelijk aan de uitwendige trekkracht dus: $\Delta F_{b1} + \Delta F_{c1} = F_{t1}$ zie afb. 20 (alle krachten worden per bout beschouwd).

Het is duidelijk dat het verloop van de lijn a niet alleen afhangt van de stijfheid van de bout, maar vooral ook van de buigstijfheid van de flens. Het verloop van lijn b hangt af van de stijfheid van de flens. Afhankelijk van de plaats van de contactkracht moet voor de stijfheid van de flens of met alleen normaalkrachtvervorming of ook met buigingsvervorming rekening worden gehouden.

In de afbeeldingen 21a en 21b zijn grafieken getekend voor twee verbindingen waarbij de plaats van de contactkracht verschillend is.



afb. 21a



afb. 21b

In afbeelding 21a neemt de contactkracht reeds bij een zeer kleine waarde van Δy zeer sterk af (normaalkrachtvervorming), terwijl bij dezelfde waarde van Δy de boutkracht relatief veel minder sterk toeneemt (vervorming t.g.v. flensbuiging en verlenging van de bouten).

Bij een bepaalde uitwendige trekkracht F_t is de toename Δy bij de verbinding volgens afbeelding 21b veel groter dan bij de verbinding volgens afbeelding 21a. De oorzaak hiervan ligt in het feit dat bij de verbinding volgens afbeelding 21b voor de overdracht van F_t de flens op buiging belast wordt, zowel voor de overdracht via de bouten als via contactkrachtvermindering.

Bij de verbinding volgens afbeelding 21a vindt de overdracht hoofdzakelijk via contactkrachtvermindering plaats.

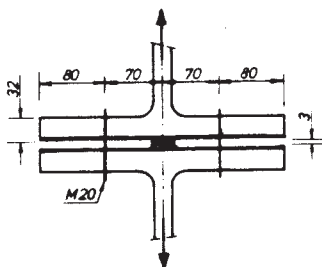
In verband met de plaats van de contactdruk gaat dit bij de verbinding volgens afbeelding 21a met normaalkrachtvervorming gepaard en deze is zeer gering.

Ook blijkt uit de afbeeldingen 21a en 21b heel duidelijk dat bij een bepaalde uitwendige trekkracht F_t de toename van de boutkracht (ΔF_b) in het geval van afbeelding 21a veel kleiner is dan in het geval van afbeelding 21b. Bij de situatie volgens afbeelding 21a is de kans op vermoeiing van de bouten dus aanzienlijk kleiner dan bij de situatie volgens afbeelding 21b.

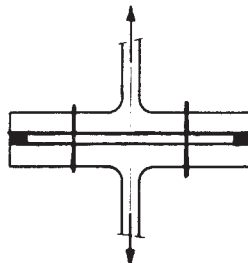
3.2. Resultaten van proeven met op trek belaste boutverbindingen

Zoals hiervoor reeds is aangetoond, is de plaats van de contactdruk, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, van essentieel belang voor de kans op vermoeiing van de bouten.

In verband hiermee zijn bij de beproeving proefstukken gebruikt waarbij met behulp van losse vulstrippen de plaats van de contactdruk kon worden gewijzigd, zie de afbeeldingen 22a en 22b.



afb. 22a

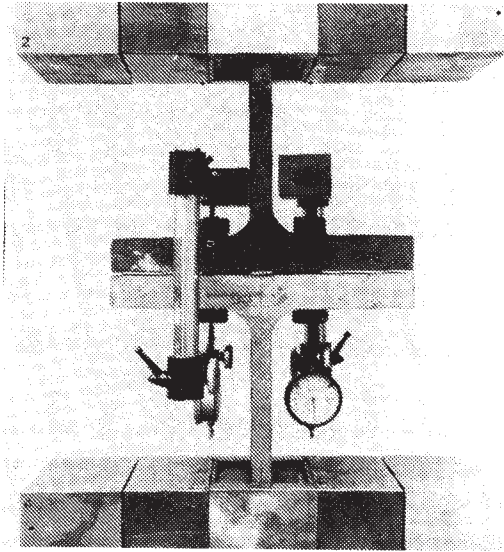


afb. 22b

Naast het wijzigen van de plaats van de contactdruk zijn verder gevarieerd:

- de afstand van de bouten tot de nek van de T-stukken
(alleen bij dynamisch belaste proefstukken)
- de materiaalkwaliteit van de bouten
- de mate van aandraaien (de grootte van de voorspankracht).

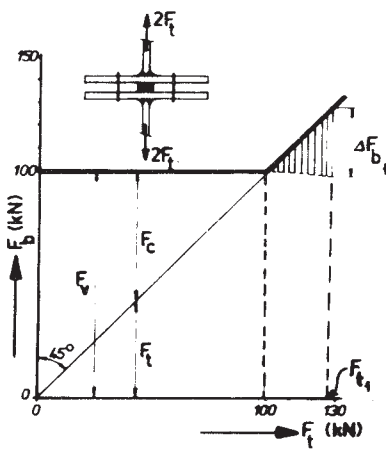
Enkele T-stukken zijn zonder vulstrippen samengebouwd en beproefd. Een gedeelte van de proefstukken is uitsluitend statisch belast; het overige deel van de proefstukken is dynamisch belast in een 60 tf's bank, fabriikaat Schenck, zie afbeelding 23.



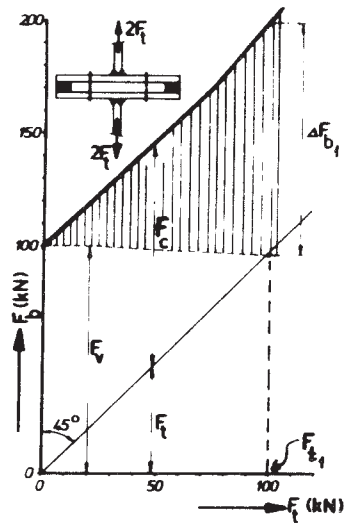
afb. 23

Resultaten statische proeven

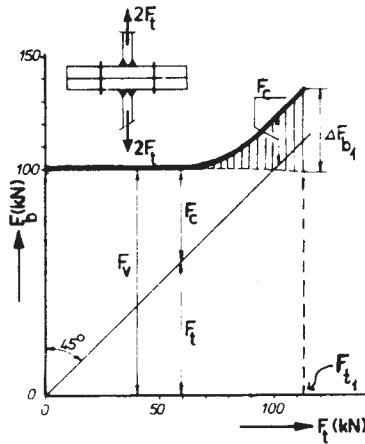
De statische proeven hadden als doel om, voor verschillende situeringen van de contactdruk, het verloop te bepalen van de boutkracht F_b als functie van de uitwendige trekkraft F_t . Van de belangrijkste statisch belaste proefstukken zijn de resultaten weergegeven in de afbeeldingen 24a, 24b en 24c.



afb. 24a



afb. 24b



afb. 24c

Zoals uit de grafieken blijkt zijn de bouten aangedraaid tot een voorspankracht van 100kN ($F_v = 100\text{kN}$).

In de grafieken is langs de horizontale as de uitwendige trekkracht F_t uitgezet (per bout gerekend, dus F_t i.p.v. $2F_t$). Langs de verticale as is de boutkracht uitgezet. De lijn die onder 45° is getrokken geeft in verticale zin ook de grootte van F_t weer. Beschouwen we afbeelding 24a dan blijkt dat bij het opvoeren van de uitwendige trekkracht F_t , de boutkracht $F_b = F_v$ constant blijft. De contactkracht F_c wordt tijdens het opvoeren van F_t steeds kleiner. Pas als de contactkracht F_c gelijk aan nul geworden is neemt de boutkracht toe. In dit geval gaat de boutkracht dus pas voor het eerst toenemen als de uitwendige trekkracht F_t gelijk geworden is aan de oorspronkelijk aangebrachte voorspankracht $F_v = 100\text{kN}$! Dit betekent dat in dit geval zolang de uitwendige trekkracht F_t kleiner is dan de oorspronkelijk aangebrachte voorspankracht F_v , de bout niets merkt van de uitwendige belasting, ook niet als deze varieert van grootte, de boutkracht blijft constant van grootte. De krachtsoverdracht geschiedt dus volledig door vermindering van contactkracht.

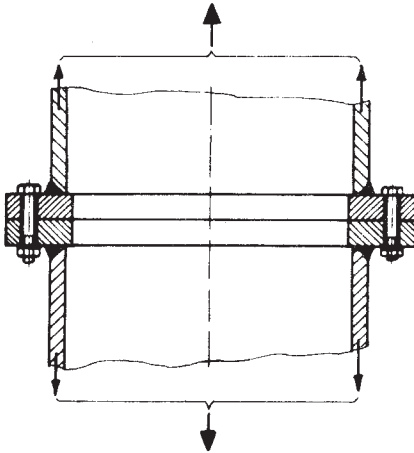
In de afbeeldingen is met een verticale arcering aangegeven de grootte van de variatie van de kracht in de bout (ΔF_b) indien de uitwendige trekkracht F_t varieert tussen een bepaalde waarde en een waarde kleiner of gelijk aan die F_t waarbij voor het eerst een toename van de boutkracht werd geconstateerd.

De in afbeelding 24b gegeven situatie is voor de bouten aanzienlijk ongunstiger. De boutkracht neemt hierbij toe zodra op de verbinding een uitwendige trekkraft F_t gaat werken.

De toename van de kracht in de bout (ΔF_b) blijkt ongeveer gelijk te zijn aan de uitwendige trekkraft F_t . Voor de kans op vermoeiing van de bouten is dit een uitermate ongunstige situatie.

De contactkracht (F_c) blijft ongeveer gelijk aan de oorspronkelijk aangebrachte voorspankracht F_v . De krachtsoverdracht geschiedt practisch volledig door vermeerdering van de boutkracht.

Bij de in afbeelding 24c gegeven situatie zonder vullingen ligt het gedrag tussen de gedragingen in van de situaties in de afbeeldingen 24a en 24b. Ook bij deze verbinding was de voorspankracht $F_v = 100\text{kN}$. De boutkracht begint hierbij voor het eerst toe te nemen bij een uitwendige trekkraft $F_t = 60\text{kN}$.



afb. 25

Daar in de praktijk ook vaak asymmetrisch belaste boutverbindingen voorkomen (bijvoorbeeld flensverbindingen bij buisprofielen, zie afbeelding 25), zijn ook verbindingen beproefd waarbij slechts één bout was aangebracht.

De resultaten van de belangrijkste proefstukken zijn gegeven in de afbeeldingen 26a en 26b.

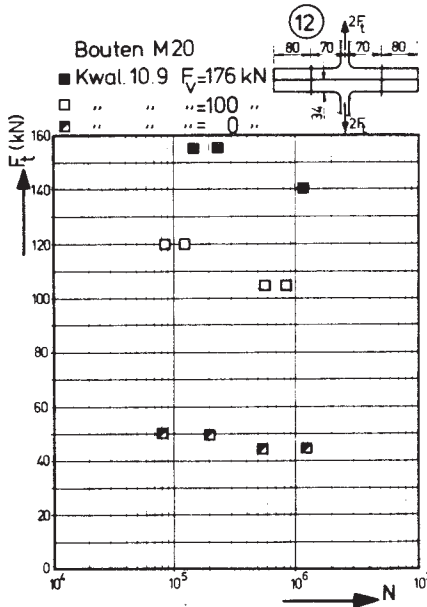
Bij de situatie welke aangegeven is in afbeelding 26a blijkt de boutkracht pas toe te nemen als de trekkraft $F_t \geq 50\text{kN}$.

De contactkracht welke in het verlengde van F_t lag bedroeg eveneens 50kN , namelijk $\frac{1}{2}F_v = 50\text{kN}$.

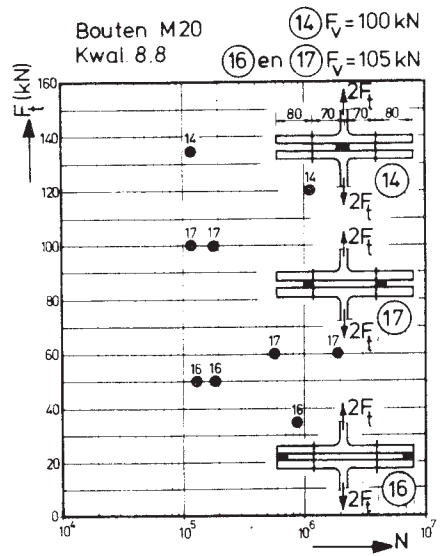
Proefstukken met twee bouten

De invloed van de grootte van de voorspankracht is te zien in afbeelding 27. In deze afbeelding is langs de verticale as de maximale uitwendige trekkracht uitgezet die op de verbinding werd uitgeoefend. Tijdens de beproeving is de belasting gevarieerd tussen deze maximale trekkracht en nul. Langs de horizontale as is het aantal belastingwisselingen uitgezet waarbij breuk van een bout geconstateerd werd. Heel duidelijk blijkt dat de grootte van de voorspankracht van grote invloed is op de vermoeingssterkte van de bouten en dat indien $F_v = 0$, zelfs heel geringe uitwendige trekkrachten tot vermoeing van de bouten kunnen leiden.

Om de kans op vermoeing van de bouten zo gering mogelijk te doen zijn, moeten de voorspankrachten zo groot mogelijk gekozen worden.



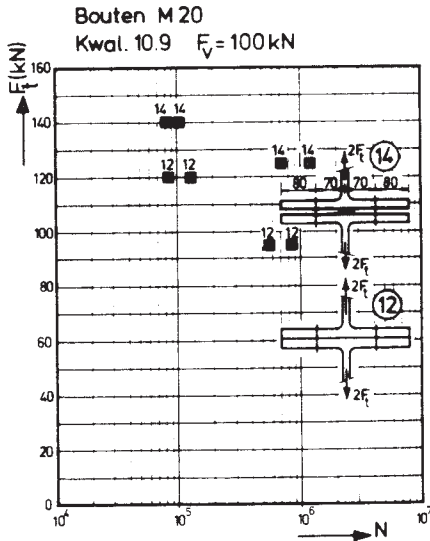
afb. 27-Invloed voorspankracht



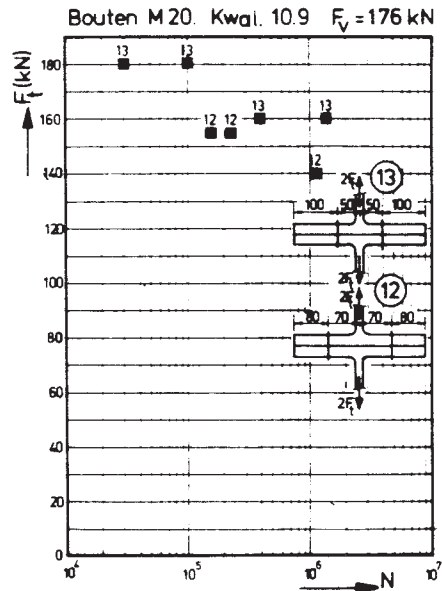
afb. 28-Invloed plaats contactdruk

De invloed van de plaats van de contactdruk, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, blijkt uit afbeelding 28. De invloed op de vermoeingssterkte is uitermate groot. Indien de contactvlakken zo ver mogelijk van de uitwendige trekkracht verwijderd zijn (proefstuk 16) dan worden zeer lage waarden geconstateerd. Deze laatste waarden liggen, ondanks de voorspankracht van 105kN, op hetzelfde lage niveau als de waarden die in afbeelding 27 zijn uitgezet voor niet aangedraaide bouten!

Afbeelding 29 geeft de resultaten van proefstukken met en zonder vulstrip bij gelijke voorspankrachten. Bij het proefstuk zonder vulstrip waren de contactvlakken geschaafd. Bij het proefstuk met vulstrip (proefstuk 14) zijn hogere vermoeiingssterkten geconstateerd.



afb.29-Invloed vulstrip

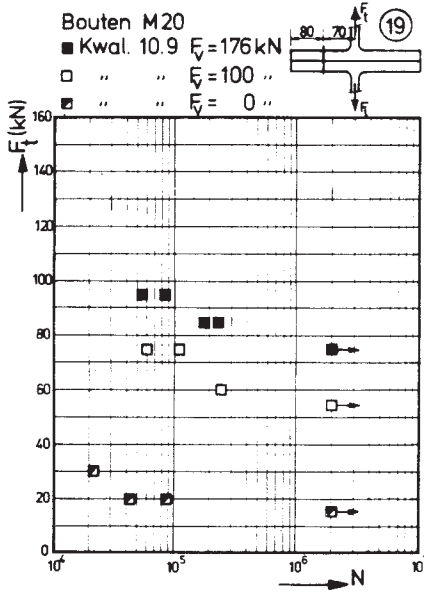


afb.30-Invloed afstand bout tot nek

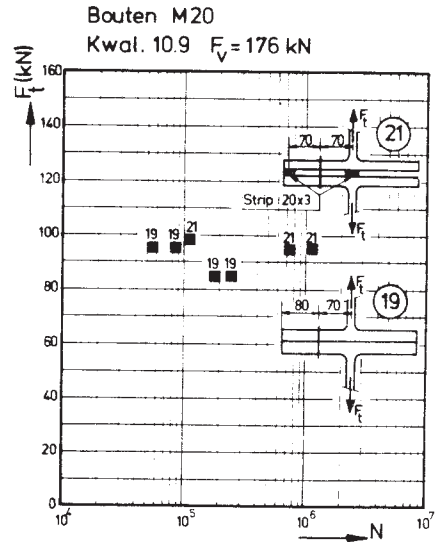
In afbeelding 30 zijn de resultaten uitgezet van twee proefstukken zonder vulstrippen met verschillende afstanden van de bouten tot de werklijn van de uitwendige trekkkracht. Het proefstuk met de kleinste afstand gaf de hoogste waarden (proefstuk 13).

Proefstuk met één bout

Afbeelding 31 geeft voor een proefstuk zonder vulstrippen de vermoeiingssterkten bij verschillende voorspankrachten. Naarmate de voorspankracht groter is blijkt ook hier de vermoeiingssterkte groter te zijn. Voor het geval $F_V = 0$ treedt hier, bij extreem lage waarden van F_t , reeds vermoeiing van de bouten op.



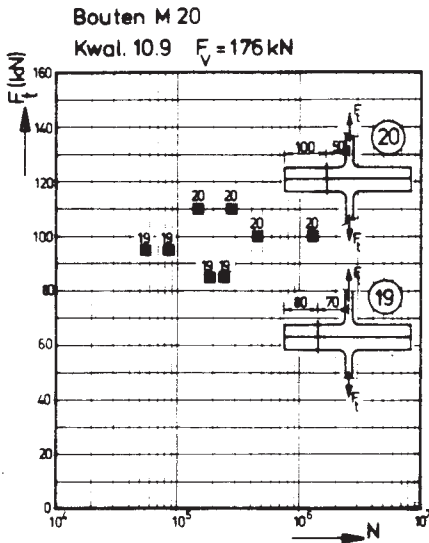
afb.31-Invloed voorspankracht



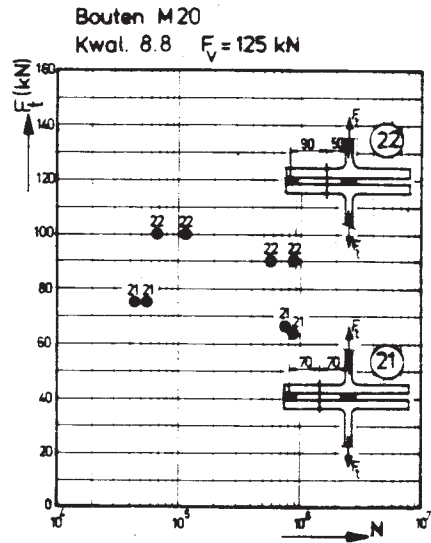
afb.32-Invloed vulstrip

Afbeelding 32 geeft resultaten van enkele proefstukken met en zonder vulstrippen. Het proefstuk met vulstrippen geeft hogere waarden dan het proefstuk zonder vulstrippen. Het is verklaarbaar dat in dit geval de kracht F_t niet veel groter kan worden dan $\frac{1}{2}F_V$ (de contactkracht t.p.v. de vulstrip in het verlengde van F_t).

De boutkracht zal, zodra deze contactkracht opgeheven is, door de hefboomswerking snel toenemen. De zekerheid bestaat echter dat bij uitwendige trekkrachten kleiner of gelijk aan de contactkracht t.p.v. de vulstrip, gelegen in het verlengde van F_t , nooit breuk van de bout tengevolge van vermoeiing kan optreden. Bij verbindingen zonder vulstrip is niet bekend waar de contactkracht precies ligt; hierdoor kan er ook geen zekerheid worden verkregen over de grootte van de belasting die kan worden aangebracht zonder dat gevaar voor vermoeiing van de bouten bestaat.



afb.33-Invloed afstand bout tot
nek, zonder vullingen



afb.34-Invloed afstand bout tot
nek, met vullingen

Afbeelding 33 geeft de invloed te zien van de afstand van de bout tot de werklijn van F_t indien geen vulstrippen worden toegepast. Een kleinere afstand geeft hogere waarden voor F_t .

Afbeelding 34 geeft hetzelfde, echter voor het geval dat wel vulstrippen worden toegepast. Ook hier is de kleine afstand gunstiger hetgeen volkomen logisch is daar hierbij de contactkracht t.p.v. de vulstrip, gelegen in het verlengde van F_t , groter is.

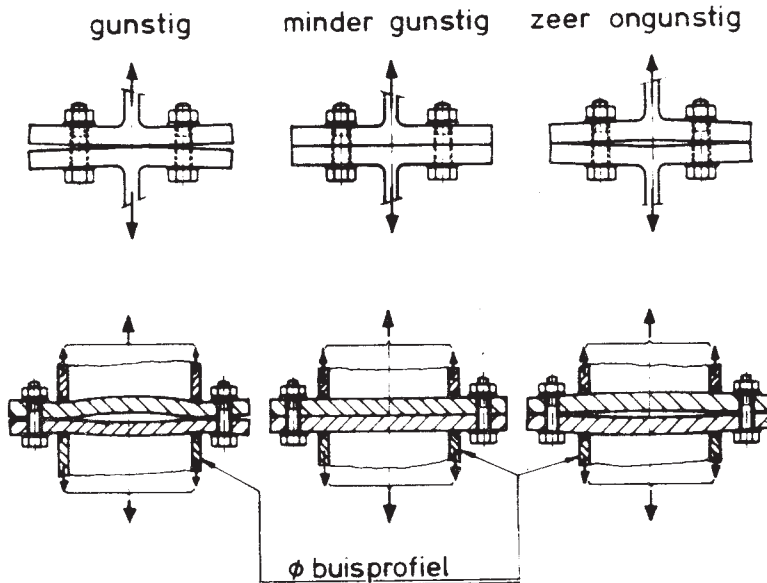
Voor 'Proeven voor de bepaling van de invloed van een ongelijke verdeling van de contactdruk op de krachtsverdeling over bouten en lassen', zie Appendix A, blz. 86.

3.3. Conclusies proeven met op trek belaste boutverbindingen

- De plaats van de contactkracht, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, is van grote invloed op de kans op vermoeiing van de bouten.
De contactkracht moet op een zodanige plaats werken dat de krachtsoverdracht via vermindering van contactkracht, in vergelijking met de krachtsoverdracht via vermeerdering van boutkracht, met zo gering mogelijke vervormingen gepaard gaat.
- Indien de contactvlakken op een gunstige plaats worden gehouden dan is er geen kans op vermoeiing van de bouten zolang de trekkrachten kleiner zijn dan de contactkracht. Hierdoor kan in vele gevallen een ingewikkelde berekening naar de vermoeiing van de bouten komen te vervallen (wel moeten eventueel aanwezige lassen voor de overbrenging van de trekkracht naar de flens, op vermoeiing worden berekend).
- Om de kans op vermoeiing zo klein mogelijk te maken moeten de voorspankrachten zo groot mogelijk worden gehouden.
- Opdat voldoende zekerheid wordt verkregen over de grootte van de voorspankracht, is in vele gevallen het aanspannen tot in het plastisch gebied van de bout sterk aan te bevelen.
- Het is meestal gunstig de afstand van de bouten tot het onderdeel waarin de trekkracht werkt zo klein mogelijk te kiezen.

3.4. Practische aanwijzingen voor het construeren van op trek belaste boutverbindingen

In afbeelding 35 zijn, met betrekking tot vermoeiing van de bouten, voor een verbinding van twee T-stukken en voor een buisverbinding met blinde flenzen enkele gunstige en minder gunstige uitvoeringen getekend.



afb. 35

Uit deze afbeeldingen blijkt dat het contactvlak zo dicht mogelijk moet liggen bij het onderdeel waarin de trekkracht werkt. Bij de T-stukken is dit onderdeel het lijf, bij de buisprofielen is dit niet het hart van de buis maar de buiswand.

Indien de constructiedelen, waarin de uitwendige trekkrachten werken, niet in elkaars verlengde liggen, dan wordt het bepalen van de gunstige ligging van de contactvlakken iets gecompliceerder.

In afbeelding 36 is een verbinding getekend waarbij de constructiedelen waarin de uitwendige trekkrachten werken niet volledig in elkaars verlengde liggen. Voor het scheppen van een gunstige situatie voor de bouten moet getracht worden de uitwendige trekkrachten de mogelijkheid te bieden zoveel mogelijk recht door te lopen.

Als de uitwendige trekkracht bij overdracht via vermindering van contactkracht recht door kan lopen dan gaat dit gepaard met normaalkrachtvervormingen welke in vergelijking met buigingsvervormingen gering zijn, zodat de contactkracht dan sterk afneemt zonder dat de boutkracht noemenswaard toeneemt.

In afbeelding 36 is met een onderbroken arcering aangegeven waar in dit geval de contactkracht, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, geconcentreerd moet worden.

Daar waar de constructiedelen, waarin de uitwendige trekkrachten werken, elkaar kruisen (zie bovenaanzicht in afbeelding 36), is dus de gunstigste plaats voor de contactvlakken.

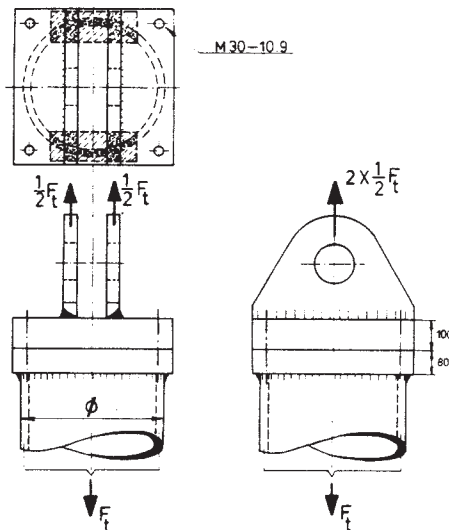
Op deze plaatsen kunnen bijvoorbeeld dunne vulplaatjes aangebracht worden waarmee dan de gunstigste plaats van de contactkracht wordt verkregen. Bij een verbinding zoals getekend in afbeelding 36 is in het geval waarbij geen vullingen aangebracht waren in een zeer vroeg stadium breuk van de bouten geconstateerd, namelijk:

F_t van 0 $\Rightarrow$ 200kN gaf na 90.000 wiss.breuk

F_t van 0 $\Rightarrow$ 110kN gaf na 10^6 wiss.breuk

Er trad dus reeds vermoeiing van de bouten op als de belasting per bout gelijk was aan $\frac{110}{4} = 27,5\text{kN}$. Dit is onwaarschijnlijk laag als men weet dat de statische breekkracht van bouten M30-10.9 ongeveer 560kN bedraagt!

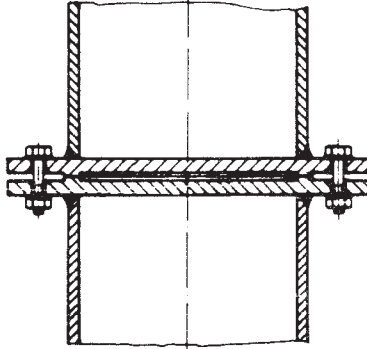
Nadat vullingen aangebracht waren is bij deze belastingen geen breuk meer geconstateerd.



afb. 36

Bij het ontwerpen kan vaak al gezorgd worden voor een goede situering van de contactdruk.

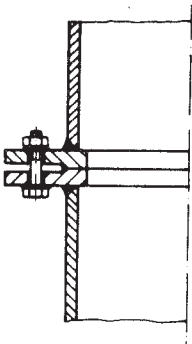
Een blinde flensverbinding bij buisprofielen kan bijvoorbeeld worden uitgevoerd als in afbeelding 37 weergegeven.



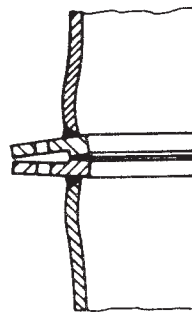
afb. 37

Indien de flenzen niet mechanisch bewerkt worden dan kan ook tussen de flenzen een dunne vulring (bijvoorbeeld 1 mm dik) in het verlengde van de buiswand worden aangebracht.

Een open flensverbinding kan worden uitgevoerd als gegeven in afbeelding 38. Dit kan bij relatief dunne wanden leiden tot vervormingen tijdens het aandraaien van de bouten, zie afbeelding 39.



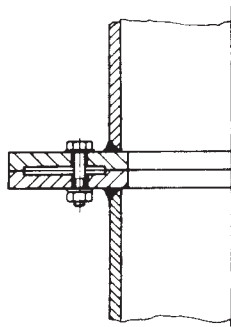
afb. 38



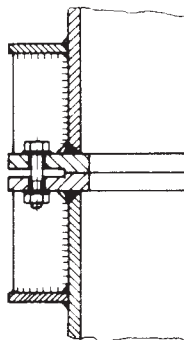
afb. 39

Om deze vervormingen te voorkomen kunnen bijvoorbeeld uitvoeringen gekozen worden als aangegeven in de afbeeldingen 40 en 41. Om bij de uitvoering volgens afbeelding 40 te zorgen dat door het aandraaien van de bouten voldoende druk komt ter plaatse van het contactvlak dat in het verlengde van de buiswand ligt, moeten de bouten zo dicht mogelijk bij de buiswand worden geplaatst.

Bij de uitvoering volgens afbeelding 41 komt de volledige boutkracht, die door het aandraaien wordt opgewekt, terecht op het contactvlak dat in het verlengde van de buiswand is gelegen.



afb. 40

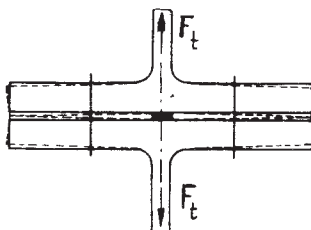


afb. 41

Indien de flenzen niet mechanisch bewerkt worden dan kunnen bij de uitvoeringen volgens de afbeeldingen 40 en 41 de contactvlakken worden verkregen door op de vereiste plaatsen dunne vulringen aan te brengen.

Uit het voorgaande is gebleken dat de kracht, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt (voorspankracht), zo groot mogelijk moet zijn om de kans op vermoeiing van de bouten zo klein mogelijk te maken. Ook omdat anders niet voldoende zekerheid wordt verkregen over de grootte van de voorspankracht, is aanspannen tot in het plastisch gebied van de bout sterk aan te bevelen.

Bij een verbinding volgens afbeelding 42 is het mogelijk dat de flenzen niet sterk genoeg zijn om de normale voorspankracht op te nemen. Tijdens het aandraaien van de bouten kan in de flens t.p.v. de nek het vloeimoment worden



afb. 42

bereikt, de flenzen gaan dan sterk doorbuigen, zie de streeplijnen in afbeelding 42.

Indien in verband met deze flensbuiging kleinere voorspankrachten aangehouden zouden moeten worden dan zullen de bouten t.g.v. vermoeiing bij kleinere uitwendige trekkrachten bezwijken.

Om te zorgen dat de volledige voorspankracht aangebracht kan worden kunnen allerlei voorzieningen worden getroffen. Zo kan bijvoorbeeld gezorgd worden voor een andere situering van de contactvlakken. In de afbeeldingen 43a t/m 43c, blz. 37, zijn voor verschillende situeringen van de contactvlakken de resultaten gegeven van statische proeven. De gunstigste resultaten worden hier verkregen met de situering van de contactvlakken volgens afbeelding 43b, blz. 37.

Dat bij het proefstuk in afbeelding 43a de boutkracht bij een lagere F_t begint toe te nemen vindt zijn oorzaak in het feit, dat het middengedeelte niet oneindig stijf is en door het contact dat langs de randen aanwezig is, een zekere hefboomswerking gaat optreden (prying force).

In afbeelding 43c is ter vergelijking met streeplijnen aangegeven wat de toename van de boutkracht is als de voorspankracht $F_v = 100\text{kN}$ bedraagt in plaats van $F_v = 176\text{kN}$ en er alleen een contactvlak aanwezig is in het verlengde van F_t , zie afbeelding 42. Hierbij is verondersteld dat de voorspankracht niet groter kan zijn dan 100kN daar anders de flenzen te veel zouden vervormen. Indien de uitwendige trekkracht bijvoorbeeld gelijk is aan F_{t1} dan is er bij de twee verschillende gevallen een duidelijk verschil in de toename van de boutkracht (ΔF_{b1}), zie afbeelding 43c.

In de afbeeldingen 44a t/m 44c, blz. 38, zijn de resultaten weergegeven van statische proeven op een proefstuk dat versterkt is d.m.v. ingelaste ruggen. Hierdoor was het mogelijk om toch de volledige voorspankracht $F_v = 176\text{kN}$ aan te brengen, terwijl alleen een contactvlak in het verlengde van F_t aanwezig was.

De gunstigste resultaten van het met ruggen versterkte proefstuk zijn verkregen voor het geval waarbij alleen contactvlakken in het verlengde van de ruggen aanwezig waren, zie afbeelding 44c, blz. 38.

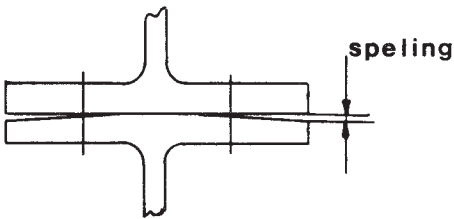
In het geval volgens afbeelding 44a begint de boutkracht reeds in een vroeg stadium toe te nemen. Dit komt omdat de ruggen de weg naar de bouten stijver maken. Dit resultaat was aanleiding om te zorgen dat ook contactvlakken in het verlengde van de ruggen kwamen. De kracht die via de ruggen loopt kan dan ook via vermindering van contactdruk worden overgedragen met als gevolg een kleinere toename van de boutkracht, zie afbeelding 44b, blz. 38.

Het toepassen van losse vullingen ter verkrijging van een gunstige plaats van de contactvlakken kan in de praktijk moeilijkheden geven.

Gunstige situaties kunnen ook worden verkregen door mechanische bewerking van de contactvlakken.

In afbeelding 45a t/m 45c zijn enkele resultaten voor verschillende mechanische bewerkingen uitgezet. Bij het proefstuk volgens afbeelding 45a zijn de contactvlakken uitsluitend geschaafd. Bij het proefstuk volgens afbeelding 45b is bovendien nog materiaal rondom het gat weggefreest, terwijl bij het proefstuk volgens afbeelding 45c ook nog de contactvlakken naast de gaten iets afgeschaafd zijn, zodat hierbij alleen een contactvlak in het middelste deel aanwezig was. Zoals te verwachten was, zijn de resultaten van dit laatste proefstuk uitermate gunstig. De boutkracht begint hierbij pas voor het eerst toe te nemen als de uitwendige trekkracht gelijk is aan 82% van de voorspankracht.

De juiste plaats van het contactvlak kan ook worden verkregen door een T-stuk iets taps te schaven, zie afbeelding 46. De speling tussen de twee T-stukken



afb. 46

kan zodanig zijn dat deze pas opgeheven wordt als de voorspankracht groter wordt dan de minimaal voorgeschreven waarde.

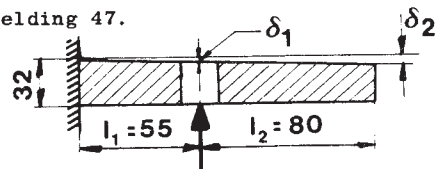
De speling kan zo gering mogelijk worden gehouden, zodat zodra in de flens t.p.v. de nek de vloeispanning bereikt wordt de twee contactvlakken op elkaar komen en verdere vervorming van de flens voorkomen

wordt. In dit geval kan de benodigde speling worden berekend door de flens t.p.v. de nek ingeklemd te beschouwen en t.p.v. de bout een kracht te plaatsen gelijk aan de minimale voorspankracht, zie afbeelding 47.

$$(I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 = \frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 3,2^3 = 41 \text{ cm}^4)$$

$$\delta_1 = \frac{F_v \cdot \ell_1^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{176 \cdot 5,5^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 41} = 0,011 \text{ cm}$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{F_v \cdot \ell_2^2}{2 \cdot E \cdot I} = 0,011 + \frac{176 \cdot 5,5^2}{2 \cdot 2,1 \cdot 10^4 \cdot 41} = 0,036 \text{ cm} = 0,36 \text{ mm}$$



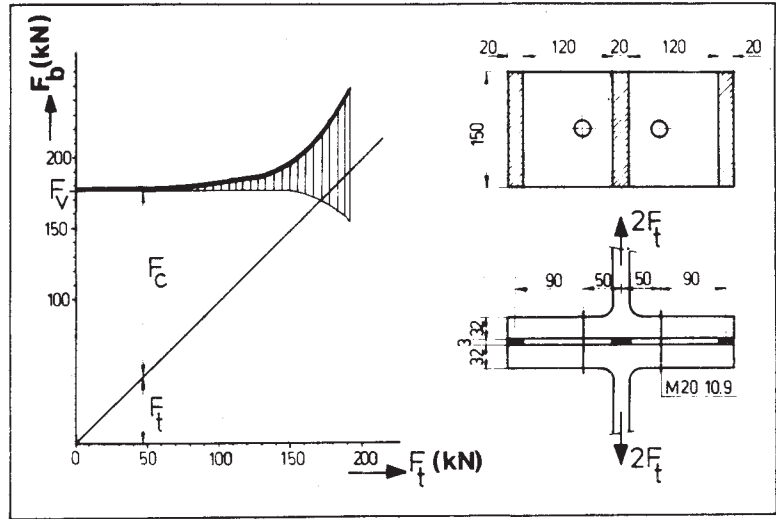
afb. 47

Verder moet nog worden gerekend op een zekere indrukking t.p.v. het contactvlak, zodat bijvoorbeeld gesteld kan worden dat $\delta_2 = 0,5 \text{ mm}$. Als slechts één flens afgeschuind wordt dan moet de afschuining tweemaal zo groot worden, dus:

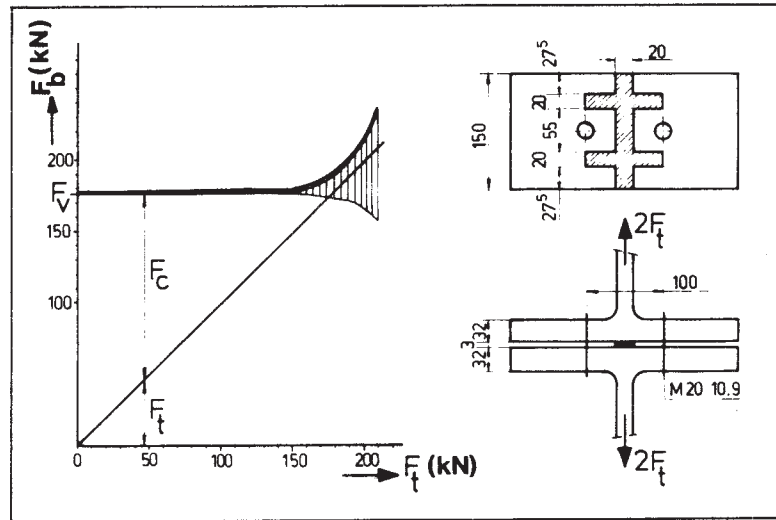
$$\delta_2 = 2 \times 0,5 \text{ mm} = 1 \text{ mm}.$$



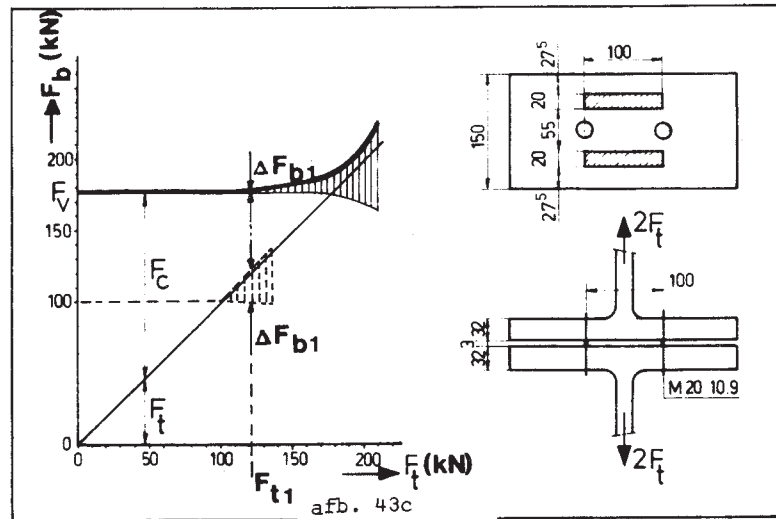
afb. 48



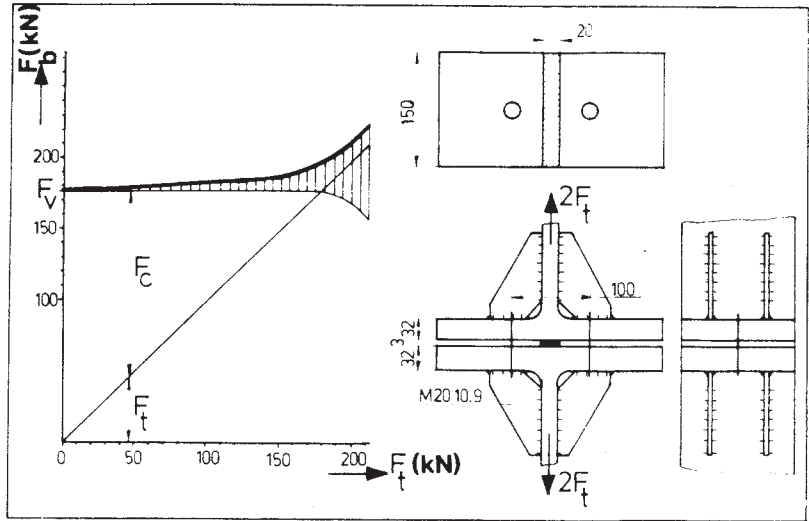
afb. 43a



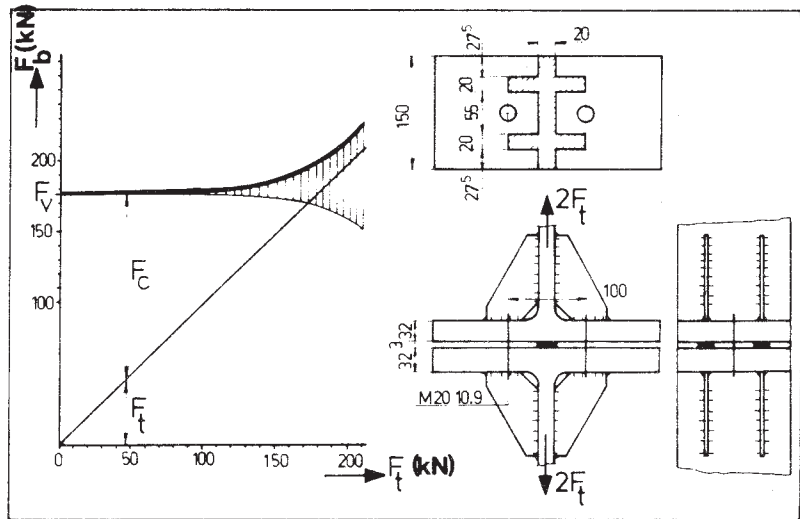
afb. 43b



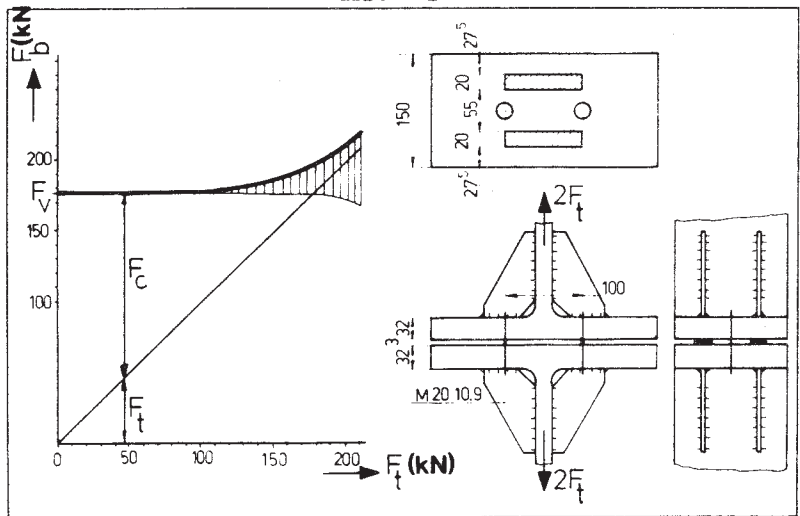
afb. 43c



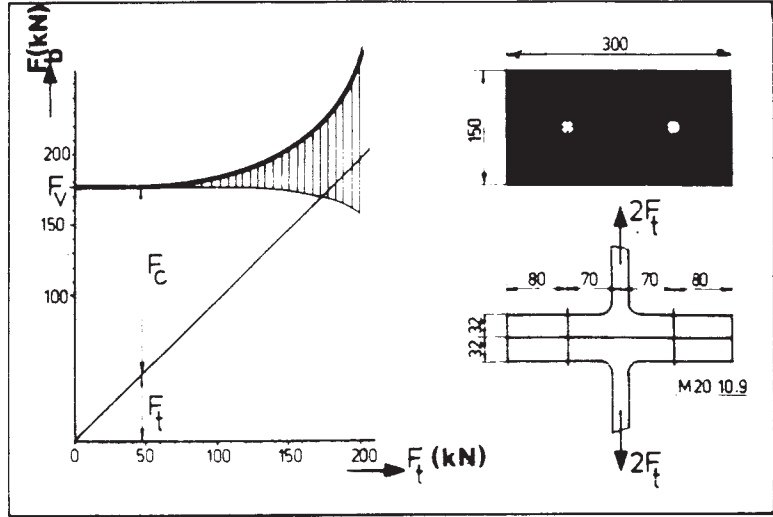
afb. 44a



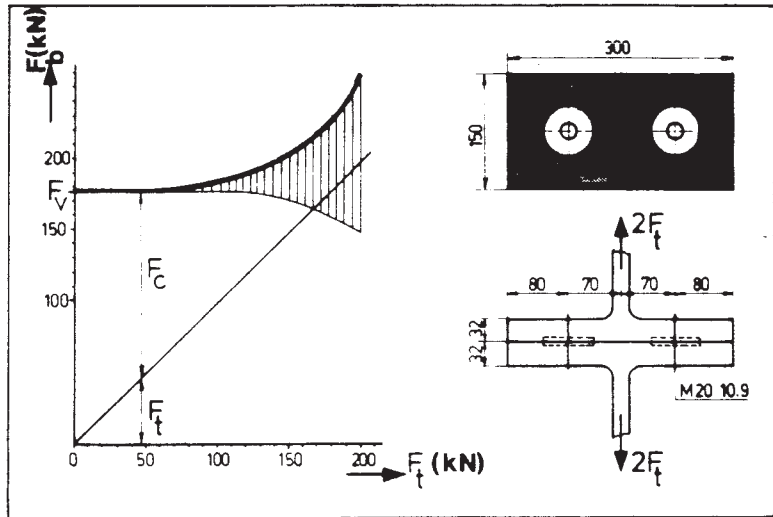
afb. 44b



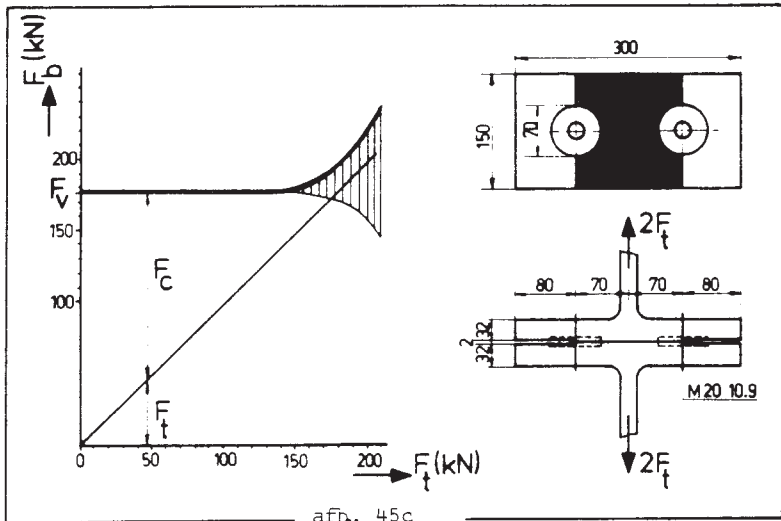
afb. 44c



afb. 45a

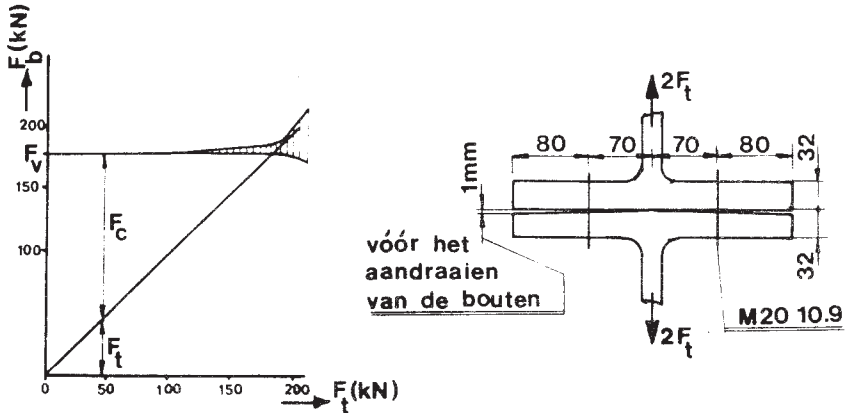


afb. 45b



afb. 45c

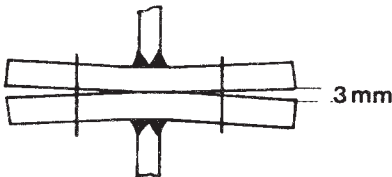
De resultaten van een proefstuk waarbij de op blz. 36 berekende afschuining was aangebracht zijn uitgezet in afbeelding 49. De resultaten zijn uitermate gunstig in vergelijking met de resultaten van hetzelfde proefstuk zonder afschuining, welke in afbeelding 45a zijn uitgezet.



afb. 49

Soms is voor het verkrijgen van de vereiste speling geen extra mechanische bewerking nodig, maar ontstaat deze speling als het ware automatisch door het optreden van vervormingen t.g.v. electrisch lassen.

In afbeelding 51 zijn de resultaten gegeven van een proefstuk waarbij de twee T-stukken d.m.v. electrisch lassen zijn vervaardigd. Bij niet aangedraaide bouten bedroeg hierbij de speling ongeveer 3 mm, zie afbeelding 50.

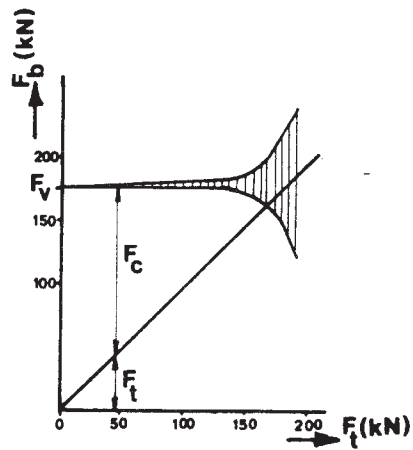
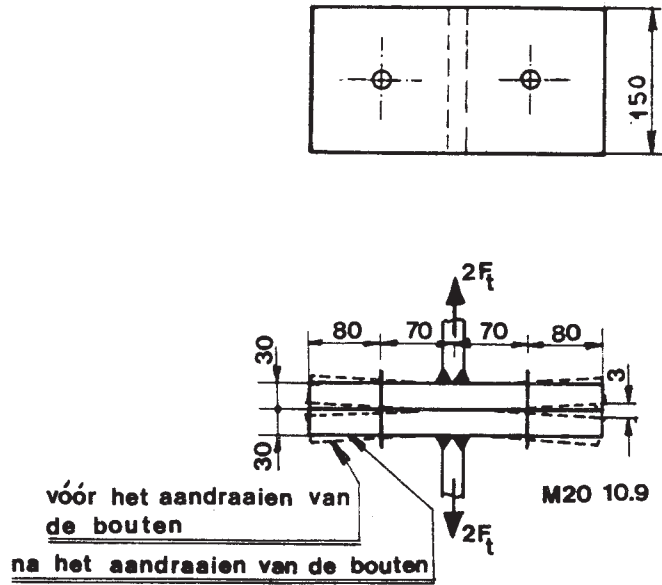


afb. 50

Bij de proefstukken in de afbeeldingen 49 en 51 begint de kracht in de bouten reeds bij kleine waarden van de uitwendige trekkracht F_t toe te nemen.

De amplitude van de boutkracht moet echter groter zijn dan 20 kN om op den duur ooit bezwijken van de bouten te kunnen krijgen. Deze amplitude treedt in afbeelding 49 pas op bij $F_t = 195$ kN en in afbeelding 51 bij $F_t = 155$ kN.

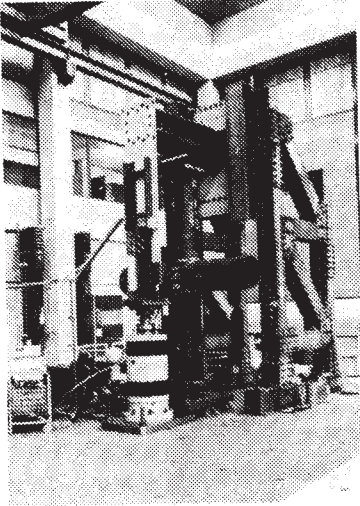
Vermoeiing van de bouten kan bij deze gevallen dus pas optreden als de uitwendige dynamische trekkracht groter is dan de toelaatbare statische trekkracht.



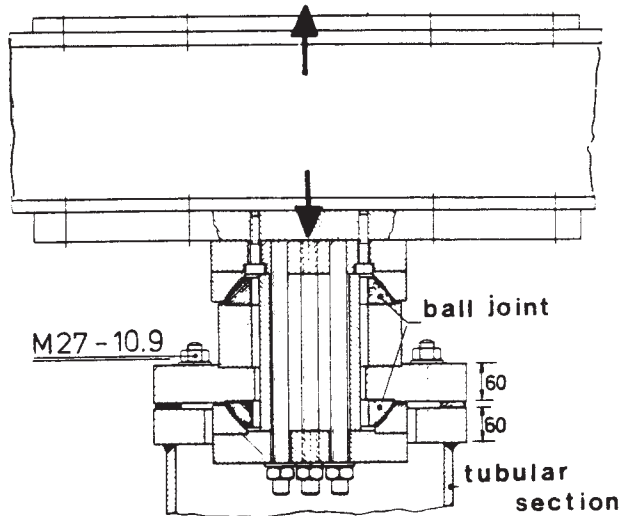
afb. 51

Ervaringen opgedaan met op trek belaste bouten bij vermoeiingsproeven
van grote buisverbindingen

Afbeelding 52 toont een opstelling voor het dynamisch belasten van gelaste verbindingen in buisprofielen.



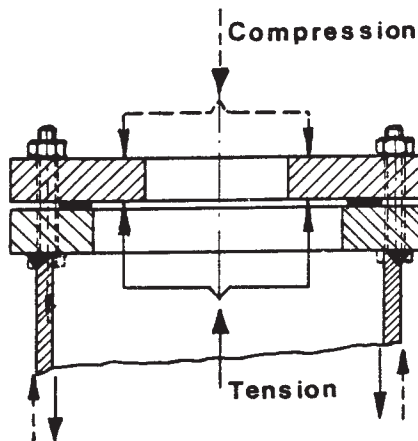
afb. 52



afb. 53

Voor het inleiden van de trek- en drukkrachten in de buisprofielen is een constructie ontworpen zoals getekend in afbeelding 53. De trek- en drukkrachten komen door tussenkomst van een bol-scharnier op een plaat terecht die met 4 bouten M27 - 10.9 is bevestigd aan de flens van het buisprofiel.

Geschematiseerd ziet de belasting op de flensverbinding er uit zoals gegeven in afbeelding 54.



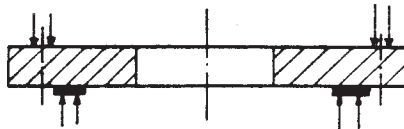
afb. 54

Tussen de dikke platen is een vulring aangebracht, hierdoor kan ervoor gezorgd worden dat de contactkracht die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, op een gunstige plaats komt te liggen. Het is dan mogelijk te bewerkstelligen dat, zelfs bij belangrijke uitwendige trekkrachten, de boutkracht weinig varieert en vermoeiing van de bouten wordt voorkomen. Tijdens de beproeving trad echter wel breuk van de bouten op.

Bij deze constructieve uitvoering van de flensverbinding doen zich twee extra complicaties voor:

- a. de constructiedelen waarin de krachten werken liggen niet in elkaars verlengde;
- b. op de platen werken niet uitsluitend trekkrachten, maar ook drukkrachten.

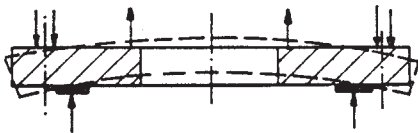
De klemkracht die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt komt als contactkracht volledig terecht ter plaatse van de vulring, zie afbeelding 55.



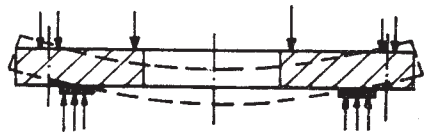
afb. 55

Indien nu op de bovenste plaat een uitwendige trekkracht wordt uitgeoefend dan ontstaat de situatie als in afbeelding 56 is aangegeven.

De contactkracht zal afnemen maar ook de boutkracht omdat door de andere plaatsen waar de krachten optreden een extra vervorming van de plaat zal optreden, zie de streeplijnen in afbeelding 56.



afb. 56



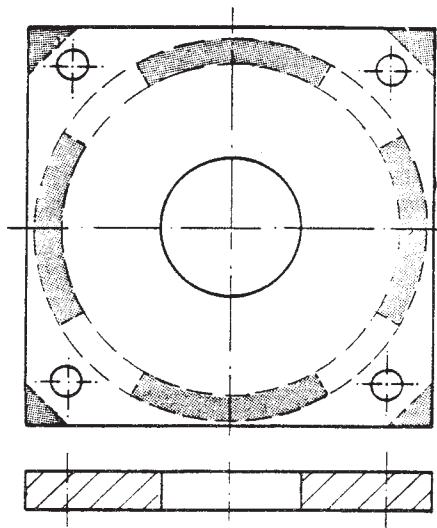
afb. 57

Wordt op de bovenste plaat een uitwendige drukkracht uitgeoefend dan zal de contactkracht vergroten, maar door de extra vervorming die optreedt zal ook de boutkracht vergroten, zie afbeelding 57.

Door de in de afbeeldingen 56 en 57 getekende vervormingen ontstaat een grote variatie in boutkracht waardoor breuk van de bouten t.g.v. vermoeiing kan optreden.

De oplossing is gevonden door ter plaatse van de hoeken vulplaten aan te brengen en tevens de vulring zo groot te kiezen dat deze direct langs de bouten loopt. Tevens is de vulring t.p.v. de bouten dunner gemaakt, dit om de weg naar de bouten slapper te maken.

In afbeelding 58 is met stippen aangegeven waar de vullingen aangebracht zijn.



afb. 58

Nadat de wijzigingen waren aangebracht is de constructie 600.000 maal belast van -650 kN naar +650 kN zonder dat breuk van de bouten is opgetreden.

Bij meting van de verandering van de boutlengte als gevolg van deze uitwendige belasting bleek deze 20 μm te bedragen (klemdikte ± 130 mm), de variatie in boutkracht was dus ongeveer 1/20 van de voorspankracht (verlenging als gevolg van F_v is $\Delta l = 3l + 30 = 3 \cdot 130 + 30 = 420$ μm).

3.5. Vergelijking van de uitkomsten van een berekeningsmethode met de resultaten van vermoeiingsproeven

Indien de plaats van de contactdruk, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt bekend is, dan zou de belasting F_t waarbij vermoeiing van de bout optreedt kunnen worden bepaald met:

$$F_t = F_c + \Delta F_b$$

Hierin is:

F_t = de uitwendige trekkracht (per bout gerekend)

F_c = de contactkracht welke in aanmerking mag worden genomen

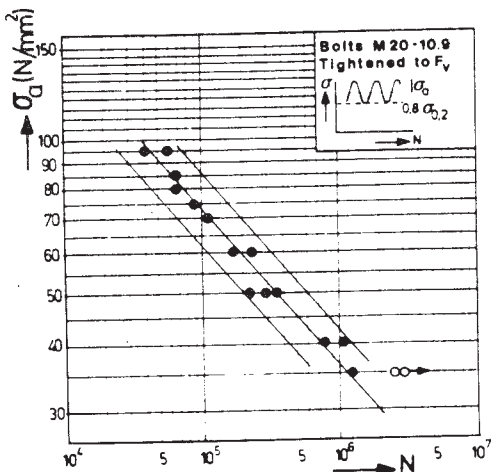
ΔF_b = de maximale variatie in boutkracht welke een bout gedurende een zeker aantal belastingswisselingen kan verdragen zonder dat breuk van de bout optreedt.

Voor het bepalen van de maximale variatie in boutkracht ΔF_b (belastingsrimpel) kan gebruik worden gemaakt van de waarden die vermeld zijn in afbeelding 59.

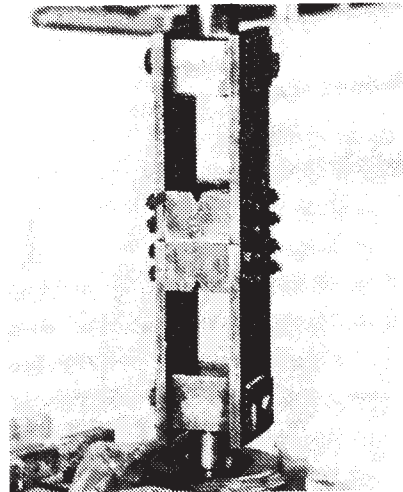
Deze waarden zijn waargenomen bij bouten, kwaliteit 10.9, welke met behulp van speciale inspanstukken in een bank dynamisch op trek zijn belast totdat breuk tengevolge van vermoeiing optrad, zie afbeelding 60. De bouten zijn vooraf aangedraaid tot de voorspankracht $F_v = 0,8 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_s$. Voor bouten M20 - kwal. 10.9 bedraagt deze voorspankracht: $F_v = 176 \text{ kN}$.

Op deze voorspankracht is in de dynamische trekbank een belastingsrimpel aangebracht groot:

$$\Delta F_{\text{bout}} = 2 \sigma_a \cdot A_s$$



afb. 59



afb. 60

Bij proeven is gebleken dat de grootte van de minimum belasting nagenoeg niet van invloed is op de vermoeiingssterkte van de bout. De belangrijkste grootte is de spanningsrimpel welke aangebracht wordt, in dit geval dus de rimpel $2\sigma_a$.

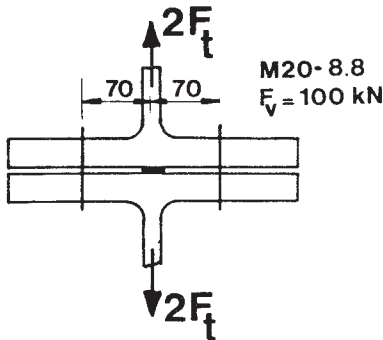
Als de ondergrens op een ander niveau ligt (hoger of lager) dan blijft de grootte van de rimpel welke kan worden opgenomen nagenoeg hetzelfde.

Ook blijkt het voor vermoeiing niet veel uit te maken of bouten 10.9 of bouten 8.8 worden gebruikt.

De waarden in afbeelding 59 kunnen dus ook gebruikt worden als de ondergrens anders is en ook als 8.8 bouten gebruikt worden i.p.v. 10.9 bouten.

Aan de hand van enkele voorbeelden zal nu worden aangegeven hoe kan worden gehandeld.

Voorbeeld 1: Verbinding met 2 bouten



afb. 61

$$F_t = F_c + F_b$$

$$F_c = 100 \text{ kN (per bout gerekend)}$$

$$\Delta F_b = ?$$

$$10^6 \text{ wisselingen} \rightarrow \Delta F_b = 2 \cdot \sigma_a \cdot A_s = 2 \cdot 36 \cdot 245 =$$

$$17640 \text{ N} \approx 18 \text{ kN} \quad (\text{zie afb. 59})$$

$$10^5 \text{ wisselingen} \rightarrow \Delta F_b = 2 \cdot \sigma_a \cdot A_s = 2 \cdot 73 \cdot 245 =$$

$$35770 \text{ N} \approx 36 \text{ kN} \quad (\text{zie afb. 59})$$

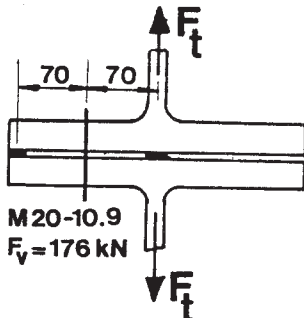
$$F_t = F_c + \Delta F_b = 100 + 18 = 118 \text{ kN geeft na } 10^6 \text{ wisselingen breuk}$$

$$F_t = F_c + \Delta F_b = 100 + 36 = 136 \text{ kN geeft na } 10^5 \text{ wisselingen breuk}$$

Volgens de proefresultaten zijn de uitwendige krachten F_t die bij 10^6 en 10^5 wisselingen breuk veroorzaken respectievelijk gelijk aan:

$$F_t \approx 120 \text{ kN en } F_t \approx 136 \text{ kN}$$

Voorbeeld 2: Verbinding met 1 bout



afb. 62

$$F_t = F_c + \Delta F_b$$

F_c is de contactkracht welke in aanmerking mag worden genomen voor overdracht van F_t , in dit geval is:

$$F_c = \frac{176}{2} = 88 \text{ kN}$$

$$10^6 \text{ wisselingen} \rightarrow \Delta F_b = 2 \cdot \sigma_a \cdot A_s = 2 \cdot 36 \cdot 245 = 17640 \text{ N} \approx 18 \text{ kN}$$

$$10^5 \text{ wisselingen} \rightarrow \Delta F_b = 2 \cdot \sigma_a \cdot A_s = 2 \cdot 73 \cdot 245 = 35770 \text{ N} \approx 36 \text{ kN}$$

ΔF_b moet nog omgerekend worden naar F_t dus:

$$\Delta F_b \cdot 70 = \Delta F_t \cdot 140 \rightarrow \Delta F_t = \frac{70}{140} \cdot \Delta F_b$$

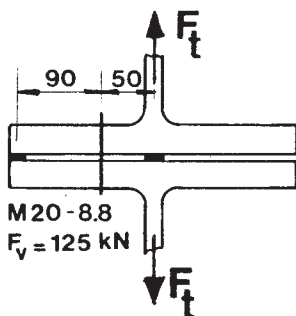
$$F_t = F_c + \frac{70}{140} \Delta F_b = 88 + \frac{70}{140} \cdot 18 = 97 \text{ kN geeft na } 10^6 \text{ wisselingen breuk.}$$

$$F_t = F_c + \frac{70}{140} \Delta F_b = 88 + \frac{70}{140} \cdot 36 = 106 \text{ kN geeft na } 10^5 \text{ wisselingen breuk.}$$

Volgens de proefresultaten zijn respectievelijk gevonden: $F_t \approx 94 \text{ kN}$

en $F_t = 98 \text{ kN}$

Voorbeeld 3: Verbinding met 1 bout, asymmetrisch geplaatst.



afb. 63

$$F_t = F_c + \Delta F_b$$

De in rekening te brengen contactkracht bedraagt in dit geval:

$$F_c = 125 \times \frac{90}{140} = 80,36 \text{ kN}$$

(contactkracht in het verlengde van F_t)

$$10^6 \text{ wiss.} \rightarrow \Delta F_b = 17,64 \text{ kN}$$

$$10^5 \text{ wiss.} \rightarrow \Delta F_b = 35,77 \text{ kN}$$

Deze waarden moeten weer worden omgerekend naar F_t dus:

$$\Delta F_b \cdot 90 = F_t \cdot 140 \rightarrow \Delta F_t = \frac{90}{140} \cdot \Delta F_b$$

$$F_t = F_c + \frac{90}{140} \Delta F_b = 80,36 + \frac{90}{140} \cdot 17,64 = 91,70 \text{ kN (na } 10^6 \text{ wiss. breuk)}$$

$$F_t = F_c + \frac{90}{140} \Delta F_b = 80,36 + \frac{90}{140} \cdot 35,77 = 103,36 \text{ kN (na } 10^5 \text{ wiss. breuk)}$$

Volgens de proefresultaten zijn respectievelijk gevonden: $F_t \approx 88 \text{ kN}$

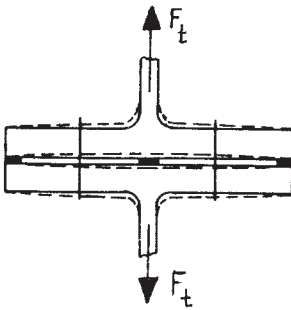
en $F_t = 100 \text{ kN}$

Ook deze waarden stemmen weer opmerkelijk goed overeen met de berekende waarden.

Opmerkingen:

- De berekende waarden van F_t zijn waarden waarbij na een zeker aantal wisselingen breuk van de bouten optreedt. Ten opzichte van deze waarden moet dus nog een bepaalde veiligheidsfactor worden ingevoerd.
- In bepaalde gevallen kunnen, nadat de contactkracht opgeheven is, door optredende vervormingen op andere plaatsen extra contactkrachten tot ontwikkeling komen. De toename van de boutkracht (ΔF_b) kan dan niet volledig gebruikt worden voor het verhogen van de uitwendige trekkracht F_t , maar

moet ook gedeeltelijk worden gebruikt voor het opnemen van de extra contactkracht (prying force).



afb. 64

In afbeelding 64 is een verbinding getekend waarbij, nadat in het midden de contactkracht is opgeheven, door de dan optredende vervormingen van de flens langs de randen extra contactkrachten tot ontwikkeling kunnen komen.

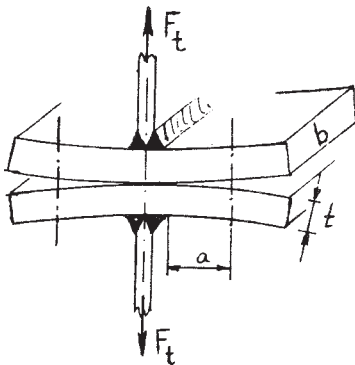
Ook bij vlakke flenzen zonder vullingen kan dit het geval zijn. Het berekenen van de extra contactkracht (prying force) is niet eenvoudig en in vele gevallen zelfs niet mogelijk. Meestal zal ΔF_b echter veel kleiner zijn dan de contact-

kracht F_c , zodat het dan mogelijk is, in die gevallen waar dat nodig is, bij de berekening in de formule: $F_t = F_c + \Delta F_b$, de ΔF_b slechts gedeeltelijk in rekening brengen of zelfs volledig te verwaarlozen en eenvoudshalve dus te stellen dat: $F_t = F_c$.

Om alle onzekerheid uit te sluiten kan ook zodanig worden geconstrueerd dat de contactkracht in het verlengde van F_t duidelijk groter is dan F_t . Bij het getallenvoorbeeld in paragraaf 3.6. wordt van dit principe uitgegaan.

3.6. Getallenvoorbeeld voor de dimensionering van een flensverbinding

De flenzen zijn door het lassen gekromd, dit is gunstig want hierdoor ligt het contactvlak op de juiste plaats. Aangenomen wordt in dit geval dat deze "natuurlijke" kromming voldoende groot is zodat de spleet niet wordt dichtgedrukt voordat in het midden voldoende contactkracht is opgewekt.



$$\sigma = \frac{M}{W} \quad 240 = \frac{2000 \cdot 10^3}{\frac{1}{6} \times 120 \times t^2}$$

Stel $F_{t\max.} = 100\text{kN}$

Door het aandraaien van de bouten moet dan tenminste een contactkracht van 100kN worden opgewekt, dus:

$F_{v\min} = 50\text{kN}$

Flensdikte: Stel afstand bout tot las: $a = 40\text{ mm}$

$M = F_{v\min} \times a = 50 \times 40 = 2000\text{ kNmm}$

$W = \frac{1}{6} b t^2 = \frac{1}{6} \times 120 \times t^2 \quad (b = 120\text{ mm})$

$\sigma_e = 240\text{ N/mm}^2$

$t^2 = 417\text{ mm}^2$

$t_{\min} = \sqrt{417} \approx 20\text{ mm}$

Om zeker te zijn dat voldoende contactkracht in het midden kan worden opgewekt, wordt gekozen: $t = 25\text{ mm}$

Om de spleet langs de randen van de flenzen door het aandraaien van de bouten te kunnen opheffen zullen de flenzen t.p.v. het lijf moeten vloeien. Indien alleen de uiterste vezels van de flenzen vloeien dan is waarschijnlijk de vervorming niet groot genoeg, stel daarom $W = \frac{1}{5}bt^2$ i.p.v. $W = \frac{1}{6}bt^2$ ($W = \frac{1}{4}bt^2$ bij vloeien volledige doorsnede).

De vloeigrens kan in werkelijkheid groter zijn dan 240 N/mm^2 , stel $\sigma_v = 320 \text{ N/mm}^2$.

$$M_{\text{vloei}} = \frac{1}{5}bt^2 \times \sigma_v = \frac{1}{5} \times 120 \times 25^2 \times 320 = 4800 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Voor het verkrijgen van voldoende vervorming moet de boutkracht voldoende groot zijn om dit moment op te wekken.

$$M_{\text{vloei}} = F_v \times a$$

$$4800 \cdot 10^3 = F_v \times 40 \rightarrow F_v = 120 \cdot 10^3 \text{ N} = 120 \text{ kN}$$

Gekozen kan bijvoorbeeld worden:

$M20 - 10.9 \rightarrow F_v = 176 \text{ kN}$

De grootste contactkracht die in het midden van de flenzen kan worden opgewekt wordt bepaald door het maximum elastisch moment dat de flens kan leveren.

Stel vloeigrens $\sigma_v = 220 \text{ N/mm}^2$ (laag gekozen).

$$M_{v\ell} = W \times \sigma_v = \frac{1}{6} \times 120 \times 25^2 \times 220 = 2750 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$M_{v\ell} = F \times a \rightarrow F = \frac{M}{a} = \frac{2750 \cdot 10^3}{40} = 68750 \text{ N}$$

In het midden wordt de contactkracht tenminste:

$$F_c = 2 \times 68750 = 137500 \text{ N} = 137,5 \text{ kN} > F_t = 100 \text{ kN}$$

Om de spleet langs de randen dicht te drukken is beschikbaar: $F_v = 176 \text{ kN}$

Het moment dat hiermee kan worden uitgeoefend bedraagt:

$$M = F_v \times a = 176 \cdot 10^3 \cdot 40 = 7040 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Het moment om de volledige doorsnede te laten vloeien bedraagt:

$$M_{v\ell} = \frac{1}{12}bh^2 \times \sigma_v = \frac{1}{12} \times 120 \times 25^2 \times 240 = 4500 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

Indien de werkelijke vloeigrens zelfs $\frac{7040}{4500} \times 240 = 375 \text{ N/mm}^2$ bedraagt dan wordt t.p.v. het lijf nog het vloeimoment in de flens bereikt.

Opmerking: Eventueel zou de flens iets dikker kunnen worden gekozen of de afstand a iets kleiner. Het gevolg hiervan is dan dat meer contactkracht in het midden wordt opgewekt, dus een grotere reserve tegen het volledig opheffen van de contactkracht in het midden van de flenzen (grotere veiligheid t.a.v. vermoeiing bouten). Voor het dicht drukken van de spleet langs de flensranden is er dan minder beschikbaar.

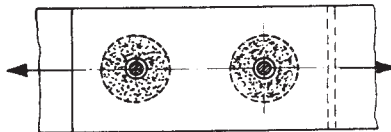
4. VERMOEIING VAN OP SCHUIF BELASTE BOUTVERBINDINGEN

4.1. Breukpatronen van op schuif belaste boutverbindingen

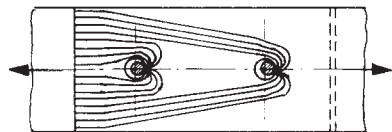
Het gedrag van een verbinding onder invloed van een dynamische belasting is afhankelijk van de manier waarop de krachtsoverdracht plaats vindt.

De belasting kan worden overgedragen door wrijving tussen de contactvlakken, door afschuiving en stuik op de bouten of door een combinatie van deze mogelijkheden. Proeven hebben aangetoond dat bij vermoeiing elke manier van krachtsoverdracht zijn eigen karakteristieke breukpatroon heeft. Deze karakteristieke patronen kunnen worden verklaard door het verloop van de spanningen in de verbindingen.

Bij een verbinding met voorspanbouten, waarbij de belasting volledig door wrijving tussen de contactvlakken wordt overgebracht, vindt de krachtsoverdracht plaats daar waar door het voorspannen een contactkracht is opgebouwd, dus in een betrekkelijk groot gebied rondom de bouten, zie gestippeld gebied in afbeelding 65.



afb. 65



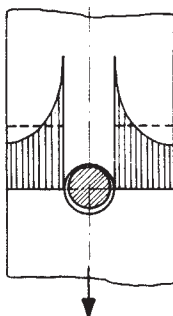
afb. 66

Bij een verbinding waarbij de krachtsoverdracht plaats vindt d.m.v. stuik en afschuiving vindt de krachtsoverdracht zeer geconcentreerd plaats aan de zijde waar de boutsteel aanligt tegen de wand van het gat. Bij deze verbindingen moet de totale kracht, de netto doorsnede passeren en lopen de krachtlijnen, in verband met de plaats van de overdracht, sterk geconcentreerd langs de wand van het gat, zie afbeelding 66.

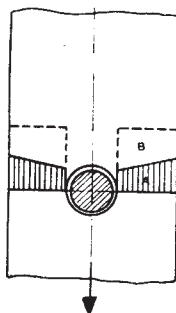
Bij een verbinding met voorspanbouten is d.m.v. wrijving reeds vóór de netto-doorsnede een gedeelte van de kracht uit de hoofdplaat naar de stuikplaten overgedragen en wordt de netto-doorsnede dus belast op een kracht die kleiner is dan de totale kracht.

Bovendien vindt de krachtsoverdracht hierbij niet sterk geconcentreerd plaats maar over een betrekkelijk groot gebied.

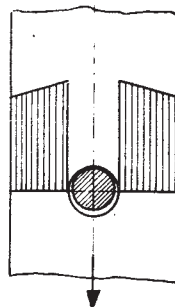
Het verschil in krachtsoverdracht heeft tot gevolg dat het verloop van de spanningsverdeling in de netto-doorsnede duidelijk verschillend is.



afb. 67a



afb. 67b



afb. 67c

In afbeelding 67a is het spanningsverloop in de netto-doorsnede getekend voor een verbinding waarbij overdracht geschiedt d.m.v. stuik en afschuiving. Direct naast de wand van het gat is een enorme spanningspiek aanwezig.

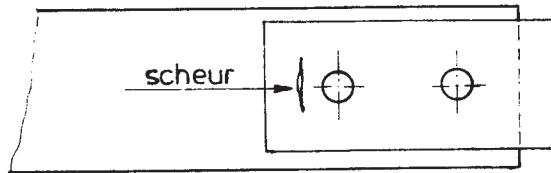
In afbeelding 67b is het spanningsverloop in de netto-doorsnede getekend voor een verbinding met voorspanbouten waarbij de overdracht volledig d.m.v. wrijving geschiedt.

Door de gunstige en minder geconcentreerde wijze van krachtsoverdracht is hierbij de spanning naast het gat zelfs het laagst.

In afbeelding 67c is het verloop getekend voor een verbinding met voorspanbouten die is vergleden. Hierbij vindt dus de krachtsoverdracht plaats zowel door wrijving als door stuik en afschuiving.

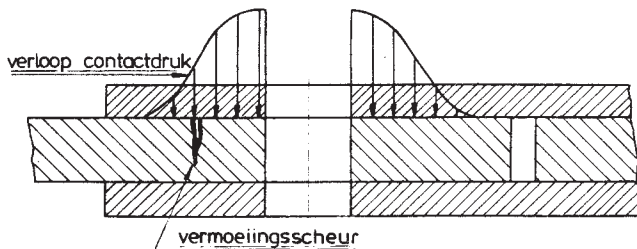
Het hoeft geen betoog dat met het oog op vermoeiing de spanningsverdeling in afbeelding 67b het gunstigst is.

Bij verbindingen met voorspanbouten treden de vermoeiingsbreuken dan ook praktisch nooit op in de netto-doorsnede maar in een bruto-doorsnede, gelegen tussen de netto-doorsnede en het begin van de stuikplaat, zie afbeelding 68.



afb. 68

Dat de vermoeiingsscheur op deze plaats tot ontwikkeling komt wordt veroorzaakt door de rekverschillen tussen hoofdplaat en stuikplaat waardoor relatieve verplaatsingen van de platen t.o.v. elkaar optreden. Aangezien door de aanwezigheid van de voorspankracht een bepaalde contactdrukspanning tussen de platen heerst, zie afbeelding 69, gaan de relatieve verplaatsingen gepaard met wrijvingskrachten. Hierdoor ontstaat wrijvingscorrosie waardoor zeer scherpe kerfjes worden gevormd die de aanleiding vormen voor een vermoeiingsscheur over de bruto-doorsnede.

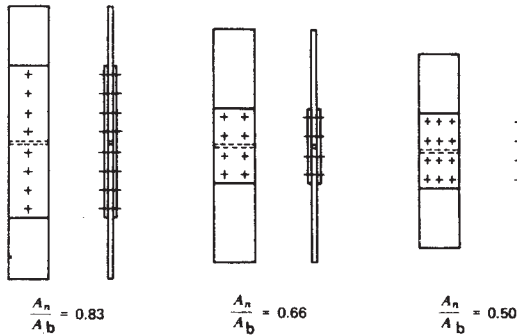


afb. 69

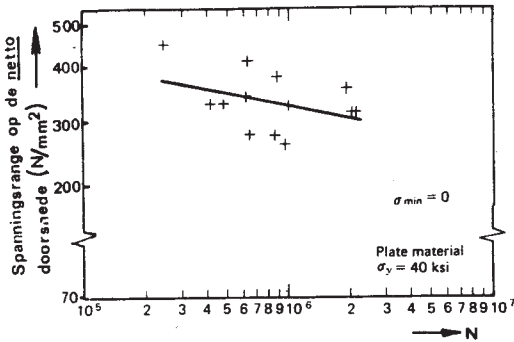
Bij verbindingen waarbij de krachten door stuik en afschuiving worden overgedragen treden de vermoeiingsbreuken, door de daar aanwezige grote spanningsconcentratie, in de netto-doorsnede op.

Ook bij het verwerken van proefresultaten komt tot uiting dat er verschil is in breukpatroon bij een verbinding met voorspanbouten en een verbinding met bouten die op stuk en afschuiving worden belast.

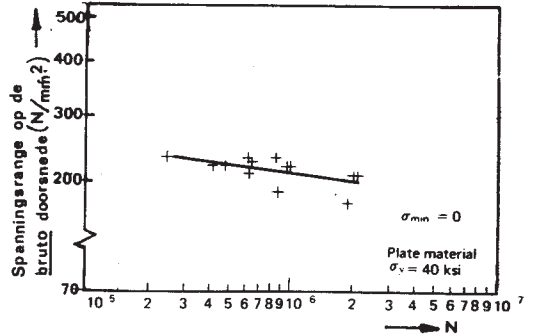
In afbeelding 70 zijn proefstukken met voorspanbouten met verschillende $\frac{A_{netto}}{A_{bruto}}$ verhoudingen getekend. Van deze proefstukken zijn de proefresultaten uitgezet in de afbeeldingen 71 en 72.



afb. 70



afb. 71



afb. 72

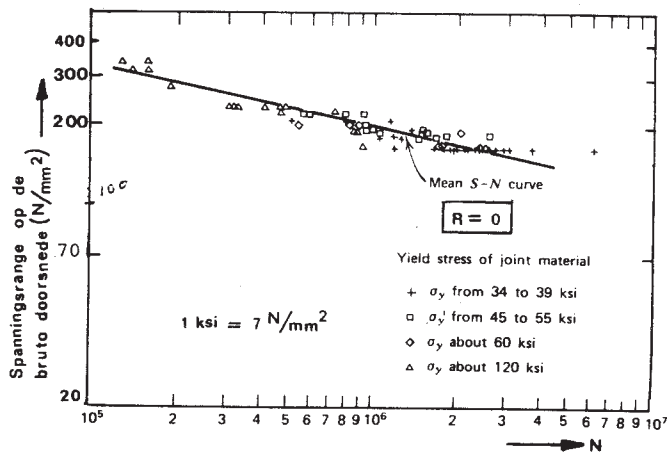
In afbeelding 71 zijn uitgezet de uit de proefresultaten berekende spanningen op de netto-doorsnede, terwijl in afbeelding 72 de met dezelfde proefresultaten berekende spanningen op de bruto-doorsnede zijn uitgezet.

Uit beide afbeeldingen blijkt heel duidelijk dat indien bij verbindingsen met voorspanbouten de bruto-doorsnede wordt aangehouden de spreiding in de resultaten veel kleiner is dan wanneer de netto-doorsnede wordt aangehouden.

Concluderend kan worden gesteld dat met betrekking tot vermoeiing bij verbindingsen met voorspanbouten gerekend moet worden met de bruto-doorsnede, terwijl voor verbindingsen met bouten belast op stuik en afschuiving de netto-doorsnede in beschouwing moet worden genomen. Deze conclusie is geheel in overeenstemming met de breukpatronen die bij vermoeiing van dubbele overlap verbindingsen optreden.

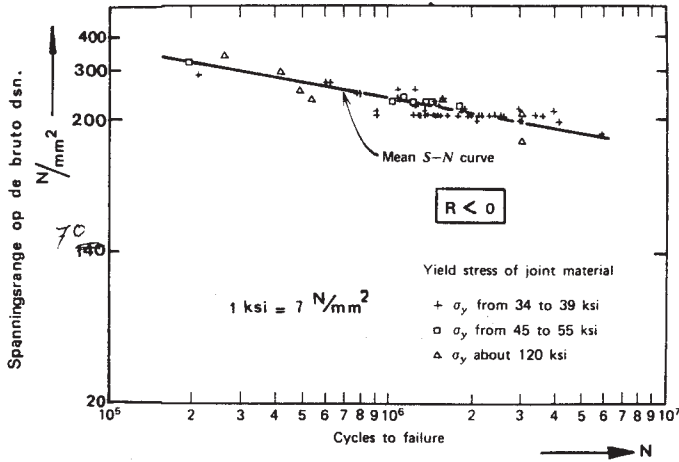
4.2. Resultaten van vermoeiingsproeven op dubbele overlap verbindingsen

In afbeelding 73 zijn resultaten van proeven op verbindingsen met voorspanbouten (wrijfingsverbindingsen) uitgezet waarbij de belasting op de verbinding schommelde tussen nul en een bepaalde positieve waarde ($R = 0$).



afb. 73

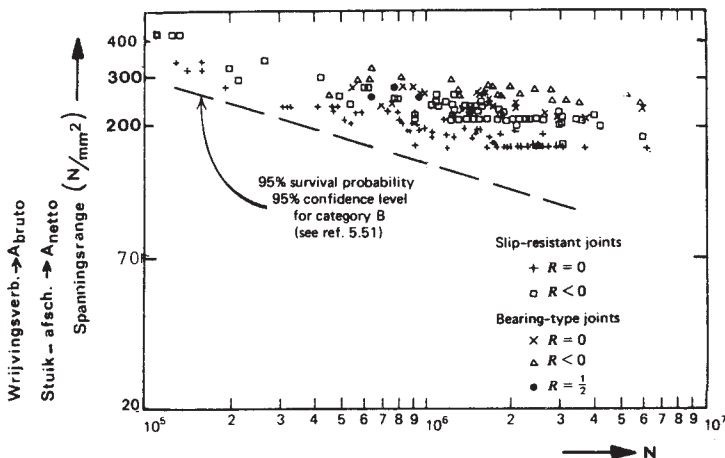
In afbeelding 74 zijn resultaten van proeven op verbindingsen met voorspanbouten uitgezet waarbij de belasting op de verbinding schommelde tussen een drukbelasting van een bepaalde waarde en een zekere trekbelasting ($R < 0$).



afb. 74

Vergelijking van de afbeeldingen 73 en 74 toont wel dat bij een bepaalde spanningsrange de levensduur van de proefstukken met $R < 0$ iets groter is dan van de proefstukken met $R = 0$. Het drukspanningsgedeelte van de spanningsrange is kennelijk niet zo effectief in het vergroten van de vermoeiingsscheur als het trekspanningsgedeelte.

In afbeelding 75 zijn een groot aantal resultaten uitgezet van proeven op wrijvingsverbindingen en op verbindingen belast op stuik en afschuiving. De vloeigrenzen van de materialen waaruit de proefstukken waren vervaardigd varieerden van 250 tot 840 N/mm^2 .



afb. 75

De in afbeelding 75 uitgezette waarden zijn voor wrijvingsverbindingen berekend met de bruto-doorsnede en voor verbindingen met bouten belast op stuik en afschuiving met de netto-doorsnede.

Opmerkelijk is dat zowel de wrijvingsverbindingen als de verbindingen op stuik en afschuiving waarbij de belasting van richting omkeerde hogere vermoeiingssterkten vertonen.

Zoals blijkt uit afbeelding 75 zijn de proefresultaten geconcentreerd in een spanningsrange band tussen 25 en 40ksi (175 en 280 N/mm²).

Hierbij moet bedacht worden dat deze resultaten afkomstig zijn van:

- materialen met sterk verschillende vloeigrenzen (250-840 N/mm²)
- beproevingen zijn uitgevoerd met verschillende R-waarden
- wrijvingsverbindingen en verbindingen op stuik en afschuiving.

Volgens afbeelding 75 bezitten wrijvingsverbindingen gedimensioneerd op basis van de bruto-doorsnede en verbindingen belast op stuik en afschuiving gedimensioneerd op basis van de netto-doorsnede ongeveer gelijke vermoeiingssterkten.

4.3. Conclusies met betrekking tot vermoeiingsproeven op dubbele overlap verbindingen

De invloed van de materiaalkwaliteit op de vermoeiingssterkte.

Zoals uit de afbeeldingen 73 t/m 75 blijkt, leveren proefstukken van materiaal met een hogere vloeigrens hogere vermoeiingssterkten op. De verschillen zijn waarschijnlijk te gering om daarmee rekening te houden.

De invloed van de grootte van R op de vermoeiingssterkte.

Uit afbeelding 73 en 74 blijkt, dat de resultaten van de proeven met $R < 0$ gunstiger zijn dan van de proeven met $R = 0$.

De vraag is of de verschillen zodanig zijn dat het de moeite loont om hiermee rekening te houden.

Welke staafdoorsnede is voor vermoeiing maatgevend?

Zoals uit de proefresultaten blijkt, worden goede uitkomsten verkregen als voor wrijvingsverbindingen met de bruto-doorsnede wordt gerekend en voor verbindingen op stuik en afschuiving met de netto-doorsnede.

Wanneer is vermoeiing maatgevend bij geboute verbindingen?

De materialen met lage vloeigrenzen bezitten ten opzichte van de statische sterkte een relatief hoge vermoeiingssterkte. Bij deze materialen (bijvoorbeeld Fe 360) zal vermoeiing daarom niet vaak maatgevend zijn.

Voor vermoeiing komt hierbij nog het volgende gunstige aspect. In de praktijk is de belasting op een constructie meestal voor een deel opgebouwd uit een constant aanwezige belasting (eigen gewicht e.d.) en voor het andere deel uit een kortstondig aanwezige belasting (mobiele belasting, wind etc.). Voor bepaling van de statische sterkte moet met de totale maximale belasting worden gerekend, ook al komt deze in de totale levensduur slechts eenmaal voor. Voor bepaling van de vermoeiingssterkte hoeft voornamelijk alleen met de variabele belasting te worden gerekend welke over het algemeen veel kleiner is dan de totale belasting.

Bovendien moet de belastingvariatie een groot aantal keren voorkomen om vermoeiing te kunnen veroorzaken. Vooral voor materialen met hoge vloeigrenzen zal vermoeiing echter toch maatgevend kunnen worden.

4.4. Aanbevelingen voor het ontwerpen van geboute verbindingen in dynamisch belaste constructies

In het boek: "Guide to design criteria for bolted and riveted joints", geschreven door Fisher en Struik, worden voor geboute verbindingen de volgende aanbevelingen gegeven.

Wrijvingsverbindingen

Indien gegarandeerd kan worden dat de kans op glijden van de verbinding kleiner is dan 5%, dan kan de spanningsrange op de bruto-doorsnede als maatgevend worden beschouwd.

Volgens Fisher en Struik kan voor de toelaatbare spanningsrange op de bruto-doorsnede de waarde worden aangehouden die voor het betreffende aantal belastingswisselingen vermeld staat in afbeelding 76.

Aantal belastingswisselingen	Spanningsrange ¹⁾ N/mm ²
20.000 - 100.000	315
100.000 - 500.000	190
500.000 - 2.000.000	125
boven 2.000.000	110

afb. 76

¹⁾ wrijvingsverbindingen → bruto-doorsnede
stuik + afschuiving → netto-doorsnede

De waarden die in afbeelding 76 staan vermeld zijn aan de veilige kant gehouden omdat nog niet voldoende proefresultaten beschikbaar zijn om hogere waarden te kunnen garanderen.

Verbindingen met bouten belast op stuik en afschuiving

De spanningsrange op de netto-doorsnede moet als maatgevend worden beschouwd. Bij dynamisch belaste constructies mag de kracht in het beschouwde onderdeel niet van richting omkeren.

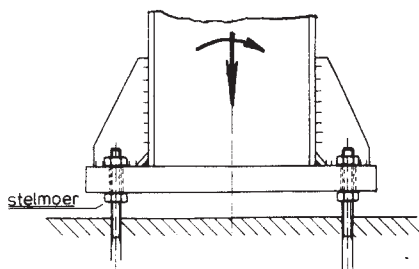
Het is dus niet toegestaan dat een heen-en-weer schuiven in de verbindingen optreedt.

Volgens Fisher en Struik kan voor de toelaatbare spanningsrange op de netto-doorsnede de waarde worden aangehouden die voor het betreffende aantal belastingswisselingen vermeld staat in afbeelding 76.

5. UITVOERING VAN CONSTRUCTIEDETAILS MET BETREKKING TOT VERMOEING

5.1. Op trek belaste verbindingen

Bevestiging kolomvoeten



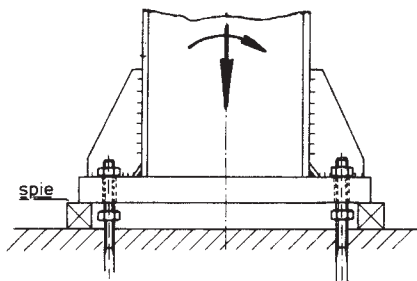
afb. 77

met volledige belasting op de ondersabeling. In werkelijkheid is de verdeling van de belasting dus heel anders dan bij de berekening van de voetplaat is aangenomen.

2e. Door het aandraaien van de bovenste moeren zal alleen het stukje anker gelegen tussen de moeren onder een voorspanning komen te staan. Het gedeelte van het anker onder de onderste moer komt dus niet onder een voorspanning.

Bij een variërende trek-belasting op de voetplaat zal nu het onderste deel van het anker de totale trekbelasting als een belasting-variatie ondergaan. Een variërende trekbelasting op de voetplaat zal zeer snel tot vermoeing van de ankers kunnen leiden.

Tweede mogelijkheid:



afb. 78

Eerste mogelijkheid

Kolom op hoogte gebracht met stelmoeren, daarna ondersabeld.

Bezwaren:

1e. Bij drukbelasting op de kolomvoet blijven de moeren dragen en komt niet de volledige belasting op de ondersabeling. Bij de berekening van de voetplaat is wel gerekend

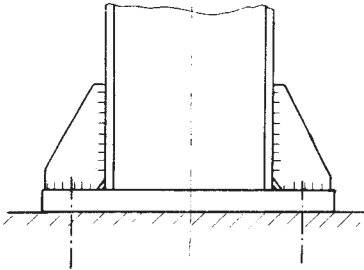
Nadat de kolom is afgesteld met de stelmoeren moeten spieën worden aangebracht. Daarna de onderste moeren eerst terugdraaien en dan pas ondersabelen.

Als de ondersabeling goed is doorgehard de spieën verwijderen en dan pas de bovenste moeren goed aandraaien. Door het aandraaien van de bovenste moeren wordt nu het anker over de volle lengte voorgespannen.

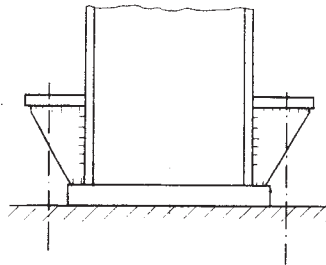
Een variërende trek-belasting op de voetplaat zal nu gedeeltelijk worden opgenomen door vermindering van contactdruk en gedeeltelijk door vergroting van de kracht in de ankers.

Hoe groot de verandering in de kracht in de ankers is hangt af van de plaats van de contactkracht en de stijfheden van onder andere voetplaat en ankers.

Dit laatste zal aan de hand van de afbeeldingen 79 en 80 nader worden toegelicht.



afb. 79



afb. 80

Het meest waarschijnlijk is dat bij de uitvoering volgens afbeelding 79 de contactkracht tussen voetplaat en voeg die door het aandraaien van de ankers wordt opgewekt, terecht komt in de omgeving van de ankers. Bij een trekbelasting op de kolomvoet zal deze de contactkracht wel verminderen maar ook is de kans groot dat nog een belangrijke vergroting van de kracht in de ankers zal optreden.

Bij een constructie volgens afbeelding 80 is de situatie met betrekking tot vermoeiing van de ankers veel gunstiger.

De contactkracht die door het aandraaien van de ankers tot stand komt zal voornamelijk tussen voetplaat en voeg in het verlengde van de kolomflens optreden. Indien de ankers goed zijn aangespannen dan zal bij een trekbelasting op de kolomvoet deze praktisch volledig worden opgenomen door vermindering van contactkracht (de kracht in de kolomflens kan recht door lopen).

Vergroting van de kracht in de ankers zal hierbij nauwelijks optreden, vooral omdat de ankers over een belangrijk deel boven de vloer uitsteken en dus een tamelijk slap element vormen en daardoor weinig neiging hebben tot het aantrekken van een kracht. Met betrekking tot vermoeiing van de ankers is de uitvoering volgens afbeelding 80 dus zeer gunstig.

Bij het ontwerp volgens afbeelding 82 zijn bovengenoemde bezwaren niet aanwezig. Bij deze uitvoering zijn t.p.v. elk deelvlak twee draagvlakken aangebracht. De contactkracht die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt komt dus op deze draagvlakken terecht; hiermee zijn de plaatsen waar contactkrachten optreden duidelijk vastgelegd.

Voor een gunstige verdeling van de boutkracht over de draagvlakken zijn de afstanden van de draagvlakken tot de bouten zodanig gekozen dat ter plaatse van het draagvlak waar overdracht via vermindering van contactkracht kan plaatsvinden, een zo groot mogelijke contactkracht ontstaat.

Vermoeiing van bevestigingsbouten van rollendraaikransen kan worden voorkomen indien bij het construeren gelet wordt op de volgende punten:

- De hartlijnen van lijf bovenconstructie, rollen zwenkkrans en lijfplaat onderconstructie moeten als het kan samenvallen, zie lijn A-A in afbeelding 82.
- Ter plaatse van de verschillende deelvlakken moeten uitsparingen worden aangebracht zodat bij elk deelvlak twee draagvlakken aanwezig zijn.
- In de verschillende deelvlakken moet één draagvlak zoveel mogelijk samenvallen met de in het eerste punt genoemde hartlijn A-A.
- Een zo groot mogelijk deel van de boutkracht moet als contactkracht in het draagvlak komen dat bij de lijn A-A ligt. De in afbeelding 82 gegeven afstanden b, d en e moeten dus zo klein mogelijk zijn, de afstanden a, c en f zo groot mogelijk.

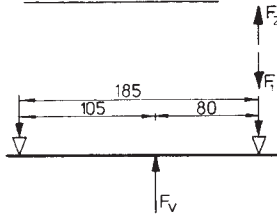
Getallenvoorbeeld - uitvoering volgens afbeelding 82.

Stel:	a = 105 mm	c = 105 mm	e = 42 mm
	b = 80 mm	d = 20 mm	f = 115 mm g = 36 mm

Verondersteld wordt verder dat, per bout gerekend, de volgende krachten werkzaam zijn:

$$F_v = 220 \text{ kN} \qquad F_1 = 300 \text{ kN} \qquad F_2 = 140 \text{ kN}$$

Deelvlak I - I:



afb. 83

Contactkrachten t.g.v. F_v :

$$\text{links : } 220 \times \frac{80}{185} = 95 \text{ kN}$$

$$\text{rechts : } 220 \times \frac{105}{185} = 125 \text{ kN}$$

Overdracht F_1 : de kracht F_1 loopt via het rechterdraagvlak van deel ① direct naar de rollen zonder een extra kracht in de bouten op te wekken.

Overdracht F_2 : de kracht $F_2 = 140 \text{ kN}$ is groter dan de contactkracht t.p.v. rechter draagvlak (125 kN). De bout zal hierdoor een extra kracht krijgen.

Van F_2 wordt de eerste 125 kN overgebracht door vermindering van contactkracht. Rest nog $140 - 125 = 15 \text{ kN}$ welke een extra kracht in de bout veroorzaakt van:

$$\Delta F_{\text{bout}} = 15 \times \frac{185}{105} \approx 26 \text{ kN}$$

Met deze kracht moet de vermoeingssterkte van de bout worden gecontroleerd
Beter is het om de voorspankracht zodanig te vergroten dat de contactkracht t.p.v. het rechter draagvlak niet wordt opgeheven, dus:

$$F_v \times \frac{105}{185} > F_2$$

$$F_v \times \frac{105}{185} > 140 \quad F_v > 247 \text{ kN}$$

$$\text{Stel } F_v = 275 \text{ kN}$$

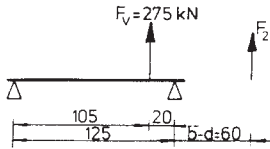
Deelvlak II - II:

Overdracht F_1 : de kracht F_1 komt niet in dit deelvlak terecht maar loopt direct van deel ① via de bovenste rollen naar deel ③

Overdracht F_2 : eerst moeten de contactkrachten worden bepaald die t.g.v. $F_v = 275 \text{ kN}$ op de draagvlakken komen:

$$\text{links : } 275 \times \frac{20}{125} = 44 \text{ kN}$$

$$\text{rechts : } 275 \times \frac{105}{125} = 231 \text{ kN}$$



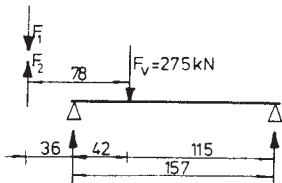
afb. 84

De kracht F_2 geeft op het rechter draagvlak een vermindering van contactkracht groot:

$$F_2 \times \frac{185}{125} = 140 \times \frac{185}{125} = 207 \text{ kN} < 231 \text{ kN}$$

dus F_2 kan volledig door vermindering van contactkracht worden opgenomen en geeft dus geen verandering van boutkracht.

Deelvlak III - III:



afb. 85

Eerst moeten de contactkrachten worden bepaald die t.g.v. F_v op de draagvlakken komen:

$$\text{links} : 275 \times \frac{115}{157} = 201 \text{ kN}$$

$$\text{rechts} : 275 \times \frac{42}{157} = 74 \text{ kN}$$

Overdracht F_1 :

De kracht F_1 geeft op het rechterdraagvlak een vermindering van contactkracht groot:

$$F_1 \times \frac{36}{157} = 300 \times \frac{36}{157} = 69 \text{ kN} < 74 \text{ kN}$$

Er blijft rechts nog een contactkracht aanwezig van $74 - 69 = 5 \text{ kN}$; er zal dus t.g.v. F_1 geen verandering van boutkracht optreden. Daar de resterende contactkracht van 5 kN klein is zou het gunstig zijn als het linker draagvlak nog wat naar links kan opschuiven, anders F_v nog wat hoger kiezen.

Overdracht F_2 : De kracht F_2 geeft op het linker draagvlak een vermindering van contactkracht groot:

$$F_2 \times \frac{36+157}{157} = 140 \times \frac{193}{157} = 172 \text{ kN} < 201 \text{ kN}$$

Er blijft links nog een contactkracht aanwezig van $201 - 172 = 29 \text{ kN}$, er treedt t.g.v. F_2 dus geen verandering van boutkracht op.

Conclusie:

Indien $F_v \geq 275 \text{ kN}$ wordt gekozen dan treedt er geen variatie in boutkracht op, uitsluitend variatie in contactkrachten, er zal dus geen vermoeiing van de bouten optreden.

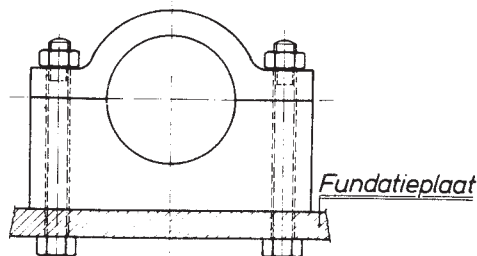
Enkele opmerkingen:

Voor het bepalen van de krachten welke per bout gerekend op de zwenkkrans werken geldt voor de ligging van de neutrale lijn het volgende:

- Voor vermoeiing van de bouten moet worden gerekend dat de neutrale lijn door het zwaartepunt van de krans gaat.
Door de overdracht door middel van contactkrachtvermindering zijn de trekzône en de drukzône namelijk praktisch even stijf
- Voor statische breuk van de bouten ten gevolge van een overbelasting kan worden gerekend dat de neutrale lijn meer naar het drukvlak komt te liggen; dit is voor de bouten gunstiger. Worden de bouten namelijk door de overbelasting extra belast dan gedragen deze zich slapper dan het gedrukte gedeelte van de zwenkkrans.
- Het lijkt verstandig om als een overbelasting is opgetreden, te controleren of de bouten nog voldoende voorspanning bezitten; deze kunnen door de overbelasting een plastische rek gekregen hebben.

Lagerstoel

In afbeelding 86 is een lagerstoel getekend, de lagerkap en de lagervoet zijn met twee bouten aan de fundatieplaat bevestigd.



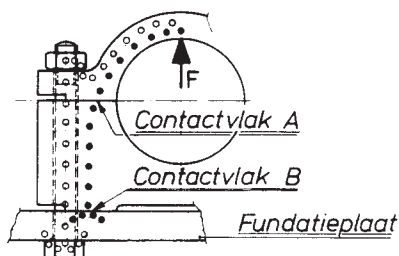
afb. 86

Indien omhoog gerichte belastingen kunnen optreden dan moeten bepaalde voorzieningen worden getroffen om vermoeiingsbreuk van de bouten te voorkomen.

In de eerste plaats moeten de bouten zodanig worden aangedraaid dat de som van de krachten die door het aandraaien in de bouten worden opgewekt, groter is dan de grootte van de omhoog gerichte belasting.

In de tweede plaats moet gezorgd worden dat de contactkrachten, die tussen kap en voet en tussen voet en fundatieplaat ontstaan, op een juiste plaats optreden.

In afbeelding 87 is aangegeven waar de contactvlakken moeten liggen (aangegeven met A en B).

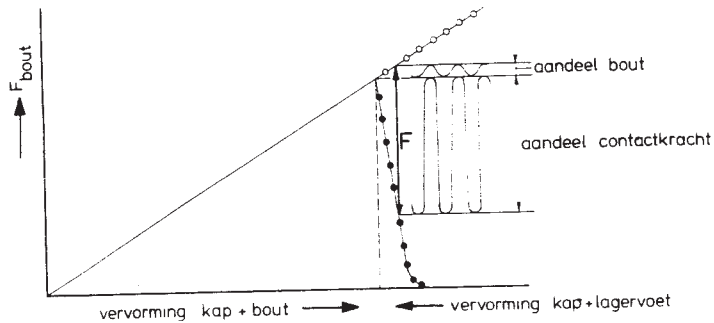


afb. 87

Indien nu gezorgd wordt dat door het aandraaien van de bouten t.p.v. deze contactvlakken contactkrachten ontstaan die samen groter zijn dan de omhoog gerichte kracht op de lagerkap, dan staan voor de krachts-overdracht de volgende wegen ter beschikking:

- 1e. de weg in afbeelding 87 aangeduid met ●●●, dus via lagerkap, contactvlak A, lagervoet en contactvlak B naar de fundatieplaat.
- 2e. de weg in afbeelding 87 aangeduid met ooo, dus via lagerkap, moer, boutsteel en boutkop naar de fundatieplaat.

Voor het bepalen van het deel van F dat via de bouten gaat en het deel van F dat via contactkrachtvermindering gaat, zou gebruik gemaakt kunnen worden van afbeelding 88.



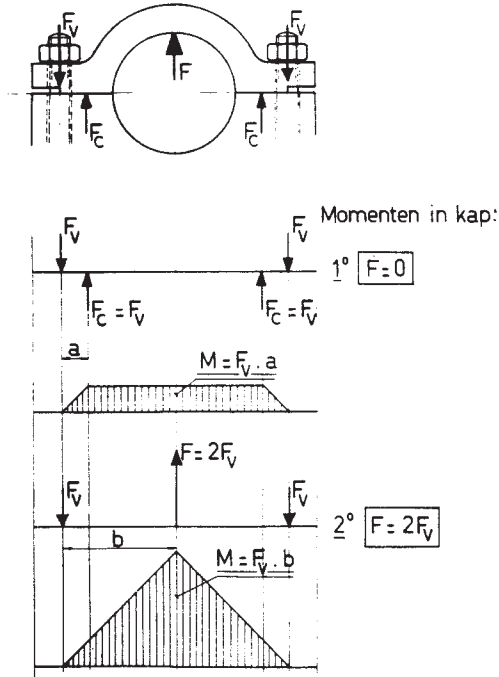
afb. 88

De vervormingen van de twee verschillende wegen zijn echter uitermate moeilijk te bepalen zodat afbeelding 88 zich moeilijk laat vastleggen.

Wel is het duidelijk dat in dit geval de eerste weg zeer veel stijver is dan de tweede weg. Voor de krachtsoverdracht wordt derhalve voornamelijk de eerste weg, dus via vermindering van contactkracht, gekozen. De bouten hebben als het ware geen weet van deze krachtsoverdracht zodat breuk tengevolge van vermoeiing van de bouten niet zal optreden.

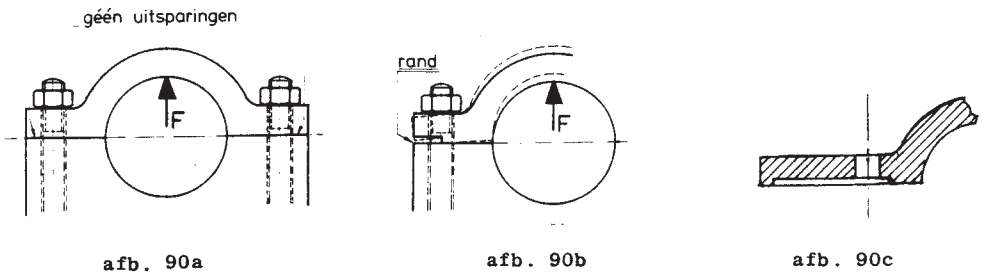
Opmerking: Indien langs de randen van de lagerkap geen uitsparingen worden gemaakt (zie afbeelding 90a) dan zijn de volgende twee nadelen aanwezig.

- Een gedeelte van de contactkracht die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt komt aan de buitenzijde van de kap terecht. Deze plaatsen zijn niet effectief voor de krachtsoverdracht via vermindering van de contactkracht.
- Door de belasting F zal de kap extra vervormen; hierdoor ontstaan prying-forces langs de randen, hetgeen hieronder wordt toegelicht. Aangenomen is hierbij dat indien F werkt, de krachtsoverdracht volledig door vermindering van contactkracht geschiedt, F_c wordt gelijk aan nul bij $F = 2F_v$ (de weg via vermindering van F_v is veel stijver dan via vermeerdering van boutkracht).



afb. 89

Met F is het momentenvlak voor de kap groter, dus een grotere vervorming van de kap, daarom beter als langs de randen van de kap geen contact mogelijk is (zie afbeelding 90b), anders ontstaan er extra krachten (prying-forces) die de bouten extra op trek belasten.



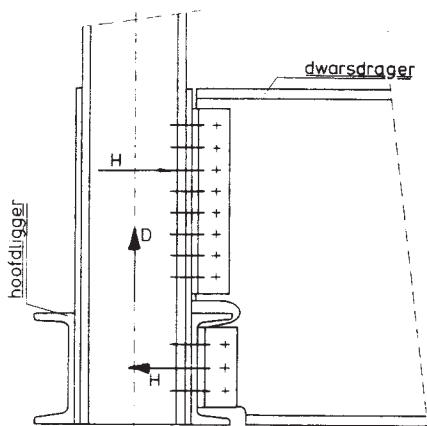
Opmerking:

Nader onderzocht moet worden of door het aandraaien van de bouten niet te snel vervormingen optreden als aangegeven in afbeelding 90b. In dat geval kan het beter zijn om ook hier weer te zorgen voor twee draagvlakken (zie afbeelding 90c), of eventueel de uitsparingen minder ver doortrekken.

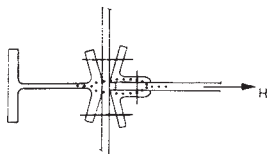
Verbinding dwarsdrager-hoofdligger van een vakwerkbrug

(zonder bovenwindverband)

Het kan voordelig zijn om de momenten waarop de verbinding wordt belast, te laten opnemen door trek- en drukkrachten op de hoekstalen zoals getekend in afbeelding 91, in plaats van door schuifkrachten ter plaatse van boven- en onderflens dwarsdrager. Bij deze laatste manier van krachtsoverdracht moet namelijk gezorgd worden voor



afb. 91



afb. 92

schuifvaste verbindingen, dus bijvoorbeeld verbindingen met voorspanbouten waarbij tevens de nodige aandacht aan de conditie van de wrijvingsvlakken moet worden besteed.

Bij de eerst genoemde wijze van momentoverdracht wordt het onderste hoekstaal op trek belast, zie afbeelding 91.

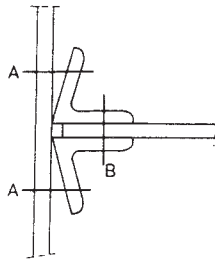
Om te zorgen dat de contactkracht op de goede plaats komt, kunnen de hoekstaalbenen en de flens van het I-profiel vooraf worden doorgezet, zie afbeelding 92.

Na het aandraaien van de bouten ligt de contactkracht dan in het verlengde van de trekkracht H zodat deze dan door middel van vermindering van contactkracht kan worden overgebracht, zie afbeelding 92. De verbinding met hoekstalen zal zich voor krachten kleiner of gelijk aan de contactkracht zeer stijf gedragen terwijl, indien de contactkracht groter of gelijk aan H is, geen vermoeiing van de bouten kan optreden.

Opgelet !

Men zal gauw geneigd zijn om voor de bepaling van H alleen aan de mobiele belasting te denken. Dit is niet juist. H moet worden bepaald met de totale hiervoor in aanmerking komende belasting die wordt aangebracht nadat de bouten zijn aangedraaid. Het eigen gewicht van bijvoorbeeld de betonvloer op de dwarsdrager moet dus voor de bepaling van H worden meegenomen in de beschouwing aangezien deze evenzeer een gedeelte van de contactkracht opsoupeert.

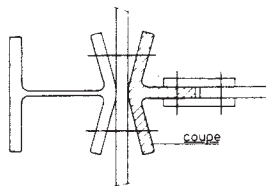
Bij de montage moet worden opgelet dat tijdens het aandraaien van de bouten A, zie afbeelding 93, de hoekstalen goed kunnen schuiven



afb. 93

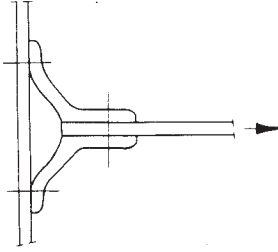
zodat de contactkracht op de goede plaats komt. In verband hiermee verdient het wellicht de voorkeur om voor bouten B, zie afbeelding 93, eerst werkbouten te nemen, kwaliteit 4.6 en iets kleiner van diameter. Deze bouten zouden eerst los-vast moeten worden gemonteerd, daarna bouten A aandraaien.

Mochten de hoekstaalbenen niet voldoende stijf zijn, dan kan ook een coupe worden gekozen, zie afbeelding 94.



afb. 94

Opmerking:



afb. 95

Als de hoekstalen worden gemonteerd zoals in afbeelding 95 aangegeven, dan is dit met oog op vermoeiing van de bouten zeer ongunstig.

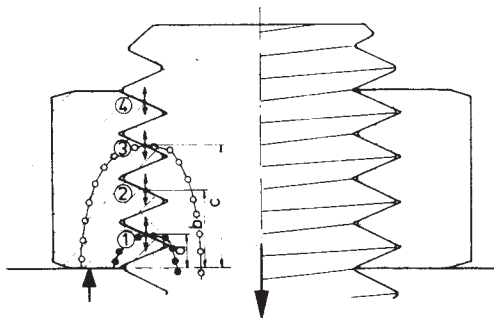
Hieruit blijkt dat, ook al zijn de bouten goed aangedraaid, toch een slechte constructie aanwezig kan zijn.

Maatregel ter verbetering van de vermoeiingssterkte van schroefdraden

Bij werktuigbouwkundige constructies kunnen de omstandigheden met betrekking tot vermoeiing van de bouten tamelijk gecompliceerd zijn. In de eerste plaats zal moeten worden getracht om zodanig te construeren dat, onder invloed van de uitwendige belasting, de boutkracht niet van grootte verandert.

Indien dit niet volledig mogelijk is, kunnen speciale maatregelen worden genomen om vermoeiing van bouten zoveel mogelijk te voorkomen..

Bijvoorbeeld wordt soms bij de vervaardiging de spoed van de schroefdraad in de moer niet gelijk gemaakt aan de spoed van de schroefdraad op de boutsteel.



afb. 96

Indien de spoed in de moer wel gelijk is aan de spoed van de schroefdraad op de steel dan zullen op de verschillende schroefgangen krachten ontstaan die niet aan elkaar gelijk zijn als gevolg van het feit dat de stijfheden van de wegen naar de schroefgangen verschillen. De vervorming t.p.v. schroefgang ① wordt bijvoorbeeld bepaald door de verlenging van de steel over de lengte a en de indrukking van de moer over dezelfde lengte.

Voor de vervorming t.p.v. schroefgang ② is echter de lengte b bepalend en voor de vervorming t.p.v. schroefgang ③ de lengte c , zie afbeelding 96.

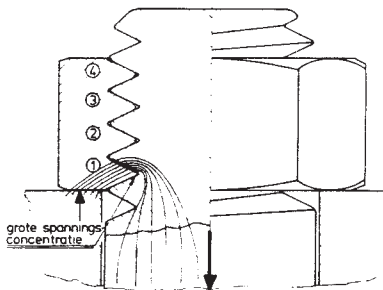
Door deze verschillen in stijfheid zullen ook de belastingen op de schroefgangen verschillend zijn.

Anders gezegd: De weg via schroefgang ① is stijver dan de weg via schroefgang ③, schroefgang ① zal dus meer belasting naar zich toe trekken dan schroefgang ③.

Om nu de belasting op de schroefgangen zoveel mogelijk gelijk te maken wordt soms de spoed van de moer gelijk gemaakt aan de spoed die de schroefdraad op de steel heeft als in de steel door het aandraaien de voorspankracht is opgewekt.

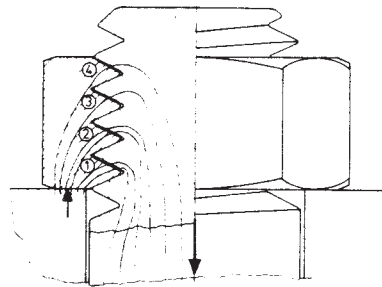
Daar in onbelaste toestand de spoed van de moer dan groter is dan de spoed op de steel, zal bij het aandraaien schroefgang ④ (zie afbeelding 96) het eerst gaan dragen. Bij verder aandraaien gaan de schroefgangen in de volgorde ③, ② en ① dragen.

Het gevolg hiervan is dat in de boutsteel een kleinere spanningsconcentratie bij de onderste schroefgang aanwezig zal zijn, vergelijk afbeelding 97a met afbeelding 97b.



afb. 97a

Alleen schroefdraad ① draagt.

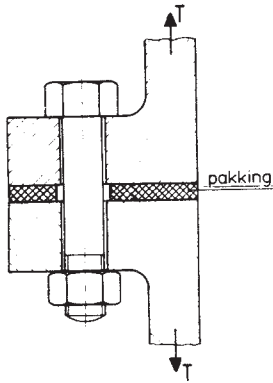


afb. 97b

Alle schroefgangen dragen.

Flenzen met pakkingen

In werktuigbouwkundige constructies moet bij flenzen vaak voor een goede afdichting worden gezorgd. De afdichting kan bijvoorbeeld worden



afb. 98

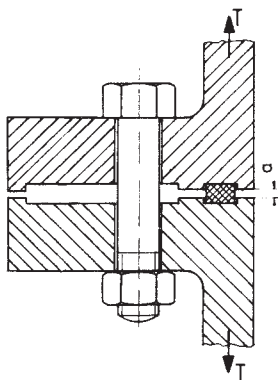
verkregen door het toepassen van een pakking, zie afbeelding 98.

In dit geval komt dan de volledige kracht, die door het aandraaien wordt opgewekt, t.p.v. de pakking terecht. De stijfheid van de verbinding met pakking zal kleiner zijn dan in het geval geen pakking is aangebracht, dus wanneer contact aanwezig is van staal op staal.

Het bezwaar van de kleinere stijfheid is dat indien de verbinding op trek wordt belast, de krachtsoverdracht

niet meer hoofdzakelijk via vermindering van contactkracht zal gaan maar gedeeltelijk ook via vermeerdering van boutkracht, dus kans op vermoeiing van de bouten.

Een oplossing kan worden gevonden door bijvoorbeeld te zorgen voor voldoende aandrukkracht op de pakking met daarnaast een zekere contactkracht van staal op staal. Als de bouten nog niet zijn aangedraaid



afb. 99

is er een zekere speling a , zie afbeelding 99, tussen de flenzen aanwezig.

Worden de bouten aangedraaid dan mag de speling a pas gelijk aan nul worden als op de pakking voldoende kracht aanwezig is voor het garanderen van een goede afdichting.

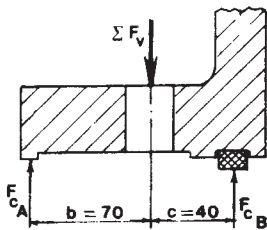
Door verder aandraaien moet er nu voor worden gezorgd dat in het verlengde van de uitwendige belasting tussen staal en staal voldoende contactkracht aanwezig is. Deze contactkracht moet groter zijn dan de uitwendige belasting die tijdens het gebruik op de verbinding kan komen.

Als dit het geval is dan zal t.g.v. de uitwendige belasting alleen de contactkracht tussen staal en staal verminderen maar niet de kracht op de pakking waarbij tevens ook de boutkracht praktisch constant zal blijven (aangenomen is dat de stijfheid van de pakking belangrijk kleiner is dan de stijfheid "staal op staal").

Het zogenaamde "natrekken" van de bouten met het doel de pakking steviger aan te drukken is hierbij niet meer mogelijk. De vraag is echter of dit nog wel nodig zal zijn.

Bij een verbinding waarbij alleen druk op de pakking wordt uitgeoefend en geen druk tussen staal en staal aanwezig is, zal t.g.v. de uitwendige belasting de kracht op de pakking van grootte variëren. Dit kan tot gevolg hebben dat de pakking gaat zetten en dat natrekken nodig is. Bij een verbinding waarbij naast de druk op de pakking voldoende kracht tussen staal en staal aanwezig is, zal de kracht op de pakking praktisch niet variëren zodat natrekken waarschijnlijk niet nodig is.

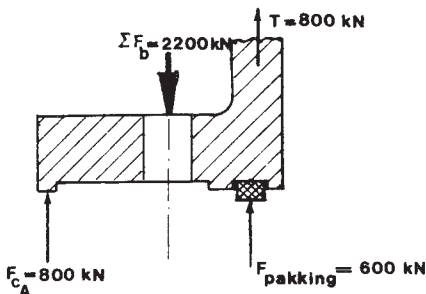
Moet de pakking bijvoorbeeld 2 mm worden ingedrukt om voldoende afdichting te garanderen, dan zal de maat $a = 2$ mm (zie afbeelding 99) moeten worden gekozen. Is voor deze indrukking een kracht nodig van bijvoorbeeld 600 kN en bedraagt de uitwendige trekkracht T bijvoorbeeld 800 kN, dan zal door het aandraaien van de bouten op het rechter contactvlak (zie afbeelding 99) tenminste $600 + 800 = 1400$ kN moeten worden opgewekt. De grootte van de totaal benodigde voorspankracht volgt m.b.v. afbeelding 100 uit:



afb. 100

$$\Sigma F_v \times \frac{b}{b+c} = 1400$$

$$\Sigma F_v \times \frac{70}{70+40} = 1400 \longrightarrow \Sigma F_v = 2200 \text{ kN}$$



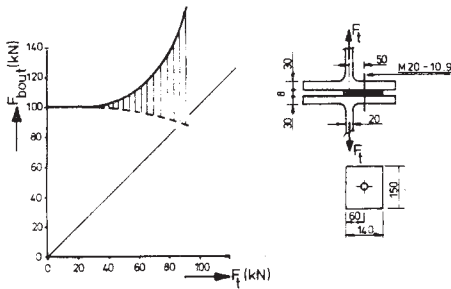
In afbeelding 101 zijn de krachten aangegeven die optreden als een uitwendige trekkracht $T = 800$ kN op de verbinding werkt.

afb. 101

Om enige reserve te hebben zou de som van de boutkrachten zodanig moeten zijn dat op het rechter contactvlak een kracht wordt opgewekt van bijvoorbeeld 1700 kN. Als in dat geval de uitwendige trekkracht $T = 800$ kN werkt, dan blijft er t.p.v. het rechter contactvlak tussen staal en staal nog een contactkracht van 300 kN over.

Plaats van de contactvlakken bij asymmetrisch op trek belaste flensverbindingen

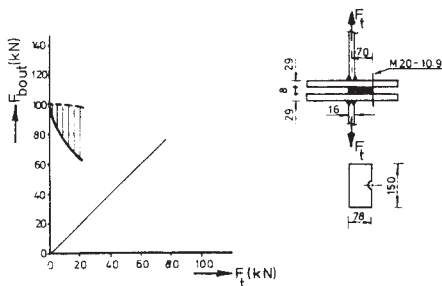
Om de constructieve keuze voor de plaats van de contactkracht te vergemakkelijken, worden hier nog enkele proefresultaten getoond.



afb. 102

In afbeelding 102 zijn de resultaten gegeven van een proefstuk waarbij over een groot deel van de rechterhelft een vulling is aangebracht.

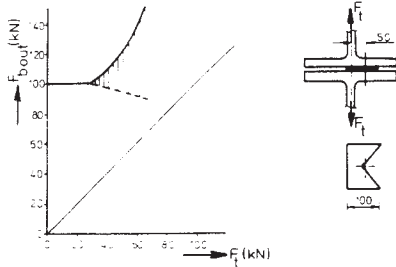
Het bezwaar van deze uitvoering is dat ook een gedeelte van de contactkracht rechts van de bout optreedt en daar minder effectief is.



afb. 103

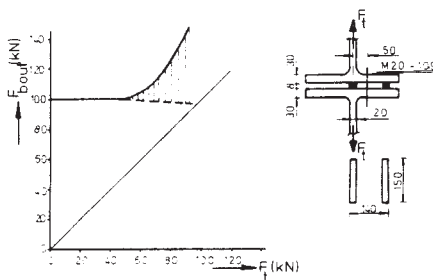
Om rechts van de bout geen contactkracht tot ontwikkeling te laten komen zou de vulling kunnen worden uitgevoerd als gegeven in afbeelding 103.

Deze uitvoering is echter, zoals uit de proefresultaten blijkt, geen verbetering maar juist een verslechtering.



afb. 104

Het blijkt dat reeds bij kleine trekkrachten de flenzen gaan kantelen. Als gevolg hiervan wordt tijdens het belasten de boutkracht kleiner i.p.v. groter. Dit betekent dat reeds bij het met geringe trekkrachten belasten en ontlasten een aanzienlijke variatie in boutkracht zal optreden en derhalve heel snel vermoeiing van de bouten.



afb. 105

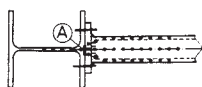
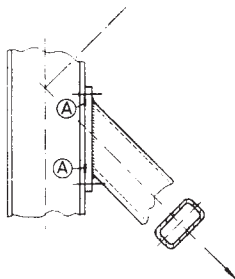
Om het kantelen te voorkomen is ook een vulling toegepast zoals gegeven in afbeelding 104. Ten opzichte van de situatie volgens afbeelding 102 blijkt dit ook geen verbetering te geven.

De beste resultaten zijn nog verkregen met twee vulstripjes, zoals gegeven in afbeelding 105. Bij dit proefstuk begon de boutkracht pas toe te nemen bij een uitwendige trekkracht van 50 kN.

Ook uit deze resultaten blijkt weer overduidelijk dat gezorgd moet worden voor een voldoende grote contactkracht in het verlengde van de uitwendige trekkracht.

Indien deze effectieve contactkracht groter is dan de uitwendige trekkracht, dan zal geen vermoeiing van de bouten kunnen optreden.

Aansluiting diagonaal aan kolom



afb. 106

Wordt voor de dynamisch op trek belaste diagonaal een rechthoekig buisprofiel gekozen en voor de kolom een HE-A profiel, zie afbeelding 106, dan zou om geen vermoeiing van de bouten te krijgen het volgende kunnen worden gedaan.

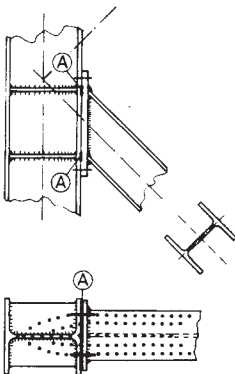
Zorg dat de uitvoering zodanig is, dat door het aandraaien van de bouten contactkrachten worden opgewekt ter plaatse van de vlakjes die in afbeelding 106 met (A) zijn aangegeven.

De krachten kunnen dan, vanuit het lijf van de kolom komende, via contactkrachtvermindering ter plaatse van de vlakjes (A) naar de diagonaal worden overgebracht.

Een bezwaar van deze uitvoering is dat de totale kracht van de diagonaal (dus ook de krachten in de zijwanden van de diagonaal) in een klein gebiedje wordt ingeleid.

De las waarmee het kokerprofiel aan de kopplaat is verbonden wordt hierdoor zeer plaatselijk dynamisch belast, zie afbeelding 106, hetgeen tot vermoeiing van de las kan leiden.

Een duidelijke verbetering kan worden verkregen met de uitvoering volgens afbeelding 107. Voor de diagonaal is nu ook een HE-A profiel gekozen terwijl tevens schotjes in de kolom zijn aangebracht. Door ervoor te zorgen dat contactkracht aanwezig is ter plaatse van de stroken (A) over de volle flensbreedte, kan over deze volle breedte krachtsoverdracht door vermindering van contactkracht plaatsvinden, zie afbeelding 107.



afb. 107

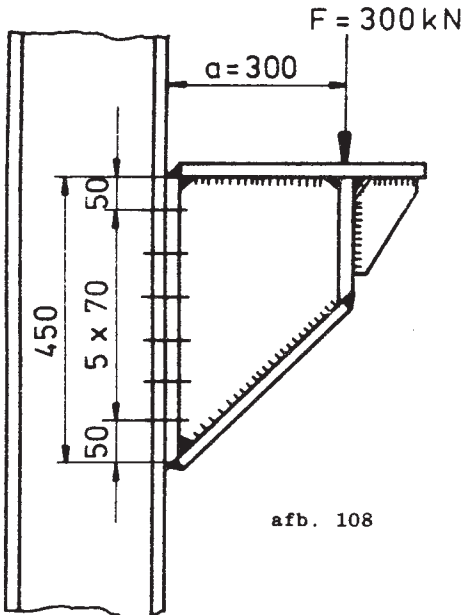
Aangezien praktisch de gehele kracht van de diagonaal in de flenzen aanzelig is, zal er bijna geen concentratie van kracht optreden en is de kans op vermoeiing van de las aanzienlijk kleiner geworden.

Berekening aansluiting console aan kolom

Bij de behandeling van de rollendraaikrans van een zwenkkraan is op blz. 65 reeds gesteld dat, voor de berekening van de vermoeiingssterkte en voor de bepaling van de statische bezwijkbelasting, de neutrale lijn niet op dezelfde plaats ligt.

Aan de hand van een voorbeeld zal dit hieronder nader worden toegelicht.

Belasting dynamisch



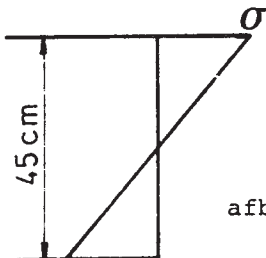
afb. 108

Aangenomen wordt dat de aansluiting aan de kolom zodanig wordt uitgevoerd dat de contactkracht, die door het aandraaien van de bouten wordt opgewekt, volledig terecht komt in het hart van de aansluiting (verlengde kolomlijf). Om geen vermoeiing van de bouten te krijgen mag deze contactkracht niet volledig door de dynamische belasting worden opgeheven.

Indien een moment op deze aansluiting wordt uitgeoefend dan zal in dit geval de voorgespannen trekzone zich ongeveer even stijf gedragen als de drukzone.

In verband hiermee moet niet het onderste punt van de console als rotatiepunt worden gekozen, maar het zwaartepunt van de aansluiting (dit is ongunstiger).

spanningsverdeling t.p.v. aansluitvlak:



afb. 109

$$\sigma = \frac{Fxa}{\frac{1}{6}xbxh^2} = \frac{300 \times 30}{\frac{1}{6} \times b \times 45^2}$$

waarin:

b = breedte van het contactvlak

h = hoogte van het contactvlak

Voor de bovenste bout komt voor rekening een strook met een hoogte

van: $(5 + \frac{7}{2}) = 8,5$ cm.

In het midden van deze strook is de spanning: $\sigma^I = \frac{(22,5 - \frac{8,5}{2})x}{22,5} = 0,81x$

De contactkracht die door de bovenste bouten moet worden geleverd be-
draagt: $F_c = \sigma^I \times b(5 + \frac{7}{2})$

$$F_c = 0,81 \times \frac{300 \times 30}{6 \times b \times 45^2} \times b \times 8,5$$

$$F_c = 183,6 \text{ kN, dus per bout } 91,8 \text{ kN}$$

Gekozen kan bijvoorbeeld worden: bout M20 - klasse 8.8 $F_v = 125 \text{ kN}$

of om een extra ruime reserve : bout M20 - klasse 10.9 $F_v = 176 \text{ kN}$
te hebben

De kolomflens en de aansluitflens van de console moet nu zodanig worden
gedimensioneerd dat door het aandraaien van de bouten, in het midden
eerst de benodigde contactkracht wordt opgewekt (voor de bovenste twee
bouten $F_c \approx 183,6 \text{ kN}$), voordat de beide flenzen t.p.v. de bouten op
elkaar komen.

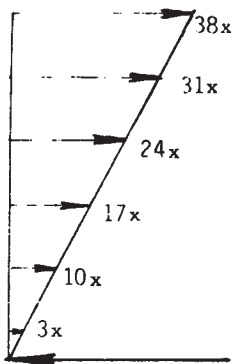
Gecontroleerd moet nog worden of ook de schuifkracht kan worden opgenomen.

Statische belasting

Bij een statische belasting mag worden aangenomen dat het rotatiepunt
ergens t.p.v. het onderste gedeelte van de console ligt.

Voordat statische breuk optreedt zullen grote
vervormingen aan de trekzijde optreden, hier-
door komt het rotatiepunt laag te liggen.

In dit geval wordt aangenomen dat het rotatie-
punt 3 cm onder de onderste bouten ligt.



afb. 110

$$F \cdot 30 = 2x(38^2 + 31^2 + 24^2 + 17^2 + 10^2 + 3^2)$$

$$F \cdot 30 = 2x \quad 3379$$

$$x = \frac{F \cdot 30}{2 \cdot 3379}$$

$$38x = \frac{38 \cdot F \cdot 30}{2 \cdot 3379} = 0,17 F$$

Stel bouten M20 - klasse 8.8 $\hat{F}_t = 137 \text{ kN}$

Volgens de berekening van de bouten zou
de grenswaarde voor de kracht F bedragen:

$$38x = 0,17 \hat{F}$$

$$137 = 0,17 F \longrightarrow F = \underline{806 \text{ kN}}$$

Gecontroleerd moet worden of de bouttrekkrachten door de kolomflens en door de aansluitflens van de console kunnen worden opgenomen. Tevens moet worden nagegaan of de kracht t.p.v. het rotatiepunt door de kolom en door de console kan worden opgenomen.

De kracht in het rotatiepunt is gelijk aan de som van de bouttrekkrachten en bedraagt in dit geval:

$$2 (38x + 31x + 24x + 17x + 10x + 3x)$$

$38x = 137 \text{ kN}$ dus de kracht in het rotatiepunt is:

$$\frac{2 \times 137}{38} (38 + 31 + 24 + 17 + 10 + 3) = 886,9 \text{ kN}$$

Indien bij de berekening van de bouten ook nog rekening gehouden is met prying forces dan kunnen deze bij de kracht in het rotatiepunt in mindering worden gebracht.

Ook moet nog worden gecontroleerd of de schuifkracht kan worden opgenomen.

Een op trek belaste geboute verbinding met hoekstalen

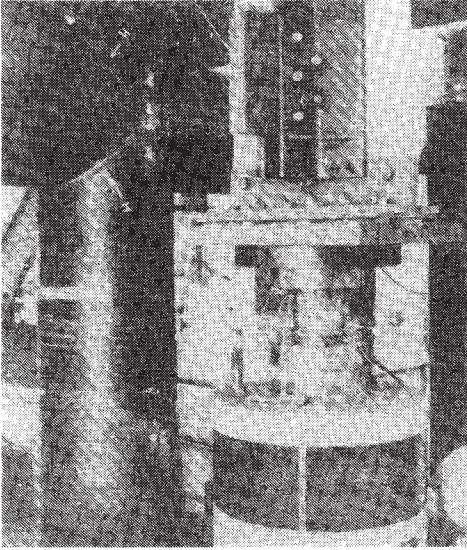
De afbeeldingen 111 en 112 geven een constructieve uitvoering van een geboute verbinding met hoekstalen welke grote dynamische trekkrachten moet overbrengen.

In de verticale benen van de hoekstalen zijn voorspan- injectiebouten aangebracht. De belasting kan dus uit de plaat via deze voorspan- injectiebouten naar de verticale hoekstaalbenen.

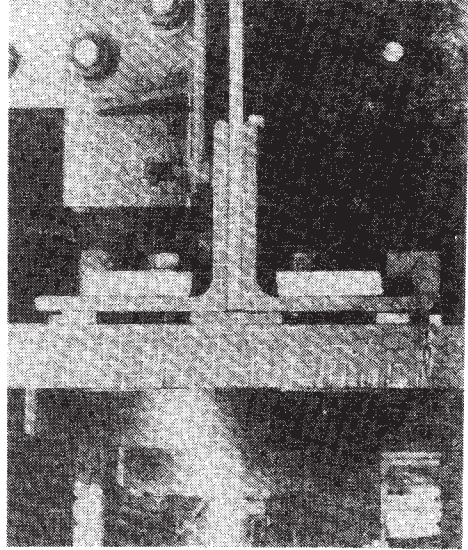
Vanuit deze benen kan de belasting via vermindering van contactdruk op de middelste strip (zie afbeelding 112) naar de daaronder liggende plaat worden overgebracht en vandaar naar het vizel.

Gezorgd moet worden dat de contactkracht, die door het aandraaien van de bouten ter plaatse van de middelste vulstrip wordt opgewekt, groter is dan de uitwendige trekkracht.

Omdat de horizontale hoekstaalbenen niet sterk genoeg zijn om het buigend moment, dat veroorzaakt wordt door de boutkrachten, op te nemen, zijn dikke platen op de hoekstaalbenen aangebracht.



afb. 111



afb. 112

Enige opmerkingen met betrekking tot de constructieve uitvoering van op trek belaste boutverbindingen

Heel duidelijk staat vast dat bij dynamisch op trek belaste boutverbindingen de constructieve uitvoering bepalend is voor de kans op vermoeiing van de bouten.

Gezorgd moet worden voor voldoende effectieve contactkracht zo mogelijk in het verlengde van de uitwendige trekkracht.

Het heeft geen zin om te pogen nauwkeurig te rekenen omdat altijd onbekende factoren aanwezig zullen zijn, zoals bijvoorbeeld afwijkingen in maten en vlakheden, relaxatie en dergelijke.

Het is zinvol om de effectieve contactkracht ruim te kiezen, dus duidelijk groter dan de vermindering t.g.v. de uitwendige trekkracht, hierdoor zal altijd een zekere contactkracht aanwezig blijven en zullen de contactvlakken niet "inslaan".

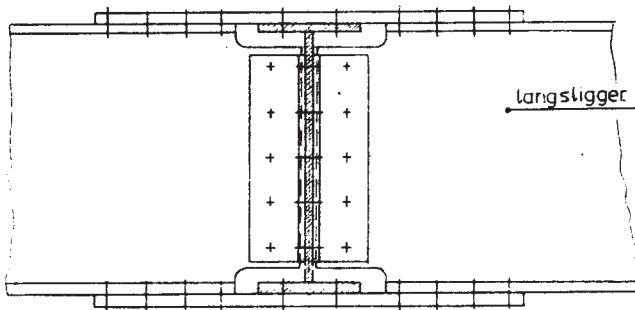
5.2. Op schuif belaste verbindingen

Continuïteitsverbinding

In afbeelding 113 is een continuïteitsverbinding getekend zoals vaak toegepast bij langsligger-dwarsdrager verbindingen in bruggen.

Bij spoorbruggen (zwaar dynamisch belast) zijn bij deze verbindingen in het verleden moeilijkheden opgetreden.

Na enige tijd vertoonden zich scheuren in het lijf van de langsligger welke gestart waren in de raveling.

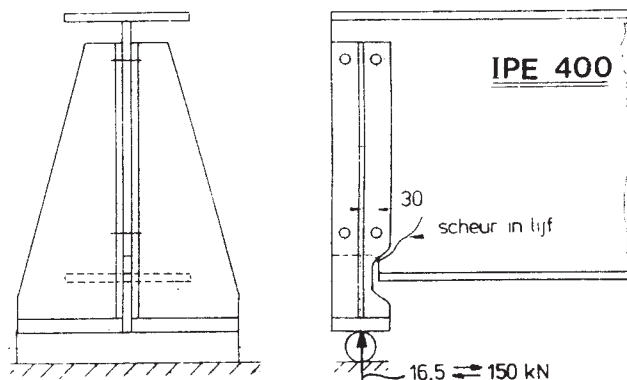


afb. 113

In het Stevinlaboratorium zijn bij het beproeven van liggers ook in een vroeg stadium t.p.v. een raveling vermoeingsbreuken opgetreden. Omdat bekend was dat deze ravelingen erg kritisch zijn, was er bij het ontwerp reeds voor gezorgd dat de raveling zo kort mogelijk was, zie afbeelding 114. De verwachting was dat dan t.p.v. de raveling geen vermoeingsbreuken zouden ontstaan.

Hoewel de oplegkracht niet extreem groot was, deze wisselde van 1,65tf naar 15tf, en de excentriciteit klein, namelijk slechts 3 cm, is toch reeds na 273.000 belastingswisselingen een scheur in het lijf ontstaan ter plaatse van de raveling.

Hoe moet de aansluiting bij een continuïteitsverbinding worden uitgevoerd opdat de kans op vermoeiing zo gering mogelijk is?



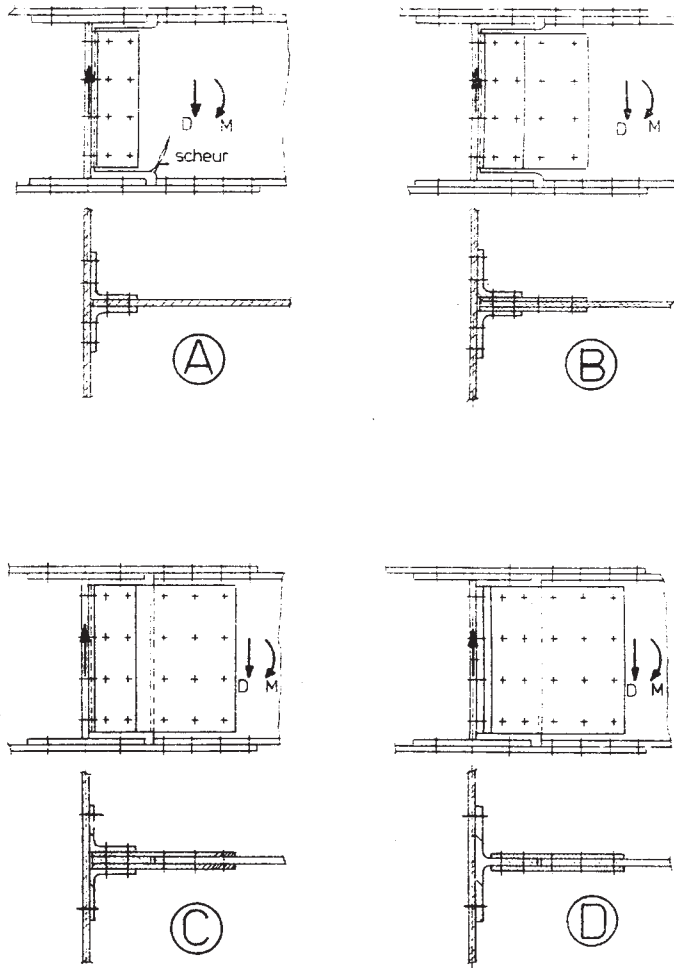
afb. 114

In afbeelding 115 zijn voor de aansluiting een viertal constructieve uitvoeringen getekend, te weten A t/m D.

Door de doorlopende opdikplaten is uitvoering B gunstiger dan uitvoering A. Het lijf van de langsligger kan bij uitvoering B toch nog een belangrijk deel van de kracht naar zich toetrekken omdat het lijf stijver is dan de opdikplaten die met verbindingsmiddelen aan het lijf verbonden zijn en daardoor beweeglijker zijn. Doordat het lijf nog een belangrijk deel en misschien wel het belangrijkste deel van de dwarskracht gaat dragen is toch weer een grote kans aanwezig op scheurvorming in het lijf t.p.v. de raveling.

De uitvoeringen C en D zijn ten aanzien van dit punt aanzienlijk gunstiger. Bij deze uitvoeringen loopt het lijf niet door en moet zowel bij uitvoering C als bij uitvoering D de totale dwarskracht via de aansluitplaten. De aansluitplaten voeren de dwarskracht plus het excentriciteitsmoment over een groot oppervlak verdeeld in het lijf, zonder dat daar een raveling is. De kans op vermoeiing is bij deze beide uitvoeringen uitermate klein. De uitvoering D is duidelijk eenvoudiger dan de uitvoering C en verdient daarom waarschijnlijk de voorkeur.

Het slimme van de oplossing zit dus in het feit dat het lijf bij de uitvoeringen C en D niet doorloopt zodat de totale dwarskracht verplicht wordt vanuit het lijf naar de stukplaten te gaan. Bij de uitvoeringen A en B is het lijf wel direct aanwezig en vormt bovendien het stijfste onderdeel waardoor veel kracht in het lijf blijft en ter plaatse van de raveling scheuren in het lijf kunnen ontstaan.

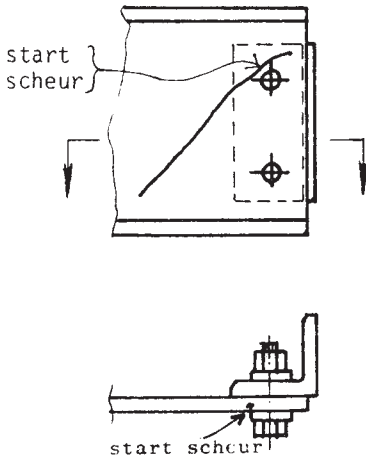


afb. 115

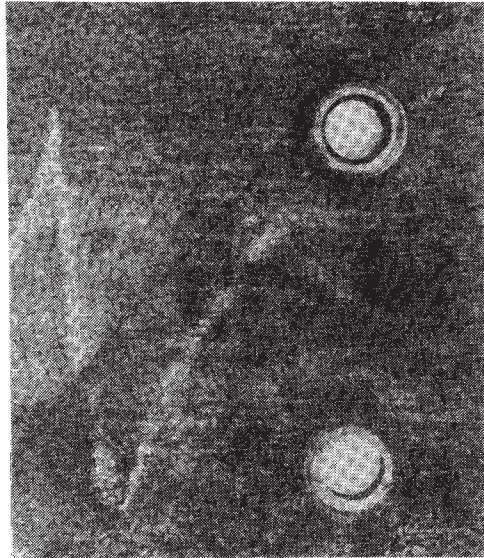
Dwarskrachtaansluiting

Bij éézijdig aangesloten constructiedelen die dynamisch worden belast, kunnen vermoeiingsscheuren t.p.v. de onderleggringen ontstaan.

Bij proeven is dit opgetreden in een lijfplaat t.p.v. een opleghoekstaal, zie de afbeeldingen 116 en 117.



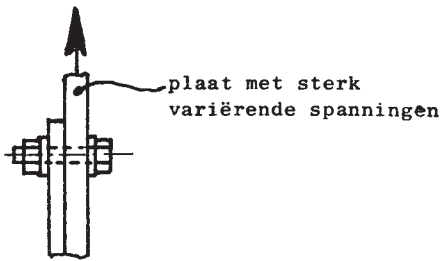
afb. 116



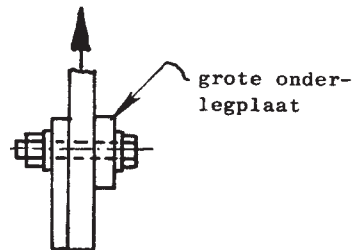
afb. 117

Het is mogelijk dat door de kleine relatieve verplaatsingen onder de ring wrijvingscorrosie is opgetreden, hetgeen een aanleiding voor vermoeiingsscheuren kan zijn. Ook kan door de ring een spanningsconcentratie ontstaan zijn.

Uit bovenstaande blijkt dat niet direct de boutkop of de onderlegging op het constructiedeel mag dragen waarin sterk variërende spanningen optreden, zie afbeelding 118. Het is beter om in dergelijke gevallen grote onderlegplaten aan te brengen, zie afbeelding 119.



afb. 118



afb. 119

APPENDIX A

Proeven voor de bepaling van de invloed van een ongelijkmatige verdeling van de contactdruk op de krachtsverdeling over bouten en lassen

In de praktijk komt het vaak voor dat bij geboute flensverbindingen de contactvlakken niet mechanisch worden bewerkt. Door het lassen zijn de flenzen vaak enigszins vervormd waardoor er geen zekerheid bestaat over de plaats van de contactkrachten, waarmee de flenzen door het aandraaien van de bouten op elkaar worden gedrukt. Indien de flensverbinding dynamisch op trek wordt belast, dan heeft de plaats van de contactkrachten een belangrijke invloed op de vermoeiingssterkte van bouten en lassen. Bij een flensverbinding, zoals getekend in *afbeelding 120*, is de invloed onderzocht van verschillende liggingen van de contactkrachten. *Afbeelding 121* geeft een overzicht van de proefopstelling.

De plaats van de contactkrachten is gevarieerd door tussen de flenzen losse vullingen aan te brengen. Ook is nagegaan of door het aanbrengen van een epoxyhars (Araldit SW 404) tussen de contactvlakken, een goede spanningsverdeling kan worden verkregen. De vullingen zijn in dit geval ingesmeerd met Araldit SW 404, waarna de flenzen op elkaar zijn geplaatst. Na 24 uur zijn de bouten tot de voorgescreven voorspankracht aangedraaid. Om een indruk te geven over de invloed van de ligging van de contactkrachten zijn in *afbeelding 122* voor verschillende gevallen verlengingen van de bouten gegeven die bij een bepaalde belasting zijn gemeten.

Bij *proefstuk 1* waren vullingen over de volle lengte aanwezig. Doordat de contactvlakken niet vlak waren, is toch een ongelijke krachtsverdeling opgetreden.

Bij *proefstuk 4* is bij elke bout de spleetopening zo goed mogelijk met vullingen opgevuld.

Proefstuk 6 is erg ongunstig, zeker gezien het feit dat een rimpel van 22 μm reeds na 10^6 wisselingen breuk van de bouten veroorzaakt.

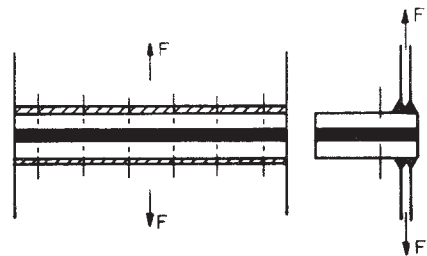
De beste resultaten zijn verkregen met *proefstuk 5*, het proefstuk waarbij de vullingen zijn ingesmeerd met de epoxyhars Araldit SW 404.

In *afbeelding 123* zijn voor de *proefstukken 5* en *6* de gemeten boutverlengingen uitgezet, terwijl tevens de in de lijfplaat gemeten spanningen zijn aangegeven.

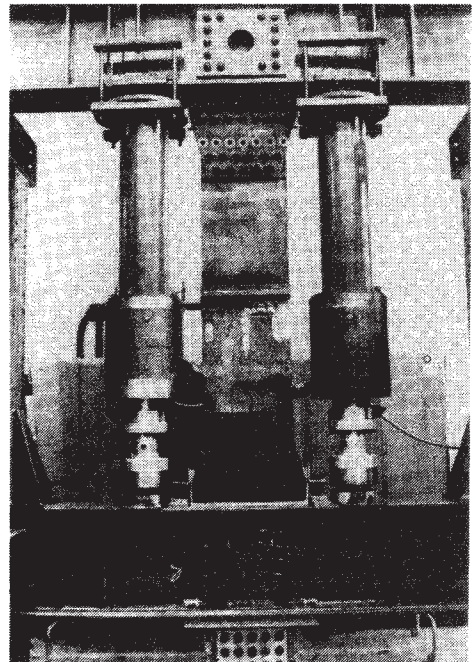
Zoals uit de figuren van *proefstuk 6* blijkt zijn ter plaatse van de bouten met de grootste verlengingen de spanningen in de lijfplaat het laagst. Dit is goed verklaarbaar omdat bij de bouten met de grootste verlengingen er geen compensatie optreedt door reductie van contactkracht (er is daar ter plaatse geen contactkracht), waardoor de boutkracht snel toeneemt, zelfs bij geringe krachten, dus bij lage spanningen in de lijfplaat. Ter plaatse van de contactvlakken treedt wel een grote reductie van de contactkracht op bij zeer geringe vervorming, waardoor daar een grote krachtoverdracht plaatsvindt, dus hoge spanningen in de lijfplaat en een kleine krachtsvariatie in de bouten (compensatie door reductie van de contactkrachten).

Uit de *afbeeldingen 122* en *123* blijkt heel duidelijk dat een juiste verdeling van de contactkrachten erg belangrijk is, niet alleen in verband met vermoeiing van de bouten, maar ook in verband met vermoeiing van de lassen!

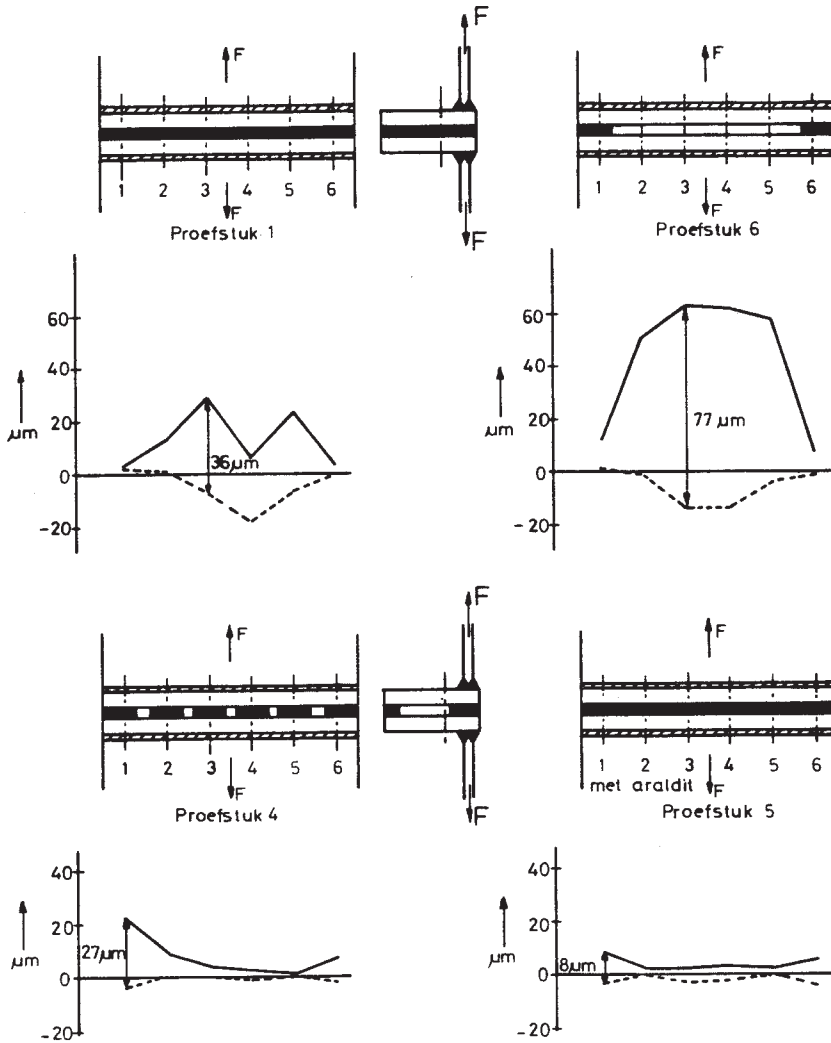
Bij contactvlakken die niet mechanisch worden bewerkt, kunnen vullingen met epoxyhars uitkomst bieden.



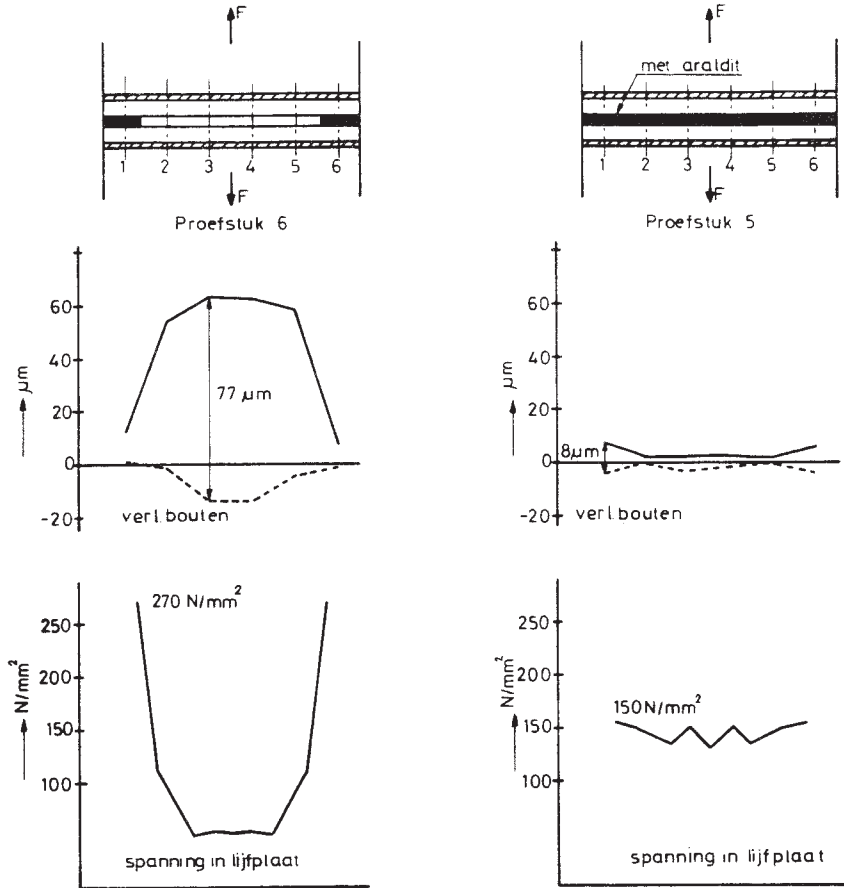
afb. 120 Flensverbinding



afb. 121 Proefopstelling flensverbinding



afb. 122 Invloed afwijking contactvlakken op boutkrachten



afb. 123 Invloed afwijking contactvlakken op spanningen in lijfplaat

