

MASTER

Kwaliteitsaspecten van felsnaden in personenauto's

Baartman, R.

Award date:
1987

[Link to publication](#)

Disclaimer

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

**Kwaliteitsaspecten van felsenaden
in personenauto's**

WE1
arch

R. Baartman

Februari 1987

VF-code: D3

WPA-rapport 0389

Verslag van eindstudieopdracht

Eindstudiedocent: prof.ir. J.A.G. Kals

**Begeleiding : dr.ir. J.A.H. Ramaekers
R.F.L. Ghijsen (Volvo, Born)**

**Technische Universiteit Eindhoven
Faculteit der Werktuigbouwkunde
Vakgroep Produktietechnologie en -Automatisering
Werkeenheid Bewerkingsprocessen en Materialen**

Februari 1987

VOORWOORD

Dit rapport bevat een samenvattend overzicht van mijn afstudeerwerk. Ik ben afgestudeerd aan de Technische Universiteit Eindhoven, binnen de werkeenheid Bewerkingsprocessen en Materialen van de vakgroep Produktietechnologie en -Automatisering. De eindstudie vond plaats bij Volvo Car Produktie B.V. te Born. Hier heb ik onderzoek verricht naar voorspelling en beheersing van kwaliteitsaspecten van felsnaden in carrosserieën van personenauto's. Voor achtergronden en berekeningen bij dit verslag wordt verwezen naar de bijlagen, WPA-rapport 0390.

Op deze plaats wil ik alle mensen bedanken die mij met raad en daad hebben bijgestaan in de afgelopen periode. In het bijzonder vermeld ik hier mijn begeleider bij Volvo, dhr. R.F.L. Ghijsen, mijn afstudeerhoogleraar prof.ir. J.A.G. Kals en mijn coach dr.ir. J.A.H. Ramaekers.

Eindhoven, februari 1987.

R. Baartman

INHOUD

Opdrachtschrijving	1
Samenvatting	2
1. Inleiding	3
2. Probleemstelling	4
3. Felsgereedschap	6
3.1. Gekromde contouren	6
3.2. Rechte contouren	9
4. Geometrie van de felsflens	12
5. Plooivorming in de felsflens	16
6. Conclusies en aanbevelingen	20
Symbolen	21
Literatuur	23

Eindstudieopdracht R. Baartman.

Begintijdstip : Oktober 1985.

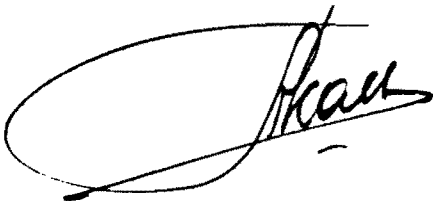
Begeleiders : Dr.ir. J.A.H. Ramaekers (TUE).
Hr. R.F.L. Ghijsen (Volvo Car, Born).

ONDERWERP : Felsen in de automobieliindustrie.

TOELICHTING : Enkelvoudige felsnaden worden veelvuldig toegepast bij het samenstellen (assembleren) van portieren, kofferdeksel, motorkap enz. uit losse plaatdelen. Aan de maatvoering en oppervlaktekwaliteit van de carrosseriedelen, inclusief de verbindingen, worden steeds hogere eisen gesteld. Dit zowel uit het oogpunt van styling als van aerodynamika en roestpreventie. De felsbewerking heeft grote invloed op de maattechnische, visuele en levensduur-kwaliteit van de carrosserie. Een beter inzicht in de achtergronden van het felsproces is dan ook noodzakelijk voor een betere voorspelling en beheersing van deze kwaliteitsaspecten.

OPDRACHT : a) Onderzoek en definieer de parameters die het felsproces beheersen (materiaal, gereedschap, geometrie van persdelen).
b) Geef aan hoe het felsproces beheerst en geoptimaliseerd kan worden, opdat plaatselijke en globale maat- en vormafwijkingen tot een aanvaardbaar niveau kunnen worden gereduceerd. Verifieer een en ander met geschikte experimenten.
c) Stel voorschriften/normen op voor:
- de uitvoering van persdelen (geometrisch ontwerp),
- de konstruktieprincipes van felsgereedschappen,
- de kwaliteitsbeoordeling van een felsnaadverbinding.

3 juli 1986
Prof.ir. J.A.G. Kals



SAMENVATTING

Felsnaden worden in carrosserieën van personenauto's toegepast op plaatsen waar hoge eisen gesteld worden aan zowel de nauwkeurigheid als de afwerking van plaatranden.

Felsen is een vrijbuigproces: vorm en ligging van de buiglijn zijn niet vastgelegd in het felsgereedschap. Door het verplaatsen van de buiglijn tijdens het felsen ontstaan maatafwijkingen. Bepalend hiervoor is de richting van de felskracht. Aanpassing van de felsstempelgeometrie verbetert het krachtverloop.

Doordat de buiglijn veelal krom is moet de felsflens behalve gebogen ook gestuikt of gerekt worden. Sterke deformatie leidt tot plooiën van de flens en zichtbare vervormingen van de gevormde rand. Hier is de deformatiearbeid in de flens bepalend. Door een beter ontwerp van zowel flensvorm als felsstempel kan de deformatiearbeid worden geminimaliseerd, waardoor randvervormingen sterk gereduceerd worden.

1. INLEIDING

Felsverbindingen worden in de automobiellindustrie veelvuldig toegepast bij de samenstelling van portieren, motorkap, kofferdeksel en dergelijke (fig 1.1.).

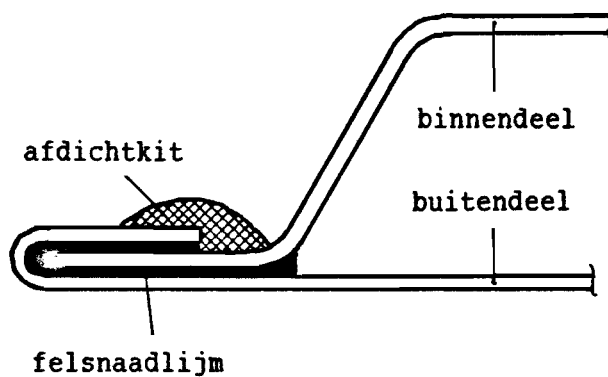


Fig. 1.1. Felsnaad

De redenen dat hier gekozen wordt voor felsnaden zijn:

- de verbinding eist weinig ruimte.
- de veelal vlijmscherpe plaatranden worden weggewerkt.
- er ontstaat een fraaie strakke rand zonder vervormingen van het buitenoppervlak van de plaat.

Zwak punt van een felsnaad was altijd de sterkte van de verbinding, maar moderne constructieve lijmtechnieken hebben dit probleem opgelost. Felsnaadlijm en een rups elastische afdichtkit zorgen voor een effectieve bescherming tegen corrosie.

Het vormen van een felsnaad vindt plaats in drie bewerkingsfasen. In een persbewerking is de felsflens reeds loodrecht omgezet. Dit heet het afkanten van de flens. Na het aanbrengen van de felsnaadlijm en het inleggen van het binnendeel wordt op enkele plaatsen voorgefelst. Dit gebeurt op moeilijk bereikbare plaatsen, bijvoorbeeld de hoeken van carrosseriedelen. Het voorfelsen zorgt tevens voor een hechting tussen binnen- en buitendeel, waardoor transport naar de felsmachine wordt vereenvoudigd. In de felsmachine wordt in een eerste bewerking de flens 45° verder gebogen (zie fig. 1.2.). In een volgende bewerking wordt de felsnaad gesloten (90° -felsen). Felsmachines verschillen nogal in uitvoering. Sommige lijken veel op een pers, andere werken met hydraulisch bekrachtigde vier-stangenmechanismen. De beide bewerkingsfasen kunnen in één machine zijn ondergebracht, maar ook in twee afzonderlijke. Het principe is echter altijd hetzelfde: eerst 45° -felsen, vervolgens 90° -felsen.

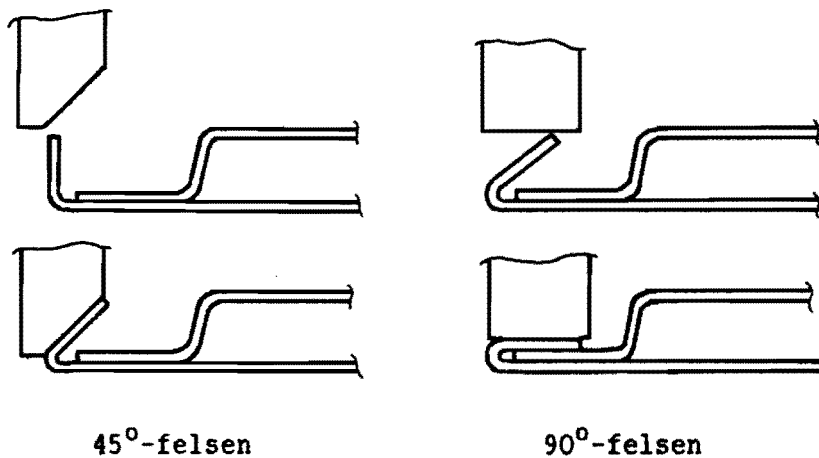


Fig. 1.2. Felsbewerkingen.

2. PROBLEEMSTELLING

Bij personenauto's is de laatste jaren een duidelijke tendens waarneembaar naar strakke aerodynamische carrosserievormen. Openingen tussen carrosseriedelen worden steeds kleiner om luchtweerstand en windruis te verminderen. Ook esthetische aspecten als styling en glans worden belangrijker. Voor de felsnaden betekent dit:

- Engere toleranties op de ligging van de gefelste contour, zowel in het vlak van de plaat (openingen) als loodrecht daarop (gelijkgigging met de rest van de carrosserie).
- Hogere eisen aan de esthetische kwaliteit van gefelste randen die in het zicht liggen.

Daarnaast eist de verdergaande automatisering in de productie beperking van handmatige nabewerkingen, zoals het schuren en slijpen van gefelste randen en oppervlakken: het is duur en bovendien manafhankelijk. Genoemde ontwikkelingen eisen een beter inzicht in het felsproces teneinde het beter beheersbaar en daardoor kwaliteitsniveau's voorspelbaar te maken.

Felsfouten kunnen ingedeeld worden in de volgende categorieën:

1. Maattechnische afwijkingen.

De aansluiting van de gefelste rand met de rest van de carrosserie is niet goed. Er kan onderscheid gemaakt worden in:

- a. Maatafwijkingen loodrecht op het vlak van de plaat, die zijn ontstaan door vervorming van het produkt als gevolg van het felsen.
- b. Maatafwijkingen in het vlak van de plaat, die zijn ontstaan door het inrollen van de rand, zie fig. 2.1.

2. Vervormingen in de gefelste rand.

Deze ontstaan op plaatsen waar de te felsen contour gekromd is waardoor deze tijdens het felsen de flens gerekt of gestuikt moet worden (fig. 2.2.).

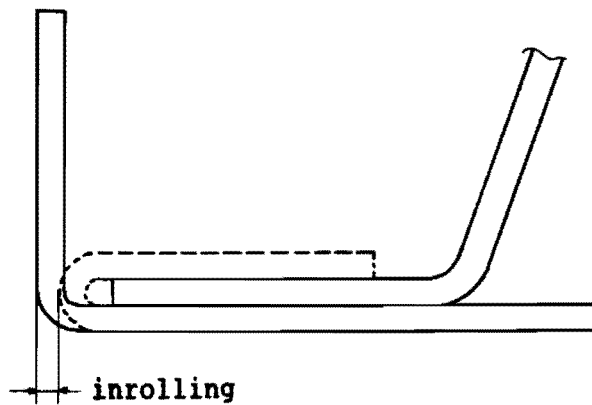


Fig. 2.1. Inrollen van de felsrand.

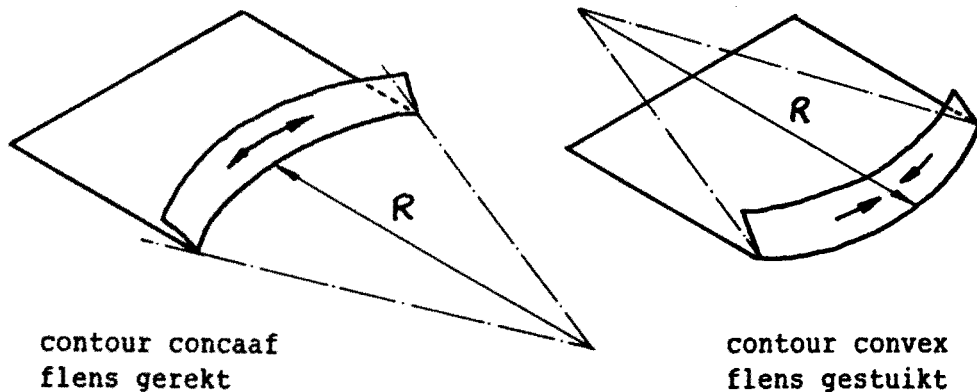


Fig. 2.2. Convexe en concave contouren.

Stuik op convexe contouren komt het meest voor: de hoeken van portieren, motorkap en dergelijke. Door het platdrukken van de hier gevormde plooiën in de flens (plaatdikte ca. 0.7. mm) ontstaan uitstulpingen in de felsrand die de contour een hoekig uiterlijk geven. Overmatige rek in de flens kan insnoeren en scheuren van de flens tot gevolg hebben.

3. Vervormingen in het oppervlak van de buitenplaat.

Op lange licht gekromde contouren (convex of concaaf) veroorzaakt het terugveren van de gestuikte of gerekte flens soms een patroon van ondiepe (enkele tienden van mm.) bulten en deuken in de buitenplaat, die pas na het lakken van de carrosserie goed zichtbaar worden.

Dit rapport beperkt zich tot de volgende onderwerpen:

- Beheersing van het inrollen/uitrollen door een aangepast ontwerp van het 45°-felsstempel (par. 3.2.)

- Verminderen van randvervormingen door het optimaliseren van de felsflensvorm (par. 4.1.) en het felsgereedschap (par. 3.1.) op gekromde contouren.
- Plooivorming in de flens, (hoofdstuk 5).

3. FELSGEREEDSCHAP

3.1. Gekromde contouren

Doorschot, [5], heeft in een onderzoek naar het kralen van dunwandige cilindrische produkten aangetoond dat bij een combinatie van buiging met stuijk of rek er een buigradius bestaat waarbij de door het materiaal opgenomen deformatiearbeid minimaal is. Deze optimale buigradius is een funktie van de geometrie van het produkt, de buighoek en de verstevigingsexponent van het materiaal. Toepassing van de optimale buigradius leidt tot een beter beheersbare produktgeometrie, geringere proceskrachten en minder gereedschapsslijtage. Deze beschouwing kan ook worden toegepast op het felsen van convex en concaaf gekromde contouren, waarbij respektievelijk een combinatie van buiging en stuijk en buiging en rek optreedt.

De toename van de deformatiearbeid δW wordt berekend bij een toename van de buighoek β met $\delta\beta$, zie fig. 3.1.

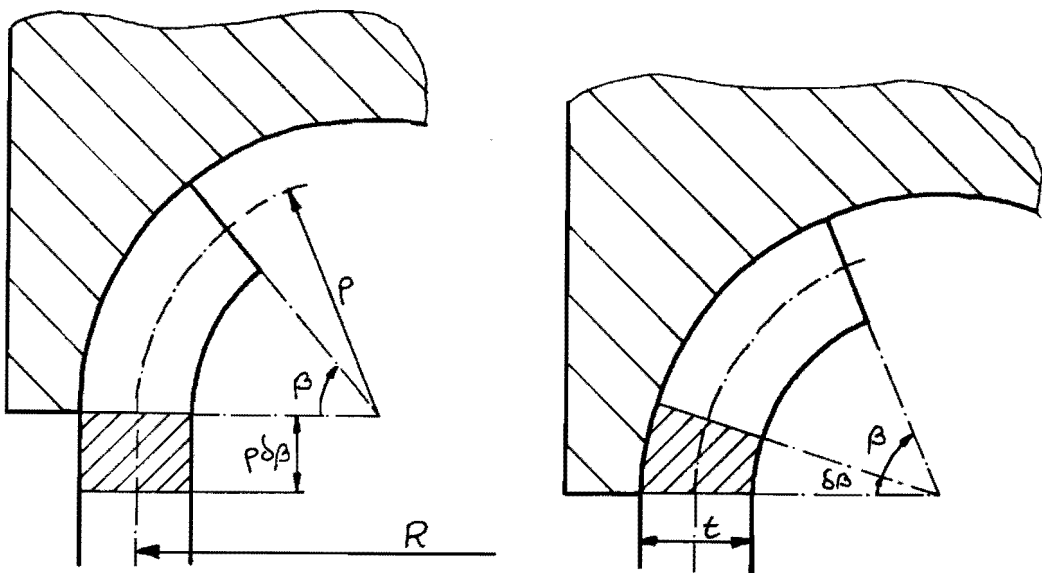


Fig. 3.1. Model van felsproces t.b.v. bepaling optimale buigradius.

δW bestaat uit twee delen:

- de toename van de buigarbeid δW_b .
- de toename van de stuikarbeid δW_{st} .

De toename van de buigarbeid bedraagt:

$$\delta W_b = \frac{1}{4} \cdot \alpha \cdot R \cdot t^2 \cdot C \cdot \bar{\epsilon}_0^n \cdot \delta\beta \quad (3.1.)$$

waarin: α : de sektorhoek van de contour.

R : de radius van de contour.

$\bar{\epsilon}_0$: de deformatie in de felsflens t.g.v. het afkanten

De toename van de stuikarbeid luidt:

$$\delta W_{st} = \alpha \cdot R \cdot \rho \cdot t \cdot \frac{C}{n+1} \left(\left[\bar{\epsilon}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos\beta) \right]^{n+1} - \bar{\epsilon}_0^{n+1} \right) \delta\beta \quad (3.2.)$$

Hieruit volgt voor de toename van de totale deformatiearbeid:

$$\delta W = \frac{1}{4} \cdot \alpha \cdot R \cdot t^2 \cdot C \cdot \bar{\epsilon}_0^n \cdot \delta\beta + \alpha \cdot R \cdot \rho \cdot t \cdot \frac{C}{n+1} \left(\left[\bar{\epsilon}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos\beta) \right]^{n+1} - \bar{\epsilon}_0^{n+1} \right) \delta\beta \quad (3.3.)$$

Bij een toename van de felshoek met $\delta\beta$ is de verticale verplaatsing van het felsgereedschap δu (zie fig. 3.1.). Er geldt:

$$\delta u = \rho \cdot \delta\beta$$

Als de wrijvingsarbeid buiten beschouwing wordt gelaten kan met behulp van het bovengrenstheorema een bovengrens voor de felskracht F afgeleid worden.

$$F \cdot \rho \cdot \delta\beta = \delta W \quad , \text{ met } F \text{ als bovengrens voor de felskracht} \quad (3.4.)$$

Met (3.3.) volgt voor F :

$$F^* = \frac{F}{\alpha \cdot R \cdot t \cdot C} = \frac{t \cdot h}{4 \cdot \rho \cdot R} \cdot \bar{\epsilon}_0^n + \frac{1}{n+1} \left(\left[\bar{\epsilon}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos\beta) \right]^{n+1} - \bar{\epsilon}_0^{n+1} \right) \quad (3.5.)$$

(3.5.) geldt zowel voor convexe als concave contouren.

Voor de voordeformatie $\bar{\epsilon}_0$ geldt, [7]:

$$\text{convexe contouren: } \bar{\epsilon}_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + \frac{\rho}{h} \frac{h}{R} \right) \quad (3.6.)$$

$$\text{concave contouren: } \bar{\epsilon}_0 = \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho}{h} \frac{h}{R}} \right) \quad (3.7.)$$

Uit fig. 3.2. blijkt dat de felskracht bij een bepaalde buigradius minimaal is. De optimale relatieve buigradius wordt berekend uit:

$$\frac{\partial F^*}{\partial \left(\frac{\rho}{R} \right)} = 0$$

Hierbij is numeriek rekengereedschap gebruikt. Figuur 3.3. toont $\left(\frac{\rho}{R} \right)_{opt}$ als functie van de relatieve kromming van de contour $\frac{h}{R}$. Uit [7] blijkt dat bij gelijke contourkromming de optimale buigradii op convexe en concave contouren nauwelijks verschillen. Ook de invloed

van de versterkingsexponent n op $(\frac{r}{R})_{opt}$ is gering. Voor materiaal met $0.2 \leq n \leq 0.3$ is fig. 3.3. toepasbaar, zowel voor stuit als voor rek.

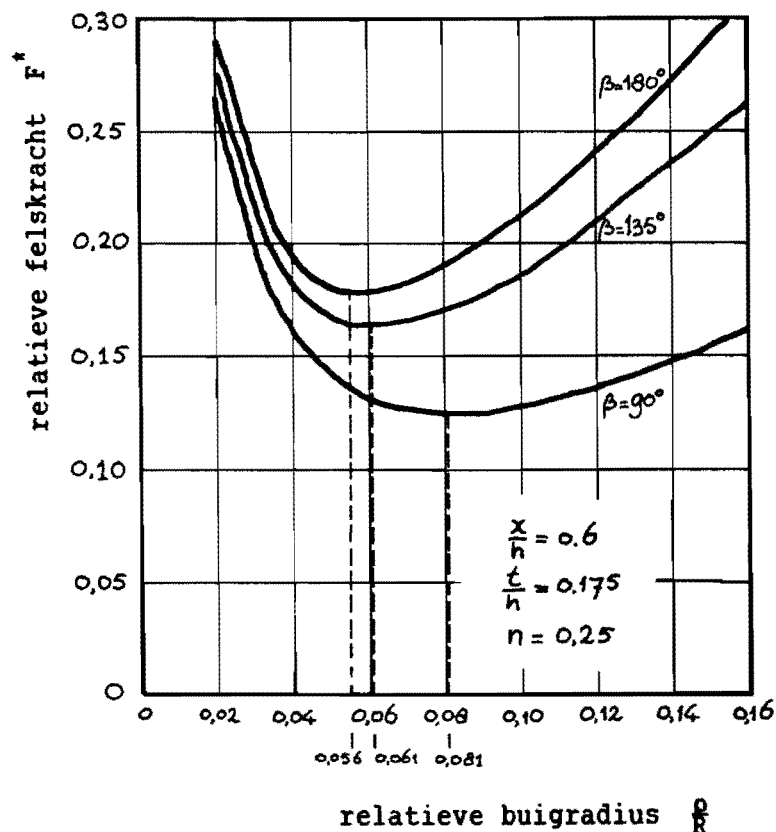


Fig. 3.2. Felskracht als functie van relatieve buigradius voor verschillende buighoeken.

De radius van het felsgereedschap dient bemeaten te worden op:

$$r_{opt} = r_{opt} + \frac{t}{2}$$

indien $r > r_{opt}$ dan volgt de flens het stempel niet: er vormt zich onafhankelijk van het gereedschap een buigradius r_{opt} . Het proces wordt echter slecht beheersbaar. Indien $r < r_{opt}$ dan neemt de fetskracht sterk toe ten opzichte van het optimum.

Bij een goede afstemming van het gereedschapsontwerp op de optimale buigradius zal plooivorming minder snel optreden omdat de flens in zijn geheel wordt ondersteund door het felsstempel. Doordat bij r_{opt} de fetskracht minimaal is, is het proces stabiel, en dus zijn proces en produktgeometrie beter beheersbaar.

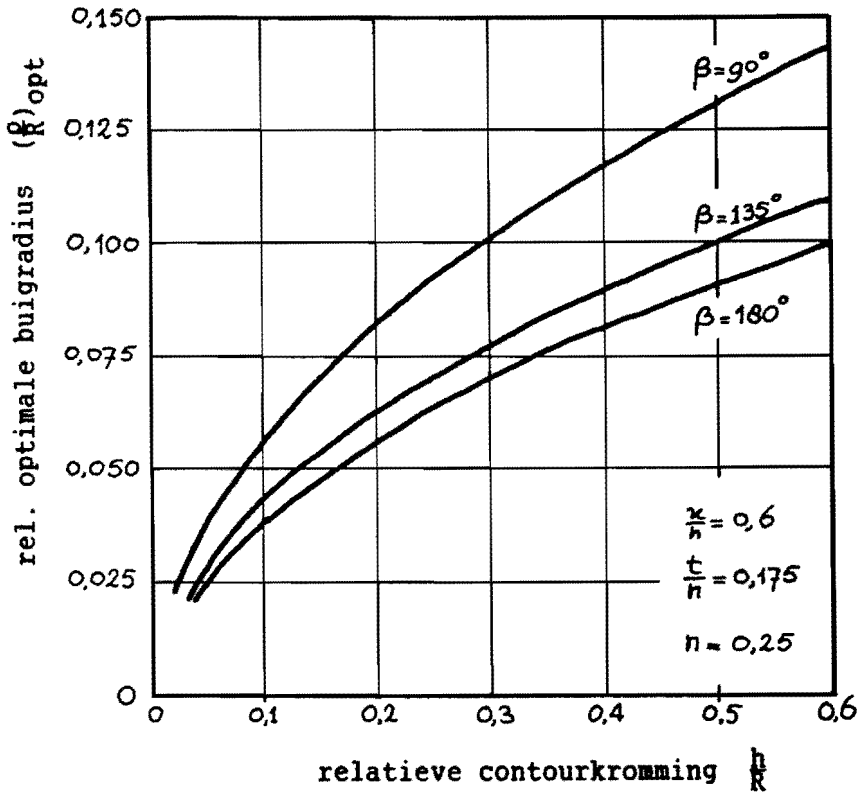


Fig. 3.3. Optimale buigradius bij minimale deformatiearbeid.

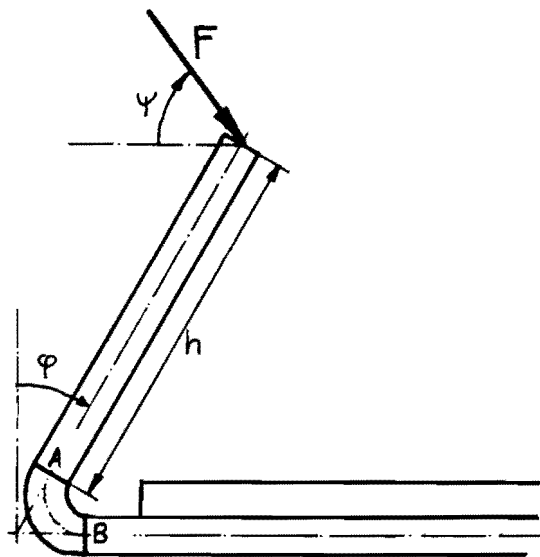


Fig. 3.4. Deformatiezones tijdens het felsen.

3.2. Rechte contouren

Bij het felsen langs rechte of bijna rechte contouren is het voorspellen en beheersen van het inrolverschijnsel het voornaamste probleem. Inrollen vindt plaats als de buigzone tijdens het felsen in

de plaat ligt in plaats van in de flens, zie fig. 3.4. De plaats van de buigzone hangt direct samen met de richting van de felskracht. In fig. 3.5. is het krachtenspel op de flens getekend. Inrolling wordt tegengegaan als het buigend moment ten gevolge van F in doorsnede A groter is dan in doorsnede B. Uit analyse van de buigende momenten volgt dan voor de krachthoek ψ :

$$\psi > 45^\circ + \frac{\mu}{2} \quad (3.8.)$$

De felskracht F is opgebouwd uit 2 componenten, zie fig. 3.5.:

- De proceskracht F_p , loodrecht op het stempeloppervlak.
- De wrijvingskracht F_w , evenwijdig aan het stempeloppervlak en tegengesteld aan de bewegingsrichting van de flens ten opzichte van het stempel. Voor F_w kan geschreven worden:

$$F_w = \mu \cdot F_p \quad \text{met } \mu \approx 0.2 \quad (3.9.)$$

De geometrie van het felsstempel wordt vastgelegd door de drukhoek θ , dit is de hoek tussen de loodlijn op het stempeloppervlak (= werklijn van F_p) en het horizontale vlak (= oppervlak buitendeel). In het algemeen geldt $\theta = \theta(\psi)$. Voor een vertikaal bewegend stempel geldt:

$$\psi = \theta + \arctan \mu \quad (3.10.)$$

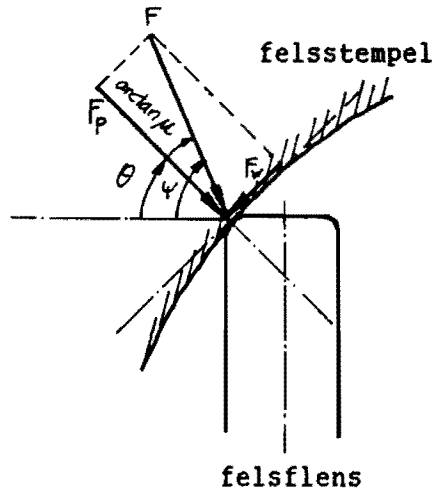


Fig. 3.5. Krachten op felsflens.

Uit (3.8.) en (3.10.) volgt voor de benodigde drukhoek θ :

$$\theta > 45^\circ + \frac{\mu}{2} - \arctan \mu \quad (3.11.)$$

Indien de drukhoek van het felsstempel te klein is kan ernstige inrolling optreden. Bij een te grote drukhoek echter komt de stabiliteit van de flens in gevaar: de flens kan uitknikken door de grote verticale component van de felskracht. In fig. 3.6. is voor

vertikaal bewegende vlakke stempels de drukhoek als functie van de flenshoek uitgezet.

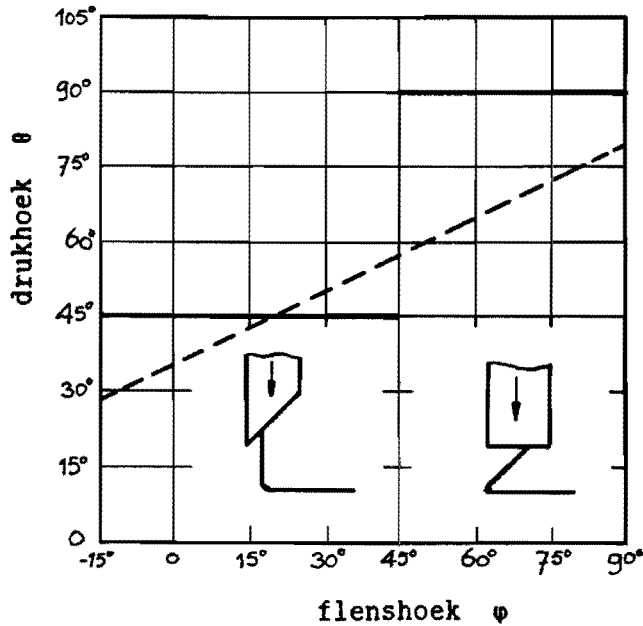


Fig. 3.6. Drukhoek van vlakke 45°- en 90°-stempels.

Het vlakke 45°-stempel heeft een constante drukhoek van 45° en het 90°-stempel een drukhoek van 90°. Van vlakke 45°-stempels is bekend dat stabiliteitsproblemen veel voorkomen. Oorzaak is de te grote drukhoek voor kleine ψ . Felsen van flenzen die minder dan 90° zijn afgekant, dus $\psi < 0^\circ$ is met een dergelijk stempel onmogelijk. Voor $30^\circ < \psi < 45^\circ$ is de drukhoek echter te klein, waardoor inrollen optreedt.

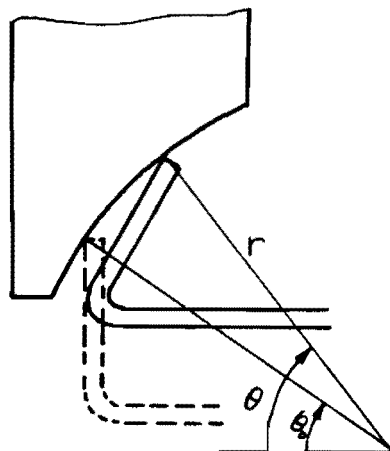


Fig. 3.7. Hol felsstempel voor eerste felsfase (45°-felsen).

Dit heeft geleid tot het ontwerp van een hol felsstempel, met radius r (fig. 3.7.). Voor de drukhoek kan afgeleid worden:

$$\theta = \arccos(\cos\theta_0 - \frac{\sin\psi}{r/h}) \quad (3.12.)$$

met $\theta_0 = 45^\circ - \arctan\mu$, de drukhoek bij $\psi = 0^\circ$ (3.13.)

In fig. 3.8. is θ weergegeven voor een hol stempel met $\frac{r}{h} = 2.5$ en $\mu = 0.2$. Voor dit stempel geldt $M_A \approx M_B$ voor $-15^\circ < \psi < 50^\circ$.

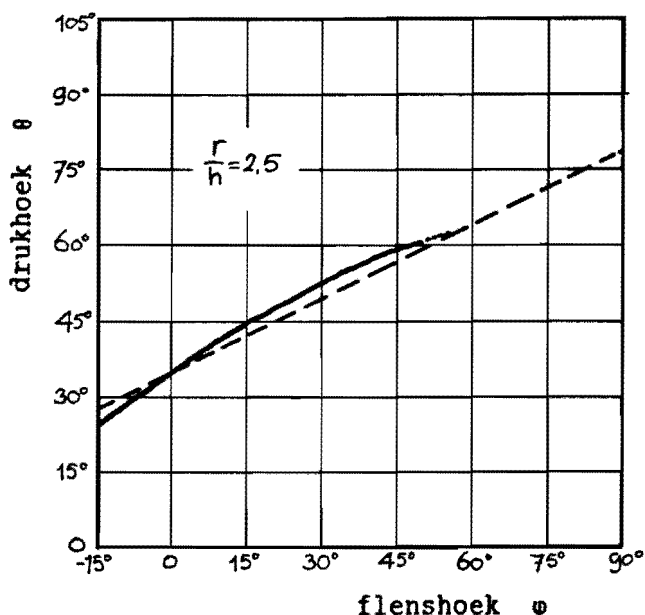


Fig. 3.8. Drukhoek van hol felsstempel.

De buigzone zal ongeveer gelijk verdeeld zijn over flens en plaat. Voor de inrolling i geldt dan in eerste benadering:

$$i \approx \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot r_i \quad (3.14.)$$

waarin r_i de afkantradius is, gemeten aan de binnenkant van het produkt. Om de inrolling te beperken dient de afkantradius zo scherp mogelijk te zijn. De praktische grens ligt ongeveer bij $r_i = \frac{s}{2}$, met s de plaatdikte. Voor een plaatdikte $s = 0.7$ mm bedraagt de inrolling ongeveer 0.5 mm. Dit is de nominale waarde van de inrolling, waarmee in de carrosseriebouw gerekend wordt.

4. GEOMETRIE VAN DE FELSFLENS.

In scherpe hoeken van carrosseriedelen veroorzaakt de sterke stuik in de felsflens veelal vervormingen van de gefelste contour. Plooivorming en uitrollen leiden tot een onregelmatig gevormde, vaak uitgestulpte contour. De mate van stuik in de flens kan beperkt worden door:

- Het verlagen van de flens op gekromde contouren. Het proces eist echter een minimale flenshoogte van 3 mm.
- Het verdelen van de deformatie over een groter flenstraject d.m.v. een uitlooptengete in de verlaagde flens aan weerszijden van de hoek, zie fig. 4.1.

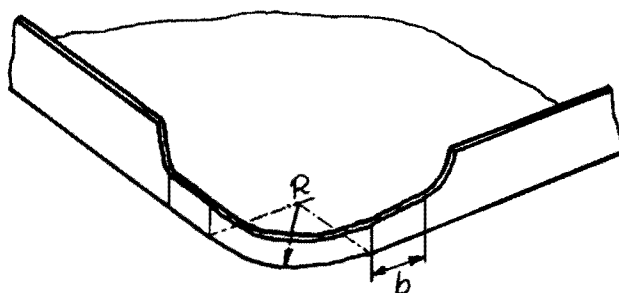


Fig. 4.1. Uitsnijding in felsflens.

Het uitdempen van de stuij in de flensuitloop gaat dan gepaard met afschuiving van de felsflens.

De benodigde flensuitloop wordt bepaald door een beschouwing van de deformatiearbeid in de flensrand. Uit symmetrie-overwegingen is een berekening van de halve hoek voldoende. Figuur 4.2. toont het bovenaanzicht van een gefelste hoek.

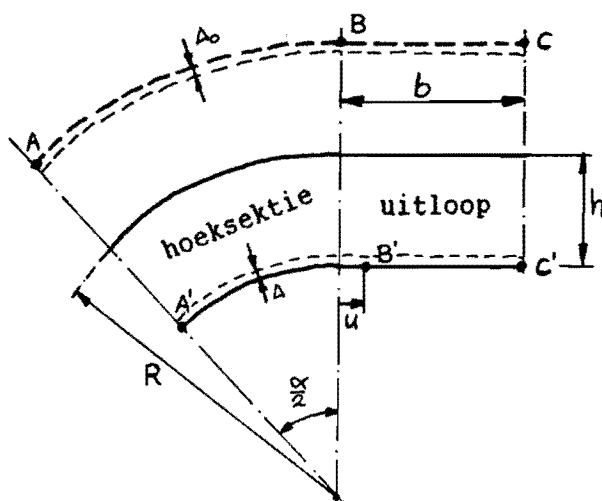


Fig. 4.2. Model van flensuitsnijding t.b.v. bepaling optimale flensuitlooptengete

De ongedeformeerde toestand, dus voor het afkanten van de flens, is gestippeld ingetekend. De punten A (voor het afkanten) en A' (na het felsen) liggen op de symmetrieliij van de hoek. Door de stuij in de

uitloop wordt B over een afstand u afgeschoven naar B'. Deze afschuiving neemt over het traject B'C' lineair af. Naarmate de stuik over een grotere lengte b uitdempt, neemt de totale afschuiving toe. Voor zekere b bestaat er evenwicht. De som van stuikarbeid en afschuifarbeid in de flens (hoeksektie plus uitloop) is dan minimaal. Voor de stuikarbeid in de flensrand kan afgeleid worden:

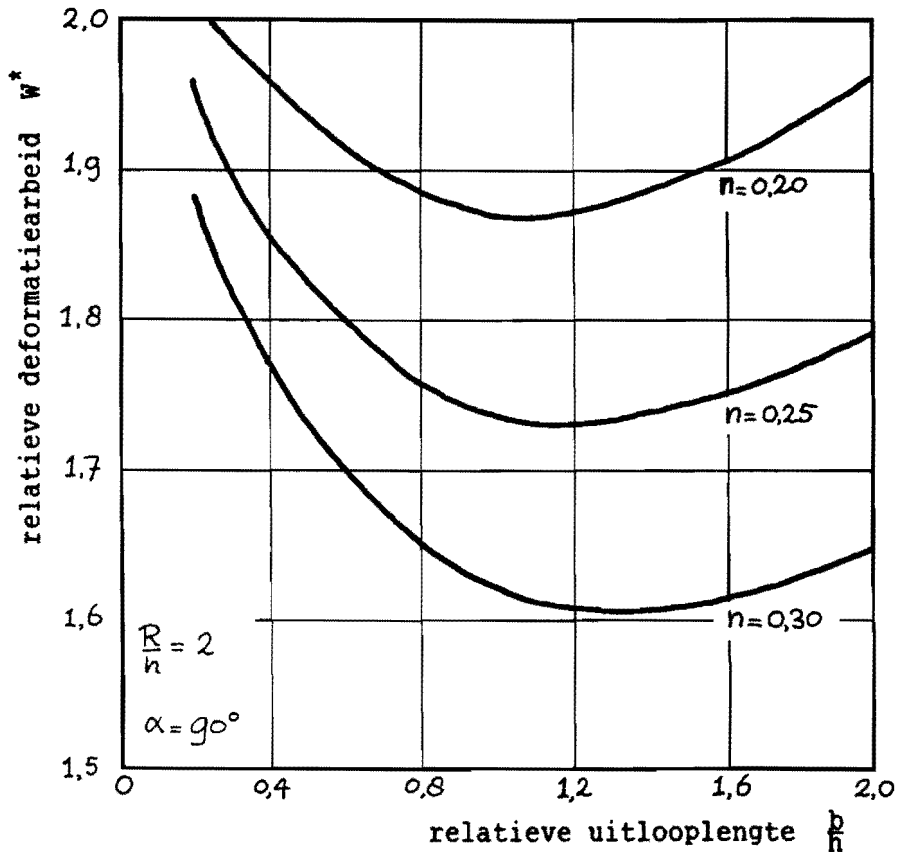


Fig. 4.3. Relatieve deformatiearbeid in flensrand.

$$W_{st} = \frac{C}{n+1} \frac{\sigma}{2}(R+h) \cdot t_0 \Delta_0 \left[\ln \left(\frac{\frac{\sigma}{2}(R+h)}{\frac{\sigma}{2}(R-h)+u} \right) \right]^{n+1} + \frac{C}{n+1} b \cdot t_0 \Delta_0 \left[\ln \left(\frac{b}{b-u} \right) \right]^{n+1} \quad (4.1.)$$

Voor de afschuifarbeid W_a in de flensrand A'C' geldt:

$$W_a = \frac{C}{(n+1)(n+2)} t_0 \Delta_0 \left[\frac{\sigma}{2}(R+h) + b \right] \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{u}{h} \right]^{n+1} \quad (4.2.)$$

De totale deformatiearbeid, geschreven in dimensieloze vorm, wordt dan:

$$W^* = \frac{W}{c t_o \Delta_o h} = \frac{1}{n+1} \left(\frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right) \left[\ln \left(\frac{\alpha \left(\frac{R}{h} + 1 \right)}{\alpha \left(\frac{R}{h} - 1 \right) + 2 \frac{u}{h}} \right) \right]^{n+1} + \frac{b}{h} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{u}{h} \frac{b}{h}} \right) \right]^{n+1} \right) + \frac{1}{(n+1)(n+2)} \left[\frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right) + \frac{b}{h} \right] \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{u}{h} \right)^{n+1} \quad (4.3.)$$

Uit de eis dat de rekgrootheden in punt B continu moeten zijn volgt voor de verplaatsing u:

$$\frac{u}{h} = \frac{\frac{\alpha}{2} \frac{b}{h}}{\frac{b}{h} + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right)} \quad (4.4.)$$

In fig. 4.3. is voor een contour met relatieve kromming $\frac{h}{R} = 0.5$ en sektorhoek $\alpha = 90^\circ$, W^* uitgezet als functie van de relatieve uitlooptengete $\frac{b}{h}$.

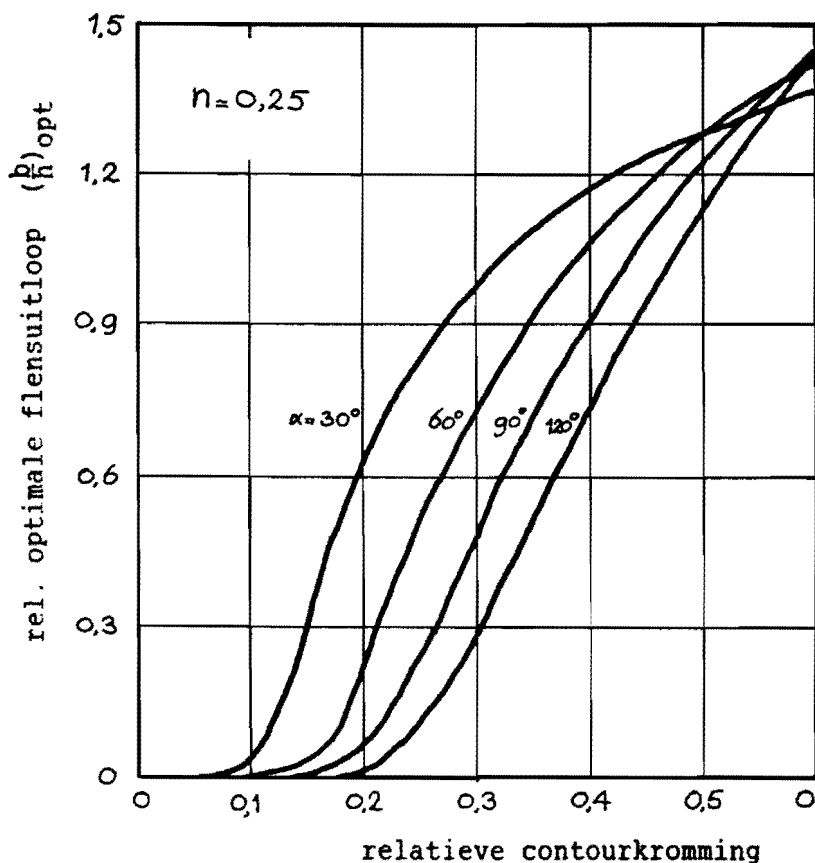


Fig. 4.4. Optimale flensuitsnijding.

Hieruit blijkt:

- W^* heeft een minimum voor $(\frac{b}{h})_{opt}$. Indien $\frac{b}{h} < (\frac{b}{h})_{opt}$ neemt de deformatiearbeid toe. Bij toepassing van een uitlooptengete groter

dan b_{opt} deformeert slechts het gedeelte ter grootte b_{opt} . Een te grote uitlooptengete in de flens is ongewenst omdat dit de felsverbinding verzwakt.

- $(\frac{b}{h})_{opt}$ neemt enigszins toe met toenemende versterkingsexponent n . Een hogere n zorgt voor een betere spreiding van de deformatie.

Figuur 4.4. toont $(\frac{b}{h})_{opt}$ als functie van de relatieve contourkromming $\frac{h}{R}$ met als parameter de sektorhoek α . Deze grafiek kan dienen als basis voor constructierichtlijnen voor flensuitsnijdingen.

$(\frac{b}{h})_{opt}$ neemt toe met toenemende stuik in de flens (afnemende contourradius R). Naarmate de sektorhoek α kleiner is kan de deformatie beter verdeeld worden en neemt $(\frac{b}{h})_{opt}$ toe. Uit fig. 4.5. blijkt dat de stuikrek $|\epsilon_{\varphi}|$ in geval van een optimale flensuitloop aanmerkelijk lager is dan bij een geringe relatieve uitlooptengete $\frac{b}{h} = 0.2$. Het effect is sterker naarmate de radius scherper en sektorhoek kleiner is. Dit zijn weliswaar theoretische waarden, maar de tendens is duidelijk.

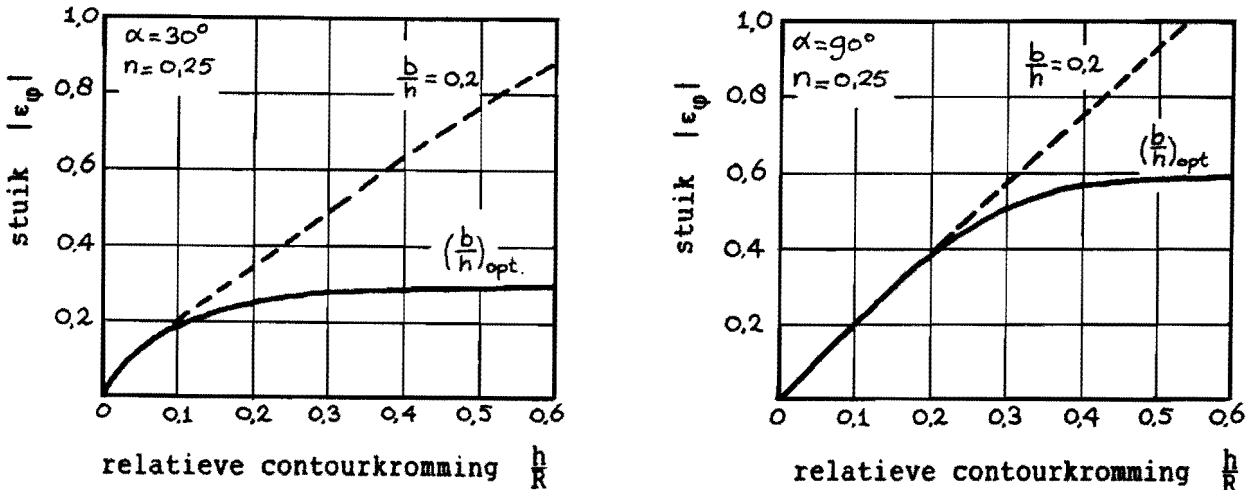


Fig. 4.5. Theoretische stuikreductie t.g.v. optimale flensuitlooptengete

5. PLOOIVORMING IN DE FELSFLENS.

Ploovorming in de felsflens leidt tot vervormingen van de gefelste contour. Op de plaats van de plooiën ontstaan lokaal uitstulpingen die de contour een hoekig uiterlijk geven.

Inzicht in ploovorming wordt verkregen met de kniktheorie van platen, [6]. Voor dit doel wordt de felsflens opgevat als een langwerpige strip die aan beide uiteinden wordt belast met een drukkracht. Een van de lange zijden is ingeklemd (starre verbinding met rest van de plaat), de andere zijde is vrij. Uit de kniktheorie volgt voor de kritische spanning σ_k :

$$\sigma_k = k \frac{1}{12} \frac{T_k^2}{(1-\nu)^2} \left(\frac{t}{h}\right)^2 \quad (4.5.)$$

De kritische spanning is die waarde van de stuikspanning σ_ϕ waarbij de toestand van gelijkmatige stuik instabiel wordt en overgaat in een stabiele geplooid toestand. Voor de knikmodulus T_k geldt:

- elastische knik: $T_k = E$ (4.6.)

- plastische knik $T_k = \frac{4 \cdot E \cdot P}{(\sqrt{E} + \sqrt{P})^2}$ (4.7.)

waarin P de plasticiteitsmodulus $P = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon}$

Voor een exponentieel versterkend materiaal geldt:

$$P = C \cdot n \cdot \epsilon^{n-1} \quad (4.8.)$$

De knikcoëfficiënt k is een functie van de slankheid van de flens $\frac{\alpha \cdot R}{h}$ en de randvoorwaarden. In fig. 4.6. is voor de eerder vermelde randvoorwaarden $k = k\left(\frac{\alpha \cdot R}{h}\right)$ weergegeven.

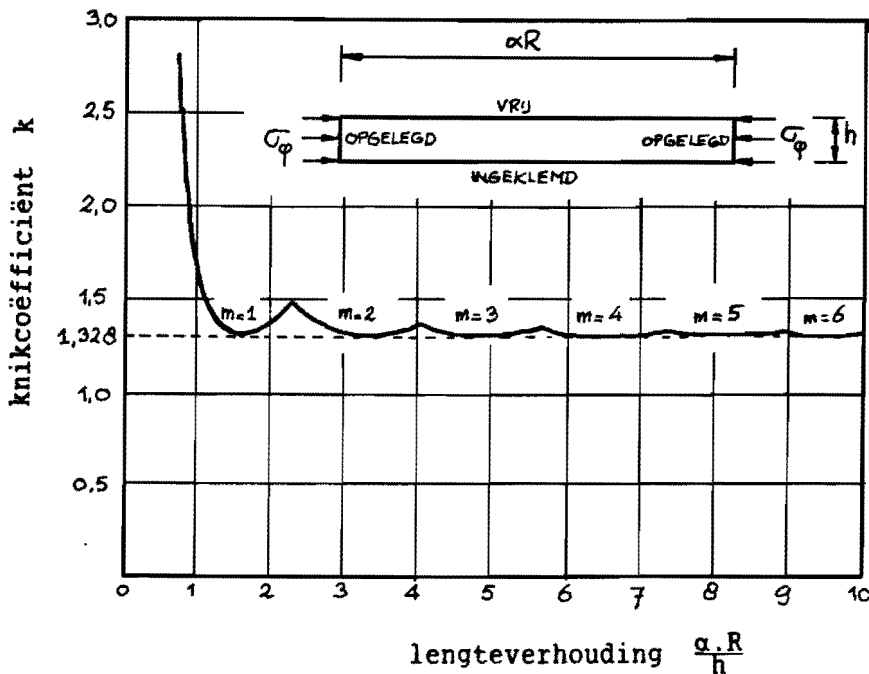


Fig. 5.1. Knikcoëfficiënt van felsflens.

Hieruit kan geconcludeerd worden:

- Het aantal halve plooiën m neemt toe met $\frac{\alpha \cdot R}{h}$. Dit is in overeenstemming met waarnemingen aan gefelste produkten.
- Voor $\frac{\alpha \cdot R}{h} > 2$ kan voor de knikcoëfficiënt $k = 1.328$ genomen worden.

Elastische knik:

Met $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ en $\nu = 0.3$ volgt voor σ_k :

$\sigma_k = 252054 \cdot \left(\frac{t}{h}\right)^2$. Indien $t = 0.7 \text{ mm}$ en $h_{\max} = 12 \text{ mm}$ dan volgt:

$\sigma_k = 858 \text{ N/mm}^2 \gg \sigma_v$.

Bij felsen treedt derhalve geen elastische knik op.

Plastische knik:

Nagegaan wordt of aan het begin van felsen plastische knik optreedt.

In dit stadium is de kans op vervormingen van de contour door plooivorming het grootst. Plooivorming wordt geïnitieerd in de felsrand; de stuikrek t.g.v. afkanten bedraagt in de rand, [7]:

$$\bar{\epsilon}_0 = \ln\left(1 + \frac{h}{R}\right)$$

De vloeispanning is dan: $\sigma_v = C \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right)\right]^n$ (4.8.)

en de plasticiteitsmodulus $P = C \cdot n \left[\ln\left(1 + \frac{h}{R}\right)\right]^{n-1}$ (4.9.)

In fig 4.7. is voor een materiaal met $C = 850 \text{ N/mm}^2$ en $n = 0.25$ de vloeispanning en de kritische spanning voor plastische knik uitgezet als functie van de relatieve contourradius $\frac{R}{h}$.

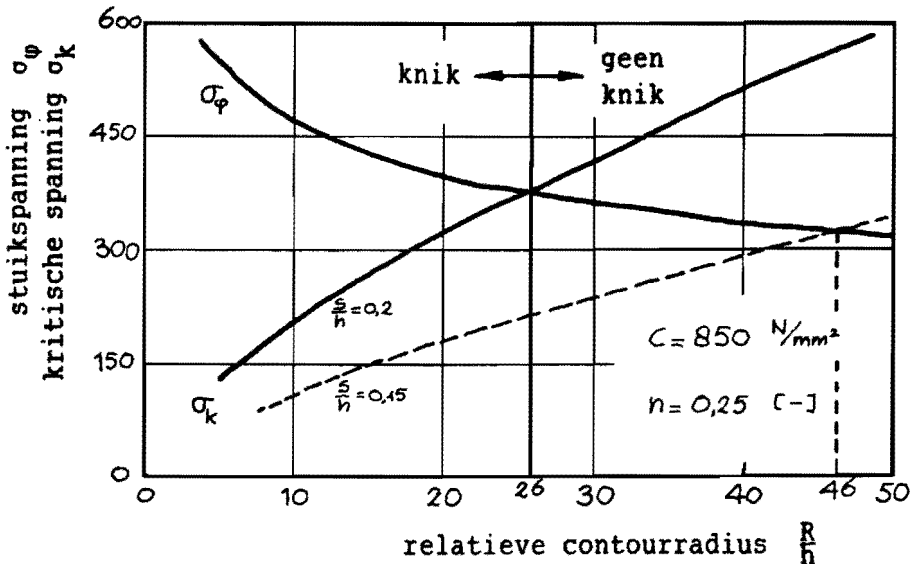


Fig. 5.2. Knikkriterium voor initiële knik in de flens.

Voor een plaatdikte-flenshoogteverhouding $\frac{t}{h} = 0.2$ plooit de flens niet direct als $\frac{R}{h} > 26$. Een iets hogere flens ($\frac{t}{h} = 0.15$) heeft een verschuiving van de grenswaarde naar $\frac{R}{h} = 46$ tot gevolg. In verband met

de minimale flenshoogte van ± 3.5 mm geldt voor een plaatdikte van 0.7 mm: $(\frac{t}{h})_{\max} = 0.2$. Geconcludeerd kan worden dat plooivorming niet te vermijden is voor $\frac{R}{h} < 26$. De effecten van plooivorming, zoals vervormingen van de gefelste contour, kunnen echter verminderd worden door een gelijkmatig en gelijktijdig contact tussen flens en stempel (zie par. 3.2.). Een verantwoorde keuze van de flenshoogte is een eerste vereiste vanwege de kwadratische invloed op de kritische spanning.

6. CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

Op rechte en licht gekromde contouren wordt aangeraden het 45°-felsstempel met een holle radius uit te voeren. Het buigen gaat daardoor gelijkmatiger en inrolling blijft beperkt.

Op sterk gekromde contouren is de deformatiearbeid bepalend voor het optreden van felsrandvervormingen. Een juiste flensuitsnijding en stempelradius minimaliseren de deformatiearbeid.

Plooiën van de felsflens op sterk convex gekromde contouren lijkt niet te voorkomen. De gevolgen kunnen beperkt worden door lage flenzen, een gelijktijdig toucheren van de flens door het stempel over de contour en een zo groot mogelijk contactvlak tussen stempel en flens.

Experimentele toetsing heeft op kleine schaal plaatsgevonden aan bestaande produkten. Uitgebreide experimenten zijn noodzakelijk, vooral voor het vaststellen van de optimale stempelvorm in de praktijk. Voor dit doel is reeds een experimenteel felsapparaat gebouwd.

SYMBOLLEN

b	: flensuitlooptengete	[m]
C	: karakteristieke spanning	[Nm ⁻²]
E	: elasticiteitsmodulus	[Nm ⁻²]
F	: felskracht	[Nm ⁻²]
F [*]	: dimensieloze felskracht	[-]
F _p	: proceskracht	[Nm ⁻²]
F _w	: wrijvingskracht	[Nm ⁻²]
h	: flenshoogte	[m]
i	: inrolling	[m]
k	: knikcoëfficiënt	[-]
M	: buigend moment in felsflens	[Nm]
m	: aantal halve plooiën	[-]
n	: verstevigingsexponent	[-]
P	: plasticiteitsmodulus	[Nm ⁻²]
R	: contourradius	[m]
r	: stempelradius	[m]
r _i	: afkantradius	[m]
t	: plaatdikte	[m]
T _k	: knikmodulus	[Nm ⁻²]
u	: verplaatsing van felsstempel	[m]
W	: deformatiearbeid	[Nm]
W [*]	: dimensieloze deformatiearbeid	[-]
W _a	: afschuifarbeid	[Nm]
W _b	: buigarbeid	[Nm]
W _{st}	: stuikarbeid	[Nm]
x	: plaatscoördinaat in hoogterichting van flens	[m]
α	: sektorhoek van contour	[-]
β	: buighoek	[-]
δ	: infinitesimale toename van grootheid	[-]
Δ	: infinitesimale lengtegrootheid	[m]
ε̄	: effectieve deformatie in felsflens	[-]
ε̄ _o	: voordeformatie t.g.v. afkanten van flens	[-]
ε _ψ	: rek in langsrichting van flens	[-]
θ	: drukhoek van felsstempel	[-]

μ	: wrijvingscoëfficiënt	[-]
ν	: dwarscontractiecoëfficiënt	[-]
ρ	: buigradius van flens	[m]
σ_k	: kritische spanning bij plooivorming	[Nm ⁻²]
σ_φ	: spanning in langsrichting flens	[Nm ⁻²]
φ	: flenshoek	[-]
ψ	: krachthoek	[-]

LITERATUUR

- [1] Judinsson, I. Falsning,
Intern rapport Volvo AB, Zweden.
(in het Zweeds)
- [2] Sachs, G. Principles and Methods of Sheet-metal
Fabricating, 2nd. ed., Reinhold, 1966.
- [3] - Clinching Machines; Their Design and
Function, Sheet Metal Industries, 1967-02
- [4] Paulusse, N.G.W. Simulatiemodel van het strijkbuigproces,
Interne notitie Philips CFT nr. 031/85.
- [5] Doorschot, F. Het kralen van ronde produkten,
Interne notitie Philips.
- [6] Timoshenko, S.P. Theory of Elastic Stability,
Gere, J.M. McGraw-Hill, 1961.
- [7] Baartman, R. Kwaliteitsaspecten van felsenaden in
personenauto's. Bijlagen. WPA-rapport
0390, febr. 1987

VOORWOORD

In dit rapport is een viertal bijlagen opgenomen, behorende bij het eindstudieverslag "Kwaliteitsaspecten van felsnaden in personen-auto's", WPA-rapport 0389.

In bijlage 1 wordt een algemene inleiding in de felstechniek gegeven. Dit stuk werd reeds in een eerder stadium van het afstudeerproject geschreven als onderdeel van een tussenverslag. De bijlagen 2, 3 en 4 omvatten uitgewerkte berekeningen die de grondslag vormen voor de in het hoofdverslag gepresenteerde onderzoeksresultaten.

INHOUD

Bijlage 1: Felsen; een algemene inleiding.	1
Bijlage 2: De optimale buigradius bij het felsen langs gekromde contouren.	18
Bijlage 3: Bepaling van de optimale uitsnijding in de felsflens op gekromde contouren.	32
Bijlage 4: Stempelgeometrie bij een niet-vertikale fels-richting.	43

BIJLAGE 1: FELSEN; EEN ALGEMENE INLEIDING.

INHOUD

1. Inleiding	2
1.1. Felsen	2
1.2. Tendenzen in de automobielbouw	2
1.3. Gevolgen voor de carrosseriebouw	3
1.4. Beheersing produktieproces	3
2. Felsen in de automobielbouw	4
2.1. Produktieproces aanschroefdelen	4
2.2. Afkantbuigen van felsflens	5
2.3. Felsen	8
2.4. Felsprincipes	9
3. Kwaliteitsaspecten van een gefelst produkt	10
3.1. Functie en kwaliteit	10
3.2. Kwaliteit van de afgekante flens	10
3.3. Kwaliteit van een felsnaad	13
Literatuur	16

1. INLEIDING

1.1. Felsen

Felsen is een verbindingstechniek die in de automobielfabrikage wordt toegepast bij de samenstelling van binnen- en buitendelen tot portieren, motorkappen, achterkleppen e.d.

Tijdens het felsen wordt de rand van het buitendeel, die in een voorgaande bewerking reeds haaks omgezet is, om de rand van het binnendeel gevouwen, (zie figuur 1.1.).



Fig. 1.1. Felsnaadverbinding.

Felsnaden worden toegepast als het buitendeel een onderdeel vormt van het buitenoppervlak van de auto. Het buitenoppervlak mag door de verbindingstechniek niet beschadigd worden, terwijl tevens hoge eisen gesteld worden aan de afwerking van de plaatranden: de randen van bv. een autoportier mogen niet scherp zijn en dienen strak aan te sluiten op de rest van de carrosserie.

1.2. Tendenzen in de automobielbouw

In het afgelopen decennium is een aantal belangrijke ontwikkelingen in de automobielinindustrie op gang gekomen.

Aanleiding tot deze ontwikkelingen waren enkele gebeurtenissen die direct samenhangen met de oliecrisis van 1973 en de daarop volgende economische crisis: sterke verhoging van de brandstofprijzen, teruglopende verkopen en daardoor een overcapaciteit op de markt voor personenauto's. Tegelijkertijd bleef het marktaandeel van de Japanse merken groeien.

Genoemde ontwikkelingen zijn:

1. Verminderen van het brandstofverbruik: ontwikkeling van zuiniger motoren en autobody's met een lagere luchtweerstand.
2. Kwaliteitsverhoging, teneinde een beter produkt te maken dan de concurrenten. Men denke aan:
 - Langere levensduur bv. door verhoogde weerstand tegen corrosie.
 - Lagere onderhoudsgevoeligheid.
3. Terugdringen van de produktiekosten door:
 - Minder uitval en afkeur van produkten.
 - Automatisering van de produktie.
 - Verhoging van de flexibiliteit in de produktie.

In de volgende paragraaf zullen de gevolgen van deze ontwikkelingen voor de carrosseriebouw en meer specifiek voor het felsen worden besproken.

1.3. Gevolgen voor de carrosseriebouw

Openingen tussen carrosseriedelen verhogen de luchtweerstand en veroorzaken windruis. Lagere luchtweerstand impliceert dus kleinere kieren tussen portieren, motorkap e.d. en de overige carrosserie. Er worden hogere eisen gesteld aan de nauwkeurigheid van de afzonderlijke carrosseriedelen en de strakheid van het buitenoppervlak. In tegenstelling tot wat meestal wordt beweerd is de technische flexibiliteit van een geautomatiseerde en met robots uitgeruste produktiestraat geringer dan die van een arbeidsintensieve produktie. Bij een handmatige bewerking is nog ruimte voor correctie en aanpassing, terwijl een robot slechts zijn programma afdraait en daarbij het produkt met zijn maat- en vormafwijkingen niet "ziet", laat staan dat hij daarop kan corrigeren. (Hier wordt overigens wel veel onderzoek naar gedaan). Een geautomatiseerde produktie stelt dus hoge eisen aan de kwaliteit van de toegevoerde produkten.

Door de felsbewerking worden de buitenmaten van een carrosseriedeel vastgelegd; correctie hierop na het felsen is niet meer mogelijk.

Bovengenoemde ontwikkelingen eisen dan ook van een gefelst produkt:

- Het voorspellen en beheersen van de plaats en de vorm van de buitenlijn van een gefelst carrosseriedeel. Immers op een kleine kier vallen onregelmatigheden meer op.
- Zo min mogelijk vervorming van het buitenoppervlak door het felsen.
- Verminderen van de uitval door felsfouten.

1.4. Beheersing produktieproces

Om met een bepaald produktieproces een produkt te maken dat aan hoge kwaliteitseisen moet voldoen tegen zo gering mogelijke kosten, dient men het produktieproces te beheersen. Naarmate de automatiseringsgraad van het proces toeneemt wordt dit steeds belangrijker, omdat de mogelijkheid tot improvisatie afneemt. Vergelijk in dit opzicht het produktieproces bij Volvo met dat van bv. Rolls Royce. Door de kleine aantallen en de ondergeschiktheid van het kostenaspect is bij Rolls Royce van mechanisering en automatisering in de produktie nauwelijks sprake. Beheersing van het produktieproces is voornamelijk een kwestie van vakbekwaamheid van de werknemer. Wil men echter een gemechaniseerd en geautomatiseerd produktieproces beter beheersen dan zal men dit proces moeten onderzoeken teneinde het te doorgronden: door welke parameters en in welke mate wordt de kwaliteit van het produkt bepaald, (zie figuur 1.2.)?

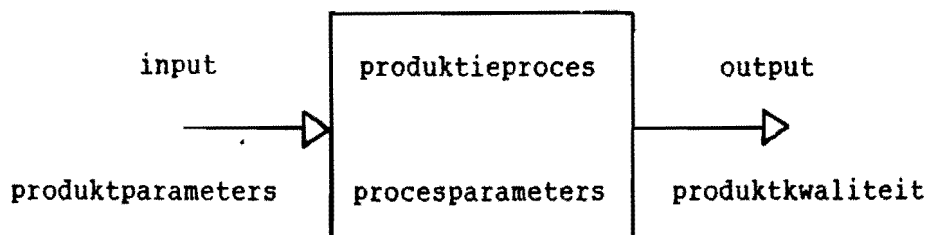


Fig. 1.2. Produktieproces als systeem met input- en output-parameters

De inputparameters van het ene proces zijn natuurlijk de outputparameters van het vorige proces. Zo wordt het felsen voorafgegaan door het 90° ombuigen van de rand van het buitendeel (het zogenaamde afkanten van de felsflens). Ook het afkanten zal dus in het onderzoek betrokken moeten worden (en theoretisch natuurlijk alle voorgaande bewerkingen).

Afgezien van de behoefte aan een betere beheersing van het produktieproces is er nog een aantal redenen bij Volvo om het felsen te onderzoeken. Deze zijn:

- Er is behoefte aan richtlijnen en normen voor de constructie en beoordeling van een felsnaad.
- Er wordt gestreefd naar minder afhankelijkheid van de al dan niet aanwezige kennis bij leveranciers van felsapparatuur.
- De onderzoeksresultaten moeten een gemotiveerde keuze van felsprincipe en constructieprincipe van felsgereedschap mogelijk maken.
- Men wil de kostbare en tijdrovende aanpassingen van persdelen en felsgereedschap beperken.
- Men hoopt dat verspreiding van de resultaten van het onderzoek zal bijdragen tot een verhoging van het kennisniveau van alle afdelingen en personen die zich bezig houden met gefelste produkten, het felsproces en felsmachines: produktontwikkeling, procesvoorbereiding en produktiemiddelenvorbereiding. Een betere kennis van zaken vereenvoudigt de communicatie over de problematiek.

2. FELSEN IN DE AUTOMOBIELBOUW

2.1. Produktieproces aanschroefdelen

De portieren, motorkap, kofferdeksel of achterklep en spatborden van een auto worden in de carrosseriebouw aangeduid met de verzamelnaam aanschroefdelen. De randen van aanschroefdelen uit staalplaat (er wordt steeds meer kunststof toegepast) worden geheel of gedeeltelijk gefelst.

Om de felsbewerking te kunnen plaatsen in het groter geheel van de produktie is in figuur 1.3. een stroomschema van het produktieproces aanschroefdelen weergegeven.

Een felsnaad wordt gevormd in 2 hoofdbewerkingen, te weten:

1. Afkantbuigen van de felsflens.
2. Dichtfelsen van de naad in 2 stappen.

Beide processen kunnen niet los van elkaar gezien worden, hoewel ze produktietechnisch erg verschillend zijn en binnen de Volvo-organisatie onder andere afdelingen vallen: het afkantbuigen is een persbewerking (groep Pershal) terwijl het felsen als verbindingstechniek behoort tot de carrosseriebouw.

2.2. Afkantbuigen van felsflens

Het afkanten van de felsflens vormt een onderdeel van het persen van het buitendeel in een persenstraat. In figuur 1.4. is het afkanten schetsmatig weergegeven. Er wordt onderscheid gemaakt in afkanten langs een rechte buiglijn en afkanten langs een gebogen buiglijn. De buiglijn kan in twee richtingen gekromd zijn:

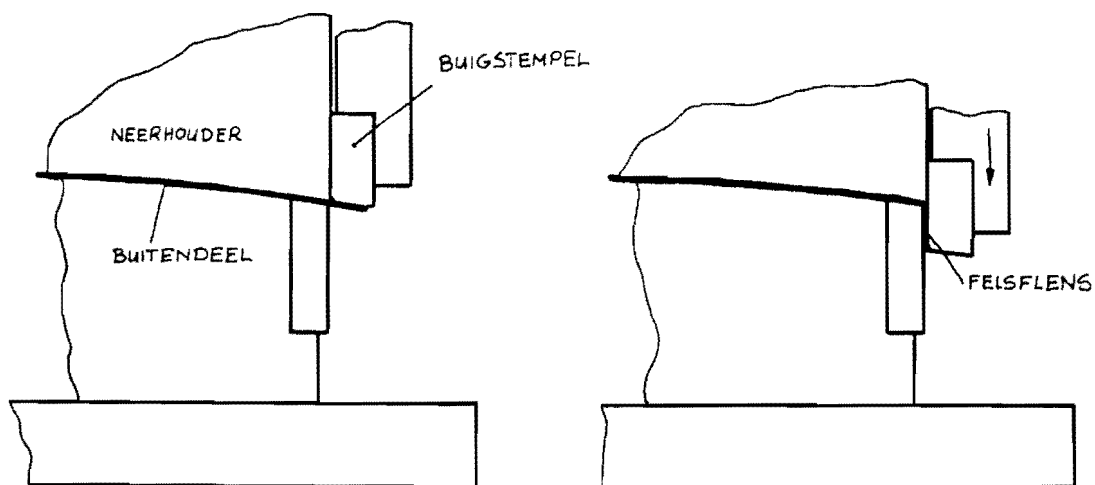


Fig. 1.4. Afkantbuigen van felsflens.

1. Kromming in plaatoppervlak:
 - a. convexe kromming.
 - b. concave kromming.
2. Kromming loodrecht op plaatoppervlak.
 - a. convexe kromming.
 - b. concave kromming.

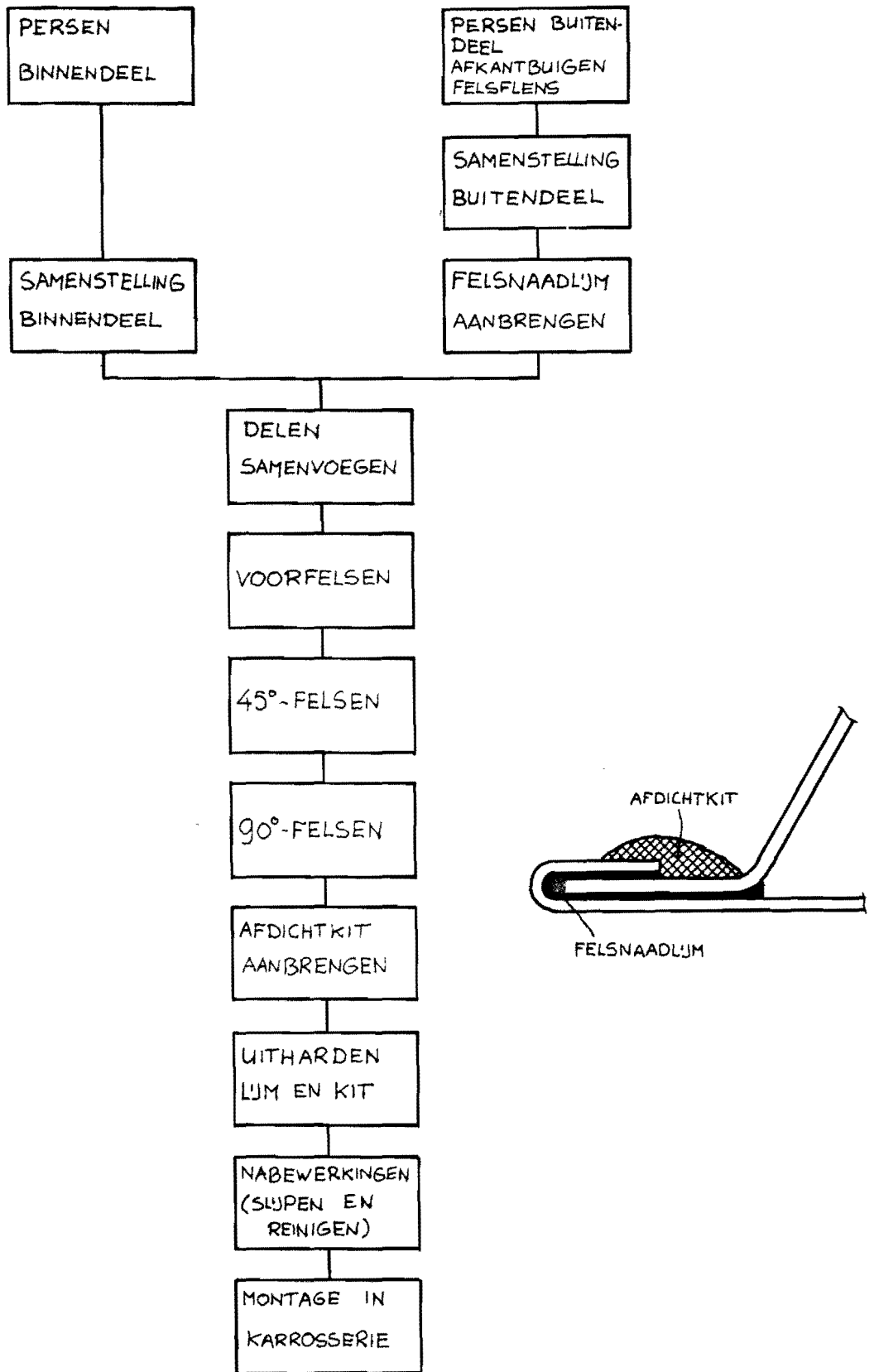


Fig. 1.3. Stroomschema productieproces aanschroefdelen.

Bij het afkanten langs een rechte buiglijn ontstaat een rechte flens. Afgezien van het materiaal in de buigzone vervormt de flens niet. Bij het afkanten langs een convex gekromde buiglijn (1a en 2a) wordt de flens in lengterichting gestuikt waarbij drukspanningen optreden. Analooq wordt bij een concave buiglijn (1b en 2b) de flens gerekt onder invloed van trekspanningen.

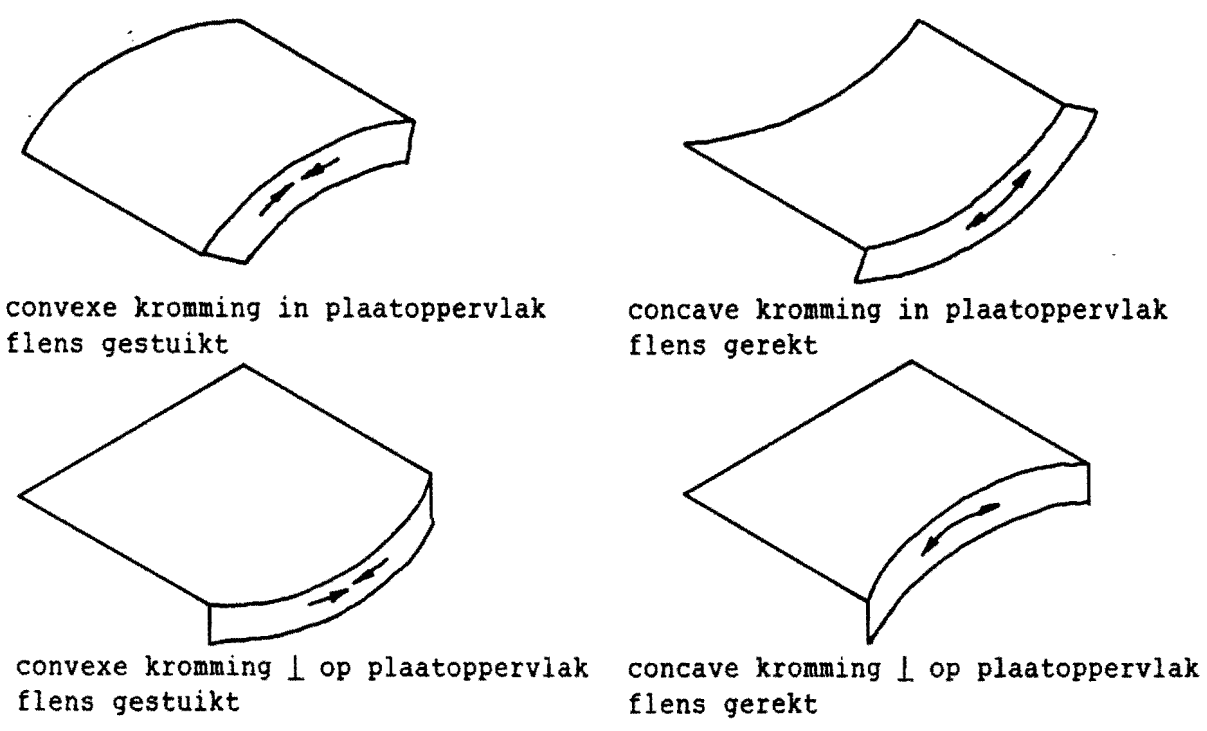


Fig. 1.5. Typen flenzen.

Belangrijk bij een flens is de waarde van de flenshoek en de afkant-radius, zie figuur 1.6. Ten behoeve van het felsen moet de radius scherp zijn en de flenshoek niet kleiner dan 90° . Vooral een scherpe buitenradius (r_u in figuur 1.6.) is erg belangrijk.

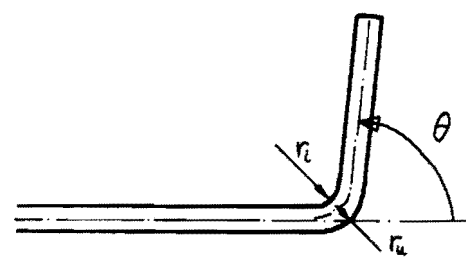


Fig. 1.6. Radius en flenshoek na het afkanten.

2.3. Felsen

Het omfelsen van de flens vindt in twee stappen plaats:

1. 45°-felsen:

Uitgaande van een loodrecht omgezette flens wordt in deze bewerking de flens ongeveer 45° omgebogen. Een betere benaming zou 135°-felsen zijn omdat de flens door het afkanten reeds 90° omgezet is.

2. 90°-felsen:

Na het 45°-felsen wordt door een apart gereedschap de felsnaad dichtgefelst (totale buighoek 180°).

Vanwege de veelal ingewikkelde ruimtelijke vorm van een te felsen produkt, is het noodzakelijk de 45°-messen op bepaalde plaatsen te delen. Deze delingen zitten vrijwel altijd op felstechnisch moeilijke punten: scherpe contourovergangen en hoeken.

De aanwezigheid van delingen verhoogt hier de kans op felsfouten. Men heeft daarom gekozen voor een aparte felsbewerking op die moeilijke punten.

Daartoe worden in de samenstellingsmal van binnen- en buitendeel geprofileerde voorfelsblokken aangebracht die middels een kantelende beweging de flens plaatselijk omfelsen, voordat de samenstelling in de felsmachine gaat (zie figuur 1.7.).

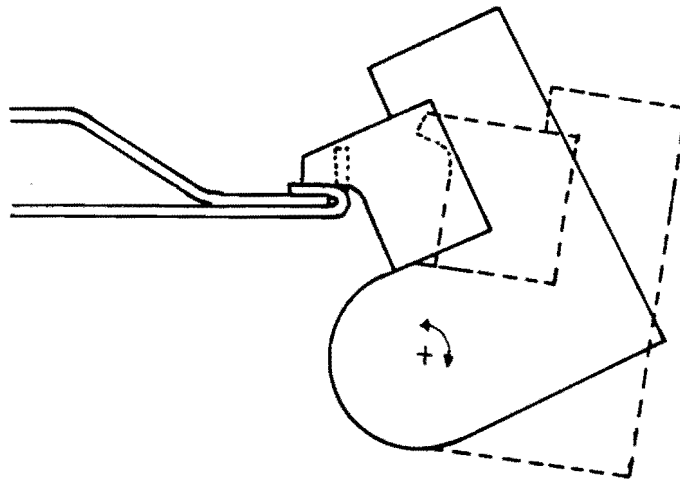


Fig. 1.7. Voorfelslen met kantelende blokken.

Afhankelijk van de kromming van de buitenlijn en het plaatoppervlak treedt ook bij felsen stuijk of rek op in de flens. Een en ander is in het volgend overzicht op een rijtje gezet.

	afkanten	felsen
1a plaatopp. convex	stuik	rek
1b plaatopp. concaaf	rek	stuik
2a contour plaatopp. convex	stuik	stuik
2b contour plaatopp. concaaf	rek	rek

2.4. Felsprincipes

Voor het 45^o-felsen worden verschillende principes toegepast:

1. Vertikaal felsen:

Het felsgereedschap beweegt in verticale richting op en neer, zie figuur 1.8.

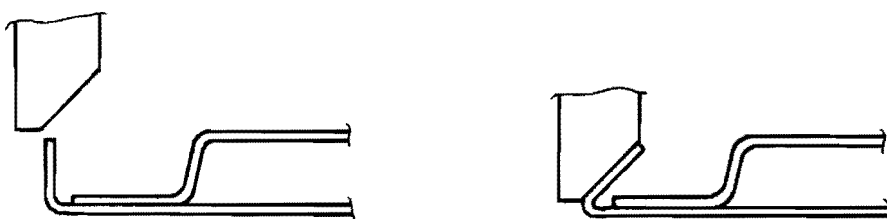


Fig. 1.8. Vertikaal 45^o-felsen.

2. Horizontaal 45^o-felsen:

Het felsgereedschap beweegt evenwijdig aan het plaatoppervlak heen en weer (figuur 1.9.).

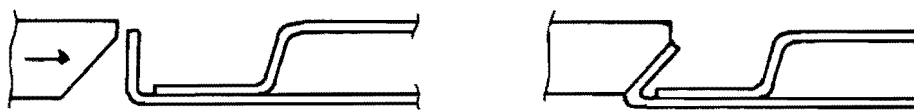


Fig. 1.9. Horizontaal 45^o-felsen.

3. Felsen met kantelende gereedschappen, zie figuur 1.10.

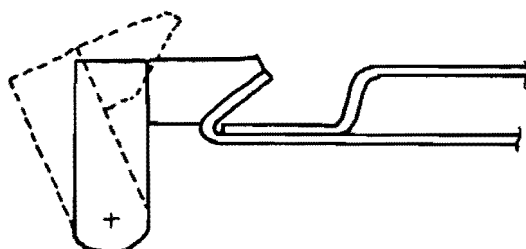


Fig. 1.10. 45^o-felsen met kantelend gereedschap.

Het 90°-felsen wordt vrijwel altijd met een vertikaal bewegend gereedschap uitgevoerd (zie figuur 1.11.). Bij sommige machines is het 90°-gereedschap op een aantal plaatsen gedeeld, bij andere vormt het gereedschap een gesloten geheel.



Fig. 1.11. 90°-felsen.

Qua constructie bestaan er grote verschillen tussen felsmachines. Zo zijn er machines die met een grote hydraulische cilinder zijn uitgerust (felspersen) en machines waarbij de gedeelde gereedschappen elk door een cilinder bediend worden. Ook ten aanzien van de manier waarop de bewegingen van de felsgereedschappen gerealiseerd worden bestaan er aanzienlijke verschillen. Hierop wordt verder niet ingegaan.

3. KWALITEITSASPECTEN VAN EEN GEFELST PRODUKT

3.1. Funktie en kwaliteit

Men kan de kwaliteit van een produkt definiëren als de mate waarin aan de funktie van het produkt wordt voldaan.

Om de kwaliteit te kunnen beoordelen moeten derhalve eerst de funktie-eisen van het produkt vastgelegd worden.

Als hoofdfunkties van een felsnaad kunnen aangemerkt worden:

1. Het realiseren van een spelingsvrije en voldoende stijve en sterke verbinding tussen binnen- en buitendeel.
2. Het nauwkeurig vastleggen van de buitenlijnen en buitenmaten van een aanschroefdeel.
3. Een mooie en gladde afwerking van de plaatranden.

3.2. Kwaliteit van de afgekante flens

Tijdens het haaks afkanten van de felsflens kunnen verschijnselen optreden die de uiteindelijke kwaliteit van de felsnaad negatief beïnvloeden. Deze verschijnselen worden hier besproken.

a. Terugvering van de buighoek

Zoals bij alle buigprocessen heeft men bij het afkanten te maken met terugvering die resulteert in een afname van de buighoek. Een buighoek $< 90^{\circ}$ is felstechnisch ongunstig, vooral bij een vertikaal bewegend gereedschap. Deze vorm van elastische terugvering is bij gekromde flenzen geringer dan bij rechte flenzen vanwege de weerstand die een gekromde buiglijn biedt tegen terugvering. Deze elastische terugvering veroorzaakt ook een vervorming van het plaatoppervlak: door de terugvering wordt een gerekte flens gestuikt waardoor de plaat iets hol wordt. Een gestuikte flens wordt door de terugvering gerekt waardoor de plaat een bolling krijgt.

b. Lineaire terugvering van de flens

Hiermee wordt bedoeld de terugvering in lengterichting van gestuikte en gerekte flenzen. De rand van een gestuikte flens zal door elastische terugvering langer worden, waardoor het plaatoppervlak holvormig vervormt. Analoog wordt de rand van een gerekte flens elastisch korter hetgeen een bolling van de plaat tot gevolg heeft. De vervormingen van het plaatoppervlak door lineaire terugvering van de flens zijn groter dan die als gevolg van terugvering van de buighoek en nemen toe met afnemende krommingsradius van de buiglijn, [6].

c. Opvering van de plaatrand

Dit fenomeen is weergegeven in figuur 1.12. Deze opvering wordt veroorzaakt door onvoldoende druk op de neerhouder of een te smalle neerhouder. Opvering van de plaatrand resulteert in een te grote buigradius en een onjuiste plaats van de buiglijn. Dit geeft problemen bij het felsen. De opvering van de plaatrand blijft na het felsen zichtbaar en valt erg op als de carrosserie gelakt is door de werking van licht en schaduw, [3].

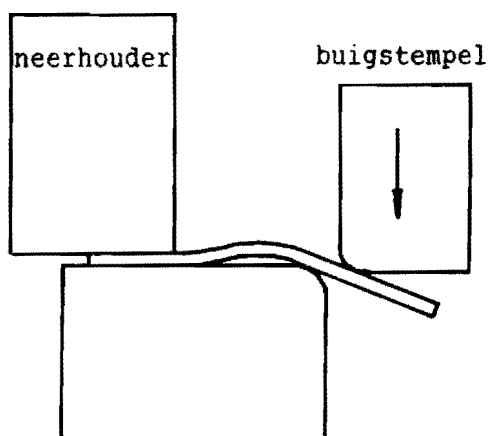


Fig. 1.12. Opvering van de plaatrand tijdens het afkantbuigen.

d. Plooivorming in de flens

Bij flenzen die tijdens het afkanten gestuikt moeten worden, treedt veelvuldig plooiën op: onder invloed van de drukspanningen in de flens knikt de flens op enkele plaatsen uit in plaats van gelijkmatig plastisch te stuiken. Achtergrond hiervan is dat plooivorming minder procesarbeid vereist dan gelijkmatig stuiken, met andere woorden de weg van de minste weerstand wordt gevolgd. Dit verschijnsel is ongewenst omdat zich bij het felsen een onregelmatige buitenlijn vormt. Hierop komen we later terug. Plooivorming bij het afkanten kan worden tegengegaan door:

1. Toepassing van lagere flenzen op plaatsen waar de flens gestuikt moet worden. Aan de minimum flenshoogte zijn echter grenzen gesteld: $h_{\min} = 3 \text{ à } 4 \text{ mm}$.
2. Het aanbrengen van compensatie-openingen in de flens.
probleem hierbij is:
 - Welke vorm moeten de uitsparingen hebben?
 - Hoeveel uitsparingen?
 - Afstand tussen de uitsparingen?Indien men zo maar iets probeert is de kans groot dat de plooi-
vorming alleen maar erger wordt.
3. Uitsmeren van de plooiën door een voldoende kleine afkantspleet. Ofschoon dit uitsmeren veelvuldig voorkomt op scherpe hoeken, bij gebrek aan andere oplossingen, kleven er grote bezwaren aan, nl.:
 - Door het uitsmeren wordt het afkantstempel plaatselijk erg hoog belast waardoor kans op vreten en versnelde slijtage bestaat.
 - De flensrand wordt onregelmatig van vorm.
 - Door de grote trekkrachten in de flens wordt het materiaal om de radius getrokken waardoor vaak een "dubbele radius" ontstaat, (figuur 1.13.). Bij het felsen bestaat dan het gevaar dat om de verkeerde radius wordt gebogen.

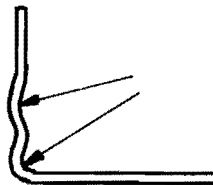


Fig. 1.13. Dubbele radius in een felsflens.

- Door het uitsmeren van de plooiën treden grote rekken op in de flens. Door de toegenomen vloeispanning ten gevolge van versteviging en afgenomen omvormbaarheid wordt daardoor tijdens het felsen opnieuw plooivorming bevorderd.

e. Inscheuren van de flens

Inscheuren van de flens komt voor op plaatsen waar de flens sterk gerekt wordt waardoor de omvormbaarheids grens van het materiaal wordt overschreden.

3.4. Kwaliteit van een felsnaad

a. Inrollen en uitrollen

Felsen is een vrijbuigproces; plaats van de buiglijn en vorm van de buigradius zijn niet vastgelegd in het felsgereedschap. Dit is wel het geval bij het afkantbuigen.

Een belangrijk probleemgebied bij het felsen is dan ook het handhaven van de juiste plaats en vorm van de buitenlijn van het carrosseriedeel. Men spreekt in dit verband over inrollen en uitrollen. Inrollen is het naar binnen verplaatsen van de buitenlijn door het felsen; bij uitrollen verplaatst de buitenlijn naar buiten. Het verschijnsel inrollen wordt getoond in figuur 1.14.

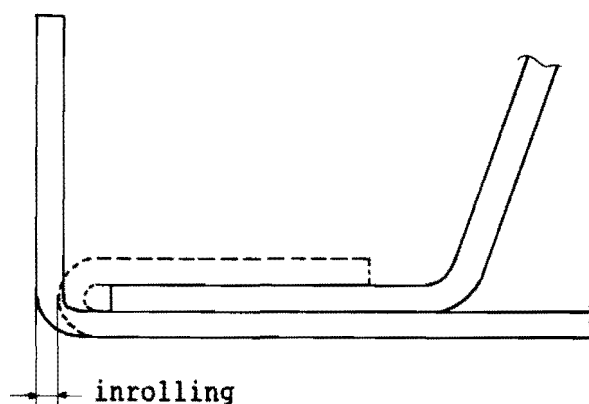


Fig. 1.14. Inrollen van de buitenlijn door het felsen.

De mate van inrollen of uitrollen is moeilijk te voorspellen omdat het verschijnsel wordt beïnvloed door een groot aantal factoren, zoals:

- plaatdikte
- materiaalsterkte
- grootte van afkantradius
- kromming van buitenlijn: richting en grootte
- kromming van plaatoppervlak: richting en grootte
- flenshoogte
- flenshoek
- felsprincipe

Uit metingen is gebleken dat op een rechte contour bij een plaatdikte van 0.7 mm een inrolling optreedt van gemiddeld 0.5 mm. Daarom geeft men het buitendeel langs de gehele omtrek (dus ook op gekromde contourdelen) een zogenaamde inroltoeslag van $0.5^{+0.5}$ mm. De buitenmaten van een ongefelst buitendeel zijn dus 0.5 tot 1.0 mm groter dan de theoretische nominale buitenmaten van het ongefelste deel. Probleem is echter dat op gekromde contouren de inrolling afwijkt van 0.5 mm: treedt stuik op in de flens tijdens het felsen dan zullen de drukspanningen in de flens inrollen tegenwerken. Anderzijds zullen trekspanningen in de flens de inrolling vergroten.

Het verschijnsel inrollen/uitrollen hangt ook samen met plooivorming. Bij het 90° -felsen worden de gevormde plooiën platgedrukt waardoor de buitenlijn plaatselijk naar buiten verplaatst. Hierdoor ontstaat een hoekige, onregelmatig gevormde buitenlijn.

In het algemeen kan gesteld worden dat een kwalitatief slecht afgekante flens (plooiën, flenshoek $< 90^{\circ}$, radius slecht) leidt tot een kwalitatief slechte felsnaad. Dit geldt in het bijzonder voor een gekromde contour. Het felsen langs een rechte lijn levert in het algemeen weinig problemen.

Het realiseren van de juiste buitenlijn is momenteel een trial-and-error methode van:

- verandering buitenlijn afgekant buitendeel.
- verandering flenshoogte en flenshoogteverloop.
- aanpassing felsgereedschap.

b. Plooivorming

Plooivorming bij het felsen heeft dezelfde achtergrond als plooivorming bij het afkanten. De gevolgen voor de kwaliteit van de felsnaad zijn in paragraaf 3.2., punt d. reeds behandeld.

c. Vervorming van het oppervlak van het buitendeel

Vervormingen van het buitendeel worden veroorzaakt door elastische terugvering van de gefelste flens. Een gerekte flens wordt door elastische terugvering korter en een gestuikte flens langer. Het buitendeel kan deze lengteverandering opvangen door plaatselijk bol of hol te gaan staan. Dergelijke golfvormige vervormingen noemt men bij Volvo "uitstraling". Na het lakken van de carrosserie worden deze deuken en bollingen pas goed zichtbaar.

d. Onvoldoende overlap tussen binnen- en buitendeel (figuur 1.15.)

Het optreden van onvoldoende overlap of zelfs een opening tussen binnen- en buitendeel is een gevolg van het gelijktijdig optreden van de volgende situaties:

1. Flenshoogte minimaal: h_{\min} 3 à 4 mm. Dit is het geval op scherp gekromde contouren.

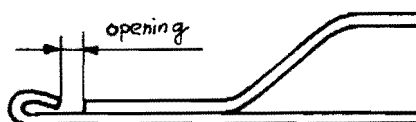


Fig. 1.15. Geen overlap van binnen- en buitendeel.

2. Speling tussen binnen- en buitendeel groot

Volgens tekening bedraagt deze speling maximaal 3 mm, namelijk:

- inroltoeslag buitendeel $0.5^{+0.5}$ mm.
- speling binnendeel ten opzichte van nominale lijn 1^{+1} mm.

Door een asymmetrische verdeling van de speling tussen binnen- en buitendeel kan deze speling plaatselijk nog groter dan 3 mm zijn.

3. Op sterk convex gekromde contouren treedt onder invloed van drukspanningen in de flens eerder uitrollen dan inrollen op.

Het zal duidelijk zijn dat een flens van nauwelijks 3 mm hoogte nooit een spleet van 3 mm breed kan overbruggen bij het felsen.

De gevolgen van deze felsfout zijn:

- Slechte verbinding tussen binnen- en buitendeel.
- Slechte weerstand tegen corrosie van binnenuit, vanwege een onvoldoende afdichting van de felsnaad.

Dit probleem onderscheidt zich van de overige doordat het van zuiver constructieve aard is. Door een betere afstemming van flenshoogte, toleranties en inroltoeslag kan het probleem in principe voorkomen worden.

LITERATUUR

- [1] Judinsson, I. Falsning.
Intern rapport Volvo AB, Zweden.
(in het Zweeds)

- [2] - Clinching Machines; Their Design and
Funktion.
Sheet Metal Industries, 1967-02

- [3] - Tool and Manufacturing Engineers
Handbook. Volume 2, Forming.
4th. ed., Society of Manufacturing
Engineers, 1984.

- [4] - Untersuchung zum Fügen hoherfesten
Tiefziehbleche.
Blech, Rohre, Profile, 31(1984)9.

- [5] Norton, J.F. Structural Adhesives in the Motor Car
Industry.
Sheet Metal Industries, 1981-11

- [6] Sachs, G. Principles and Methods of Sheet-metal
Fabricating, 2nd. ed., Reinhold, 1966.

- [7] Oehler, G. Biegen.
Hanser, München, 1963.

- [8] Paulusse, N.G.W. Simulatiemodel van het strijkbuigproces.
Interne notitie Philips CFT nr. 031/85.

- [9] Minnen, F.A.R. Buigen van plaat.
Rapport PT-0434, Technische Universiteit
Eindhoven, 1978.

- [10] Koning, A.U. de Plastisch buigen van plaat.
Rapport PT-0234, Technische Universiteit
Eindhoven, 1970.

- [11] Koeyvoets, B. e.a. Felsnaadverlijming in de carrosseriebouw.
Interne notitie nr. BK/HL 850410,
laboratorium Volvo Born.

[12] Baartman, R.

Kwaliteitsaspecten van felsenaden in
personenauto's.
WPA-rapport 0389, Technische Universiteit
Eindhoven, 1987.

BIJLAGE 2. DE OPTIMALE BUIGRADIUS BIJ HET FELSSEN
LANGS GEKROMDE CONTOUREN.

INHOUD

2.1. Inleiding	19
2.2. Deformatieverdeling in de flens t.g.v. het afskanten.	19
2.3. Deformatiearbeid bij het felsen.	21
2.4. De optimale buigradius.	27
2.5. De invloed van $\frac{x}{h}$ op $\left(\frac{P}{R}\right)_{opt}$.	28
2.6. De invloed van h op $\left(\frac{P}{R}\right)_{opt}$	29
2.7. Invloed van krommingsrichting contour op $\left(\frac{P}{R}\right)_{opt}$	29

BIJLAGE 2. DE OPTIMALE BUIGRADIUS BIJ HET FELSEN LANGS GEKROMDE CONTOUREN.

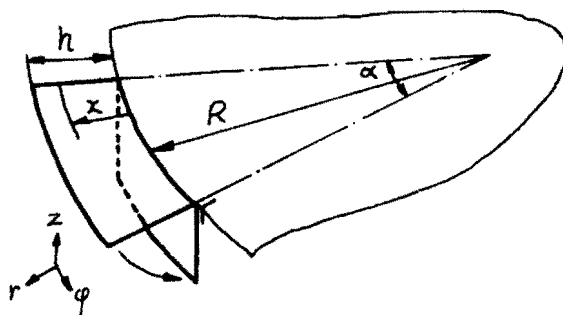
2.1. Inleiding

In deze bijlage worden de vergelijkingen afgeleid waaruit de optimale buigradius langs numerieke weg bepaald is. ([1], par. 3.1.). Het gaat hierbij om de uitdrukkingen voor de toename van de deformatiearbeid en de hieruit afgeleide bovengrens voor de felskracht, [1] vgl. (3.3.) en (3.5.) en de uitdrukkingen die de voordeformatie in de felsflens ten gevolge van het afkanten beschrijven (vgl. (3.6.) en (3.7.)). Verder zal worden nagegaan wat de invloed is van enkele parameters op de optimale buigradius.

2.2. Deformatieverdeling in de flens t.g.v. het afkanten.

Bij de bepaling van de deformatiearbeid in de flens bij het felsen dient rekening te worden gehouden met de voordeformatie $\bar{\epsilon}_0$ ten gevolge van de voorgaande bewerking: het afkanten van de flens.

A. Afkanten langs een convexe contour (stuik).



r, φ, z : met de flens meedraaiend assenkruis

fig 2.1. Afkanten langs een convexe contour.

Uit fig 2.1. volgt voor de langsrek ϵ_φ in de flens na het

afkanten :

$$\epsilon_y = \ln \left[\frac{\alpha R}{\alpha(R+x)} \right] = \ln \left[\frac{1}{1 + \frac{x}{h} \cdot \frac{h}{R}} \right] < 0 \quad (2.1.)$$

Uit metingen aan geperste en afgekante buitendelen is gebleken dat door het afkantbuigen de plaatdikte niet toeneemt. Enerzijds komt dit door de anisotropische eigenschappen van dieptrekplaat, anderzijds door het afkantproces zelf: in breedte-richting (r -richting) worden door het buigstempel trekspanningen in de flens geïntroduceerd die groter zijn naarmate de contourradius R kleiner is. Er kan derhalve een vlakke deformatietoestand aangenomen worden:

$$\epsilon_z = 0 \rightarrow \epsilon_r = -\epsilon_y \quad (2.2.)$$

Uit (2.1.) en (2.2.) volgt voor de effectieve deformatie $\bar{\epsilon}_0$:

$$\bar{\epsilon}_0 = \sqrt{\frac{2}{3} (\epsilon_r^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(1 + \frac{x}{h} \cdot \frac{h}{R} \right) \quad (2.3.)$$

B. Afkanten langs een concave contour (rek).

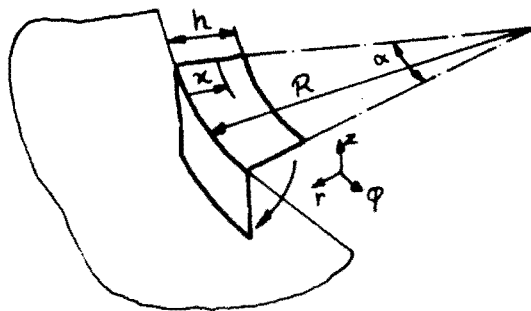


fig 2.2. Afkanten langs een concave contour

Uit fig 2.2. volgt nu voor de langsrek ϵ_y :

$$\varepsilon_{\varphi} = \ln \left[\frac{\alpha R}{\alpha(R-x)} \right] = \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{x}{h} \cdot \frac{h}{R}} \right] > 0 \quad (2.4.)$$

Uit metingen blijkt dat op concave contouren de plaatdikte van de flens door het afkanten wel verandert. In de flensrand ($x=h$) kan een lijnspanningtoestand aangenomen worden: $\sigma_r = \sigma_z = 0$. Uit de spanning-rekrelaties van Levy-von Mises volgt voor de rekgrootheden in de flensrand:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_z = -\frac{1}{2} \varepsilon_{\varphi} \quad (2.5.)$$

Deze relatie tussen de rekgrootheden wordt nu verondersteld te gelden voor de gehele flens. Uit (2.4.) en (2.5.) volgt dan voor de effectieve deformatie $\bar{\varepsilon}_0$:

$$\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_{\varphi} = \ln \left[\frac{1}{1 - \frac{x}{h} \cdot \frac{h}{R}} \right] \quad (2.6.)$$

2.3. Deformatiearbeid bij het felsen.

De toename van de deformatiearbeid δW bij het vergroten van de buighoek met $\delta\beta$ wordt berekend. Bij de afleiding van δW wordt uitgegaan van gecombineerde buiging en stuit in de flens, dus felsen langs een convexe contour. De toename van de deformatiearbeid bestaat uit twee delen:

- de toename van de buigarbeid δW_b
- de toename van de stuitarbeid δW_{st}

A. Toename van de buigbaarheid

Bij de bepaling van δW_b wordt aangenomen dat het neutrale vlak van de plaat tijdens het buigen niet verschuift en dus blijft samenvallen met het midden van de plaatdoorsnede. Omdat de buigrek en de buigspanningen in de omgeving van het neutrale vlak klein zijn, wordt met deze aanname slechts een kleine fout in δW_b geïntroduceerd. Uit fig. 2.3. blijkt dat bij een zakking $p \cdot \delta\beta$ van het felsstempel het gearceerde schijfje flens wordt gebogen.

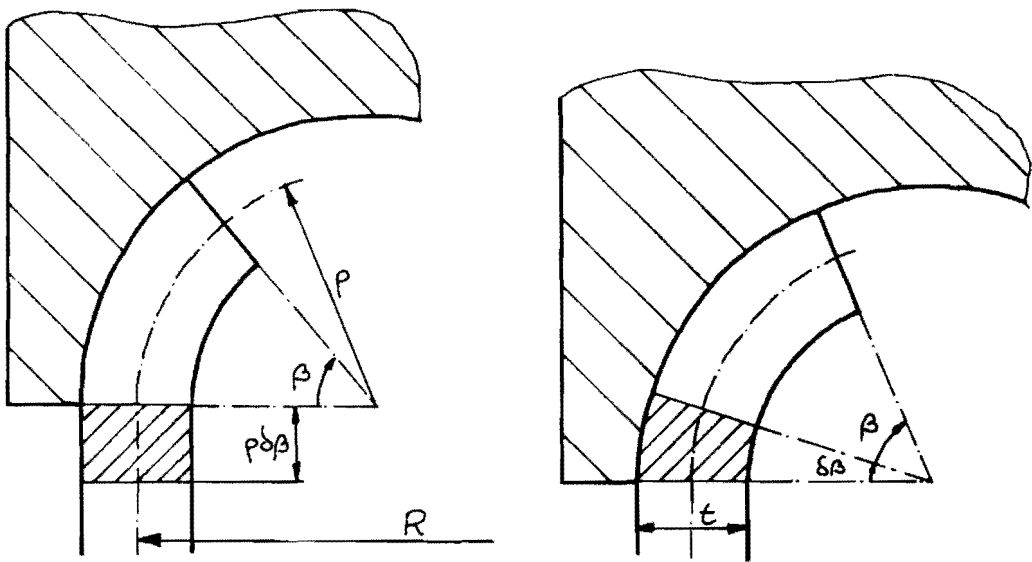


fig 2.3. Buiging van de flens tijdens felsen.

Figuur 2.4. toont het gebogen segment nogmaals in detail.

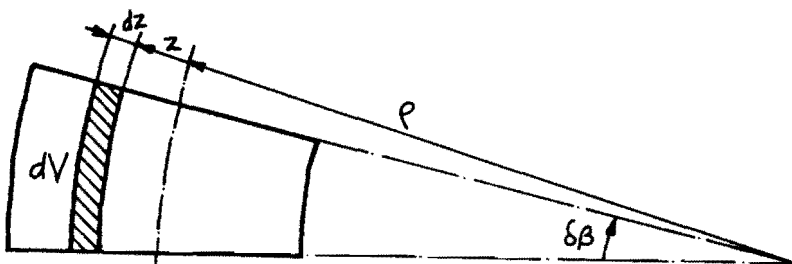


fig 2.4. Gebogen segment van flens.

De incrementele buigrek van het volume-elementje dV bedraagt:

$$\delta \varepsilon_b = \frac{(\rho+z)\delta\beta - \rho\delta\beta}{\rho\delta\beta} = \frac{z}{\rho} \quad (2.7.)$$

Voor dV geldt:

$$dV = (\rho+z)\delta\beta \cdot \alpha \cdot R \cdot dz \quad (2.8.)$$

waarin α de sektorhoek van de contour, zie fig. 2.1.

Omdat de buigrek klein is t.o.v. de rekgrootheden als gevolg van het stuiken (of rekken) van de flens, kan bij de bepaling van de toename van de buigarbeid δW_b een constante vloeispanning σ_v aangenomen worden. Voor σ_v geldt:

$$\sigma_v = C \cdot \bar{\varepsilon}_0^n \quad \text{met } \bar{\varepsilon}_0 \text{ de voordetformatie in de flens} \quad (2.9.)$$

Voor δW_b kan vervolgens afgeleid worden:

$$\delta W_b = \int_V \sigma_v \left| \frac{z}{\rho} \right| dV = 2 \alpha R \sigma_v \int_0^{t/2} \frac{z}{\rho} (\rho+z) dz = \frac{1}{4} \alpha R \sigma_v t \left(t + \frac{t^2}{3\rho} \right)$$

$\frac{t^2}{3\rho}$ kan verwaarloosd worden t.o.v. t , zodat voor δW_b volgt:

$$\delta W_b = \frac{1}{4} \alpha R t^2 \sigma_v \delta\beta$$

met (2.9.) volgt:

$$\boxed{\delta W_b = \frac{1}{4} \alpha R t^2 C \bar{\varepsilon}_0^n \delta\beta} \quad (2.10.)$$

B. Toename van de stuikarbeid.

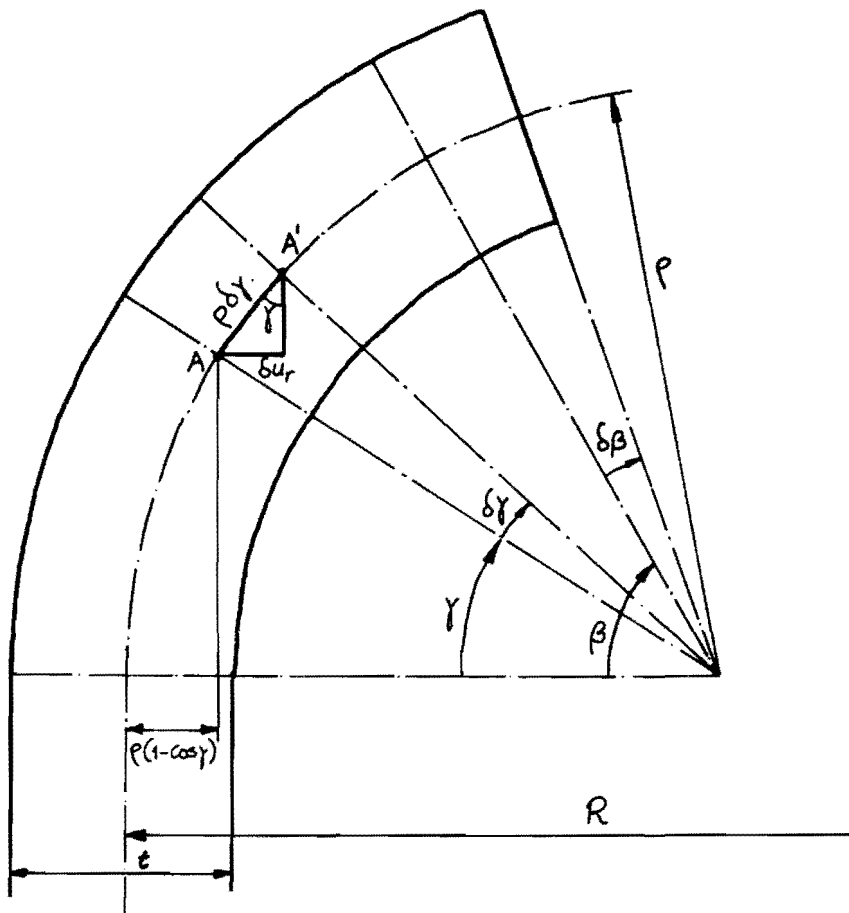


fig. 2.5. Radiale verplaatsing t.g.v. buiging.

Door de toename van de buighoek met $\delta\beta$ verplaatst punt A in fig. 2.5. naar punt A'. A' is hierdoor over een afstand δu_r in de richting van het krommingsmiddelpunt van de contour verplaatst. Voor δu_r geldt (fig. 2.5.) :

$$\delta u_r = p \delta\gamma \sin\gamma \quad (2.11.)$$

Voor de toename van de stuik δE_p geldt dan

$$\delta E_p = \frac{-\delta u_r}{r} = \frac{-p \delta\gamma \sin\gamma}{R - p(1 - \cos\gamma)} < 0 \quad (2.12.)$$

Omdat $\rho \ll R$ kan $\rho(1-\cos\gamma)$ verwaarloosd worden ten opzichte van R . Hiermee wordt (2.12.):

$$\delta E_\varphi = -\frac{\rho}{R} \delta\gamma \sin\gamma \quad (2.13.)$$

Als aangenomen wordt dat de plaatdikte t niet verandert, dan volgt voor de incrementele effectieve deformatie t.g.v. stuik:

$$\delta \bar{E}_s = \frac{2}{\sqrt{3}} |E_\varphi| = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} \delta\gamma \sin\gamma, \text{ met } \delta\gamma \approx \delta\beta \quad (2.14.)$$

Door integratie van $\delta \bar{E}_s$ over het totale buigtraject van A , wordt de effectieve deformatie \bar{E}_s verkregen:

$$\bar{E}_s = \int_0^{\bar{E}_s} \delta \bar{E}_s = \int_0^{\gamma} \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} \sin\gamma \delta\gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1-\cos\gamma) \quad (2.15.)$$

Voor de bepaling van de toename van de stuikarbeid δW_{st} wordt een exponentieel verstevigend materiaalmodel gehanteerd volgens:

$$\bar{\sigma} = C (\bar{E}_0 + \bar{E}_s)^n \quad (2.16.)$$

Voor δW_{st} geldt dan:

$$\delta W_{st} = \int_V C (\bar{E}_0 + \bar{E}_s)^n \delta \bar{E}_s dV \quad (2.17.)$$

De voordetformatie \bar{E}_0 wordt in de integratie als een constante beschouwd, omdat anders analytische integratie van (2.17.) onmogelijk wordt. Later wordt nagegaan hoe groot de invloed is van de plaatscoördinaat

x op de optimale buigradius. Voor dV kan geschreven worden :

$$dV \approx \alpha R \rho t dy \quad (2.18.)$$

met (2.14.), (2.15.), (2.16.) en (2.18.) wordt (2.17.) :

$$\delta W_{st} = \int_0^\beta C \left[\bar{\epsilon}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos \gamma) \right]^n \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} \sin \gamma \delta \beta \alpha R \rho t dy$$

Hieruit volgt na integratie :

$$\delta W_{st} = \alpha \cdot R \cdot \rho \cdot t \frac{C}{n+1} \left\{ \left[\bar{\epsilon}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos \beta) \right]^{n+1} - \bar{\epsilon}_0^{n+1} \right\} \delta \beta$$

(2.19.)

Voor de totale toename van de deformatiearbeid geldt nu :

$$\delta W = \delta W_b + \delta W_{st} \quad (2.20.)$$

Indien de wrijving tussen stempel en flens buiten beschouwing wordt gelaten, kan met het bovengrenstheorema een bovengrens F voor de stempelkracht afgeleid worden :

$$F \cdot \delta u = \delta W \quad (2.21.)$$

Uit fig. 2.3. volgt voor de zakking van het stempel δu :

$$\delta u = \rho \cdot \delta \beta \quad (2.22.)$$

met (2.10) en (2.19) volgt dan voor F :

$$F = \frac{\alpha R t^2}{4\rho} \cdot C \cdot \bar{E}_0^n + \alpha R t \cdot \frac{C}{n+1} \left\{ \left[\bar{E}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos\beta) \right]^{n+1} - \bar{E}_0^{n+1} \right\} \quad (2.23.)$$

Herschrijven van (2.23.) in dimensieloze grootheden leidt tot :

$$F^* = \frac{F}{\alpha R t C} = \frac{\frac{t}{h} \cdot \frac{h}{R}}{4 \cdot \frac{\rho}{R}} \cdot \bar{E}_0^n + \frac{1}{n+1} \left\{ \left[\bar{E}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\rho}{R} (1 - \cos\beta) \right]^{n+1} - \bar{E}_0^{n+1} \right\} \quad (2.24.)$$

Indien getelst wordt langs een concave contour dan verandert (2.12.) in :

$$\delta E_\varphi = \frac{\delta u_n}{r} = \frac{\rho \delta \gamma \sin \gamma}{R + \rho (1 - \cos \gamma)} > 0 \quad (2.25.)$$

Omdat is uitgegaan van $\rho \ll R$ blijft (2.14.) echter hetzelfde. Hieruit volgt dat (2.24.) ook geldt voor een combinatie van buiging en rek (concave contour). De uitdrukkingen voor de voordeformatie \bar{E}_0 verschillen echter voor convexe en concave contouren.

2.4. De optimale buigradius

De optimale buigradius ρ_{opt} is die buigradius waarbij de felskracht F minimaal is. ρ_{opt} wordt derhalve bepaald uit :

$$\frac{\partial F^*}{\partial \left(\frac{\rho}{R}\right)} = 0 \quad (2.26.)$$

Uitwerking van (2.26.) levert:

$$\frac{\partial F^*}{\partial \left(\frac{\rho}{R}\right)} = -\frac{\frac{t}{h} \cdot \frac{h}{R}}{4 \cdot \left(\frac{\rho}{R}\right)^2} \cdot \bar{E}_0 + \left[\bar{E}_0 + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\rho}{R} (1 - \cos \beta) \right]^n \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} (1 - \cos \beta) = 0 \quad (2.27.)$$

Uit (2.27.) kan geen expliciete uitdrukking voor $\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$ afgeleid worden. Numerieke oplossing van vergelijking (2.27.) kan echter al op een eenvoudige pocketcomputer.

2.5. De invloed van $\frac{x}{h}$ op $\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$.

De voordeformatie \bar{E}_0 is een functie van de plaatscoördinaat $\frac{x}{h}$ in de flens: \bar{E}_0 is minimaal op de afkantroadius ($\frac{x}{h} \approx 0$) en maximaal op de flensrand ($\frac{x}{h} = 1$). Omdat bij de integratie van de strikarbeid over het volume van de flens \bar{E}_0 als een constante is beschouwd, moet worden nagegaan wat de invloed is van $\frac{x}{h}$ op $\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$. In tabel 2.1. is $\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$ weergegeven als functie van $\frac{x}{h}$ voor een vijftal waarden van de relatieve contourkromming $\frac{h}{R}$.

$\frac{x}{h}$	$\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$				
	$\frac{h}{R} = 0,1$	$\frac{h}{R} = 0,2$	$\frac{h}{R} = 0,3$	$\frac{h}{R} = 0,4$	$\frac{h}{R} = 0,5$
0,2	0,053	0,076	0,095	0,111	0,124
0,4	0,055	0,080	0,099	0,115	0,129
0,6	0,057	0,082	0,101	0,117	0,131
0,8	0,058	0,082	0,102	0,118	0,132
1,0	0,058	0,083	0,103	0,119	0,133

$n = 0,25$
 $\frac{t}{h} = 0,175$
 $\beta = 90^\circ$
 contour
 convex

tabel 2.1. Invloed van $\frac{x}{h}$ op $\left(\frac{\rho}{R}\right)_{opt}$.

Uit tabel 2.1. volgt dat de invloed van $\frac{x}{h}$ op $(\frac{e}{R})_{opt}$ gering is. In verdere berekeningen is $\frac{x}{h} = 0,6$ genomen.

2.6. De invloed van n op $(\frac{e}{R})_{opt}$.

Dieptrekplaat voor carrosserie-buitendelen moet volgens Volvo-normen een minimale versterigingsexponent hebben van 0,2. In de praktijk heeft n een waarde van ongeveer 0,27. Uit tabel 2.2. blijkt dat voor $0,2 \leq n \leq 0,3$ de invloed van de versterigingsexponent op de optimale buigradius zeer gering is.

$\frac{h}{R}$	$(\frac{e}{R})_{opt}$		
	$n=0,20$	$n=0,25$	$n=0,30$
0,1	0,057	0,057	0,056
0,2	0,082	0,082	0,080
0,3	0,102	0,101	0,099
0,4	0,118	0,117	0,115
0,5	0,132	0,131	0,129
0,6	0,145	0,144	0,142

$\frac{x}{h} = 0,6$

$\frac{t}{h} = 0,175$

$\beta = 90^\circ$

contour convex

tabel 2.2. Invloed van n op $(\frac{e}{R})_{opt}$

2.7. Invloed van krommingsrichting contour op $(\frac{e}{R})_{opt}$.

De uitdrukkingen voor \bar{E}_0 zijn voor concave en convexe contouren verschillend, zie vgl (2.3.) en (2.6.). Uit tabel 2.3. blijkt echter dat de verschillen in $(\frac{e}{R})_{opt}$ te verwaarlozen zijn, indien de overige parameters gelijk zijn. Uit het voorgaande (par. 2.5, 2.6 en 2.7.) kan geconcludeerd worden dat fig 3.3. uit [1] geldig is voor zowel convexe als concave contouren en voor materialen met een versterigings exponent tussen

BIJLAGE 3. BEPALING VAN DE OPTIMALE LUTSNIJDING IN DE
FELSFLENS OP GEKROMDE CONTOUREN.

INHOUD

3.1. Inleiding.	32
3.2. Deformatiemodel voor de flensrand.	33
3.3. Bepaling van de verplaatsingsgrootte u .	36
3.4. Stuikarbeid.	37
3.5. Afschuifarbeid.	38
3.6. De optimale flensuitlooplengte.	40

BIJLAGE 3. BEPALING VAN DE OPTIMALE UITSNIJING IN DE FELSFLENS OP GEKROMDE CONTOUREN.

3.1. Inleiding.

In fig. 3.1. is een bovenaanzicht geschetst van een gefelste convexe contour. De flenshoogte is plaatselijk verlaagd om de mate van stuik in de flens tijdens afkanten en felsen te verminderen. Deze flensuitsnijding zet zich over een lengte b door in de aangrenzende rechte contour : de uitlooptlengte van de verlaagde flens. De gestippelde lijn in fig. 3.1. is de uitslag van het plaatdeel voor het afkanten, dus in ongedeformeerde toestand.

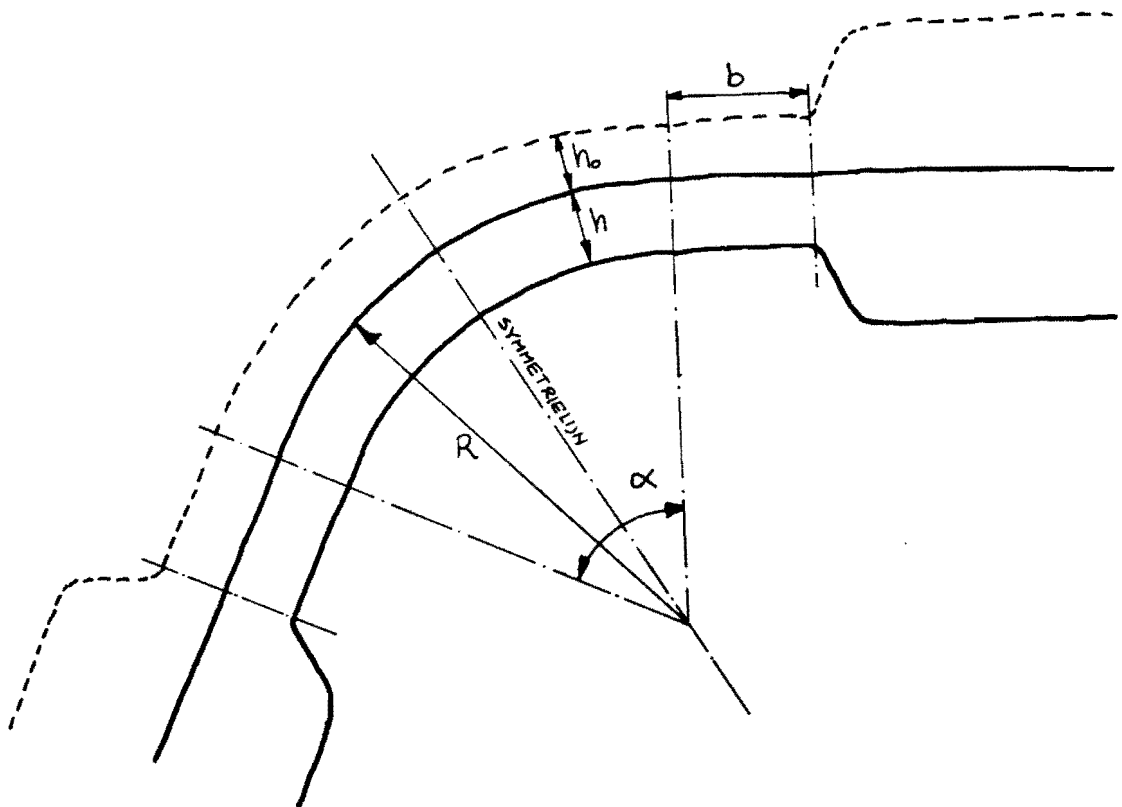


fig 3.1. Flensuitsnijding in gefelste contour.

Door de bissektrice van de sektorhoek α wordt de flensuitsnijding in twee symmetrische helften verdeeld. In zo'n halve uitsnijding kunnen twee gebieden onderscheiden worden :

- de hoeksektie van de flens, langs de gekromde contour.
- de flensuitloop langs de rechte contour.

3.2. Deformatiemodel voor de flensrand.

Vanwege de convexe kromming van de buiglijn wordt de flens in de hoeksektie tijdens het afkanten en felsen gestruikt. De drukspanningen die hiërdoor in tangentiële richting ontstaan zorgen tevens voor een zekere deformatie van de flensuitloop.

Er wordt aangenomen dat de vormstijfheid van de gebogen felsradius dusdanig groot is dat hier geen tangentiële stuik van de flensuitloop plaatsvindt. Gevolg van deze aanname is dat de verdeling van de stuik over hoeksektie en flensuitloop gepaard gaat met afschuiving in de flens. In fig 3.2. is de vormverandering van de flens geschetst.

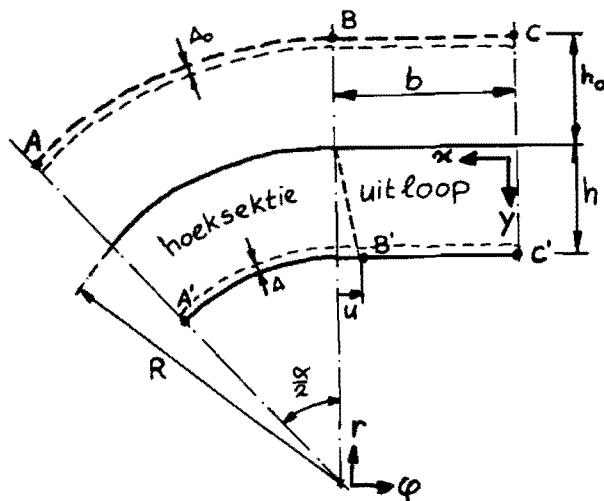


fig 3.2. Deformatie van de flensrand.

Op het symmetrievlak vindt geen afschuiving plaats. In de hoeksektie neemt de afschuiving toe met φ . Op het grensvlak van hoeksektie en flensuitloop is de afschuiving maximaal (punt B'). In het uiterste van de flensuitloop, bij de overgang naar de normale, hoge flens is de deformatie volledig uitgedempt (punt C'). Om het rekenwerk niet al te gecompliceerd te maken wordt de analyse beperkt tot een dunne reep materiaal in de flensrand ter breedte Δ ($\Delta \approx t$, de plaatdikte). De deformatiearbeid in de flensrand ten gevolge van het afkanten en felsen wordt berekend.

HOEKSEKTIE

Ten aanzien van de stuik in de hoeksektie van de flensrand wordt aangenomen :

- uniforme stuik : $\epsilon_{\varphi} \neq \epsilon_{\varphi}(\varphi)$
- lijnspanningstoestand : $\epsilon_r = \epsilon_z = -\frac{1}{2} \epsilon_{\varphi}$

Voor de stuik in de flensrand geldt dan :

$$\epsilon_{\varphi} = \ln \left[\frac{\frac{\alpha}{2}(R-h) + u}{\frac{\alpha}{2}(R+h_0)} \right] \quad (3.1)$$

Door de stuik zal de flenshoogte toenemen. Een gedeelte van de flens verdwijnt echter in de gevormde felsradius. Voor het gemak wordt daarom gesteld : $h \approx h_0$. Hiermee wordt (3.1.) :

$$\epsilon_{\varphi} = \ln \left[\frac{\frac{\alpha}{2}(R-h) + u}{\frac{\alpha}{2}(R+h)} \right] \quad (3.2)$$

Tevens geldt : $\epsilon_{\varphi} = \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \varphi}$. Omdat $\epsilon_{\varphi} \neq \epsilon_{\varphi}(\varphi)$ volgt

hieruit voor u_φ :

$$u_\varphi = C_1 \cdot \varphi + C_2 \quad (3.3.)$$

met als randvoorwaarden: $u_\varphi(\varphi=0) = 0$
 $u_\varphi(\varphi = \frac{\alpha}{2}) = u$

Dit resulteert in :

$$u_\varphi = \frac{\varphi}{\alpha/2} \cdot u \quad (3.4.)$$

Met behulp van (3.4.) kan de afschuiving in de flensrand van de hoeksectie bepaald worden



per definitie geldt :

$$\epsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} \tan \gamma_\varphi \quad (3.5.)$$

met γ_φ de afschuifhoek

Als wordt aangenomen dat de afschuifhoek in een flensdoorsnede constant is, dan volgt voor $\epsilon_{r\varphi}$:

$$\epsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} \frac{u_\varphi}{h} = \frac{1}{2} \frac{\varphi}{\alpha/2} \cdot \frac{u}{h} \quad (3.6.)$$

FLENSUITLOOP

In de rand van de flensuitloop neemt de stuik af van B' naar C' . Om rekentechnische redenen wordt toch uniforme stuik aangenomen. Er geldt dan voor de stuik

$$\epsilon_x = \ln\left(\frac{b-u}{b}\right) \quad (3.7.)$$

De afschuiving is maximaal in B' en nul in C'
Analoog als bij de hoeksectie volgt :

$$\epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \frac{x_0}{b} \cdot \frac{u}{h} \quad (3.8.)$$

x_0 is de plaatscoördinaat van de Nensuitloop in ongedeformeerde toestand

3.3. Bepaling van verplaatsingsgrootte u .

In de rekgrootheden is u nog een onbekende. Deze grootte wordt bepaald uit de eis dat de rekgrootheden in B' continu moeten zijn. Er moet gelden :

$$\epsilon_{\varphi} \left(\varphi = \frac{\alpha}{2} \right) = \epsilon_x (x_0 = b) \quad (3.9.)$$

$$\epsilon_{\varphi y} \left(\varphi = \frac{\alpha}{2} \right) = \epsilon_{xy} (x_0 = b)$$

Aan de tweede vgl van (3.9.) wordt automatisch voldaan.
Met (34.) en (37.) volgt uit (3.9.) :

$$\frac{\alpha(R-h) + u}{\alpha(R+h)} = \frac{b-u}{b}$$

Hiervan volgt voor u :

$$u = \frac{\alpha b h}{b + \frac{\alpha}{2}(R+h)} \quad (3.10.)$$

controle: $\alpha=0$ (geen gekromde contour) $\rightarrow u=0$

$b=0$ (geen Nensuitloop) $\rightarrow u=0$

voorbeeld : $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (rechte hoek)

$$R = 20 \text{ mm}$$

$$h = 4 \text{ mm}$$

$$b = 4 \text{ mm}$$

$$\rightarrow u = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot 4 \cdot 4}{4 \cdot \frac{\pi}{4} (20+4)} = 1,1 \text{ mm.}$$

3.4. Stuikarbeid.

Formeel mogen stuikarbeid en afschuifarbeid hier niet afzonderlijk bepaald worden omdat stuik en afschuiving gelijktijdig plaats vinden. Hier worden beide processen toch ontkoppeld in twee afzonderlijke spannings- en deformatietoestanden teneinde analytische bepaling van de deformatiearbeid mogelijk te maken. De werkelijke deformatiearbeid is kleiner dan de hier bepaalde.

Voor de specifieke stuikarbeid in de flensrand geldt :

$$(W_{st})_s = \frac{C}{n+1} \bar{\epsilon}_{st}^{n+1}$$

Met de aanname dat t.a.v. stuik in de flensrand een lijnspanningstoestand heerst volgt :

$$\text{hoeksektie } (W_{st})_s = \frac{C}{n+1} |\epsilon_{\varphi}|^{n+1} \quad (3.11.)$$

$$\text{flensuitloop } (W_{st})_s = \frac{C}{n+1} |\epsilon_{\alpha}|^{n+1}$$

Omdat de stuik in de flensrand uniform verdeeld is, geldt voor de stuikarbeid W_{st} :

$$W_{st} = \int_V (W_{st})_s dV = (W_{st})_s \cdot V = (W_{st})_s \cdot V_0 \quad (3.12.)$$

met V_0 het oorspronkelijke volume in ongedeformeerde toestand

hoeksektie : $V_0 = \frac{\alpha}{2} (R+h) t_0 \Delta_0$ (3.13.)

flensuitloop : $V_0 = b \cdot$

met (3.12.) en (3.13.) volgt voor W_{st} :

$$W_{st} = \frac{C}{n+1} \cdot \frac{\alpha}{2} (R+h) t_0 \Delta_0 \left[\ln \left(\frac{\alpha/2 (R+h)}{\alpha/2 (R-h) + u} \right) \right]^{n+1} + \frac{C}{n+1} \cdot b \cdot t_0 \Delta_0 \left[\ln \left(\frac{b}{b-u} \right) \right]^{n+1}$$

(3.14.)

3.5. Afschuifarbeid.

Voor de effectieve deformatie ten gevolge van afschuiven geldt :

hoeksektie : $\bar{\epsilon}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_{xy} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\varphi}{\alpha/2} \cdot \frac{u}{h}$

flensuitloop : $\bar{\epsilon}_a = \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon_{xy} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\alpha_0}{b} \cdot \frac{u}{h}$

Omdat de coördinaten φ en α_0 betrekking hebben op de ongedeformeerde toestand, moet over het oorspronkelijke volume V_0 geïntegreerd worden.

hoeksektie : $W_a^h = \int_0^{\alpha/2} \frac{C}{n+1} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\varphi}{\alpha/2} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1} (R+h) t_0 \Delta_0 d\varphi =$

$$= \frac{C}{(n+1)(n+2)} \frac{\alpha}{2} (R+h) t_0 \Delta_0 \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1}$$

$$\begin{aligned} \text{flensuitloop: } W_a^f &= \int_0^b \frac{C}{n+1} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{x_0}{b} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1} t_0 \Delta_0 dx_0 = \\ &= \frac{C}{(n+1)(n+2)} \cdot b \cdot t_0 \cdot \Delta_0 \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1} \end{aligned}$$

De totale afschuifarbeid $W_a = W_a^h + W_a^f$ wordt dan:

$$W_a = \frac{C}{(n+1)(n+2)} \cdot t_0 \cdot \Delta_0 \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1} \left\{ \frac{\alpha}{2} (R+h) + b \right\}.$$

(3.15.)

Voor de totale deformatiearbeid in de flensrand geldt:

$W = W_{st} + W_a$ In dimensioneloze vorm geschreven wordt dit:

$$\begin{aligned} W^* = \frac{W}{C \cdot t_0 \Delta_0 h} &= \frac{1}{n+1} \left\{ \frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right) \ln \left[\frac{\alpha \left(\frac{R}{h} + 1 \right)}{\alpha \left(\frac{R}{h} - 1 \right) + 2 \frac{u}{h}} \right]^{n+1} \right. \\ &\quad \left. + \frac{b}{h} \left[\ln \frac{1}{1 - \frac{u \cdot h}{b}} \right]^{n+1} \right\} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{(n+1)(n+2)} \left[\frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right) + \frac{b}{h} \right] \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{u}{h} \right]^{n+1}$$

(3.16.)

met $\frac{u}{h} = \frac{\alpha \cdot \frac{b}{h}}{\frac{b}{h} + \frac{\alpha}{2} \left(\frac{R}{h} + 1 \right)}$

3.6. De optimale flensuitlooplengte.

De optimale flensuitlooplengte b_{opt} is die b waarvoor de deformatiearbeid in de flensrand minimaal is. Voor $b=b_{opt}$ geldt derhalve:

$$\frac{\partial W^*}{\partial \left(\frac{b}{h}\right)} = 0 \quad (3.17.)$$

Analytische uitwerking van (3.17.) blijkt niet mogelijk. Voor de bepaling van $\left(\frac{b}{h}\right)_{opt}$ is gebruik gemaakt van numerieke differentiatie en nulpuntsbepaling op een pocketcomputer. Het minimum van de deformatiearbeid blijkt een vrij zwak minimum te zijn, zie [1], fig 4.3. De invloed van de versterkingsexponent op $\left(\frac{b}{h}\right)_{opt}$ is gering voor $0,2 \leq n \leq 0,3$. Vanwege het zwakke minimum in de deformatiearbeid hebben kleine afwijkingen ten opzichte van b_{opt} geen grote gevolgen voor de optredende deformatiegrootheden in de felsflens. Door de toepassing van een flensuitlooplengte wordt de strik in de hoeksectie echter wel in belangrijke mate gereduceerd, zie [1], fig. 4.5.

In tabel 3.1. zijn de berekende waarden van $\left(\frac{b}{h}\right)_{opt}$ weergegeven en in tabel 3.2. de bijbehorende waarden van de afschuiving $\frac{u}{h}$.

$\frac{h}{R}$	$(\frac{b}{h})_{opt}$			
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$
0,1	0,07	0,00	0,00	0,00
0,2	0,63	0,23	0,07	0,02
0,3	0,97	0,73	0,48	0,28
0,4	1,17	1,06	0,90	0,74
0,5	1,28	1,28	1,22	1,13
0,6	1,36	1,43	1,44	1,42

tabel 3.1. Optimale flensuitlooplengte

$\frac{h}{R}$	$\frac{u}{h}$			
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\alpha = 120^\circ$
0,1	0,012	0,000	0,000	0,000
0,2	0,150	0,071	0,023	0,007
0,3	0,241	0,255	0,194	0,122
0,4	0,294	0,384	0,387	0,352
0,5	0,324	0,470	0,536	0,554
0,6	0,346	0,530	0,640	0,706

tabel 3.2. Maximale afschuiving in flensrand

BIJLAGE 4. STEMPELGEOMETRIE BIJ EEN NIET-VERTIKALE
FELSRICHTING.

BIJLAGE 4 . STEMPELGEOMETRIE BIJ EEN NIET-VERTIKALE FELSRICHTING.

In [1], par. 3.2., is voor het felsen van rechte contouren de geometrie van het 45°-felsstempel afgeleid op grond van een beschouwing van de drukhoek θ . Voor de drukhoek moet gelden:

$$\theta \approx 45^\circ + \frac{\varphi}{2} - \arctan \mu \quad (4.1)$$

met μ : wrijvingscoëfficiënt tussen flens en stempel.
 φ : flenshoek

Voor een verticale felsrichting, d.w.z. de stempelbeweging staat loodrecht op het oppervlak van het buitendeel, wordt aan (4.1) voldaan indien het stempel hol is met radius $r = 2.5 * h$ (h = flenshoogte).

In veel gevallen is de felsrichting echter niet vertikaal. Door de vorm van het carrossiedeel of het constructieprincipe van de felsmachine kan de felsrichting een hoek maken van $0^\circ - 45^\circ$ met de loodlijn op het buitendeel. Dit heeft gevolgen voor de geometrie van het felsstempel. In deze bijlage wordt een uitdrukking voor de drukhoek θ afgeleid in het geval van een niet-vertikale felsrichting. In fig 4.1. maakt de felsrichting een hoek γ met de normaal op de buitenplaat. Gezocht wordt de relatie:

$$\theta = \theta(\theta_0, \gamma, h, r, \varphi)$$

met θ_0 : drukhoek bij $\varphi = 0$
 γ : hoek tussen felsrichting en loodlijn op

buitenplaat
 h : flenshoogte
 φ : flenshoek

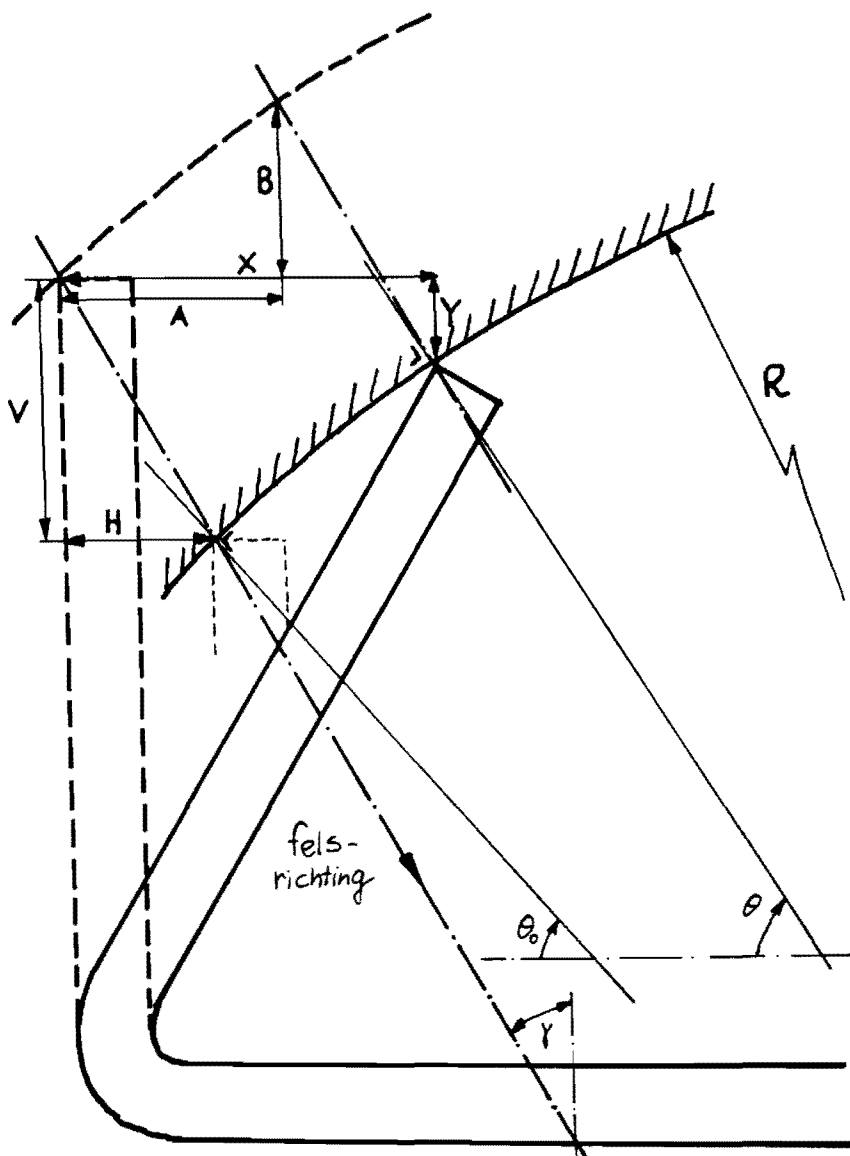


fig 4.1. Beweging van flens t.o.v. stempel bij een niet-vertikale felsrichting.

Ten gevolge van de "slag" S van het felstempel buigt de flens over een hoek φ . Voor de horizontale verplaatsing X en de verticale verplaatsing Y van de flens kan geschreven worden:

$$\begin{aligned} X &= h \sin \varphi \\ Y &= h(1 - \cos \varphi) \end{aligned} \quad (4.2.)$$

Hierbij is verondersteld dat de flens tijdens het felben recht blijft. Dit is in werkelijkheid niet het geval. De buigradius is niet constant, maar neemt toe naarmate de arm van de felkracht kleiner wordt ([2]). De flenshoek φ is dus ook niet constant. Indien echter voor φ de flenshoek van de bovenrand wordt aangehouden (zie fig 4.2.), dan blijft de fout in X en Y door de kromming van de flens klein.

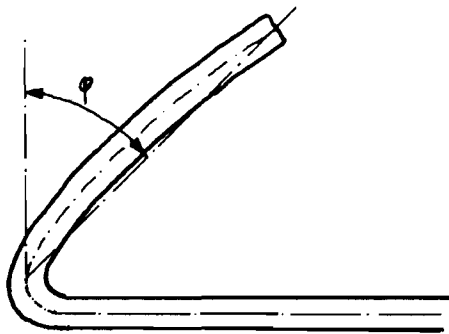


fig 4.2. Definitie flenshoek bij een niet-rechte flens.

De verplaatsing van het contactpunt tussen flens en stempel wordt vastgelegd met de maten A en B , waarvoor geldt:

$$\begin{aligned} A &= r(\cos \theta_0 - \cos \theta) \\ B &= r(\sin \theta - \sin \theta_0) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Voor de horizontale en verticale componenten van de stempelverplaatsing geldt:

$$\begin{aligned} H &= S \sin \gamma \\ V &= S \cos \gamma \end{aligned} \quad (4.4)$$

De relaties tussen de grootheden X, Y, A, B, H en V luiden:

$$\begin{aligned} X &= H + A \\ Y &= V - B \end{aligned}$$

In uitgeschreven vorm:

$$\begin{aligned} h \sin \varphi &= S \sin \gamma + r(\cos \theta_0 - \cos \theta) \\ h(1 - \cos \varphi) &= S \cos \gamma + r(\sin \theta_0 - \sin \theta) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Eliminatie van S uit (4.5.) leidt tot:

$$h \sin(\varphi + \gamma) - h \sin \gamma - r \cos(\theta_0 + \gamma) + r \cos(\theta + \gamma) = 0 \quad (4.6)$$

Voor de drukhoek θ volgt dan uit (4.6.):

$$\theta = \arccos \left\{ \cos(\theta_0 + \gamma) + \frac{h}{r} [\sin \gamma + \sin(\varphi + \gamma)] \right\} \quad (4.7)$$

Voor een verticale felsrichting, $\gamma = 0$, volgt uit (4.7.):

$$\theta(\gamma = 0) = \arccos \left\{ \cos \theta_0 + \frac{h}{r} \sin \varphi \right\} \quad (4.8)$$

Dit is dezelfde uitdrukking als (3.12) in [1].

In tabel 4.1. zijn de theoretische waarden voor de drukhoek weergegeven voor $-15^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$, zoals berekend met vgl (4.1.) waarbij $\mu=0,2$. De berekende waarden van de drukhoek van een hol ketsstempel met constante radius r staan in tabel 4.2. Dit is gebeurd voor verschillende febrichtingen: $\gamma=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ en 45° . Bij toenemende γ moet de radius van het stempel steeds kleiner genomen worden omdat het contactvlak, waarover de flens in aanraking met het stempel komt tijdens het ketsen, kleiner wordt.

φ	θ_{th}
-15°	26°
0°	34°
15°	41°
30°	49°
45°	56°

$\mu=0,2$

θ_{th} afgerond op hele graden

tabel 4.1. Theoretische drukhoek voor 45° -ketsstempel

$\varphi \backslash \theta$	$\gamma=0^\circ$ $\frac{r}{h}=2,5$	$\gamma=15^\circ$ $\frac{r}{h}=2$	$\gamma=30^\circ$ $\frac{r}{h}=1,5$	$\gamma=45^\circ$ $\frac{r}{h}=1$
-15°	21°	23°	23°	21°
0°	34°	34°	34°	34°
15°	43°	42°	42°	43°
30°	51°	50°	49°	49°
45°	57°	54°	52°	51°

$\mu=0,2$

θ afgerond op hele graden

tabel 4.2. Druk hoeken voor verschillende febrichtingen en stempelradii

