Buigen

vormgeven van dunne metaalplaat

vm 113

VM

FME CWM

Buigen

vormgeven van dunne metaalplaat

vm 113

Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/januari 2010, 2e herziene druk

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technologie & Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl

buigen

vormgeven van dunne metaalplaat

toelichting:

De eerste uitgave van deze publicatie is in 1996 samengesteld door de werkgroep "Buigen van dunne plaat" en geeft gerichte theoretische en praktische informatie ten behoeve van respectievelijk de gebruikers van het buigproces, geïnteresseerden in dit proces, technische cursussen en opleidingen. In 2009 is deze publicatie aangepast aan de huidige stand der techniek.

De inhoud van deze publicatie behandelt de aspecten welke voor het vormgeven van plaat door middel van buigen van belang zijn. De achterin toegevoegde supplementen over materialen en over machines en gereedschappen geven processpecifieke informatie over de desbetreffende onderwerpen. In de voorlichtingspublikaties VM 111 "Materialen" en VM 112 "Machines en gereedschappen" worden de algemene gegevens over deze onderwerpen behandeld.

Het NIMR (Netherlands Institute of Metals Research) inmiddels opererend onder de naam M2i (Materials innovation institute) heeft geld ter beschikking gesteld om deze nieuwe publicatie te laten opstellen en aan te passen aan de stand der techniek. De FME heeft de coördinatie daarvan op zich genomen en voor de aanpassing van de inhoud van deze voorlichtingspublicatie onder meer TNO en FDP ingeschakeld.

Op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl die in het kader van andere projecten zijn ontwikkeld, is op het gebied van dunne plaat bewerking en verbindingstechnieken een groot aantal publicaties vrij te downloaden (waaronder ook deze publicatie).

samenstelling werkgroep (1996):

A.A. Aldenkamp	PMP
P. Boers	Vereniging FME-CWM
R.F. Grimbergen †	Hoogovens Research & Development
Th. Janssen	Philips PMF Nederland BV
W. Laging	Fokker Aircraft BV, Bedrijf Drechtsteden
R. Liet	Darley BV
L.M.J. Robroek	TNO Industrie
G. van Scherrenburg	PMP (voorzitter)
T. Slot	Safan BV
J.A.J. Willemsen	Machinefabriek Wila BV
G. van Wijngaarden	Metaalcompagnie Brabant BV

samenstelling werkgroep herziening (2009/2010):

J. Borsboom	Federatie Dunne Plaat
H. de Kruijk	TNO Industrie en Techniek
H. Raaijmakers	Federatie Dunne Plaat
J. van de Put	Syntens
T. Slot	Safan BV

eindredactie:

P. Boers	Vereniging FME-CWM

samenstelling overleggroep (1996):

Darley B.V., Eijsden	R. Liet
Delem BV, Eindhoven	F. Kocken
Fokker Aircraft, Bedrijf Drechtsteden, Papendrecht	W. Laging
Holec Systemen en Componenten BV, Hengelo	G. Schats
Hoogovens Research & Development, IJmuiden	R.F. Grimbergen † en A. Hurkmans
IOP-Metalen, Apeldoorn	D. v.d. Torre
Machinefabriek Wila B.V.	J.A.J. Willemsen
Metaalcompagnie Brabant BV, Valkenswaard	G. van Wijngaarden
Philips PMF Nederland BV, Eindhoven	Th. Janssen
PMP, Apeldoorn	A.A. Aldenkamp, G. van Scherrenburg en G.H.G. Vaessen (voorzitter)
Safan Lochem BV, Lochem	T. Slot, C.S. Todd † en P. Wielens
Stork Brabant BV, Boxmeer	R. Wilmsen
TNO Industrie	L.M.J. Robroek (projectleider)
Vereniging FME-CWM, Zoetermeer	P. Boers

Al deze bedrijven/instellingen hebben indertijd een bijdrage geleverd aan het onderzoek. Het Ministerie van Economische Zaken had daarnaast in belangrijke mate bijgedragen aan de financiering van dit project.

informatie over en bestelling van VM-publicaties:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 11 00
- telefax	079 - 353 13 65

Inhoudsopgave

blz.

Gebruiksaanwijzing 5

Symbolenlijst 6

1 **Inleiding** 7

2 **Procesbeschrijving** 8
2.1 Definities van vrij-, strijk-, matrijs-, elastomeer- en zwenkbuigen 8
2.1.1 Vrijbuigen 8
2.1.2 Strijkbuigen 8
2.1.3 Matrijsbuigen 8
2.1.4 Elastomeerbuigen 8
2.1.5 Zwenkbuigen 9
2.2 Lokale procesbeschrijving 9
2.2.1 Spanningen bij het buigen 9
2.2.2 Vervormingen bij het buigen 10
2.2.3 Randvervormingen 10
2.2.4 De neutrale lijn 10
2.2.5 Terugvering 11
2.2.6 Minimale buigradius 11
2.2.7 Scheuren 11
2.3 Totale procesbeschrijving 11
2.3.1 Inleiding 11
2.3.2 Vrijbuigen 12
2.3.2.1 Procesbeschrijving 12
2.3.2.2 Krachten 12
2.3.2.3 Terugvering 13
2.3.2.4 Geometrie 13
2.3.2.5 Voor- en nadelen vrijbuigen 13
2.3.3 Strijkbuigen 13
2.3.3.1 Procesbeschrijving 13
2.3.3.2 Krachten 14
2.3.3.3 Terugvering 14
2.3.3.4 Geometrie 14
2.3.3.5 Voor- en nadelen strijkbuigen 15
2.3.4 Matrijsbuigen 15
2.3.4.1 Procesbeschrijving 15
2.3.4.2 Krachten 15
2.3.4.3 Terugvering 15
2.3.4.4 Geometrie 16
2.3.4.5 Voor- en nadelen matrijsbuigen 16
2.3.5 Elastomeerbuigen 16
2.3.5.1 Procesbeschrijving 16
2.3.5.2 Krachten 16
2.3.5.3 Terugvering 16
2.3.5.4 Geometrie 16
2.3.5.5 Voor- en nadelen elastomeer-buigen (vergeleken met matrijs-buigen) 16
2.3.6 Zwenkbuigen 16
2.3.6.1 Procesbeschrijving 16
2.3.6.2 Krachten 17
2.3.6.3 Terugvering 17
2.3.6.4 Geometrie 17
2.3.6.5 Voor- en nadelen zwenkbuigen 17

3 **Praktische toepassingen** 18
3.1 Berekeningen en tabellen 18
3.1.1 De buigradius 18
3.1.2 De uitslag van het product 18
3.1.2.1 Uitslagberekening methode 1 19
3.1.2.2 Uitslagberekening methode 2 20
3.1.2.3 Voorbeeld van uitslagberekeningen 20
3.1.3 De buigkracht 20
3.1.4 De terugvering en de buighoekcompensatie 22
3.1.5 De toleranties 22
3.1.6 De walsrichting van het materiaal 23
3.1.7 Gatvervorming tengevolge van het buigen 23
3.2 De werkvoorbereiding of het methodeplan 23
3.2.1 Inleiding 23
3.2.2 Proceskeuze 23
3.2.2.1 Kenmerken van de buigprocessen 23
3.2.2.2 Kenmerken van de producten 24
3.2.3 Buigvolgorde 24
3.3 Trouble shoot lijst 24
3.4 Uitgewerkt voorbeeld 24
3.4.1 Keuze van het buigproces 26
3.4.2 Benodigde bewerkingen 26
3.4.3 Platines knippen 26
3.4.4 Buigen van het product 26
3.4.4.1 De totale maatvoering van het product 26
3.4.4.2 Het benodigde gereedschap 26
3.4.4.3 De handling van het product tijdens de productie 27
3.4.5 Nabeschouwing 27

blz.

Supplement "materialen" 28
S.1 Inleiding 28
S.2 Productmaterialen 28
S.2.1 Mechanische eigenschappen van belang zijn voor het buigen 28
S.2.2 Overige eigenschappen van belang voor proces en product 28
S.2.3 Verandering mechanische eigenschappen door buigen 29
S.2.4 Invloed knipdeformatie/braam c.q. warmte-beïnvloede zone bij thermisch snijden 29
S.2.5 Voor buigen geschikte materialen 29
S.3 Gereedschapmaterialen 38
S.4 Smeermiddelen 39

Supplement "machines en gereedschappen" 41
M.1 Inleiding 41
M.2 Universele machines 41
M.2.1 De kantpers 41
M.2.1.1 De aandrijving 42
M.2.1.2 Het frame 42
M.2.1.3 De stijfheid 42
M.2.1.4 De hoofd- en hulpfuncties 43
M.2.2 De zwenkbuigmachine 43
M.2.2.1 De aandrijving 45
M.2.2.2 Het frame 46
M.2.2.3 De stijfheid 46
M.2.2.4 Bewegingsmogelijkheden 46
M.2.3 De strijkbuigmachine 46
M.2.4 De meerslede-automaat 46
M.3 Gemeenschappelijke onderwerpen 47
M.3.1 De besturing 47
M.3.2 De steltijd 47
M.3.3 De veiligheid 47
M.4 Hulpmiddelen 48
M.4.1 Bombering 48
M.4.2 Plaatvolgsysteem (buighulpen) 48
M.4.3 Meten en corrigeren van de indringdiepte 49
M.4.4 Meten en corrigeren van de buighoek 49
M.4.4.1 Bij kantpersen 49
M.4.4.2 Bij zwenkbuigmachines 49
M.5 Gereedschappen 49
M.5.1 Gereedschappen voor kantpersen en zwenkbuigmachines 49
M.5.1.1 Vrijbuiggereedschappen 49
M.5.1.2 Strijkbuiggereedschappen 50
M.5.1.3 Matrijsbuig- of kalibreergereed-schappen 50
M.5.1.4 Elastomeergereedschappen 50
M.5.1.5 Zwenkbuiggereedschappen 50
M.5.1.6 Gereedschapmaterialen 51
M.5.1.7 Gereedschapconstructies 51
M.5.1.8 Stellen (stelplan) 52
M.5.1.9 Onderhoud en revisie 53
M.5.1.10 Spanmiddelen 53
M.5.2 Volgsnijbuiggereedschappen 54
M.5.2.1 Gereedschapconstructies 54
M.5.2.2 Voorbeeld volgsnijbuigen 55
M.5.2.3 Gereedschapmateriaal en smering 55
M.5.2.4 Stellen 55
M.5.2.5 Onderhoud en revisie 55
M.5.3 Gereedschappen voor een buigautomaat 55

Literatuur 56

Trefwoorden 56

Gebruiksaanwijzing:

Deze VM-publicatie is onderdeel van een serie publicaties die zich richt op diegenen die in de praktijk te maken hebben met het vormgeven van dunne plaat of zich daarmee willen gaan bezighouden.
Vormgeven van dunne plaat kan met een groot aantal technieken. De publicaties richten zich op de meest voorkomende:

- dieptrekken, kraagtrekken en strekken;
- buigtechnieken zoals vrij-, strijk-, zwenk-, matrijs- en vijfpuntsbuigen;
- scheidingstechnieken zoals ponsen en knippen, plasma- en lasersnijden.

Voor het verbinden van dunne plaat wordt verwezen naar diverse VM-publicaties over lassen, solderen, lijmen, mechanisch verbinden (zie de catalogus van de FME en de website www.DunnePlaat-Online.nl).

Bij het vormgeven van plaat spelen drie aspecten een rol:

- de keuze van het vormgevingsproces, op basis van of in wisselwerking met het productontwerp;
- de keuze en invloed van het productmateriaal, het gereedschapmateriaal en smeermiddelen (hulpstoffen) op het vormgevingsproces en het eindproduct;
- de keuze van machines en gereedschappen.

Sommige materiaal- en machinegebonden aspecten zijn alleen van belang voor een bepaalde vormgevingstechniek, zoals bijvoorbeeld smeermiddelen voor dieptrekken. Andere zijn van algemeen belang.

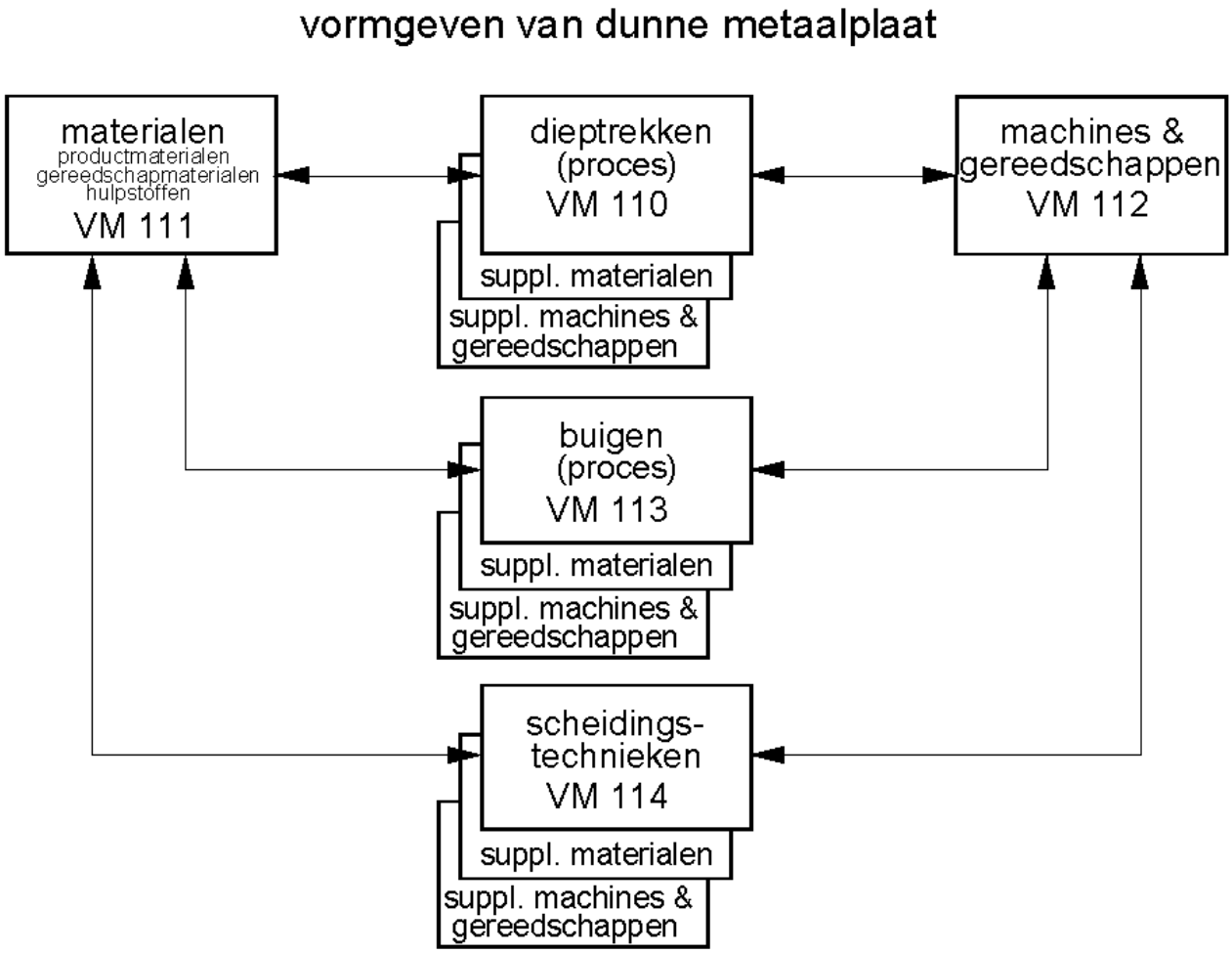
Informatie over respectievelijk dieptrekken (inclusief kraagtrekken en strekken), buigen en scheiden worden in drie aparte (proces-)publicaties gegeven. Deze procespublicaties worden geflankeerd door twee publicaties:

- een publicatie met algemene informatie over product- en gereedschapmaterialen alsmede hulpstoffen;
- een publicatie over machines en gereedschappen.

In de procespublicaties bevinden zich supplementen over materialen, alsmede machines en gereedschappen, waarin specifieke informatie wordt gegeven die van belang is voor het desbetreffende proces. Voor een goed begrip van de stof wordt aangeraden ook de publicaties VM 111 “Materialen” en VM 112 “Machines en gereedschappen” erbij te houden.

In de procespublicaties worden trouble shoot lijsten gegeven. Deze verwijzen niet alleen naar de tekst in de procespublicatie zelf, maar indien nodig ook naar de andere publicaties.

In het hieronder afgebeelde schema wordt de samenhang aangegeven.



Symbolenlijst

A	rek na breuk
B	(plaat)breedte
D	doorndiameter
E	elasticiteitsmodulus
F	kracht
F_b	buigkracht
F_{klem}	klemkracht
F_n	normaalkracht
F_r	reactiekracht
F_w	wrijvingskracht
L_o	uitgangslengte
M	moment
M_p	maximaal buigend moment
R	verticale verplaatsing achteraanslag
R_e	elasticiteitsgrens
R_i	minimaal toelaatbare inwendige buigradius
R_m	treksterkte
S_o	oppervlakte van doorsnede
V	matrijsopening, verstelling onder-balk
W_{klem}	inklemlengte
X	horizontale verplaatsing achteraanslag
Y	verplaatsing persbalk
Z	horizontale verplaatsing achteraanslagvinger

a	afstand
b	breedte
c	correctiefactor
h	hoogte
k	correctiefactor
n	verstevigingsexponent
r_i	inwendige buigradius
r_m	matrijsradius, inloopradius
r_n	radius van de neutrale lijn
r_s	stempelradius
s	plaatdikte
s_o	uitgangsdikte
u	grootte buigspleet
v	buigverlies
x	afstand in x-richting, minimale beenlengte
y	afstand in y-richting

α	buighoek
β	product- of openingshoek
σ	spanning
σ_d	drukspanning
σ_{max}	piekspanning
σ_{tr}	trekspanning
σ_y	spanning in y-richting

Hoofdstuk 1
Inleiding

Om fabricage door middel van omvormen te beschrijven, kan gebruik worden gemaakt van het schema in figuur 1.1.

Centraal staat het eigenlijke *omvormproces:* de rekken en materiaalverplaatsingen waardoor een plaat tot een product wordt omgevormd.
Deze komen tot stand door middel van een *gereedschap*, aangedreven door een *machine*. Contact met het gereedschap dwingt het materiaal een bepaalde vorm aan te nemen. De wederzijdse respons van het materiaal en het gereedschap op hun contact wordt bepaald door de eigenschappen van het productmateriaal, het gereedschapmateriaal en eventueel het contactmedium (smeermiddel).

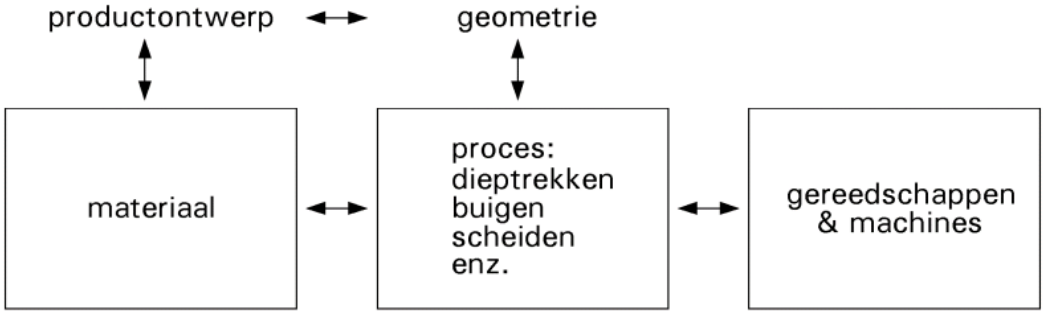
In de praktijk wordt de rol van het omvormproces vaak onderbelicht. Bij het voorbereiden van de fabricage gaat de aandacht vooral uit naar het gereedschap en het eventueel te bestellen productmateriaal.

Binnen de categorie spaanloze bewerkingen neemt het buigen van metalen een vooraanstaande plaats in. In deze publicatie worden de meest voorkomende buigbewerkingen besproken.

Het doel van de publicatie is de, thans in de bedrijven aanwezige, kennis en ervaring op een gestructureerde wijze vast te leggen en beschikbaar te stellen. Om deze doelstelling te realiseren is voor de volgende aanpak gekozen:
1. Beschrijving van het buigproces met praktische toepassingen (hoofdstuk 2 en 3);
2. Een supplement "Materialen", als aanvulling van de voorlichtingspublicatie VM 111 "Materialen" op het gebied van buigen;
3. Een supplement "Machines en gereedschappen", als aanvulling van de voorlichtingspublicatie VM 112 "Machines en gereedschappen" op het gebied van buigen.

Deze publicatie is bestemd voor gebruik in de ontwerp-, de werkvoorbereidings- en de productiefase van een product.

Aan het eind van deze publicatie zijn supplementen toegevoegd met betrekking tot materialen, alsmede machines en gereedschappen. Deze supplementen zijn speciaal voor de in deze publicatie behandelde processen een aanvulling op de algemene voorlichtingspublicaties VM 111 “Materialen” en VM 112 “Machines en gereedschappen“.



figuur 1.1 Schema voor het beschrijven van de fabricage door middel van omvormen

Hoofdstuk 2
Procesbeschrijving

In het algemeen worden de buigprocessen die bij het omvormen worden toegepast, onderscheiden door het soort machine en/of gereedschap waarmee de bewerking wordt uitgevoerd.
Het onderscheid is niet altijd even duidelijk waarneembaar. Met name wanneer de bewerking buigen één van de bewerkingsfasen in een specifiek gereedschap vormt, is het onderscheid minder duidelijk zichtbaar. In deze publicatie worden dan ook allereerst de processen nader beschouwd.

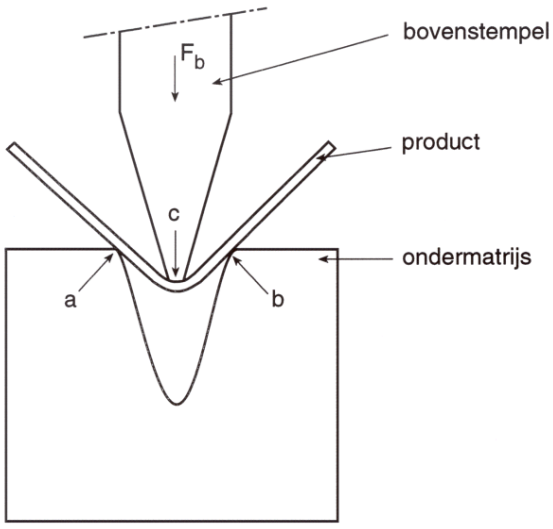
Alvorens in te gaan op de lokale en totale procesbeschrijvingen worden de definities van de te beschouwen processen weergegeven.
Daarbij worden alleen de kenmerken genoemd, de gedetailleerde beschrijving volgt in § 2.3 "totale procesbeschrijving".

2.1 *Definities van vrij-, strijk-, matrijs-, elastomeer- en zwenkbuigen*

2.1.1 *Vrijbuigen*

Bij het vrijbuigen wordt het materiaal gebogen met behulp van een bovenstempel en een ondermatrijs (zie figuur 2.1).

De kenmerken van het zuivere vrijbuigen zijn:
a. Het product kan zich vrij vormen.
b. Het contact tussen het productmateriaal en het gereedschap bestaat uit drie evenwijdige contactlijnen, ter plekke van a, b en c (zie figuur 2.1).
c. De inwendige productradius is de zogenaamde natuurlijke radius.



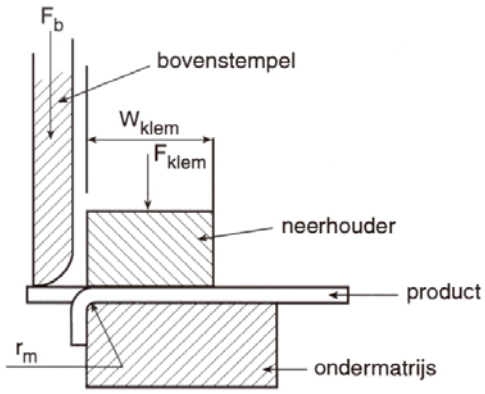
figuur 2.1 Vrijbuigen

2.1.2 *Strijkbuigen*

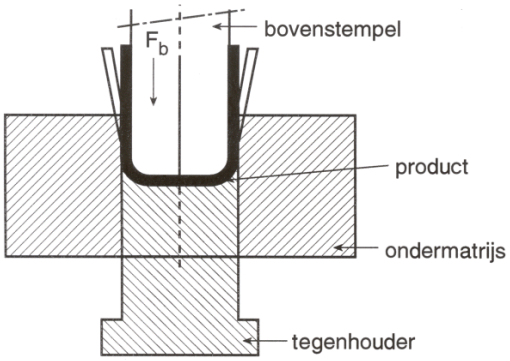
Bij het strijkbuigen (zie figuur 2.2) wordt het productmateriaal, over een afstand W_{klem}, eenzijdig met een neerhouder ingeklemd met een klemkracht F_{klem}. Het overstekende productmateriaal wordt door de neergaande bovenstempel om de matrijsradius r_m gebogen.

Het buigproces kan op verschillende soorten persen, steeds met specifiek gereedschap, worden uitgevoerd.

U-Buigen
Bij het zogenaamde U-buigen (zie figuur 2.3) wordt een symmetrische strijkbuigbewerking uitgevoerd. Ter beperking van de terugvering wordt het gevormde product aan het einde van de persslag gekalibreerd (doodgedrukt).



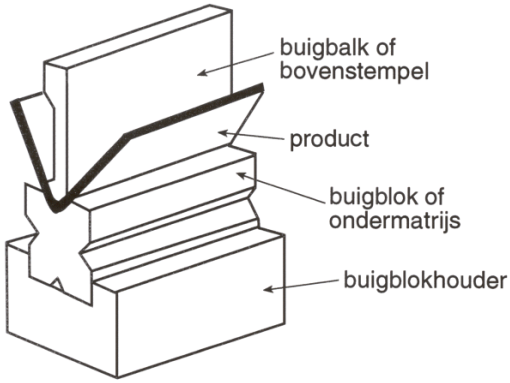
figuur 2.2 Strijkbuigen



figuur 2.3 U-buigen

2.1.3 *Matrijsbuigen*

Matrijsbuigen (zie figuur 2.4) wordt steeds voorafgegaan door vrijbuigen of strijkbuigen.
In de laatste fase van de bewerking wordt het product dusdanig in de matrijsradius gedrukt dat het materiaal wordt geplet. De terugvering wordt daardoor grotendeels tegengegaan.



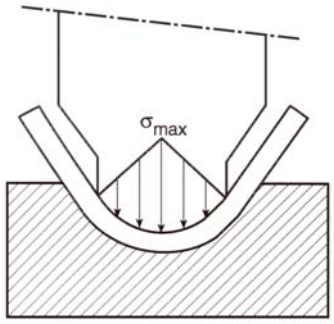
figuur 2.4 Matrijsbuigen

Bij het pletten lopen de krachten zeer sterk op. Deze piekbelasting kan een veelvoud zijn van de benodigde buigkracht voor het vrijbuigen.

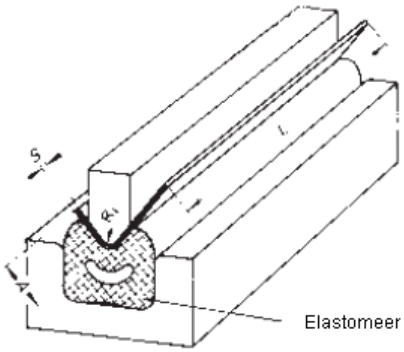
Figuur 2.5 geeft de verdeling van de piekbelasting bij het matrijsbuigen weer.

2.1.4 *Elastomeerbuigen*

Elastomeerbuigen (zie figuur 2.6) is een variant van het matrijsbuigen. In plaats van een hard buigblok of ondermatrijs wordt een elastomeer gebruikt. Dit elastomeer kan beschouwd worden als een universeel gereedschap. De gereedschapkosten bij het "matrijsbuigen" worden hierdoor dus kleiner. De voor deze bewerking toegepaste elastomeren zijn polyurethaansoorten. De hardheid ligt tussen 60-90 ShoreA.



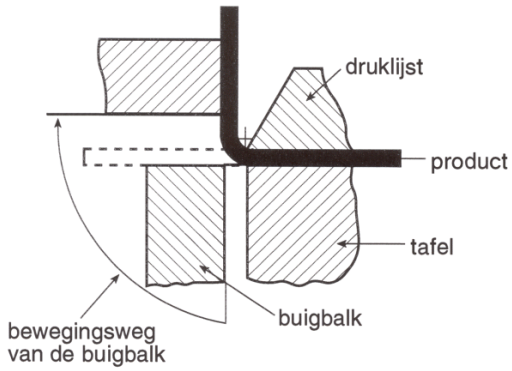
figuur 2.5 Spanning tengevolge van de piekbelasting bij het matrijsbuigen



figuur 2.6 Elastomeerbuigen

2.1.5 *Zwenkbuigen*

Bij zwenkbuigen (zie figuur 2.7) wordt het productmateriaal eenzijdig ingeklemd tussen de druklijst en de tafel. Met de scharnierende buigbalk zwenkt men het uitstekende materiaal om de druklijst, tot de gewenste openingshoek is verkregen. Door de zwenkende buigbalk staat de buigkracht loodrecht op het materiaaloppervlak. De kans op oppervlaktebeschadigingen wordt daardoor sterk verminderd.



figuur 2.7 Zwenkbuigen

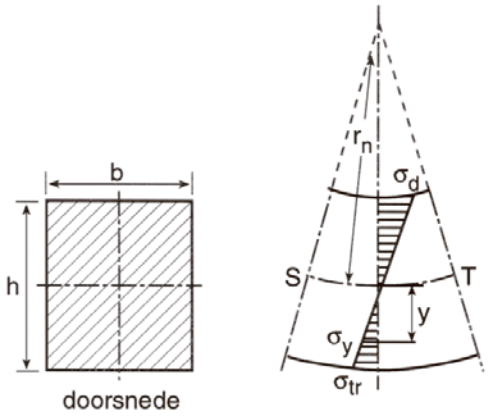
2.2 *Lokale procesbeschrijving*

In deze paragraaf worden enkele specifieke onderwerpen besproken die direct van belang zijn voor het buigen. Het is evenwel gewenst vooraf kennis te nemen van de voorlichtingspublicatie "VM 111 - Materialen", uitgegeven in het kader van "Vormgeven van dunne metaalplaat".

In deze publicatie VM 111 komen onder meer aan de orde:
- de begrippen rek en rekweg;
- het materiaalgedrag onder belasting;
- elastische en plastische vervorming;
- de verschillen tussen insnoering, scheuren en breuk.

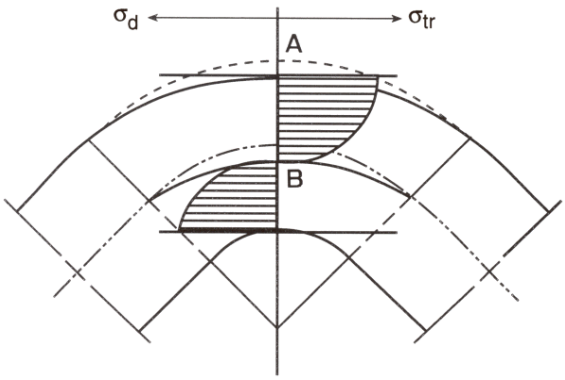
2.2.1 *Spanningen bij het buigen*

a. **Spanningen in het elastisch gebied**
Zolang het materiaal zich elastisch gedraagt, dus zolang de spanningen in de doorsnede overal lager zijn dan de proportionaliteitsgrens R_p, zijn de lokale trek- en drukspanningen in de doorsnede rechtevenredig met de afstand y vanaf de neutrale lijn (lijn ST in figuur 2.8). Na het wegnemen van de belasting neemt het materiaal zijn oorspronkelijke vorm weer aan.



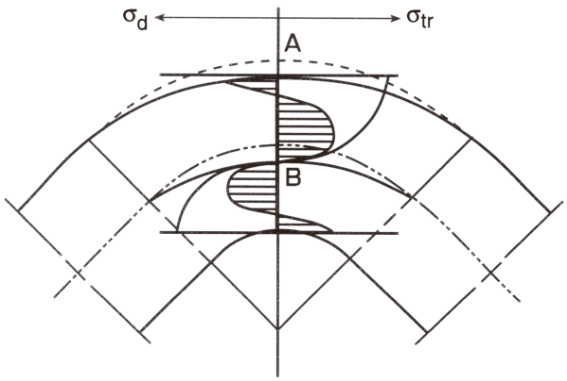
figuur 2.8 Optredende spanningen bij buiging in het elastische gebied

b. **Spanningen in het plastisch gebied**
Komt tijdens het buigen ergens in de doorsnede de lokale spanning boven de elasticiteitsgrens R_e (meestal aan de buitenzijde), dan ontstaat blijvende vervorming (zie figuur 2.9). Bij groter wordende belasting zal de plastische zone zich in de richting van de neutrale lijn uitbreiden.
Bij de maximale vervorming is de buitenzijde van het materiaal het meest scheurgevoelig, omdat daar de lokale spanning als eerste de breukspanning zal bereiken.
Indien bij gelijkblijvende buigradius dikker materiaal wordt gebogen, neemt de kans op overschrijden van de breukgrens toe en dus de kans op scheuren. De minimaal toelaatbare buigradius wordt dan ook mede bepaald door de materiaalsoort en -dikte.



figuur 2.9 Optredende spanningen bij buiging tot in het plastische gebied

c. **Restspanningen na het buigen**
Na het wegnemen van de buigbelasting blijven er in de buigdoorsnede restspanningen achter. Deze werken, zowel aan de binnen- als de buitenzijde van de plaat, tegengesteld aan de buigspanningen.
Tijdens het buigen treden in de buitenzone (AB in figuur 2.9) alleen trekspanningen op. Na het buigen treden, onder invloed van de terugvering, ook tegengesteld gerichte drukspanningen op (zie AB in figuur 2.10).



figuur 2.10 Restspanningen na het wegnemen van een buigbelasting tot in het plastische gebied

2.2.2 *Vervormingen bij het buigen*

Tijdens het buigen wordt het productmateriaal elastisch en plastisch vervormd. De elastische vervorming veroorzaakt terugvering van de productbenen.
Het materiaalvolume voor en na de plastische vervorming is gelijk. Het materiaal aan de binnenkant van de radius wordt in de richting van de buighoek gestuikt en in de dwarsrichting verbreed.
Het materiaal aan de buitenkant van de radius wordt in de richting van de buighoek gerekt en in de dwarsrichting versmald.

Bij het buigen van smalle stroken of platen, waarvoor geldt dat de breedte kleiner is dan vijfmaal de dikte ($B < 5s$), wordt de doorsnede sterk vervormd. In de buigzone is de materiaaldikte afgenomen. Aan de binnenzijde is het materiaal verbreed, aan de buitenzijde versmald.

De doorsnede van een gebogen smal materiaal heeft een trapeziumachtige vorm. De vervorming is driedimensionaal (zie figuur 2.11).

Bij brede stroken of platen ($B > 5s$) wordt de breedterek aan de buitenzijde van het materiaal tegengewerkt door de weerstand van het materiaal in die richting. De vervorming is tweedimensionaal (zie figuur 2.11).

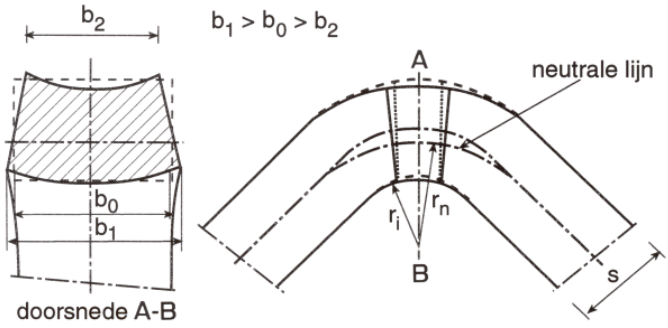
2.2.3 *Randvervormingen*

Randvervormingen treden hoofdzakelijk op bij het buigen van dikkere materialen met kleinere buigradii. In de vorige paragraaf is beschreven dat bij het buigen van een product de stuikzijde de neiging heeft breder te worden en de rekzijde smaller, indien in de dwarsrichting onvoldoende weerstand wordt geboden.
G. Oehler [lit. 8] geeft als richtwaarde voor staal zowel voor de enkelzijdige toe- als afname: $0{,}4 \times s/r_i$, waarin s = materiaaldikte; r_i = inwendige buigradius.

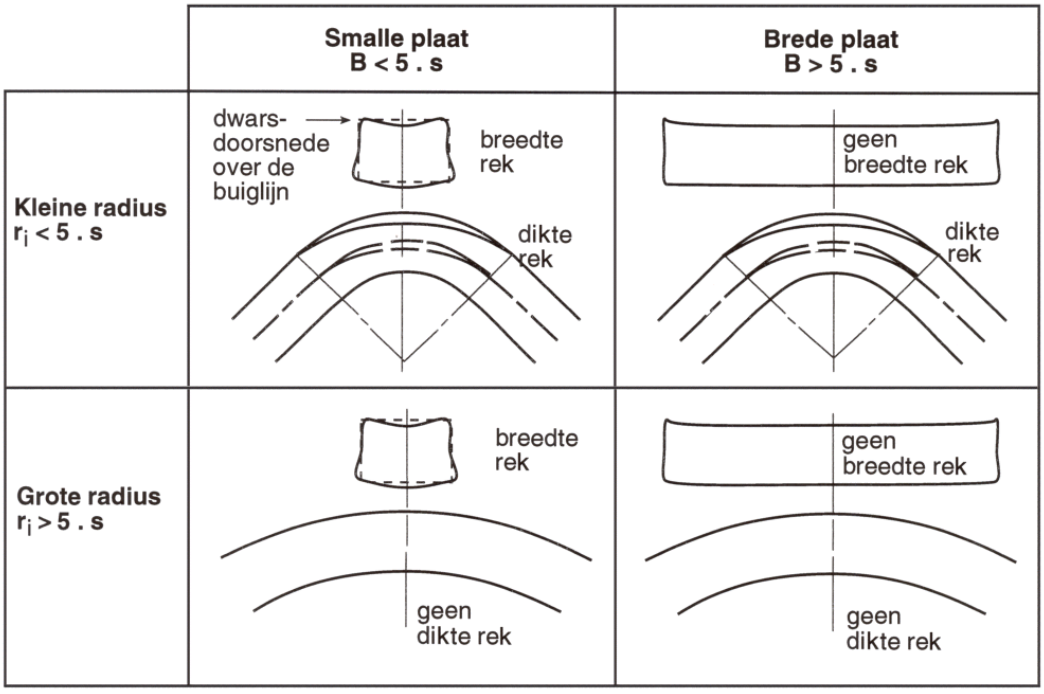
Aan de stuikzijde vindt dus een toename ($b_1 - b_0$) van de oorspronkelijke breedte met $2 \times 0{,}4 \times s/r_i$ plaats en een gelijke afname ($b_0 - b_2$) aan de rekzijde (zie figuur 2.12). Deze richtwaarden worden beïnvloed door de anisotropiefactor van het productmateriaal.

2.2.4 *De neutrale lijn*

De neutrale lijn stelt een denkbeeldige lijn voor die zich in het algemeen tussen de buiten- en binnenzone van het buigvlak, in het overgangsgebied van de lokale trek- en drukspanningen, bevindt (zie figuur 2.12).
De lengte van de neutrale lijn is gelijk aan de lengte van het uitgeslagen product, omdat op deze lijn de rek nul is.



figuur 2.12 Weergave van de neutrale lijn



figuur 2.11 Overzicht van de vervormingen bij het buigen.
B = materiaalbreedte; s = materiaaldikte; r_i = inwendige buigradius

Bij het buigen van brede plaat ligt de neutrale lijn in het midden van de door het buigen verminderde plaatdikte. Bij het buigen van smalle plaat of strip neemt de breedte aan de stuikzijde toe en aan de rekzijde af. Door deze vormverandering verplaatst zich de neutrale lijn in de richting van de stuikzijde.

Opgemerkt moet worden dat de kromming van de neutrale lijn niet cirkelvormig is. De berekening van de ligging en van de lengte van de neutrale lijn, nodig voor het berekenen van de uitslag, komt in het hoofdstuk 3 "Praktische toepassingen" aan de orde.

Toelichting: *Voordat een product wordt gebogen, moeten de afmetingen van de vlakke plaat op een zodanige wijze worden bepaald dat bij het buigen de bedoelde productmaten worden gerealiseerd. Deze berekening noemt men het bepalen van de uitslag.*

2.2.5 *Terugvering*

Bij vrijwel elk materiaal dat op buiging wordt belast is sprake van elastische vervorming en plastische vervorming. De terugvering, bij wegnemen van de belasting, wordt veroorzaakt door de elastische vervorming en is mede afhankelijk van de elasticiteit van het materiaal.

De terugvering kan voor het buigen van grote radii ($>5\ s_o$) worden berekend. Bij het buigen met kleine radii moet de terugvering proefondervindelijk worden bepaald.
Voor het buigen met grote radii geldt in dit verband:

$$R_s = E \times s_o \times R_p / E \times s_o + (2 \times R_p + s_o) s_b$$

Hierin is: R_s = de stempelradius.
E = de elasticiteitsmodules.
s_o = de plaatdikte.
R_p = de productradius.
s_b = de buigspanning.

De buigspanning kan worden bepaald met de formule van Nadai:

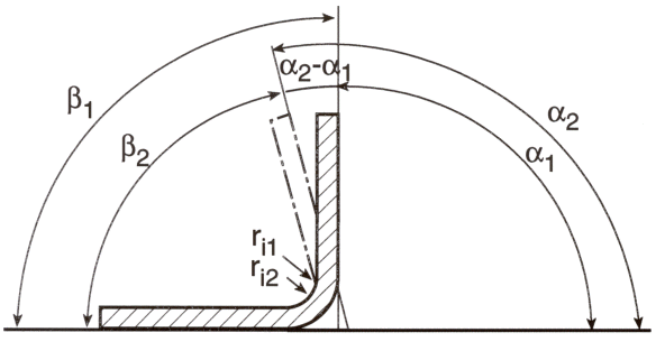
$$s_b = C \times (f_v + f)^a$$

Hierin is: C = een materiaaleigenschap, zijnde de spanning die in dat materiaal een natuurlijke rek van 1 oftewel 100% veroorzaakt.
f_v = de voordeformatie, die veelal kan worden verwaarloosd.
f = de natuurlijke rek, die in de uiterste vezel van de buigdoorsnede optreedt.

De natuurlijke (blijvende) rek kan aan de hand van de producttekening als volgt worden berekend:

$$f = \ln[(r_p + s_o)/(r_p + 0{,}5 s_o)]$$

In figuur 2.13 zijn voor de begripsbepaling een aantal hoeken aangegeven.



figuur 2.13 Overzicht van de diverse hoeken. α = buighoek; β = openingshoek; $\alpha 2 - \alpha 1$ = terugveringshoek

2.2.6 *Minimale buigradius*

Om de terugvering te beperken is het gunstig om met zo klein mogelijke buigradius te werken. De eigenschappen van de verschillende te buigen materialen laten echter geen onbeperkte verkleining toe. Met het kleiner worden van de buigradius neemt de vervorming aan de buitenzijde van de buiging toe. De minimaal toelaatbare inwendige buigradius r_i kan worden berekend uit de maximaal toelaatbare vervorming aan de buitenzijde van de buiging.

Overige invloedsfactoren:
- materiaaleigenschappen;
- walsrichting van het materiaal;
- conditie van de materiaalkanten (door voorbewerkingen kunnen de snijkanten of het oppervlak sterk in hardheid toenemen). Verder kan de snijbraam, die aan de rekzijde van de buigdoorsnede bevindt, scheurvorming als gevolg van kerfwerking inleiden.

Het berekenen van de minimale buigradius wordt in hoofdstuk 3 "Praktische toepassingen" besproken.

2.2.7 *Scheuren*

Scheuren ontstaan meestal in de buitenzone van het gebogen product en worden veroorzaakt door plaatselijke overschrijding van de maximale toelaatbare rek.

Aan het buigen gaat dikwijls een knip-, snij- of ponsbewerking vooraf. Als deze bewerking loodrecht op de buiglijn ligt, wordt de vervormbaarheid ter plaatse van de scheidingsvlakken minder.

Bramen, ontstaan bij een voorbewerking, moeten bij voorkeur aan de stuikzijde van de buigradius liggen.
Liggen de bramen aan de rekzijde, dan kunnen zij gemakkelijk scheuren veroorzaken.
Grote bramen aan de stuikzijde kunnen ook scheuren veroorzaken. Om deze reden moeten grote bramen voor het buigen worden verwijderd.

De oppervlakte-ruwheid van het uitgangsmateriaal kan een rol spelen bij het ontstaan van scheuren.
Door de grote rekken die optreden bij het buigen om kleine stralen zal de ruwheid toenemen. De ruwheid kan eveneens toenemen door slijtage en/of wrijving over gereedschaponderdelen.
De juiste smering is dan ook een belangrijk criterium, in combinatie met gereedschap- en productmateriaal.

De mechanische eigenschappen van een materiaal zijn niet in alle richtingen gelijk, hiermede moet dan ook rekening worden gehouden bij het buigen van de producten.

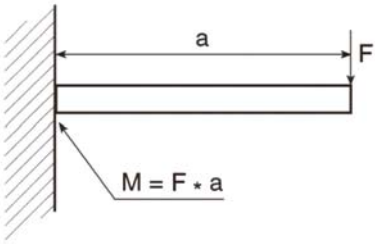
2.3 *Totale procesbeschrijving*

2.3.1 *Inleiding*

Alvorens de verschillende buigprocessen nader te omschrijven, worden de krachten die bij elk van die buigprocessen optreden enigszins toegelicht.

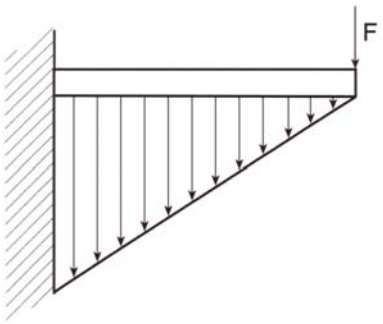
Voor de te bespreken buigprocessen geldt dat de minimaal benodigde kracht om de buiging te realiseren, afhankelijk is van het gekozen proces.
Deze kracht wordt bepaald door het buigend moment - waarbij plastische vervorming optreedt in de doorsnede waar de buiging moet plaatsvinden - te delen door de arm waarover de kracht het moment uitoefent.

Voor een buigproces geldt het volgende principemodel: een eenzijdig ingeklemde balk waarop, over een afstand a, een puntbelasting F wordt uitgeoefend (figuur 2.14).



figuur 2.14 Principemodel voor het buigen

De momentenlijn, met het maximale buigmoment ter plaatse van de inklemming, is in figuur 2.15 weergegeven.



figuur 2.15 De optredende momenten (momentenlijn)

Omdat bij het buigen sprake is van blijvende vervorming is de plastische mechanica van toepassing. De grootte van het moment waarbij plastische vervorming optreedt, is:

$M_p = c.R_m.B.s^2/4$ (1)

waarin:
M_p = buigend moment waarbij plastische vervorming optreedt.
c = de correctiefactor.
R_m = de treksterkte.
B = de lengte van de buiglijn (is meestal de breedte van het te buigen product).
s = de materiaaldikte.

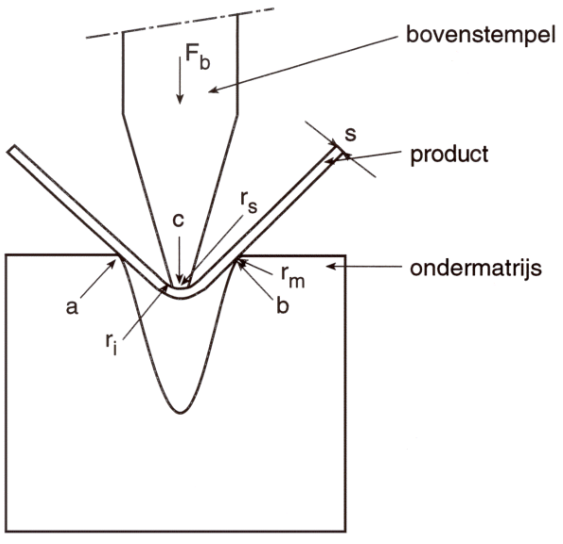
Opmerkingen:
1. *Omdat bij het buigen aanzienlijke vervorming optreedt, wordt voor de bepaling van het moment gerekend met een buigspanning gelijk aan de treksterkte.*
2. *Er wordt een factor c in rekening gebracht, voor:*
   - *correctie van de spanningstoestand t.o.v. de trekproef;*
   - *veranderende lengte van de arm, afhankelijk van het proces, waarover de kracht wordt uitgeoefend.*

De factor c wordt besproken in hoofdstuk 3 "Praktische toepassingen".

2.3.2 *Vrijbuigen*

2.3.2.1 *Procesbeschrijving*

Bij het vrijbuigen wordt het materiaal gebogen met behulp van een bovenstempel en een ondermatrijs (zie figuur 2.16). Het contact tussen het productmateriaal en het gereedschap blijft beperkt tot drie evenwijdige lijnen (a, b en c).



figuur 2.16 Vrijbuigen

Om dat te realiseren is het noodzakelijk dat de stempelradius (r_s) kleiner is dan de inwendige natuurlijke productradius (r_i). Het product wordt dan vrij gebogen.
Bij gegeven gereedschap en materiaal bepaalt de indringdiepte van de bovenstempel de grootte van de gebogen hoek.

De kromtestraal, de straal waarover het product wordt gebogen, wordt tijdens het buigen steeds kleiner. De materiaalvervorming in de bocht neemt dan toe. De beide raaklijnen a en b verplaatsen zich daarbij over de inloopradii (r_m) van de ondermatrijs naar binnen.

De inwendige productradius (r_i)

De grootte van de inwendige productradius, zijnde de zogenaamde natuurlijke radius, wordt bepaald door de buighoek, de grootte van de V-opening van de ondermatrijs, de materiaaldikte en de materiaaleigenschappen (verstevigingsexponent).

De combinatie van invloedsfactoren maakt een nauwkeurige berekening van die radius ingewikkeld, zodat in de praktijk veelal wordt gewerkt met ervaringsgegevens.

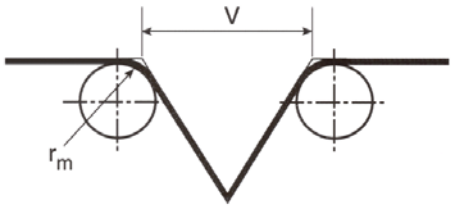
Het berekenen van de inwendige productradius komt aan de orde in hoofdstuk 3 "Praktische toepassingen".

De grootte van de V-opening

Om te voorkomen dat bij het buigen van een product het materiaal in de buigzone dusdanig wordt vervormd dat scheurvorming optreedt, is een minimale grootte van de V-opening noodzakelijk. Deze grootte V (zie figuur 2.17) is afhankelijk van de materiaalsoort en materiaaldikte (s).

Praktijkwaarden:
- staalplaat met $R_m \leq 450$ N/mm ➞ V = 8s
- staalplaat met $R_m > 450$ N/mm ➞ V = 10 tot 12s
- aluminium (afhankelijk van soort) ➞ V = 6s

Het zal duidelijk zijn dat naarmate de V-opening kleiner is, er een kleinere productradius ontstaat.



figuur 2.17 Aanduiding van de V-opening

De stempelradius (r_s)

Al eerder is aangegeven dat de stempelradius r_s bij het zuivere vrijbuigen kleiner moet zijn dan r_i. Om echter te voorkomen dat er een indrukking in het productmateriaal ontstaat, mag r_s niet te klein worden gekozen.

De inloopradius (r_m) van de ondermatrijs

De grootte van de inloopradius van de matrijs is afhankelijk van de beenlengte van het product en gewoonlijk 10 á 20% van de grootte van de V-opening. Een te kleine inloopradius kan bij het buigen leiden tot een te grote vlaktedruk, waardoor het product kan worden beschadigd.

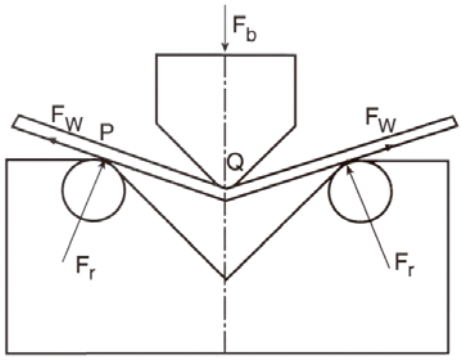
2.3.2.2 *Krachten*

Het vrijbuigen is in principe te vergelijken met een op buiging belaste, op twee steunpunten rustende balk, die in het midden door een puntlast wordt belast.
De kracht F_b veroorzaakt de reactiekrachten F_r en de wrijvingskrachten F_w (figuur 2.18).

De kracht om het maximale moment te overwinnen wordt opgebracht door F_b.
Het maximale moment is: $M_p = ½ F_b . ½ V$ (2)

De reactiekracht F_r geeft met de arm PQ een buigend moment (zie § 2.3.1).

Formule (1) uit de inleiding luidt: $M_p = c.R_m.B.s^2/4$



figuur 2.18 De krachten die optreden bij het vrijbuigen

Uit (1) en (2) volgt: $(c.R_m.B.s^2)/4 = (F_b.V)/4$

Hieruit volgt de maximaal benodigde buigkracht:

$$F_b = \frac{c \cdot R_m \cdot B \cdot s^2}{V}$$

waarin:
F_b = de maximaal benodigde buigkracht.
c = de correctiefactor, die kan worden berekend uit $c = 1 + 4 \times s_o/V$.
R_m = de treksterkte.
B = de lengte van de buiglijn.
s = de materiaaldikte.
V = de grootte van de V-opening.

Reduceren van de wrijving tussen het productmateriaal en de inloopradius van de matrijs (r_m), door bijvoorbeeld smering, kan de buigkracht met circa 10% verlagen.

2.3.2.3 *Terugvering*

De terugvering bij het vrijbuigen wordt in sterke mate bepaald door:
- de materiaaleigenschappen;
- de materiaaldikte;
- de grootte van de inwendige productradius in relatie tot de materiaaldikte (grotere verhouding r_i/s geeft grotere terugvering);
- de grootte van de V-opening:
  grotere V-opening geeft grotere buigzone en grotere terugvering (de elastische vervorming is relatief groot ten opzichte van de plastische vervorming).

Zie ook § 2.2.5.

2.3.2.4 *Geometrie*

Het vrijbuigen zoals in § 2.3.2.1 beschreven, is een symmetrisch proces.
Voorwaarden:
- nauwkeurige uitlijning van bovenstempel en ondermatrijs;
- correcte gereedschapcondities (gelijke inloopradii).

Het gebogen product heeft een verlopende radius, het grootst bij de raaklijnen met de ondermatrijs en het kleinst op de plaats waar het grootste buigmoment optreedt, dus bij de raaklijn met de bovenstempel.
De verlopende buigradius bij het vrijbuigen maakt het vooraf berekenen van de uitslag moeilijk (zie voor de berekening hoofdstuk 3 "Praktische toepassingen").

Bij het vrijbuigen wordt het productmateriaal niet geklemd. Het is dan ook mogelijk, dat het materiaal bij het buigen kleine verschuivingen ondergaat, waardoor onnauwkeurigheden ontstaan.

Bij grote belasting heeft het persbed en de stoter van de kantpers de neiging enigszins door te buigen, waardoor het product niet overal even ver wordt gebogen. Dit heeft vorm- en/of maatafwijkingen tot gevolg.

Opmerking: *Het eindresultaat van het gebogen product wordt mede bepaald door de uitrusting van de machine (zie de volgende paragraaf en het supplement machines en gereedschappen).*

2.3.2.5 *Voor- en nadelen vrijbuigen*

Voordelen:
- het proces laat redelijk snel werken toe (zwenkbuig- en strijkbuigautomaten zijn echter aanzienlijk sneller);
- meerdere verschillende buighoeken kunnen met een bepaalde stempel/matrijs combinatie worden gerealiseerd;
- een kantpers is flexibel, er kunnen veel productvormen mee worden vervaardigd;
- de benodigde gereedschappen zijn veelal standaard en kunnen worden toegeleverd. Relatief snel opstarten van de productie van een nieuw product wordt daardoor mogelijk.

Nadelen:
- het vrijbuigproces is gevoelig voor materiaaldikteverschillen;
- het vrijbuigproces is eveneens gevoelig voor verschillen in de materiaaleigenschappen;
- opzwaaiende plaat bij het buigen ervan kan gevaar opleveren;
- de 'handling' van de producten kan, mede afhankelijk van de afmetingen en het gewicht ervan, problemen opleveren.

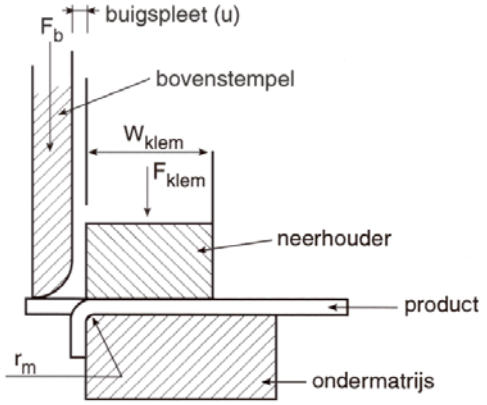
Opgemerkt moet worden dat de pers kan worden uitgerust met een aantal speciale voorzieningen, waardoor de genoemde nadelen worden opgeheven, zoals:
- meetsysteem voor materiaal-dikteverschillen, met correctiemogelijkheid voor de machine;
- meetsysteem voor het bepalen van de terugvering, eveneens gekoppeld aan de besturing van de pers;
- geleidingsarmen voor ondersteuning van het opzwaaiende materiaal;
- bombeersysteem om doorbuigen te compenseren.

Welke voorzieningen noodzakelijk zijn, wordt vooral bepaald door het productiepakket. Een gegeven is, dat de investering lonend moet zijn. Daarbij spelen niet alleen de kostprijs, maar bijvoorbeeld ook het verhogen van de flexibiliteit, de verbetering van het kwaliteitsniveau en het verhogen van de veiligheid een belangrijk rol.

2.3.3 *Strijkbuigen*

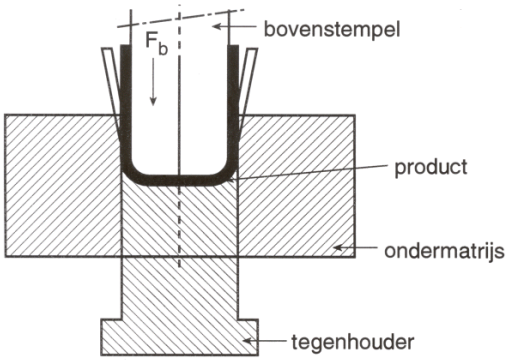
2.3.3.1 *Procesbeschrijving*

Bij het strijkbuigen (zie figuur 2.19) wordt het productmateriaal over een bepaalde afstand eenzijdig ingeklemd. Door de neergaande bovenstempel wordt het materiaal over de matrijsradius (r_m) gebogen. De nauwkeurigheid van de buiging wordt bepaald door de materiaaleigenschappen, de grootte van de buigradius en de grootte van de buigspleet. Voor nauwkeurig werk is de buigspleet minstens gelijk aan de nominale materiaaldikte, voor minder nauwkeurig werk de maximale materiaaldikte. Wanneer de buigspleet kleiner is dan de materiaaldikte treedt "strijken" van het materiaal op, waarvoor een veel hogere kracht nodig is. Bovendien leidt het tot afwijkende maten, zowel van de dikte als de lengte van het omgezette been.



figuur 2.19 Strijkbuigen

Het U-buigen is een bijzondere vorm van strijkbuigen. In dit geval worden beide productbenen tegelijkertijd gebogen. Wanneer niet wordt nagedrukt, gelden de formules voor strijkbuigen, bij wel nadrukken die van matrijsbuigen (zie figuur 2.20). In praktisch alle gevallen is nadrukken noodzakelijk.

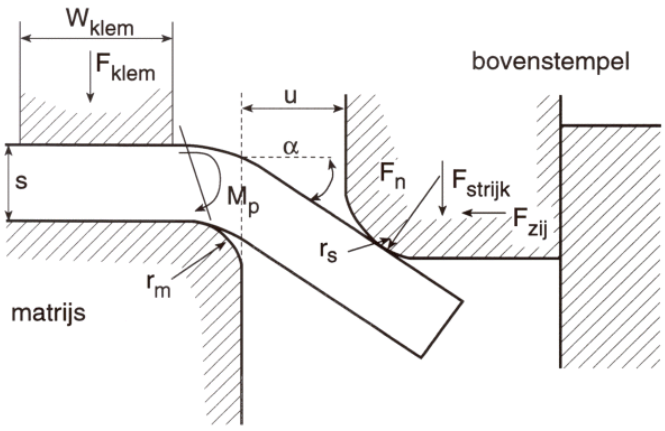


figuur 2.20 U-buigen

2.3.3.2 *Krachten*

Bij het strijkbuigen komen de volgende krachten aan de orde (zie ook figuur 2.21):

- F_n = de normaalkracht, die werkend op de arm het benodigde moment levert;
- F_{strijk} = de verticaal ontbonden kracht van Fn, werkend in de bewegingsrichting van de bovenstempel (de kracht die de machine minstens moet leveren;
- F_{zij} = de horizontaal ontbonden kracht van Fn, werkend loodrecht op de bewegingsrichting;
- F_{klem} = de klemkracht;
- F_{strek} = de strekkracht in het te buigen productdeel, als gevolg van de neergaande beweging van de bovenstempel, in grootte afhankelijk van de grootte van de buigspleet en de materiaaleigenschappen.



figuur 2.21 Krachten die werken bij het strijkbuigen

Het gewenste moment wordt geleverd door de normaalkracht Fn, over de arm $(r_m + u + r_s)$, waarin:
r_m = de matrijsradius
u = de buigspleet
r_s = de stempelradius

Wanneer het product over een hoek α is gebogen (zie figuur 2.21), is de situatie ten opzichte van het begin als volgt:

- de arm is $(r_m + u + r_s)/\cos\alpha$
- $F_{strijk} = F_n.\cos\alpha$;
  dus $F_n = F_{strijk}/\cos\alpha$

Bekend was dat $M_p = F_n.arm$, zodat kan worden ingevuld:

$$F_n.arm = (F_{strijk})/\cos\alpha \,.\, (r_m + u + r_s)/\cos\alpha$$
$$= \{F_{strijk}.(r_m + u + r_s)\}/\cos^2\alpha$$

Vanuit de praktijk is gebleken dat, onder andere ter compensatie van de wrijving, moet worden gerekend met $\cos^2\alpha = 1$.

Uit de inleiding, zie § 2.3.1, is bekend: $M_p = c.R_m.B.s^2/4$

Dus: $c.R_m.B.s^2/4 = F_{strijk}.(r_m + u + r_s)$

en $F_{strijk} = (c.R_m.B.s^2)/4(r_m + u + r_s)$

Wanneer de wrijving laag is, kan voor c = 1,15 worden gekozen.

Waar in de praktijk wordt gerekend met $r_m = u = r_s = s$, geldt dat de kracht die de machine met het bovenstempel minstens moet leveren gelijk is aan:

$$F_{strijk} = (c.R_m.B.s^2)/(4 \times 3s) = (c.R_m.B.s)/12$$

De zijdelingse kracht

De horizontaal ontbondene F_{zij} van de normaalkracht F_n werkt loodrecht op de bewegingsrichting van de bovenstempel. Bij de constructie van het gereedschap moet rekening worden gehouden met het feit dat de bovenstempel, onder invloed van die kracht, zal wijken.

Opmerking: *In volggereedschappen kan de bovenstempel worden voorzien van een hiel, die wordt afgesteund in het gereedschap en daardoor zijdelingse verplaatsing voorkomt. De zijdelingse kracht is maximaal als het been ongeveer 45° is gebogen, dan geldt $F_{zij} = F_{strijk}$, mits $u > s$.*

De klemkracht

Uit de literatuur blijkt dat klemmen over een grootte van drie tot vijfmaal de materiaaldikte het meest effectief is. Een vuistregel voor de grootte van de klemkracht is: één tot anderhalf maal de benodigde buigkracht.

Aandachtspunten:

- te lage klemkracht kan verschuiven van het product veroorzaken;
- te hoge klemkracht kan beschadigingen aan het product veroorzaken.

Overigens moet worden vermeld dat, indien de natuurlijke radius kleiner is dan de afrondingsradius van de ondermatrijs, er een grote trekkracht ontstaat op het materiaal in de inklemming, waardoor de plaat kan verschuiven. Verschuiving van het productmateriaal tijdens het strijkbuigen is overigens nauwelijks te voorkomen.

De strekkracht

Onder invloed van de strijkende beweging van de bovenstempel werkt in het te buigen been een strekkracht. De grootte van deze strekkracht is afhankelijk van de grootte van de wrijvingskracht. Deze wrijvingskracht is afhankelijk van de grootte van de buigspleet, de oppervlaktegesteldheid en de grootte van de reactiekracht.

2.3.3.3 *Terugvering*

Door de neergaande strijkende beweging van de bovenstempel wordt het materiaal in meer of mindere mate, afhankelijk van de materiaaleigenschappen en de grootte van de buigspleet, gestrekt. Hierdoor wordt de terugvering versterkt. Reduceren van de terugvering is mogelijk, door:

- buigen over een kleinere buigradius;
- bewust werken met kleinere buigspleet (let op maatvoering en beschadiging van het product, overmatige slijtage van het gereedschap en de grootte van de strijkkracht);
- een kalibreerbewerking toe te voegen middels een hiel aan het bovenstempel.

2.3.3.4 *Geometrie*

Het strijkbuigen, waarbij het materiaal eenzijdig is ingeklemd, is een asymmetrisch proces. Eén productzijde wordt over de matrijsradius gebogen. De kromming aan het buigproduct verloopt van maximaal bij de inklemming tot nul bij het eerste contactpunt met de bovenstempel. Het eindresultaat is sterk afhankelijk van de gereedschapconstructie en de condities, zoals:

- de radii aan matrijs en bovenstempel;
- de grootte van de buigspleet;
- voorkomen dat de bovenstempel kan uitwijken, zodat geen onnauwkeurigheden worden geintroduceerd.

Het spreekt voor zich dat ook de productmateriaaleigenschappen van grote invloed zijn. Met name de diktetolerantie van het materiaal speelt een grote rol, omdat vanuit de materiaaldikte de grootte van de buigspleet wordt bepaald.

Het product volgt de matrijsradius, zodat de uitslag van het product redelijk nauwkeurig kan worden berekend.

2.3.3.5 *Voor- en nadelen strijkbuigen*

Voordelen:
- het proces laat snel werken toe;
- door het materiaal eenzijdig in te klemmen kunnen korte randen aan lange werkstukken worden gebogen;
- tijdens het strijkbuigen ligt de te buigen plaat vlak op de tafel, waardoor de 'handling' van die plaat eenvoudig is.

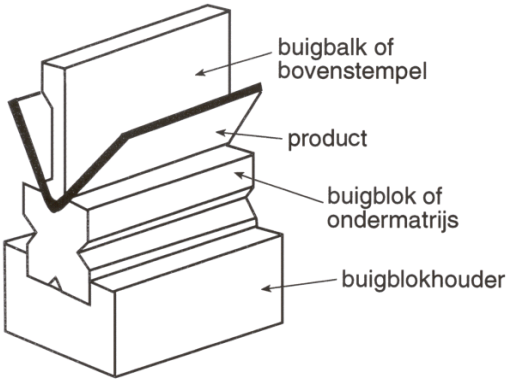
Nadelen:
- de hoek van het te buigen product wordt sterk beïnvloed door de tolerantie op de materiaaldikte, in combinatie met de grootte van de buigspleet;
- het klemmen van het materiaal vraagt een grote kracht;
- klemmen kan beschadigingen veroorzaken;
- door de neerwaartse beweging van de bovenstempel kunnen op het product strijksporen ontstaan;
- wanneer er sprake is van aanladen, neemt de gereedschapslijtage sterk toe;
- de bovenstempel heeft de neiging, onder invloed van de zijwaartse kracht, te wijken (gereedschapconstructie);
- hogere kosten door het gebruik van productgebonden gereedschap. Indien op strijkbuigautomaten wordt gebogen is dit bezwaar geëlimineerd.

Algemeen:
- het eigenlijke buigen vraagt slechts een klein deel van de totale cyclustijd. De rest van die cyclustijd wordt besteed aan product wisselen en positioneren. Een zekere vorm van mechanisatie of automatisering is wellicht mogelijk en rendabel. Automatische aan- en afvoer van producten is een mogelijkheid.
- omdat voor het proces specifiek gereedschap noodzakelijk is, is er een nauwe samenhang met de seriegrootte. Specifiek gereedschap heeft een grotere invloed op de kostprijs van het product, als de levensduur van het gereedschap groter is dan nodig voor het totaal aantal te maken producten.

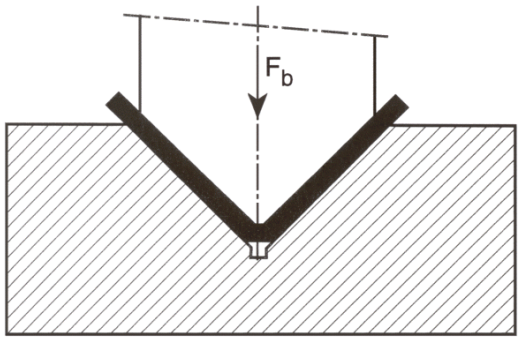
2.3.4 *Matrijsbuigen*

2.3.4.1 *Procesbeschrijving*

Voor het matrijsbuigen op een kantpers wordt gebruik gemaakt van een bovenstempel en een ondermatrijs (zie figuur 2.22). Matrijsbuigen wordt steeds voorafgegaan door één van de bewerkingen vrijbuigen of strijkbuigen. Bij het zuivere vrijbuigen bestaat het contact tussen het productmateriaal en het gereedschap uit drie evenwijdige lijnen. Wanneer de buiging wordt voortgezet, ontstaan vijf contactlijnen, vervolgens wordt het materiaal opgesloten tussen bovenstempel en ondermatrijs (zie figuur 2.23).



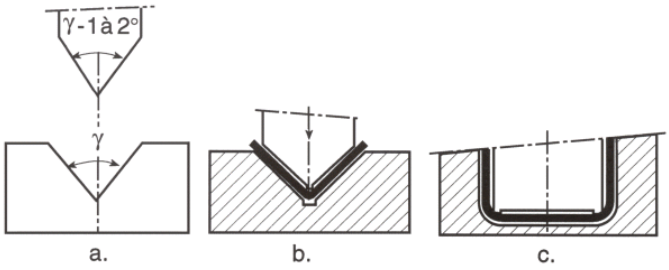
figuur 2.22 Matrijsbuigen



figuur 2.23 Situatie aan het einde van het matrijsbuigen

Wanneer het opgesloten materiaal verder wordt gedrukt, begint het zogenaamde pletten of kalibreren van het materiaal. Gewoonlijk wordt het kalibreren in de radius van het product uitgevoerd, met als doel door middel van drukspanningen de elastische vervorming en daarmede de terugvering, te elimineren ("dooddrukken" van het materiaal).

Voor het realiseren van de bewerking bestaan de volgende uitvoeringsvormen van het gereedschap:
a. De ingesloten hoek van de bovenstempel is een of twee graden kleiner dan de hoek van de ondermatrijs (zie figuur 2.24a);
b. De bovenstempel is van een facet voorzien, een verhoging van ongeveer 0,1 mm op het midden van de radius van de bovenstempel (zie figuur 2.24b);
c. Aan de bovenstempel zijn drukranden aangebracht (zie figuur 2.24c, wordt vooral toegepast in volggereedschappen).



figuur 2.24 Verschillende uitvoeringsvormen van het gereedschap

2.3.4.2 *Krachten*

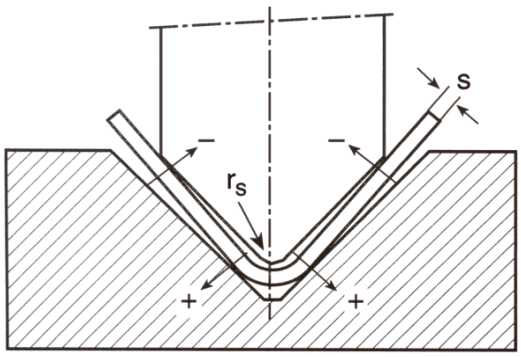
Omdat het matrijsbuigen wordt voorafgegaan door vrijbuigen of strijkbuigen, geldt voor dat deel van het proces de krachtberekening volgens de paragrafen 2.3.2.2 en 2.3.3.2. Wat nog ontbreekt is het eigenlijke kalibreren of pletten. De daarvoor benodigde kracht laat zich berekenen als:
te pletten oppervlak × de benodigde vlaktedruk.
De gevraagde kalibreerkracht bedraagt in de praktijk tenminste 3 tot 5 maal de maximale vrijbuigkracht.

Uit het oogpunt van gereedschapbeveiliging dient te worden nagegaan welke de toelaatbare drukspanning van het toe te passen gereedschapmateriaal is. De situatie wordt kritischer, naarmate de treksterkte van het te pletten productmateriaal hoger is.

2.3.4.3 *Terugvering*

In het algemeen wordt door het matrijsbuigen de terugvering verminderd, maar door onder andere materiaaldiktetoleranties en de daardoor verschillende verhouding r_s/s, is het eindresultaat niet steeds gelijk.
Wanneer de verhouding $r_s/s > 5$ is, is de beschrijving volgens § 2.2.5 van toepassing.
Wanneer de verhouding $r_s/s < 0{,}2$ à $0{,}3$ is, kan met betrekking tot de terugvering, de situatie ontstaan, zoals in fi-

guur 2.25 weergegeven.
De verhouding $r_s/s < 5$ en $> 0{,}2$ á 0,3 is een overgangsgebied tussen de eerste twee situaties.



figuur 2.25 Situatie bij het terugveren indien $r_s/s < 0{,}2$ à 0,3

Tijdens het buigen en kalibreren van de hoek treden twee soorten van terugvering op:
1. Positieve terugvering door het opveren van de hoek, aangegeven door "+".
2. Negatieve terugvering van de benen "–", veroorzaakt door de drukspanningen die bij het kalibreren aanwezig zijn.

Het verschil van deze tegengesteld gerichte terugveringen kan resulteren in een terugvering die positief, nul of negatief is. Invloedsfactoren zijn: een aantal materiaaleigenschappen, de relatieve stempelradius r_s/s, de beenlengte, de buighoek en de grootte van de ingebrachte drukspanningen. Het gevolg is evenwel dat de terugvering zich in dit geval niet laat berekenen door het niet voorspelbare karakter van de buiging.

2.3.4.4 *Geometrie*

Matrijsbuigen als laatste fase van het vrijbuigen is een symmetrisch proces. Als laatste fase van het strijkbuigen is het een asymmetrisch proces.

De uitslag van het product kan redelijk nauwkeurig worden berekend. Dit komt omdat de radius, vergeleken met vrijbuigen, beter voorspelbaar is.

De terugvering blijkt voor radii kleiner dan $5.s_o$ moeilijk te voorspellen. Verschillen in materiaaldikte leiden namelijk tot verschillen in pletdiepte, met het gevolg dat de terugvering niet constant is. Dit is zeker het geval, wanneer op mechanische persen wordt gekalibreerd. Bij het kalibreren op (krachtgebonden) hydraulische persen is dat in mindere mate het geval.

2.3.4.5 *Voor- en nadelen matrijsbuigen*

Voordelen:
- het proces laat snel werken toe;
- het buigverlies is voor gangbare productmaterialen redelijk bepaald;
- de uiteindelijke producthoek is goed reproduceerbaar.

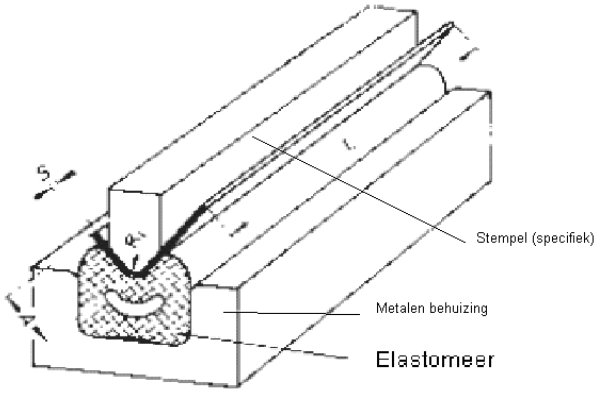
Nadelen:
- onder bepaalde omstandigheden, met name wanneer de verhouding $r_s/s < 5$ is, is de terugvering moeilijk te voorspellen;
- het proces is bij het kalibreren op mechanische persen erg gevoelig voor verschillen in materiaaldikte;
- vormafwijkingen na het pletten zijn moeilijk te corrigeren;
- voor het kalibreren is een zeer hoge kracht nodig;
- voor het matrijsbuigen zijn voor verschillende productgroepen productgebonden gereedschappen nodig.

Zie voor de volledigheid ook paragraaf 2.3.2.5 en 2.3.3.5

2.3.5 *Elastomeerbuigen*

2.3.5.1 *Procesbeschrijving*

Elastomeerbuigen wordt meestal toegepast op een kantpers, waarbij het elastomeer is ingebed in de ondermatrijs (zie figuur 2.26). Het proces lijkt zeer veel op het matrijsbuigen. Het verschil is dat gedurende de gehele buigcyclus het elastomeer tegen de plaat aandrukt en zodoende een betere stabiliteit bewerkstelligt.



figuur 2.26 Elastomeerbuigen

Evenals bij het matrijsbuigen wordt een plet- of kalibreereffect bereikt door de perskracht te verhogen. Hoe harder het elastomeer, hoe groter het effect.

2.3.5.2 *Krachten*

Het berekenen van de benodigde krachten komt overeen met de krachtberekening bij het matrijsbuigen. Omdat het elastomeer in het begin van het buigproces meteen al een tegenkracht veroorzaakt, is de weg waarover de (grotere) kracht plaatsvindt langer. Het proces vraagt dus meer arbeid van de pers.

2.3.5.3 *Terugvering*

In het algemeen geldt dat hoe harder het elastomeer is en hoe groter de kracht, hoe kleiner de terugvering is. De terugvering is niet of moeilijk berekenbaar en dient derhalve proefondervindelijk te worden bepaald.

2.3.5.4 *Geometrie*

Bij het elastomeerbuigen is het mogelijk om te buigen over een niet-rechte buiglijn. Hierdoor kunnen dus gebogen producten worden gemaakt.

2.3.5.5 *Voor- en nadelen elastomeerbuigen (vergeleken met matrijsbuigen)*

Voordelen:
- goedkoper specifiek gereedschap;
- kortere omsteltijd;
- asymmetrische producten zijn gemakkelijker maakbaar;
- geen beschadigingen aan de elastomeerkant van het plaatmateriaal.

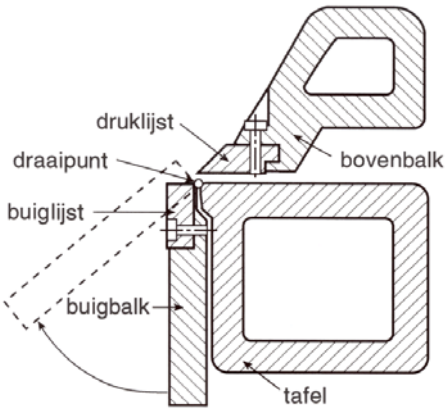
Nadelen:
- langere cyclustijd (vanwege relaxatie van het elastomeer);
- slijtage van het elastomeer;
- voorspelbaarheid (terugvering) is moeilijker;
- reproduceerbaarheid is minder goed;
- proces is moeilijk uitvoerbaar op een mechanische pers.

2.3.6 *Zwenkbuigen*

2.3.6.1 *Procesbeschrijving*

Zwenkbuigen wordt in het algemeen toegepast op de zetbank. Deze zwenkbuigmachines bestaan in meerdere uitvoeringen, van eenvoudig tot zeer geavanceerde NC ge-

stuurde machines. Bij het zwenkbuigen ligt de te bewerken plaat op de tafel, wordt geklemd door de druklijst en met relatief lage snelheid door de zwenkende buigbalk gebogen (zie ook figuur 2.27). Doordat de buigbalk zwenkt, staat de buigkracht gedurende het gehele proces loodrecht op het materiaaloppervlak. De druklijst bestaat gewoonlijk uit meerdere delen, zodat de totaal benodigde lengte kan worden afgestemd op de te buigen lengte. De druklijst is, indien nodig, voorzien van de radius of het profiel waarover wordt gebogen.

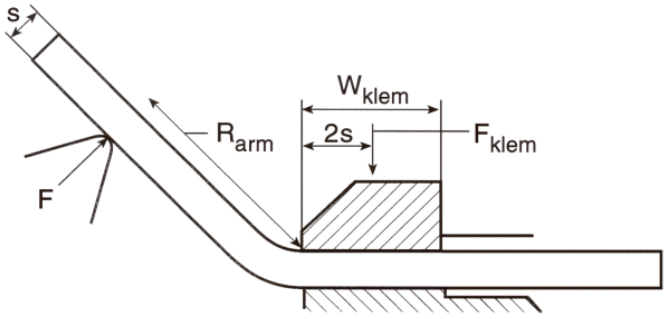


figuur 2.27 Zwenkbuigen

2.3.6.2 *Krachten*

Ook bij het zwenkbuigen geldt dat het maximale buigmoment M_p, moet worden geleverd door de kracht F, die werkt op R_{arm}, waarbij R_{arm} de afstand is van de inklemming tot het aangrijpingspunt van de kracht F (zie ook figuur 2.28).

Uit de inleiding, § 2.3.1, is bekend dat het maximaal buigend moment $M_p = c.R_m.B.s^2/4$.
Bij zwenkbuigen is de kracht op het aangrijpingspunt: $F = (c.R_m.B.s^2)/(4.R_{arm})$.



figuur 2.28 Krachten bij het zwenkbuigen

De klemkracht

Al eerder is vermeld dat de literatuur aangeeft dat klemmen over een afstand (W_{klem}) van drie tot vijfmaal de materiaaldikte het meest effectief is.

Voor het berekenen van de grootte van de klemkracht wordt uitgegaan van $W_{klem} = 4s$ en de arm waarover de klemkracht werkt is 2s.

Dan wordt $F_{klem} = (c.R_m.B.s^2/4)/2s = (c.R_m.B.s)/8$.

Deze klemkracht geldt als W_{klem} drie tot vijfmaal de materiaaldikte is.

Een veilige klemkrachtberekening is uit praktische ervaringen: $F_{klem} = 0,2 \times R_m \times s_o \times B$.

Aandachtspunten:
- de inklemming van de plaat moet stijf zijn;
- bij te lage klemkracht kan het product verschuiven;
- bij te hoge klemkracht kan het product beschadigen.

2.3.6.3 *Terugvering*

Bij het zwenkbuigen kunnen variaties in de grootte van de terugvering worden gecorrigeerd door de, goed instelbare, buighoek te wijzigen.

2.3.6.4 *Geometrie*

Bij het zwenkbuigen is het materiaal eenzijdig ingeklemd, terwijl het andere been wordt gebogen. Er is dan ook, evenals bij het strijkbuigen, sprake van een asymmetrisch proces. De kromming van het buigproduct verloopt van maximaal bij de inklemming tot nul bij het contact met de buiglijst. Door het inklemmen wordt de maatvastheid van de producten verbeterd.

Het proces is gevoelig voor verschillen in de materiaaleigenschappen (gevolgen voor de terugvering).

2.3.6.5 *Voor- en nadelen zwenkbuigen*

Voordelen:
- een groot voordeel is dat de plaat op de tafel kan blijven liggen, terwijl een been ervan wordt omgezet. Dit komt de maatnauwkeurigheid ten goede. De terugvering kan nogal variëren, maar kan alleen door verder of minder ver te buigen, worden gecorrigeerd. Het proces leent zich uitstekend voor het verwerken van grote, zware, moeilijk te hanteren producten;
- het productmateriaal wordt, doordat het enerzijds wordt geklemd en anderzijds bij het buigen door de scharnierende buigbalk wordt gesteund, niet of nauwelijks beschadigd (geen strijksporen);
- de buighoek is goed in te stellen en te corrigeren;
- het zwenkbuigen is een relatief nauwkeurig proces;
- het zwenkbuigen op zwenkbuigautomaten is sneller dan op kantpersen.

Nadelen:
- zwenkbuigen is een relatief langzaam proces;
- corrigeren van de terugvering is alleen mogelijk door de buighoek te wijzigen, mogelijkheden als nadrukken zijn niet aanwezig.

Hoofdstuk 3
Praktische toepassingen

Bij het ontwikkelen en realiseren van een nieuw product worden meerdere fasen onderscheiden, zoals:
- het opstellen van een voorlopige productspecificatie, het maken van een productontwerp, het aanmaken en testen van prototypes en de proeffabricage;
- het voorbereiden van het definitieve productieproces, inclusief het (laten) aanmaken van de productiemiddelen;
- het perfectioneren en aanlopen van het productieproces;
- het produceren van het product. In deze fase worden de productiemiddelen onderhouden en gerepareerd.

De maakbaarheid van een product is een uiterst belangrijke factor en wordt in hoge mate in het ontwikkelstadium van het product bepaald. Om tot een beheerst en reproduceerbaar productieproces te komen is het noodzakelijk dat gedurende het gehele traject afstemming plaatsvindt tussen de afdelingen Ontwikkeling, Werkvoorbereiding en Fabricage.

Op het moment dat de voorbereiding van het definitieve productieproces start, zijn de volgende documenten aanwezig:
- de producttekening;
- de productspecificatie;
- de materiaalspecificatie;
- een eisenblad en een opgave van de kwaliteitsaspecten.

Tijdens het traject van productontwerp tot realisatie van een in productie te nemen product, komen de volgende punten aan de orde:
- de buigradius;
- de uitslag van het product;
- de buigkracht;
- de terugvering en de buighoekcompensatie;
- de toleranties;
- de walsrichting van het materiaal;
- gatvervorming tengevolge van het buigen.

In dit hoofdstuk worden allereerst de bovengenoemde punten besproken, vervolgens komen de onderwerpen proceskeuze en buigvolgorde aan de orde.

3.1 *Berekeningen en tabellen*

3.1.1 *De buigradius*

In deze publicatie wordt steeds gesproken over de inwendige radius.
De grootte van de buigradius is afhankelijk van de materiaaleigenschappen (n-waarde), de materiaaldikte, de walsrichting, de grootte van de buighoek, de grootte van de stempelradius en van het proces.

Vooraf een korte toelichting op de begrippen minimaal toelaatbare buigradius en de natuurlijke buigradius.

De minimaal toelaatbare buigradius is de radius waarover nog net, zonder problemen, kan worden gebogen. Deze minimaal toelaatbare buigradius is gelijk aan de helft van de in de normbladen opgegeven doorndiameter: $r_i = \frac{1}{2}D$ (zie de tabellen S.1 t/m S.18 in het supplement materialen).

De toe te passen buigradius moet groter of gelijk zijn aan de minimaal toelaatbare buigradius.

De natuurlijke buigradius bij vrijbuigen ontstaat als de buiging zich, door middel van de machine-instelling (indringdiepte), vrij kan vormen. Ook bij zwenkbuigen is sprake van buigen volgens de natuurlijke radius, als de radius aan de druklijst kleiner is dan de natuurlijke radius van het productmateriaal.
In bijzondere gevallen kan bij strijkbuigen eveneens volgens de natuurlijke radius worden gebogen, wanneer de buigspleet groot is. Het kenmerk in alle situaties is dat het productmateriaal niet wordt gedwongen de radius of de vorm van het gereedschap aan te nemen.

Uit onderzoek [lit. 1] blijkt dat, op basis van theoretische inzichten voor plaatmateriaal met een dikte van 0,6 tot 3 mm, de volgende formule vaak een redelijke benadering voor de natuurlijke radius geeft, die bij het vrijbuigen wordt verkregen:

$$r_i = C.(0,1 + 0,5n).V.a/90$$

In de formule is:
- a = de openings- of producthoek;
- n = de verstevigingsexponent of n-waarde (productmateriaal);
- V = de grootte van de V-opening;
- r_i = de inwendige productradius.

In de praktijk wordt, voor het bepalen van de grootte van de natuurlijke productradius bij het vrijbuigen, dikwijls uitgegaan van eenvoudige tabellen met richtwaarden. Deze tabellen zullen vaak afhankelijk zijn van de te gebruiken machines en gereedschappen en worden daarom vaak specifiek voor een bedrijf opgesteld.

Een voorbeeld is tabel 3.1, waarbij als uitgangspunten gelden:
- alle genoemde waarden zijn richtwaarden;
- de grootte van de V-opening is 8 tot 12 maal de materiaaldikte;
- de stempelradius is kleiner dan de inwendige productradius;
- de inloopradius van de matrijs is circa 10% van de grootte van de V-opening.

Nogmaals wordt benadrukt dat bovenstaande berekeningen leiden tot richtwaarden. De uitkomsten van de beide berekeningen voor een bepaalde situatie, kunnen dan ook verschillen.

tabel 3.1 Natuurlijke inwendige productradii

materiaal	**openingshoek of producthoek** [°]	**inwendige productradius** [mm]
staal	135 90 45	0,33 V 0,17 V 0,12 V
aluminium	135 90 45	0,20 V 0,10 V 0,07 V
austenitisch RVS	135 90 45	0,37 V 0,20 V 0,17 V
koper	135 90 45	0,25 V 0,14 V 0,08 V
messing	135 90 45	0,25 V 0,17 V 0,11 V

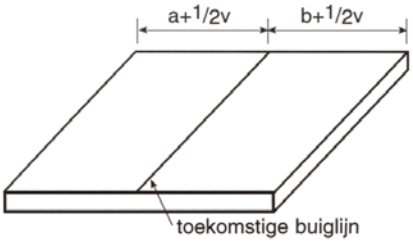
3.1.2 *De uitslag van het product*

Voordat een product wordt gebogen, moeten de afmetingen van de vlakke plaat en de ligging van de buiglijnen worden bepaald, op een zodanige wijze dat bij het buigen de bedoelde productmaten worden gerealiseerd. Deze berekening noemt men het bepalen van de uitslag.

De volgende factoren zijn van invloed:
a. **De geometrie**
   De som van de uitwendig gemeten lengten van de twee productbenen in gebogen toestand is niet gelijk aan de som van die lengten in vlakke toestand. Het verschil wordt "buigverlies" genoemd.
b. **Verschuiven van de neutrale lijn**
   De lijn die voor en na het buigen dezelfde lengte heeft wordt hier de neutrale lijn genoemd. Bij $r_i/s < 5$ verschuift de neutrale lijn, tijdens het buigen, iets naar de binnenzijde van de buiging (zie ook § 2.2.2 t/m 2.2.4).
c. **De procesinvloed**
   Vrijbuigen is een symmetrisch proces. Daardoor wordt het buigverlies (v) gelijk over de beide productbenen verdeeld. Strijkbuigen en zwenkbuigen zijn a-symmetrische processen, waarbij het buigverlies niet in gelijke

mate over de beide benen wordt verdeeld. Deze effecten zijn van belang voor de ligging van de buiglijn.

Toelichting:
Wanneer er sprake is van een gebogen product met benen a en b en een buigverlies v, zijn de uitslagmaten bij vrijbuigen zoals weergegeven in figuur 3.1.



figuur 3.1 De uitslagmaten bij het vrijbuigen

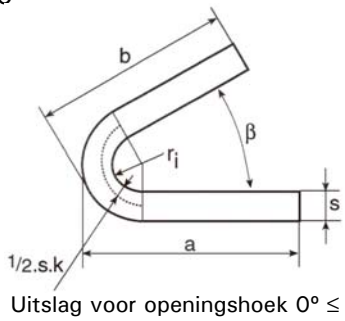
In deze publicatie worden twee methoden van uitslagberekening besproken, zoals die worden toegepast bij een tweetal, bij de publicatie betrokken, bedrijven.

3.1.2.1 *Uitslagberekening methode 1*

Deze uitslagberekening is gebaseerd op DIN 6935 (DIN 6935 geldt alleen voor staal). De lengte van de uitslag $= a + b + v$, waarbij de grootte van v afhankelijk is van de grootte van de openings- of producthoek, de buigradius en de materiaaldikte.

Bij een openingshoek $0° \le \beta \le 90°$ geldt (zie ook figuur 3.2):

$$v = \pi \frac{180 - \beta}{180}\left(r_i + \tfrac{1}{2}s \cdot k\right) - 2\left(r_i + s\right) \qquad (1)$$



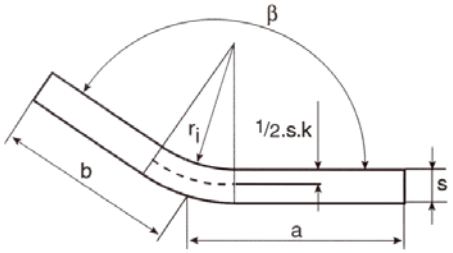
figuur 3.2 Uitslag voor openingshoek $0° \le \beta \le 90°$

Voor een openingshoek $90° < \beta \le 165°$ geldt (zie ook figuur 3.3):

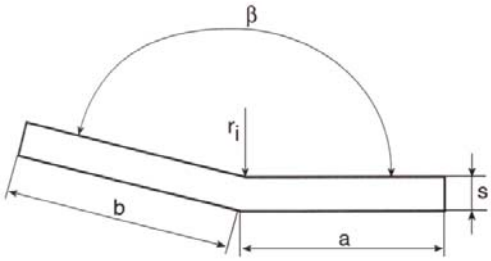
$$v = \pi \frac{180 - \beta}{180}\left(r_i + \tfrac{1}{2}s \cdot k\right) - 2\left(r_i + s\right).\tan\frac{180 - \beta}{2} \qquad (2)$$

Voor een openingshoek $165° < \beta \le 180°$ geldt (zie ook figuur 3.4):

$$v = 0 \qquad (3)$$



figuur 3.3 Uitslag voor openingshoek $90° < \beta \le 165°$



figuur 3.4 Uitslag voor openingshoek $165° < \beta \le 180°$

De berekeningen gelden voor de materialen zoals weergegeven in tabel 3.2. In tabel 3.3 worden voor de in tabel 3.2 aangegeven materiaalsoorten de correctiefactoren gegeven.

De factor k kan ook worden afgelezen in de grafiek van figuur 3.5.

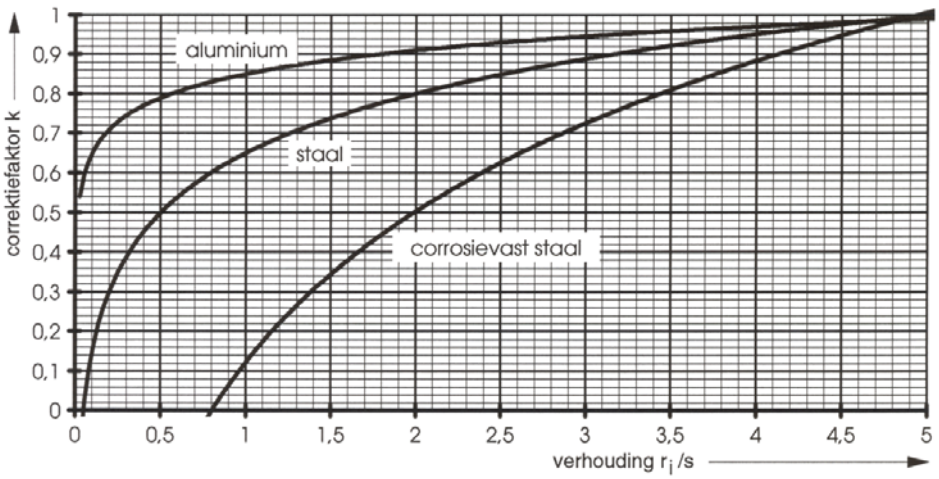
tabel 3.2 Materiaalkeuze

materiaal	materiaalsoorten
Staal, voor algemeen gebruik volgens EN 10025 en EN 10130	DC01, S235JR
Corrosievast staal, volgens EN 88-86	X 5 CrNi 18 10
Aluminium, zetkwaliteit volgens DIN 1745	Al99.5 W7, AlMg3 F21

tabel 3.3 Correctiefactoren k

materiaalsoort volgens tabel 3.2	correctiefactor k [1)]
staal	$k = 0{,}65 + 0{,}5 \log r_i/s$
corrosievast staal	$k = 0{,}122 + 1{,}265 \log r_i/s$
aluminium	$k = 0{,}85 + 0{,}2 \log r_i/s$
1) Voor $r_i/s > 5$ is de berekening niet meer geldig en moet $k = 1$ worden ingevuld.	

Opmerking: De waarden voor staal in tabel 3.3 en in de grafiek van figuur 3.5 zijn volgens DIN 6935; die voor aluminium en corrosievast staal zijn toegevoegd.

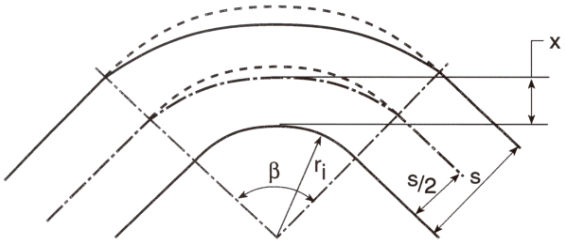


figuur 3.5 De correctiefactor in relatie met de verhouding r_i/s voor de in tabel 3.2 genoemde materialen

3.1.2.2 *Uitslagberekening methode 2*

Wanneer $r_i/s > 5$ wordt aangenomen dat de neutrale lijn niet verschuift.

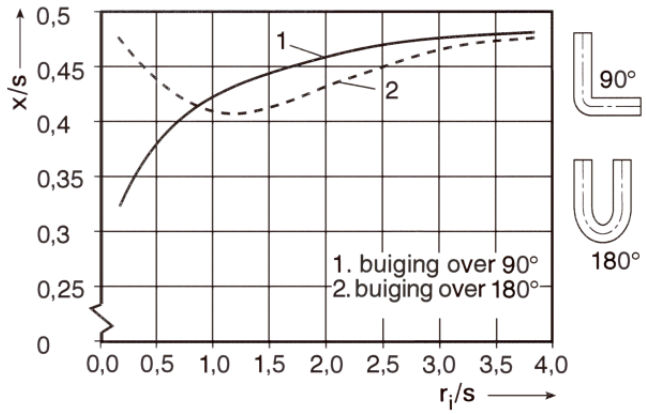
Voor de berekening van de uitslaglengte bij $r_i/s < 5$ is de verschuiving van de neutrale lijn van belang. In het centrum van de buiging (zie figuur 3.6), verschuift de neutrale lijn over een afstand van ½s–x in de richting van de binnenzijde van de buiging. De buigradius van de neutrale lijn krijgt dan een verlopende vorm, van $r_i + x$ in het midden naar $r_i = ½s$ aan de uiteinden van de boog (figuur 3.6).



figuur 3.6 Ligging van de neutrale lijn bij $r_i/s < 5$

Het verband tussen buigradius/materiaaldikte en afstand x/materiaaldikte is weergegeven in de grafiek van figuur 3.7.

Om de lengte van de boog te bepalen is het redelijk om de gemiddelde radius van de neutrale lijn voor de hele boog te nemen, in plaats van alleen de kleinste waarde.



figuur 3.7 Het verband tussen buigradius/materiaaldikte (r_i/s) en afstand x/materiaaldikte (x/s)

$$r_{n\,gem.} = \frac{(r_i + s/2) + (r_i + s \cdot x/s)}{2}$$

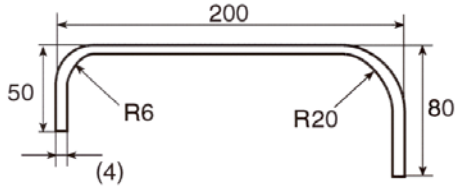
$$= r_i + 0{,}25.s.(1 + 2x/s)$$

De lengte van de boog is: $\beta/180°.\pi.r_{n\,gem.}$.

De totale uitslaglengte van het product wordt dan:
de lengte van de rechte delen plus de lengte van de bogen.

3.1.2.3 *Voorbeeld van uitslagberekeningen*

In deze paragraaf wordt volgens beide besproken methoden voor het productmateriaal S235JR de uitslag berekend (zie figuur 3.8).



figuur 3.8 Uitwendige maten van het voorbeeld

Berekenen van de uitslag, methode 1

- de som van de uitwendige maten 50 + 200 + 80 = 330 mm
- buiging $r_i = 6$ mm; $r_i/s = 1{,}5$
- aflezen in de grafiek van figuur 3.5: ➞ k = 0,74
- formule (1) voor openingshoek ≤ 90° toepassen (zie § 3.1.2.1).

$$v = \pi \frac{180 - \beta}{180}(r_i + ½s \cdot k) - 2(r_i + s)$$

$v = \pi.0{,}5.(6 + 4/2.0{,}74) - 2(6 + 4)$
$= \pi.0{,}5.7{,}48 - 20 = -8{,}26$ mm

- Idem voor $r_i = 20$ mm; $r_i/s = 5$: ➞ k = 1

$v = \pi.0{,}5(20 + 4/2.1) - 2(20 + 4)$
$= \pi.0{,}5.22 - 48 = -13{,}46$ mm

- De totale uitslaglengte is dus:
  330 – 8,26 – 13,46 = 308,28 mm

Berekenen van de uitslag, methode 2

- de som van de rechte delen van het product is:
  50 – 6 – 4 + 200 – 6 – 4 – 20 – 4 + 80 – 20 – 4 = 262 mm
- $r_i = 6$ mm; s = 4 mm; $r_i/s = 1{,}5$
- aflezen in grafiek van figuur 3.7: ➞ x/s = 0,44
- $r_i = 6$ mm;
  $r_{n\,gem.} = 6 + 0{,}25.4.(1 + 2.0{,}44) = 7{,}88$ mm
- lengte van de boog = $90°/180°.\pi.r_{n\,gem.}$
  $= 0{,}5.\pi.7{,}88 = 12{,}37$ mm
- evenzo voor $r_i = 20$ mm; $r_i/s = 5$; x/s = 0,5
- $r_i = 20$ mm;
  $r_{n\,gem.} = 20 + 0{,}25.4.(1 + 2.0{,}5) = 22$ mm
- lengte van de boog = $0{,}5.\pi.22 = 34{,}54$ mm
- de uitslaglengte is 262 + 12,37 + 34,54 = 308,91 mm

Opmerking: *Beide uitkomsten hebben een schijnnauwkeurigheid. Gewoonlijk wordt afgerond op een tiende mm.*

3.1.3 *De buigkracht*

In hoofdstuk 2.3 "Totale procesbeschrijving" is het berekenen van de buigkracht besproken. Voor de verschillende buigprocessen is de grootte:

Vrijbuigen: $F_b = \frac{c \cdot R_m \cdot B \cdot s^2}{V}$

Strijkbuigen: $F_b = \frac{c \cdot R_m \cdot B \cdot s^2}{4(r_m + u + r_s)}$

Matrijsbuigen: Als vrij- of strijkbuigen, afhankelijk van het proces, plus de kracht voor het kalibreren of pletten.

Zwenkbuigen: $F_b = \frac{c \cdot R_m \cdot B \cdot s^2}{4 \cdot R_{arm}}$

(Zie de paragrafen 2.3.2.2, 2.3.3.2, 2.3.4.2, 2.3.5.2)

In alle gevallen wordt een correctiefactor toegepast als compensatie voor:
a. De afwijkende spanningstoestand van een buiging ten opzichte van de trekproef (bij het buigen kan het materiaal in de breedte niet rekken).
b. Veranderende lengte van de arm waarover de kracht wordt uitgeoefend.

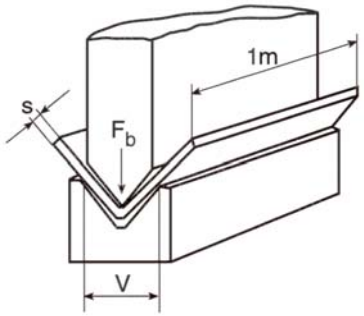
De literatuur geeft verschillende richtwaarden voor de factor c. De waarden ervan variëren van minimaal 1,15 tot maximaal 1,53, waarbij de factor 1,42 de meest toegepaste is. Zie eerder genoemde correctiefactor voor vrijbuigen.

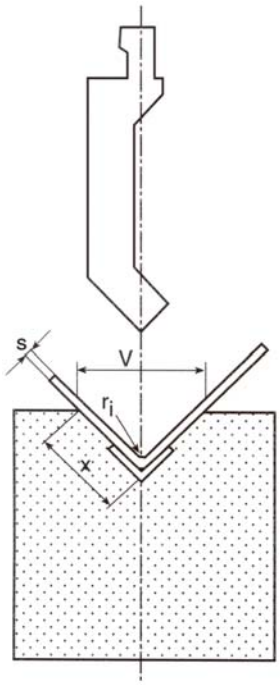
In de praktijk wordt dikwijls gebruik gemaakt van zelf opgestelde, of door de leverancier van de machine bijgeleverde, tabellen of diagrammen, voor het kunnen bepalen van de technische data.

Als voorbeeld is tabel 3.4 opgenomen, bestemd voor het vrijbuigen, waarin is weergegeven: de buigkracht F, nodig voor het buigen van staalplaat over een lengte van 1 m en een treksterkte van 450 N/mm².

tabel 3.4 Buigkracht per meter buiglengte, voor staal met een treksterkte van 450 N/mm²

			plaatdikte s [mm]																				
			0,5	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,2**	**1,5**	**2**	**2,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**	**12**	**15**	**20**	**25**	**30**	**40**	**50**
r_i [mm]	x [mm]	V [mm]	buigkracht × 10 kN/m (≈ ton/m)																				
1	4	6		4	7	11	16																
1,3	5,6	8		3	5,5	8	12																
1,5	6,7	9,5			4,5	7	10	15,5															
1,6	7	10				6,5	9	14,5															
1,9	8,5	12					8	12															
2	9,2	13						11	20														
2,4	10,5	15						10	17														
2,6	11	16							16	25													
3	13,4	19							14	21	31												
3,2	14	20							13	20	29												
3,8	17	24								17	24												
4	18	25								16	23	41											
4,8	21	30								14	20	34	54										
5	23	32									18	32	50										
5,6	25	35									17	30	47										
6	27	38										27	42	61									
7	29	40										26	40	58									
8	36	50										21	32	46	82								
8,5	37	52											31	44	79								
9	39	55											29	42	75	116							
10	43	60												39	69	106							
10	45	63												37	65	101							
11	50	70													59	92	131						
12	55	76													54	85	121	189					
13	60	80													50	80	115	179					
16	75	100														64	85	144	255				
20	90	125														52	74	115	204	319			
26	115	160															58	90	160	249	359		
32	141	200																72	127	200	287	511	
40	180	250																	102	159	230	408	639
52	230	360																		125	179	321	499
			plaatdikte s [mm]																				
			0,5	**0,6**	**0,8**	**1**	**1,2**	**1,5**	**2**	**2,5**	**3**	**4**	**5**	**6**	**8**	**10**	**12**	**15**	**20**	**25**	**30**	**40**	**50**





In tabel 3.4 is af te lezen:
- ► de materiaaldikte s in mm;
- ► de inwendige productradius r_i ($r_i = 0{,}16V$);
- ► de minimale beenlengte x ($x \approx 0{,}7$ V);
- ► de grootte van de V-opening in mm.

In deze tabel wordt de buigkracht afgelezen nodig voor het buigen van 1 meter staalplaat (de grijze vakjes gelden voor de voorkeursituatie).

Voorbeeld: Vrijbuigen van een stalen plaat (Fe 450); s = 6 mm; buiglengte 1800 mm.

Tabel 3.4 kan op meerdere manieren worden gebruikt:

1. ► kies de materiaaldikte van 6 mm;
   - ► omhoog of omlaag naar het grijze vakje: 460 kN;
   - ► naar links: V-opening 50 mm;
     minimale beenlengte 36 mm;
     r_i = 8 mm;
   - ► buigkracht voor een lengte van 1800 mm is $1{,}8 \times 460 = 828$ kN.

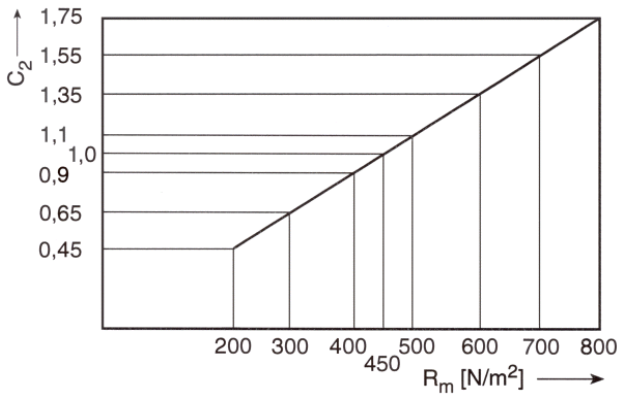
Opmerking: *Wordt bijvoorbeeld een V-opening van 40 mm gekozen, dan is de benodigde buigkracht $1{,}8 \times 580 = 1044$ kN.* De minimale beenlengte is dan 29 mm en ri = 7 mm.

2. ► bereken V: (= 8s = 8.6 = 48 mm);
   - ► kies de V-opening;
   - ► lees links de waarden van de minimale beenlengte en r_i af;
   - ► lees rechts de buigkracht per meter af.

Wanneer materiaal met een andere treksterkte moet worden gebogen, wordt een correctiefactor c_2 in rekening gebracht, volgens de grafiek in figuur 3.9, op de waarde uit tabel 3.4.

Voorbeeld:

Wanneer het voorgaande product wordt gemaakt uit staal met een treksterkte van 600 N/mm², is de benodigde buigkracht $1{,}35 \times 828 = 1118$ kN.



figuur 3.9 Afhankelijkheid van de correctiefactor c_2 met de treksterkte R_m

3.1.4 *De terugvering en de buighoekcompensatie*

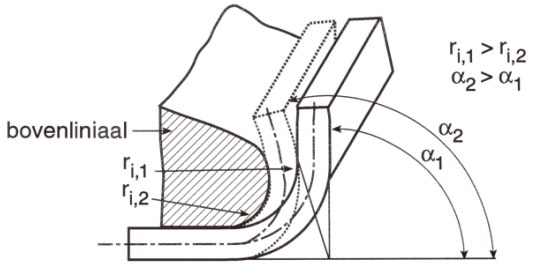
Na het wegnemen van de buigkracht zal het gebogen product terugveren. Reeds bij het aanmaken van het gereedschap en/of bij het instellen van de pers, moet men rekening houden met de terugvering. Deze wordt bepaald door:
- de materiaalsoort en -eigenschappen;
- de materiaaldikte;
- de grootte van de buighoek;
- de grootte van de inwendige productradius;
- de grootte van de V-opening bij vrijbuigen, de grootte van de buigspleet bij U-buigen en strijkbuigen.

Terugvering kan onder andere worden beperkt door:
- het toepassen van een kleine buigradius;
- het aanbrengen van drukspanningen in de productradius (matrijsbuigen);
- het aanbrengen van drukspanningen middels een hiel in het bovenstempel (strijkbuigen).

Bij buigen gevolgd door kalibreren is de terugvering minder groot dan wanneer niet wordt gekalibreerd. Deze terugvering is, afhankelijk van de situatie, niet of nauwelijks te berekenen, zie ook § 2.2.5. In deze situatie wordt gewoonlijk gebruik gemaakt van praktijkgegevens die zo nodig via proefbuigingen worden gecorrigeerd.

Wanneer niet wordt gekalibreerd is het berekenen van de terugvering mogelijk, hoewel ook deze berekeningen deels zijn gebaseerd op praktijkgegevens.

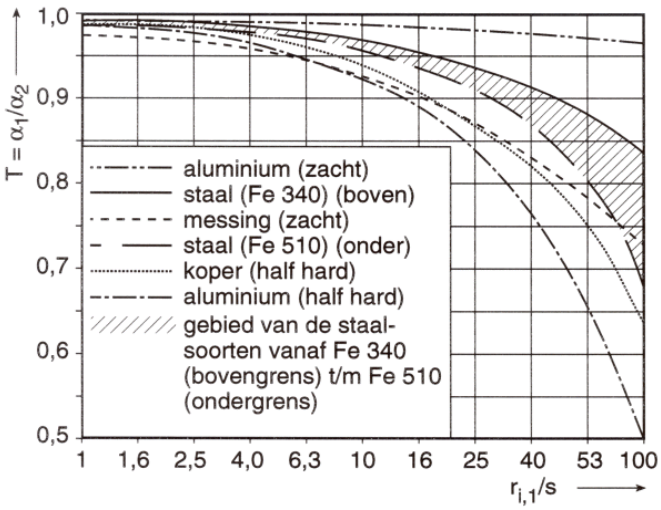
Het merendeel van de berekeningen gaat uit van de ligging van de neutrale lijn. Bij $r_i/s < 5$ verschuift de neutrale lijn en dit effect wordt in de berekening meegenomen. Wanneer een product wordt gebogen, bijvoorbeeld door vrijbuigen (zie figuur 3.10) met productradius $r_{i,2}$ en buighoek α_2, ontstaat na het wegnemen van de buigkracht een product met productradius $r_{i,1}$ en buighoek α_1, in andere woorden:
$r_{i,1}$ = de gewenste productradius;
$r_{i,2}$ = de werkelijk gebogen inwendige productradius;
α_1 = de gewenste buighoek;
α_2 = de gecompenseerde buighoek.



figuur 3.10 Schematische voorstelling van terugvering bij zwenkbuigen

Met behulp van de terugveringsfactor T, waarbij $T = \alpha_1/\alpha_2$ en dus $\alpha_2 = \alpha_1/T$, wordt de buighoekcompensatie berekend.

De waarde van T is door middel van proeven bepaald en in een grafiek (zie figuur 3.11) vastgelegd, waarbij de materiaalsoort en de verhouding $r_{i,1}/s$ bekend zijn.



figuur 3.11 De terugveringsfactor T als functie van de verhouding $r_{i,1}/s$

3.1.5 *De toleranties*

Bij het opstellen van een productspecificatie komt ondermeer de maatvoering van het product, met vermelding van de toleranties, aan de orde. Daarbij is van belang:
- welke zijn de producteisen;
- welke toleranties kunnen in het productieproces, onder normale omstandigheden, worden gerealiseerd.

Bij elk productieproces is sprake van een tolerantieveld, waarbinnen moet en kan worden geproduceerd.

Bij het buigen is, naast de algemene maatgeving, de ligging van de buiglijn en de grootte van de buighoek, met de bijbehorende toleranties, aan de orde. De te bereiken nauwkeurigheid wordt vooral bepaald door het productieproces.

Een tweetal kanttekeningen bij het buigen op kantpersen:
1. Nauwkeurige maten bij het buigen kunnen worden gerealiseerd door gebruik te maken van aanslagen. Dit betekent ook dat maatafwijkingen zullen optreden in het productgedeelte dat niet tussen de aanslagen en het buiggereedschap is geweest. In dat laatste geval is er sprake van een sluit- of restmaat, waarin onnauwkeurigheden kunnen worden weggewerkt.
2. Wanneer aanslagen worden gebruikt moet het product bij voorkeur worden aangelegd op een knip- of snijrand of op een scherp (< 90°) gebogen hoek.

Wanneer geen speciale voorzieningen aan de machine zijn getroffen, geldt in het algemeen dat de ligging van de buiglijn bij klemmen nauwkeuriger is bepaald dan bij niet klemmen.

DIN 7168 geeft waarden voor de tolerantie op de buighoeken. Daarbij worden drie niveaus onderscheiden, te weten:
- fijn/midden, met tolerantie ±1°;
- groot, met tolerantie ±1°30';
- zeer groot, met tolerantie ±3°;

In de praktijk is aangetoond dat bovenstaande toleranties algemeen toepasbaar zijn voor het buigen en onafhankelijk zijn van de beenlengte van het product.

Eveneens is aangetoond dat, onder de optimale machine-, gereedschap- en procescondities, de volgende hoektoleranties kunnen worden gerealiseerd:
- vrijbuigen: ±30';
- strijkbuigen, ±30';
- matrijsbuigen, ±10';
- zwenkbuigen, ±30'.

Het spreekt voor zich dat het product wel gemeten moet kunnen worden, bijvoorbeeld: om een hoek te kunnen me-

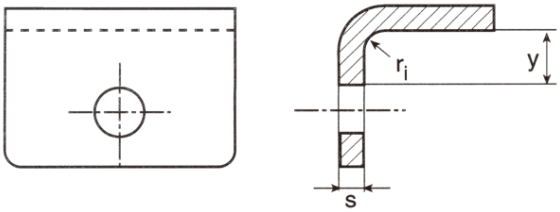
ten moeten de productbenen een voldoende recht gedeelte hebben.

3.1.6 *De walsrichting van het materiaal*

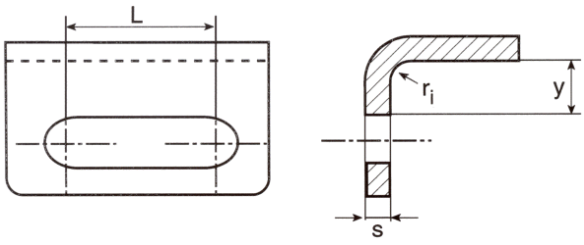
In de praktijk hebben we gewoonlijk te maken met anisotroop materiaal. De mechanische eigenschappen van het materiaal zijn dan niet in alle richtingen gelijk (zie de publicatie VM 111, Materialen, hoofdstuk 3) Het gevolg voor de bewerking buigen is, dat met name de grootte van de terugvering afhankelijk is van de ligging van de buiglijn ten opzichte van de walsrichting. De buiglijn evenwijdig aan de walsrichting geeft een grotere terugvering dan wanneer de buiglijn loodrecht op de walsrichting staat. Wanneer een product buigingen bevat die loodrecht op elkaar staan, dan verdient het aanbeveling, wanneer dat wat betreft materiaalrendement verantwoord is, de buiglijn onder 45° ten opzichte van de walsrichting te laten lopen.

3.1.7 *Gatvervorming tengevolge van het buigen*

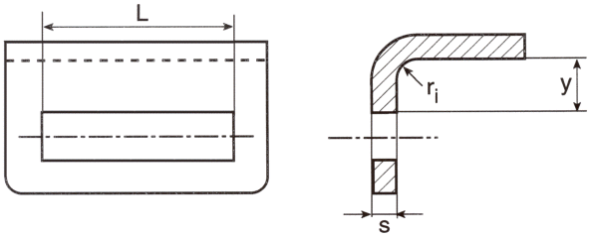
Indien in een vlakke uitslag gaten worden aangebracht, kunnen deze, wanneer de gaten te dicht bij de buiglijn liggen, tengevolge van het buigen worden vervormd. Soms kan die vervorming worden voorkomen door, op een lijn met het aanwezige gat, onderbrekingen in de buiging aan te brengen. In de meeste gevallen moet echter een minimum afstand van het gat tot de buiging worden aangehouden. In de figuren 3.12 t/m 3.14 (waarbij alle maten in millimeters zijn aangegeven) is de minimum afstand Y aangegeven voor de volgende situaties:
- aanwezigheid van ronde gaten (zie figuur 3.12);
- aanwezigheid van slobgaten (zie figuur 3.13);
- aanwezigheid van rechthoekige gaten (zie figuur 3.14).



figuur 3.12 Minimale afstand bij ronde gaten: $y_{min.} = r_i + 2s$



figuur 3.13 Minimale afstand bij slobgaten
$L \leq 25$: $y_{min.} = r_i + 3s$
$L > 25$ en ≤ 50: $y_{min.} = r_i + 4s$
$L > 50$: $y_{min.} = r_i + 5s$



figuur 3.14 Minimale afstand bij rechthoekige gaten
$L \leq 25$: $y_{min.} = r_i + 3s$
$L > 25$ en ≤ 50: $y_{min.} = r_i + 3{,}5s$
$L > 50$: $y_{min.} = r_i + 4s$

3.2 *De werkvoorbereiding of het methodeplan*

3.2.1 *Inleiding*

Voorafgaand aan de fabricage van een product wordt de werkvoorbereiding opgesteld, bestaande uit onder andere het bepalen van de noodzakelijke bewerkingen en de volgorde ervan, het berekenen van de materiaalafmetingen en -hoeveelheden, het bepalen van de te gebruiken gereedschappen en eventueel het berekenen van de kostprijs van het product. Afhankelijk van de organisatie van het bedrijf geeft de werkvoorbereider opdracht tot bestelling van het materiaal en van de benodigde gereedschappen.

Van belang voor het kiezen van de fabricagemethode is:
- soort en moeilijkheidsgraad van het product;
- seriegrootte van de te leveren producten;
- aanwezigheid en bezettingsgraad van het noodzakelijke machinepark;
- investeringsmogelijkheden (machines en gereedschappen).

Dikwijls zal een product op meerdere manieren kunnen worden vervaardigd. Bovendien overlappen de toepassingen van de verschillende buigprocessen en machines elkaar. Het is zaak tot een beheerst en reproduceerbaar productieproces te komen, dat voldoet aan de algemene eisen ten aanzien van kwaliteit, flexibiliteit en productiviteit.

In deze publicatie wordt getracht een richting aan te geven om tot de meest wenselijke fabricagemethode te komen, door de kenmerken van de verschillende processen aan te geven en vervolgens die van de producten. De combinatie ervan moet leiden tot een logische keuze van de productiemethode. De aandacht wordt daarbij vooral gericht op het buigen, hoewel ook de noodzakelijke voor- en nabewerkingen van het product van wezenlijk belang zijn.

3.2.2 *Proceskeuze*

3.2.2.1 *Kenmerken van de buigprocessen*

Vrijbuigen:
- het productmateriaal wordt tijdens het buigen niet geklemd, zodat kleine verschuivingen mogelijk zijn;
- de pers en het gereedschap worden bij het vrijbuigen veel minder belast dan bijvoorbeeld bij matrijsbuigen;
- de tolerantie op de materiaaldikte veroorzaakt relatief grote buighoekvariaties (met hoekmetingen met CNC terugkoppeling wordt dit probleem voorkomen);
- voor een goed buigresultaat moeten onder- en bovengereedschap tijdens het buigen evenwijdig blijven. De kans op doorbuigen is evenwel aanwezig;
- het productmateriaal glijdt over een relatief grote afstand over de inloopradius van de matrijs, waardoor beschadigingen kunnen ontstaan (verder treden bij kleine V-openingen grote vlaktedrukken en dus afdrukranden op);
- de minimale beenlengte van het te buigen product moet, om het been lang genoeg op de inloopradius te houden, minimaal 0,7 maal de V-opening zijn. Met z.g. WingBend gereedschappen (Trumpf) kunnen kleinere beenlengten worden gebogen;
- bij het buigen komen de beide productbenen omhoog, waardoor naast een verhoging van de kans op extra vervormingen een sterke vermindering van de hanteerbaarheid optreedt;
- om tegengesteld gerichte buigingen te realiseren moet het product worden omgekeerd;
- met één stempel/matrijscombinatie kunnen, door de indringdiepte van de bovenstempel in te stellen, verschillende hoeken worden gebogen.

Strijkbuigen:
- het productmateriaal wordt geklemd, hetgeen de maatnauwkeurigheid ten goede komt;
- de tolerantie op de materiaaldikte, in combinatie met de grootte van de buigspleet, bepaalt in grote mate de hoeknauwkeurigheid van de buiging. Verder is er altijd sprake van een verschuiving van het productmateriaal van ten minste 0,05 mm;
- de bovenstempel kan, door de neer- en opgaande slag, het product beschadigen;

- de 'handling' van het product is, doordat het product ook tijdens het buigen vlak op tafel ligt, minder gecompliceerd dan bij vrijbuigen;
- de kans op gereedschapbeschadiging is groot, wanneer er sprake is van aanladen;
- de bewerking wordt vooral toegepast in productgebonden volggereedschappen, in speciale CNC buigmachines en, met behulp van specifieke gereedschappen, op een kantpers.

Zwenkbuigen:
- het productmateriaal wordt geklemd, hetgeen de maatnauwkeurigheid ten goede komt;
- het product wordt minimaal beschadigd, doordat het ene been wordt geklemd en over het andere been slechts over een klein gebied glijden plaatsvindt;
- de minimum lengte van het te buigen been is 3 à 4 maal de materiaaldikte;
- de 'handling' van het product is, doordat het ook tijdens het buigen vlak op de tafel ligt, minder gecompliceerd;
- omdat met één gereedschapcombinatie meerdere producthoeken kunnen worden gerealiseerd, is relatief weinig gereedschap nodig. Met uitzondering van de bovenste buiglijst of druklijst waarop de buigradius en eventueel het buigprofiel wordt aangebracht, zijn de benodigde gereedschappen niet ingewikkeld.

Matrijsbuigen en elastomeerbuigen:
- matrijsbuigen wordt steeds voorafgegaan door vrijbuigen of strijkbuigen. Bij elastomeerbuigen geschiedt de matrijsbuigwerking van het begin af aan;
- bij matrijsbuigen wordt door middel van pletten of kalibreren de elastische vervorming en daarmede de terugvering sterk gereduceerd (dooddrukken van het materiaal);
- kalibreren heeft alleen succes bij productradii $> 5.s_o$;
- door het verminderen van de terugvering wordt een hogere hoeknauwkeurigheid bereikt;
- de machine en het gereedschap worden zeer zwaar belast, zodat in het algemeen zwaardere constructies nodig zijn;
- omdat voor ieder nieuw product steeds specifiek gereedschap nodig is, zijn de gereedschapkosten relatief hoog (geldt niet voor elastomeerbuigen).

3.2.2.2 *Kenmerken van de producten*

Een eerste, zeer globale indeling is:
a. Niet al te grote producten, goed hanteerbaar en moeilijke buigingen: meest geschikt voor buigen op kantpersen.
b. Producten van grote afmetingen en moeilijk te hanteren: meest geschikt voor zwenkbuigen.

Verfijning:

Vrijbuigen op kantpersen:
- producten met kleine afmetingen en moeilijke profielen: middelgrote series;
- producten met moeilijke en nauwkeurige profielen: alle series;
- smalle, lange producten: in lijn gekoppelde persen.

Matrijsbuigen (op kantpersen):
- voor het realiseren van de kleinst mogelijke buigradius en het reduceren van de terugvering;
- grote series.

Elastomeerbuigen:
- kleine buigradius;
- buigen over een niet rechte buiglijn;
- kleine en middelgrote series.

Strijkbuigen:
- buigbewerkingen in volggereedschappen;
- grote, paneelachtige producten met korte opstaande profielen (dikwijls op speciale CNC buigmachine).

Zwenkbuigen:
- grote producten met korte opstaande beenlengtes;
- veelhoekige, gesloten producten, zoals kanalen en behuizingen, mits de machine is uitgerust met een uitzwenkbare bovenklembalk;
- producten die niet of minimaal mogen worden beschadigd.

Bij het maken van de definitieve proceskeuze moet worden uitgegaan van de feitelijke bedrijfssituatie, waaronder de werkelijk aanwezige productie-outillage. De machines kunnen worden uitgerust met veel extra toebehoren, waardoor sommige genoemde nadelen, in de beschreven kenmerken, in het geheel niet van toepassing zijn (zie ook: supplement machines en gereedschappen).

Daarnaast is het mogelijk dat, bijvoorbeeld op grond van de seriegrootte, voor kleine series een ander buigproces wordt gekozen dan voor grote series.
Eveneens is het denkbaar dat voor een bepaald belangrijk product, specifieke machines of productielijnen worden aangeschaft.

3.2.3 *Buigvolgorde*

Bij het bepalen van de buigvolgorde worden de volgende punten in beschouwing genomen:
- de vereiste maatnauwkeurigheid;
- het vermijden van botsingen tussen product en gereedschap;
- het voorkomen van hanteerbaarheidsproblemen;
- de doorlooptijd.

De werkvoorbereider maakt een keuze op grond van:
- de productvorm;
- de maatnauwkeurigheid;
- de grootte van de uitslag;
- de hanteerbaarheid van de producten;
- de mogelijkheden om het proces bij te sturen.

Oorspronkelijk werd, met inachtname van bovenstaande punten, vooral op grond van ervaring de buigvolgorde bepaald, waarbij moest worden gekozen uit een groot aantal mogelijkheden. Met de intrede van de computerbesturing is dit een stuk eenvoudiger geworden.

De huidige CAD/CAM mogelijkheden kunnen niet alleen voor een goede werking van de machine zorgen, maar kunnen tevens een grote ondersteuning voor de bediener van de machine en/of voor de werkvoorbereider vormen. In een vroeg stadium kan het buigproces en het te maken product grafisch worden weergegeven. Door zowel de machine- en gereedschapbestanden, als de vorm van het te maken product in de computer te brengen, is het mogelijk een optimale buigvolgorde te berekenen en, met de huidige 3D software, de verschillende buigingen zichtbaar te maken op het beeldscherm.

Waar bovendien sprake is van geavanceerde buigmachines, bestaat de situatie dat op het constructiebureau het gehele buigproces zichtbaar kan worden gemaakt. Door in dat stadium eventuele productieproblemen te onderkennen en constructief op te lossen, wordt een grote bijdrage geleverd om tot een beheerst en reproduceerbaar productieproces te komen.

3.3 *Trouble shoot lijst*

Op de volgende bladzijde is een trouble shoot lijst opgenomen, die kan worden gebruikt bij het vinden van oorzaken bij problemen bij het buigen. Tevens is een overzicht gegeven waar de desbetreffende problematiek wordt behandeld.

3.4 *Uitgewerkt voorbeeld*

Als afsluiting van deze publicatie wordt een case besproken, om daarmede:
a. het gebruik van de publicatie toe te lichten;
b. zichtbaar te maken hoe groot de invloed is van het productontwerp op de fabricagemethodiek;
c. gegevens en richtlijnen te verstrekken aan de ontwerper, de werkvoorbereider en de producent.

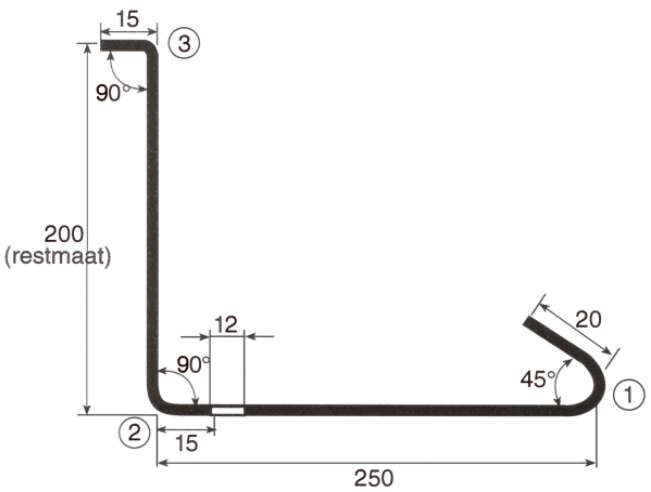
Onderwerp: Het vervaardigen van het product volgens onderstaande gegevens (zie ook figuur 3.15)

- productmateriaal: staal Fe P05 (DC 05);
- materiaaldikte 1,2 mm;

symptomen	oorzaken																						
	buiggereedschap									machine					materiaal/proces								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
insnoering															■		■						
scheuren															■	■	■						
verruwing															■					■			
knikken (op buiglijn)														■				■	■				
beschadiging van het productoppervlak	■		■			■		■															
dubbele aftekening ondergereedschap op vrijbuigproduct	■				■																		
te grote variatie in buighoek over de serie	■	■											■			■					■	■	
verloop in buighoek van de uiteinden naar het midden van het product	■			■			■				■												
torderen van het product																						■	
maatafwijkingen (o.a. verschillen in buigverlies)		■								■			■			■					■	■	
ongewenste (natuurlijke) buigradius									■			■	■										
deklaag laat los															■								■

	oorzaken:	meer informatie in:
	buiggereedschap	
1	De slijtage van het gereedschap is te hoog	§ 5.1.8 supplement machines & gereedschappen
2	Er is het verkeerde gereedschap gekozen (bijvoorbeeld vrijbuig- en matrijsgereedschap zijn door elkaar gehaald	§ 5.1 supplement machines & gereedschappen
3	De afrondingen van het buiggereedschap zijn te klein gekozen	§ 2.3.2
4	De buigspleet bij het strijkbuiggereedschap varieert te veel (bijvoorbeeld door uitbuiging)	§ 2.3.3
5	Er is een te grote matrijshoek voor het ondergereedschap gekozen (bij vrijbuigen)	§ 5.1.1 supplement machines & gereedschappen
6	Het gereedschap heeft een verkeerde oppervlaktebehandeling gehad	§ 3 supplement materialen en § 5.1.5 supplement machines & gereedschappen
7	De uitlijning van het buiggereedschap is niet voldoende	§ 5.1.7 supplement machines & gereedschappen
8	Er treedt aanladen van het gereedschap door productmateriaal op (vervuiling)	§ 5.1.8 supplement machines & gereedschappen
9	Een verkeerde V-opening is gekozen voor het ondergereedschap (bij vrijbuigen)	§ 3.1.1
	machine	
10	De aanslagvoorziening is verkeerd gekozen of niet goed gebruikt	§ 2.1.4 supplement machines & gereedschappen
11	De bombering op de machine is onvoldoende of werkt niet goed	§ 4.1 supplement machines & gereedschappen
12	Er is een verkeerde instelling van de buigwang gekozen (bij het zwenkbuigen)	§ 2.2 supplement machines & gereedschappen
13	Er wordt onvoldoende klemkracht op het productmateriaal uitgeoefend (bij zwenkbuigen of strijkbuigen)	§ 2.3.2.2 en 2.3.5.2
14	De perssnelheid is te hoog ingesteld	–
	materiaal/proces	
15	Er wordt geprobeerd een te kleine hoek te buigen met het productmateriaal	§ 2.5 supplement materialen
16	Het productmateriaal wordt in een verkeerde richting gebogen t.o.v. de walsrichting ervan (verkeerde nesting)	§ 2.2 supplement materialen en § 3.1.6
17	Het gekozen plaatmateriaal heeft ongunstige mechanische eigenschappen voor de vervorming die gewenst is	supplement materialen
18	Het materiaal vertoont een vloeivlag	hoofdstuk 3 van VM 111 "Materialen"
19	Het gekozen materiaal vertoont onvoldoende versteviging	§ 2.3 supplement materialen
20	De korrelgrootte van het gekozen plaatmateriaal is te groot	§ 2.2 supplement materialen
21	De materiaaleigenschappen en/of de plaatdikte variëren te veel	§ 2.2 supplement materialen
22	De inwendige spanningen (restspanningen) in het materiaal zijn te hoog	§ 2.2 supplement materialen
23	De hechting tussen materiaal en deklaag is onvoldoende	§ 5.1 van VM 111 "Materialen"

- productbreedte = de lengte van de buiglijn = 580 ± 0,2 mm;
- alle buigradii 1,5 ± 0,5 mm;
- alle maten, met uitzondering van de restmaat, ± 0,2 mm;
- hoeknauwkeurigheid ± 60';
- de drie gaten Ø 12 mm liggen op een lijn, het middelpunt van het eerste gat op 145 ± 0,2 mm vanaf de zijkant, de hartafstand van de gaten is 145 ± 0,1 mm;
- verwachte uitval 3%;
- aantal producten: 1400 stuks.



figuur 3.15 Doorsnede van het te vervaardigen product

3.4.1 *Keuze van het buigproces*

In deze case wordt aangenomen dat het bedrijf alle buigprocessen kan uitvoeren.
In § 3.2 van deze publicatie wordt een overzicht gegeven van de proces- en productkenmerken. Hieruit blijkt dat het product via verschillende processen kan worden vervaardigd.

- Omdat geen speciale eisen worden gesteld aan de grootte van de buigradii en evenmin een zeer kleine tolerantie op de hoeknauwkeurigheid aan de orde is, is matrijsbuigen niet noodzakelijk.
- Door de hoek van 45° is strijkbuigen minder geschikt.
- Wel in aanmerking komen vrijbuigen en zwenkbuigen.
- Vrijbuigen wordt hier gekozen, omdat:
  a. de gevraagde maten en toleranties haalbaar zijn;
  b. de producten goed hanteerbaar zijn;
  c. de cyclustijd acceptabel is;
  d. gelijksoortige producten eerder zijn gemaakt;
  e. standaardgereedschap aanwezig is.

3.4.2 *Benodigde bewerkingen*

De volgende bewerkingen moeten worden uitgevoerd:
Bew. 1: Platines knippen (of slitten en richten/knippen);
Bew. 2: Drie gaten Ø 12 mm ±0,1 mm aanbrengen;
Bew. 3: Producten buigen, in drie buigingen.

Opmerking: *In deze case wordt alleen het buigen van de producten besproken. Wel komen de randvoorwaarden van de voorgaande bewerkingen aan de orde.*

3.4.3 *Platines knippen*

Voordat de uitslag van het product kan worden berekend, moet bekend zijn welke de inwendige radii van het product zullen zijn. Om die reden worden vooraf de gereedschapcondities bepaald.

In § 3.1.1 en in tabel 3.1 is weergegeven:

- aanbevolen V-opening van de matrijs is: 8.s = 9,6 mm; Beschikbaar is een matrijs met opening 9,5 mm
- grootte van de natuurlijke inwendige productradii:
  bij 90° buigen:
  $r_i = 0{,}17$ V, dus 0,17.9,5 = 1,6 mm
  bij 45° buigen:
  $r_i = 0{,}12$ V, dus 0,12.9,5 = 1,1 mm

De uitslagberekening, zie § 3.1.2, verloopt als volgt:

Totaal van de gegeven maten:
15 + 200 + 250 + 20 = 485 mm

Buiging van 90°: $r_i/s = 1{,}6/1{,}2 = 1{,}33$
Aflezen in de grafiek van figuur 3.5 → k = 0,71
Formule 1 voor openingshoek ≤ 90° toepassen:
v = π.0,5(1,6 + 1,2/2.O,71) − 2(1,6 + 1,2)
= −2,4 mm
Idem voor de tweede hoek van 90°: v = −2,4 mm

Buiging van 45°: $r_i/s = 1{,}1/1{,}2 = 0{,}92$
Aflezen in de grafiek van figuur 3.5 → k = 0,63
Formule 1 toepassen: v = −1,1 mm

De uitslaglengte is 485 −2,4 −2,4 −1,1 = 479,1 mm

De afmetingen van de platine zijn dus: 580 × 479,1 mm, beide maten met een tolerantie van ±0,2 mm

Opmerking: *Omdat de grootte van de terugvering bij het buigen mede afhankelijk is van de ligging van de buiglijn ten opzichte van de walsrichting, is het gewenst alle producten op dezelfde manier te buigen.*
Voor het voorbeeldproduct geldt dat de buiglijnen van alle producten loodrecht op de walsrichting lopen. Het risico van maatafwijkingen, ontstaan door ongelijke terugvering, wordt zodoende zoveel mogelijk beperkt. Wanneer een CNC kantpers met hoekmeting beschikbaar is, is deze maatregel niet nodig.

Aandachtspunt voor het knippen!

Omdat het verwachte uitvalpercentage voor het totale fabricageproces 3% is, worden 1400/0,97 = 1444 platines vervaardigd.

3.4.4 *Buigen van het product*

Vooraf te beschouwen punten:

- de totale maatvoering van het product;
- het benodigde gereedschap;
- de 'handling' van het product tijdens de productie.

3.4.4.1 *De totale maatvoering van het product*

De hoofdmaten van het product

In de producttekening van figuur 3.15 is, naast maten met een tolerantie van ±0,2 mm, ook een sluit- of restmaat vermeld. Dit is de maat van 200 mm.
Het is gewenst dat een dergelijke maat gegeven is, omdat daarin afwijkingen kunnen worden weggewerkt.
Afwijkingen kunnen o.a. ontstaan door knipfouten, verschillen tussen de berekende en de werkelijke platine-afmeting, verkeerd berekende platine-afmeting en onnauwkeurigheden bij het buigen.

Maatafwijkingen komen altijd in dat deel van het product dat niet tussen de aanslag en het buiggereedschap is geweest (zie ook § 3.1.5).

De plaats van de buiglijnen

Het is bekend dat bij vrijbuigen het buigverlies gelijk over de beide benen wordt verdeeld (zie ook § 3.1.2).
Bij het buigen van de hoek van 45° is het buigverlies −1,1 mm. De buiglijn ligt dan op een afstand van 20−1,1/2 = 19,45 mm van de snijrand.
Bij het buigen van de hoek van 90°, en de maat van 250 mm, ligt de buiglijn op 250−2,4/2 = 248,8 mm.
Bij het buigen van de hoek van 90°, en de maat van 15 mm, ligt de buiglijn op 15−2,4/2 = 13,8 mm.

Ligging van gaten, enz. t.o.v. de buigingen

In § 3.1.7 van de publicatie worden minimale afstanden, y_{min}, van aanwezige gaten ten opzichte van de buiging vermeld. In ons geval geldt figuur 3.12. De bedoelde y is: de gegeven maat van 15 mm, minus de materiaaldikte, minus de straal van het aanwezige gat, dus 15−1,2−6,0 = 7,8 mm.
De minimale afstand $y_{min} = r_i + 2s = 1{,}6 + 2.1{,}2 = 4{,}0$ mm, waarmede is aangetoond dat de gaten op voldoende afstand van de buiging liggen.
Bij een afstand y kleiner dan 4 mm zouden de gaten tijdens het buigen kunnen worden vervormd.

3.4.4.2 *Het benodigde gereedschap*

De maatvoering van het gereedschap

Bij het berekenen van de uitslag is reeds bepaald:

a. De V-opening van de matrijs is 9,5 mm (minimale beenlengte van het product is circa 7 mm);
b. De natuurlijke inwendige productradius bij 90° buigen is 1,6 mm, bij 45° buigen 1,1 mm.

In § 3.1.1 wordt als inloopradius r_m van de matrijs ca. 10% van de grootte van de V-opening aanbevolen. In ons geval is deze r_m dus 1,0 mm.
Omdat de buigkracht relatief klein is, kan er voor slanke gereedschappen worden gekozen.
Het bovenstempel bijvoorbeeld kan een tophoek van 30° hebben. De radius r_s van het bovenstempel moet kleiner zijn dan r_i, dus kleiner dan 1,1 resp. 1,6 mm.
We kiezen voor de standaard r_s 1,0 mm (zie ook § 5.1.1 van het supplement machines en gereedschappen).

De maximaal benodigde buigkracht

Het productmateriaal is Fe P05, met een treksterkte van 270 tot 330 N/mm^2 (zie supplement materialen A.1).

BEREKENING VOLGENS METHODE 1:

Volgens de paragrafen 2.3.2.2 en 3.1.3 is de maximaal benodigde buigkracht:

$$F_b = \frac{c \cdot R_m \cdot B \cdot s}{V}$$

$$F_b = \frac{1{,}42 \cdot 330 \cdot 580 \cdot 1{,}2}{9{,}5} = \mathbf{41{,}2\ kN}$$

BEREKENING VOLGENS METHODE 2:

Aflezen in tabel 3.4 van § 3.1.3
Als $s = 1{,}2$ mm; $R_m = 450$ N/mm^2; $V = 9{,}5$ mm, dan is de buigkracht: 100 kN/m.
Voor 580 mm is de buigkracht dus 58 kN.

R_m is echter 330 N/mm^2.
De factor c_2 wordt bepaald uit de grafiek in figuur 3.9 en bedraagt circa 0,73.
De maximaal benodigde buigkracht is dan:

$F_b = 0{,}73 \times 58 = \mathbf{42{,}3\ kN}$

3.4.4.3 *De handling van het product tijdens de productie*

Aanslagmogelijkheden

Zoals beschreven in § 3.1.5 ontstaan nauwkeurige afmetingen van een plaatdeel als dat deel tussen de aanslag en het buiggereedschap wordt gepositioneerd.
Bovendien gaat de voorkeur uit naar het aanslaan op een gesneden rand of een scherp gebogen hoek.

Voor het te beschouwen product geldt:
1. De hoek van 45° buigen, met achteraanslag op de gesneden rand;
2. De hoek van 90° buigen, met de maat van 250 mm, met achteraanslag op de gebogen hoek van 45°;
3. De hoek van 90° buigen, met de maat van 15 mm, met achteraanslag op de gesneden rand.

Op deze wijze wordt tevens bereikt dat het plaatdeel van 200 mm de eerdergenoemde sluitmaat krijgt. Dit plaatdeel is niet tussen de aanslag en het gereedschap geweest.

De buigvolgorde

Bij het bespreken van de aanslagmogelijkheden is tevens de buigvolgorde bepaald, in de producttekening van figuur 3.15 aangegeven met de nummers 1, 2 en 3.

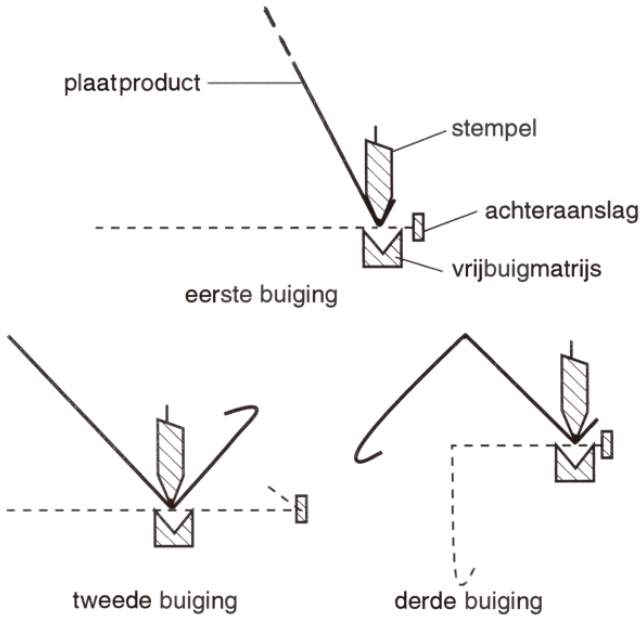
'Handling'

Door de redelijke afmetingen en gewicht (circa 2,6 kg) is het product nog goed hanteerbaar. Toch kan worden overwogen om bij de eerste buiging gebruik te maken van buighulpen. Bij deze buiging steekt namelijk een relatief groot gedeelte van de platine voor het gereedschap uit. Bij onvoldoende ondersteuning tijdens het buigen kunnen dan ongewenste vervormingen optreden. Na de tweede buiging moet het product worden omgedraaid.

Naarmate de platine en/of het opzwaaiende deel ervan groter wordt, kan worden gedacht aan het gebruik van een zwenkbuigmachine, omdat de platine dan vlak op de tafel kan blijven liggen.

Er moet ook in dat geval rekening worden gehouden met het feit dat de derde buiging tegengesteld gericht is. Dit betekent dat een zwenkbuigmachine bij voorkeur in twee richtingen moet kunnen buigen om het omdraaien van het product te voorkomen.

De bedoelde buigbewerkingen zijn weergegeven in figuur 3.16.



figuur 3.16 De volgorde van de buigbewerkingen van het product

3.4.5 *Nabeschouwing*

Een kritisch punt bij het gekozen buigproces is de grootte van de buigradius bij de 45° buiging.
Deze radius moet volgens tekening 1,5 ±0,5 zijn.
De berekende natuurlijke radius is 1,1 mm, dus aan de onderkant van het tolerantieveld.
Een oplossing voor dit probleem zou het werken met een grotere V-opening van de ondermatrijs zijn.
Echter, wanneer die grotere V-opening, bijvoorbeeld 12 mm, ook wordt gebruikt voor de buiging van 90° ontstaat daar een natuurlijke radius van $0{,}17 \times 12 = 2{,}0$ mm, bij deze maatvoering maximaal toegestaan.
Beide situaties zijn minder gewenst.
Dat de stempelradius $r_s = 1{,}0$ mm is gekozen garandeert niet dat de kleinste inwendige productradius dan ook 1 mm zal zijn.
Ook het werken met twee verschillende V-openingen is, vanuit ergonomisch en economisch oogpunt, niet aantrekkelijk.
Opnieuw overleg met de ontwerper is nodig om tot een bevredigende oplossing te komen. Misschien is het mogelijk het tolerantieveld te verleggen voor de buigradius van de hoek van 45°.

Bij de uitwerking van dit voorbeeld is duidelijk gebleken dat de bewerkingsmethodiek in sterke mate door de productontwerper wordt bepaald.
In deze eenvoudige case kwam dat ondermeer aan de orde bij:
- de grootte van de buigradii;
- de totale maatvoering, waarbij met name de aanwezigheid en de ligging van de sluit- of restmaat van belang is;
- de ligging van de ronde gaten in het product.

Een vroegtijdig overleg tussen de ontwerper van een product, de werkvoorbereider en de producent ervan, is zeer zinvol en noodzakelijk. Het is raadzaam om te overwegen of werkvoorbereidingspakketten hierbij zinvol ingezet kunnen worden.
Juist in het ontwerpstadium zijn er mogelijkheden om, met handhaving van de functionele producteisen, tot een goed en efficiënt maakbaar product te komen.

Supplement "materialen"

S.1 *Inleiding*

In dit supplement wordt nader ingegaan op die aspecten van materialen die specifiek betrekking hebben op de in deze publicatie behandelde processen. Dit supplement dient te worden gezien als aanvulling op de publicatie VM 111 "Materialen".

S.2 *Productmaterialen*

S.2.1 *Mechanische eigenschappen van belang voor het buigen*

Uit de procesbeschrijving van het buigen (zie hoofdstuk 2) blijkt dat de volgende materiaaleigenschappen relevant zijn:
- de treksterkte;
- de 0,2% rekgrens of de vloeigrens;
- de rek;
- de elasticiteitsmodulus;
- de versteviging;
- de minimaal toelaatbare buigdoornmiddellijn.

De treksterkte, 0,2% rekgrens of vloeigrens en de rek worden met de "standaard" trekproef bepaald. Zie voor de definitie en methode van bepalen VM 111 "Materialen".
De elasticiteitsmodulus kan in principe ook met een trekproef worden bepaald. Aangezien de elasticiteitsmodulus bij benadering onafhankelijk is van de behandelingstoestand van het materiaal, wordt deze grootheid als een constante gezien.
Voor de in dit supplement vermelde materialen gelden voor de elasticiteitsmodulus bij benadering de volgende waarden:
- ongelegeerd en laaggelegeerd staal: 210.000 N/mm^2;
- austenitisch roestvast staal in gegloeide toestand: 196.000 N/mm^2;
- aluminium en aluminiumlegeringen: 70.000 N/mm^2.

De versteviging wordt vaak gekarakteriseerd met de verstevigingsexponent of n-waarde (zie VM 111 "Materialen"). De methode om deze verstevigingsexponent te bepalen staat onder andere omschreven in een bijlage bij het normblad EN 10 130. Is de verstevigingsexponent niet bekend, dan kan enig idee omtrent de versteviging worden verkregen uit de verhouding rekgrens/treksterkte.
Als basis voor het bepalen van de minimale buigdoornmiddellijn kan het normblad DIN 50 111 (1987) "Technologischer Biegeversuch" dienen. De minimale buigdoornmiddellijn kan worden gebruikt om de minimaal toelaatbare buigradius van het materiaal te bepalen. Voor de minimaal toelaatbare inwendige buigradius kan als benadering worden genomen: $R_i = ½D$, waarbij D de bij het materiaal behorende minimale buigdoornmiddellijn is. Bij de op deze manier berekende waarde R_i kan worden aangenomen dat het materiaal de vervorming nog net aankan. Het proberen te buigen van kleiner inwendige buigradii met het betreffende materiaal zal problemen geven.
In de tabellen verderop in dit supplement zijn voor een groot aantal materialen de genoemde eigenschappen, althans voor zover bekend, verzameld.

S.2.2 *Overige eigenschappen van belang voor proces en product*

Naast de mechanische eigenschappen zijn bij het buigen nog andere factoren van belang, zoals de invloed van de walsrichting, de hoogte en verdeling van inwendige spanningen, de diktetoleranties van het plaatmateriaal, de korrelgrootte en de oppervlaktegesteldheid.

Walsrichting

Zoals in de publicatie VM 111 "Materialen" staat beschreven, wordt al het band- en plaatmateriaal door walsen vervaardigd.
Meestal wordt daarbij het materiaal in de lengterichting gestrekt, in de breedterichting niet of nauwelijks (uitzondering zijn zogenaamde quartoplaten, die kruiselings worden gewalst). Het gevolg hiervan is dat:
- de mechanische eigenschappen verschillen in de diverse richtingen ten opzichte van de walsrichting, en daarmee ook de buigeigenschappen (o.a. terugvering);
- insluitsels worden in de lengterichting gestrekt, waardoor bij buigingen waarbij de as van buigen evenwijdig aan de walsrichting ligt in het algemeen een grotere minimale buigstraal moet worden aangehouden dan wanneer de as van buigen loodrecht op de walsrichting staat.

Inwendige spanningen

Inwendige spanningen in band- of plaatmateriaal kunnen bij plaatbewerkingstechnieken tot onaangename verrassingen leiden. Zo ook bij buigen.
In zijn algemeenheid gesproken zijn inwendige spanningen in plaat of band het gevolg van een door een uitwendige belasting opgelegde inhomogene plastische deformatie. Wordt de uitwendige belasting weggenomen, dan zal het materiaal willen terugveren (elastische spanningen), hetgeen door de plastisch gedeformeerde gebieden wordt verhinderd. Het resultaat zijn inwendige spanningen. Zoals uit de procesomschrijving "Buigen" blijkt, worden ook door buigen inwendige spanningen geïntroduceerd door een inhomogene plastische deformatie over de dikte van het materiaal.
Materiaal dat als band geproduceerd is en op coil wordt geleverd, zal bij afwikkelen niet vlak zijn. Grofweg kunnen de volgende vier afwijkingen worden onderscheiden:
- coilkromming;
- bandkromming;
- randspanning;
- middenspanning.

Vaak treedt een combinatie op. Bij het verwerken van band of hieruit vervaardigde plaat zal in het algemeen moeten worden uitgegaan van een vlakke toestand. Dit betekent dat voorafgaande aan de bewerking het materiaal moet worden gericht. Tegenwoordig vindt het richten in het algemeen plaats op rollenrichtmachines, waarmee, door het materiaal afwisselend heen en terug te buigen, een vlak eindproduct wordt verkregen. Hierbij moet worden bedacht, dat door het richten de aanwezige inwendige spanningen niet teniet worden gedaan, maar anders worden verdeeld. Het eindproduct kan alleen vlak zijn op basis van een evenwicht van (elastische) inwendige spanningen. Wordt tijdens de verdere verwerking dit spanningsevenwicht verstoord, dan kan dat leiden tot een vervorming van het materiaal.

Toleranties op de dikte

Afhankelijk van het toegepaste buigproces heeft de materiaaldikte invloed op de buigstraal, de terugvering en het buigverlies. Daarmee heeft de tolerantie op de dikte uiteraard invloed op de nauwkeurigheid van het buigproces. Voor plaat- en bandmateriaal zijn de toegestane diktetoleranties vastgelegd in normen. Bij de tabellen verderop in dit supplement wordt steeds vermeld in welke norm de diktetoleranties staan vermeld. In een aantal gevallen zal de volgens de normen toegestane diktetolerantie voor het goed verloop van het buigproces te ruim zijn. In dit soort gevallen verdient het aanbeveling om samen met de toeleverancier nauwere toleranties af te spreken. De meerprijs die hiervan het gevolg is, zal moeten worden gecompenseerd door een verbetering van de productiviteit.

Korrelgrootte

De korrelgrootte of kristalgrootte heeft enerzijds invloed op de mechanische eigenschappen van een materiaal, anderzijds op het uiterlijk van een gedeformeerd, dus ook van een gebogen product. Een fijnkorrelig materiaal zal in het algemeen een hogere rekgrens te zien geven dan hetzelfde materiaal met een grovere korrel. Bij staalkwaliteiten zal een kleinere korrel bovendien een betere kerfslagwaarde (weerstand tegen brosse breuk) tot gevolg hebben.
Wordt een materiaal gebogen, dan zal materiaal in de buitenradius worden gestrekt. Het gevolg hiervan is onder

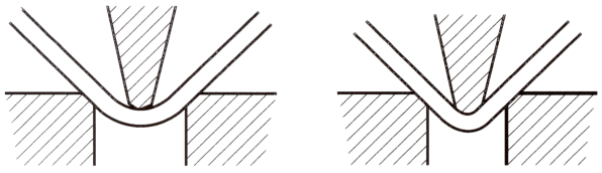
andere een toename van de ruwheid, de zogenoemde sinaasappelhuid. Dit verschijnsel wordt ernstiger naarmate de korrel groter wordt.
De toename van de ruwheid op een buiging kan bijvoorbeeld een verschil in uiterlijk geven na het aanbrengen van galvanische bedekkingen voor decoratieve doeleinden.
In kwaliteitsnormen voor metalen is in het algemeen geen eis opgenomen voor de korrelgrootte. Indien relevant, dient een en ander bij de bestelling te worden overeengekomen.

Oppervlaktegesteldheid

In tegenstelling tot koudgewalste materialen, zullen warmgewalste materialen in het algemeen bedekt zijn met een oxidehuid, de zogenoemde walshuid. Vooral bij staal kan deze laag dik zijn en gemakkelijk van de ondergrond loslaten. Bij het verwerken van een dergelijk materiaal zullen machines, gereedschappen en de omgeving vervuild raken. Een verder nadeel kan de grotere slijtage van gereedschappen zijn. Oxiden zijn immers hard.
Verwijderen van de walshuid kan zowel mechanisch (stralen) als chemisch (beitsen). Het stralen kan, afhankelijk van het gebruikte straalmiddel en de straalintensiteit, een nadelig effect hebben op de buigbaarheid, onder andere, omdat in het oppervlak kerfjes ontstaan, waardoor op de buiglijn vroegtijdig scheuren kunnen ontstaan.
Evenals koudgewalst staal, zal warmgewalst staal ontdaan van de walshuid licht ingeolied geleverd worden, tenzij bij de bestelling anders is overeengekomen.

S.2.3 *Verandering mechanische eigenschappen door buigen*

Tengevolge van de deformatie bij het buigen zal het materiaal in de buigzone verstevigen, dat wil zeggen de rekgrens neemt toe (zie ook de publicatie VM 111 "Materialen"). In het algemeen zal deze verandering in eigenschappen geen nadelige gevolgen voor de productfunctie hebben.
De diverse materialen vertonen vaak een nogal verschillend verstevigingsgedrag, hetgeen tot uiting komt in verschillende n-waarden. Met name bij het vrijbuigen heeft de versteviging invloed op de bereikte buigstraal. Materiaal met veel versteviging zal, bij gelijke buighoek, een grotere buigstraal te zien geven dan een materiaal met weinig versteviging (schematisch weergegeven in figuur S.1). De reden hiervoor is, dat bij buigen van materiaal met veel versteviging, de deformatie over een groter gebied wordt verdeeld dan bij materiaal met weinig versteviging.



figuur S.1 Schematische weergave van de invloed die de versteviging heeft bij het vrijbuigen ($n_A > n_B$)

In een aantal situaties is het mogelijk dat de buigdeformatie tot een ontoelaatbare verandering in mechanische eigenschappen leidt.
Een voorbeeld hiervan betreft gebogen producten, gemaakt uit ouderingsgevoelig staal, die thermisch worden verzinkt. Onder invloed van de hoge temperatuur bij het verzinken zal het materiaal met name in de buigzone kunstmatig worden verouderd.
Tengevolge van deze veroudering kan het materiaal zo bros worden, dat al bij een geringe vervorming breuk optreedt. In dit soort gevallen verdient het dus aanbeveling uit te gaan van niet-ouderingsgevoelige staalkwaliteiten. Tevens heeft kouddeformatie, dus ook buigen, van staal een nadelig effect op de weerstand tegen brosse breuk (kerfslagwaarde). Bij verouderingsgevoelige stalen kan ter plaatse van de buigzone ook nog natuurlijke veroudering optreden, waardoor de weerstand tegen brosse breuk nog verder afneemt. Onder ongunstige omstandigheden (zware deformatie, grote materiaaldikte) kan het noodzakelijk zijn de gevolgen van de kouddeformatie door een warmtebehandeling teniet te doen.

S.2.4 *Invloed knipdeformatie/braam c.q. warmte-beïnvloede zone bij thermisch snijden*

Veel buigproducten zullen worden gemaakt uit op maat geknipte plaat of strip of uit op breedte geslitte band. Door de scheidende bewerking zal er enerzijds een verstevigde randzone ontstaan, anderzijds een, meestal zwaar verstevigde, braam. Beide verschijnselen hebben een nadelige invloed op de vervormbaarheid. Vooral bij wat hardere materialen en/of smalle strip en/of grotere materiaaldikten kan de randzone vroegtijdig scheuren veroorzaken. In deze gevallen is het gunstig om de braam aan de binnenradius van het product te leggen. In extreme gevallen zullen de braam en de verstevigde zone mechanisch, bijvoorbeeld door slijpen, moeten worden verwijderd.
Dikker materiaal kan ook door thermisch snijden (autogeen-, plasma- of lasersnijden) op maat worden gemaakt. Door het thermisch snijden ontstaat aan de rand de zogenaamde warmte-beïnvloede zone (wbz). Door het opwarmen en afkoelen zullen in deze zone de mechanische eigenschappen worden beïnvloed, vaak in negatieve zin. In welke mate de eigenschappen veranderen, hangt af van de materiaalkwaliteit, de hoogte van de in de wbz bereikte temperatuur en de afkoelsnelheid. Onder ongunstige omstandigheden kan het materiaal in de wbz bros worden, waardoor bij buigen scheuren ontstaan.

S.2.5 *Voor buigen geschikte materialen*

In de tabellen S.1 t/m S.19 zijn de voor het buigen relevante eigenschappen opgenomen. Voor zover mogelijk zijn deze eigenschappen overgenomen uit de diverse normen. Worden in een norm geen waarden voor een bepaalde eigenschap gegeven, dan is getracht toch een waarde in te vullen. Deze waarden zijn of afkomstig uit ervaring of uit literatuur. Zoveel mogelijk is gebruikt gemaakt van nederlandstalige Europese (EN) normen. Indien deze niet aanwezig zijn, zijn Euronormen (EU) gebruikt. In dit laatste geval zijn tevens de overeenkomstige Duitse (DIN) normen genoemd.

A **koud- en warmgewalst ongelegeerd laag koolstofstaal voor vervormingsdoeleinden**

A.1 EN 10 130 (1992). Toleranties volgens EN 10 131 (1992). Koudgewalste platte producten van laag koolstofstaal voor koud dieptrekken of zetwerk (zie tabel S.1).
Opmerking: *Deze norm wordt herzien en t.z.t opnieuw uitgegeven als EN 10 130. De wijziging zal met name de aanduiding van de staalkwaliteiten betreffen. Voor de volledigheid zijn in tabel S.1 de toekomstige aanduidingen opgenomen.*

Binnen deze groep is de kwaliteit Fe P01 de minst gedefinieerde kwaliteit. Met name de rekgrens kan een grote spreiding te zien geven, zeker tussen verschillende leveringen. Is deze grote spreiding voor het buigproces niet acceptabel, dan zal een beter gedefinieerde kwaliteit moeten worden gekozen.
Uit ervaring is bekend dat de rekgrens voor de kwaliteit Fe P01 kan variëren tussen circa 160 en circa 260 N/mm^2, terwijl voor de kwaliteit Fe P04 de rekgrens varieert tussen 160 en 205 N/mm^2. Dit betekent dat de keuze van een hogere kwaliteit leidt tot enerzijds een kleinere spreiding in mechanische waarden, anderzijds dat het gemiddelde niveau lager ligt.

A.2 EN 10 139 - Toleranties volgens EN 10 140. Niet-bekleed koudgewalst band in walsbreedten van minder dan 600 mm van zacht ongelegeerd staal voor koudvervormen (zie ook DIN 1624 van 1987) (zie tabel S.2).

A.3 EN 10 111 - Toleranties volgens EN 10 051 (1992). Continu warmgewalste, niet beklede plaat en band

van laag koolstofstaal staal voor koud dieptrekken of zetwerk. Zie ook DIN 1614 (1986) (zie tabel S.3).

A.4 EN 10 142 (1995) - Toleranties volgens EN 10 143 (1993). Continu dompelverzinkte plaat en breedband van laag koolstofstaal voor koud dieptrekken of zetwerk (zie tabel S.4).

Binnen deze groep is Fe P02 G de minst gedefinieerde en vertoont daarom de grootste spreiding in mechanische eigenschappen. Volgens de norm moet met een minimum rekgrens van 140 N/mm^2 rekening worden gehouden voor alle kwaliteiten.
Uit ervaring is bekend dat de rekgrens voor de kwaliteit Fe P02 G in het algemeen varieert tussen 240 tot 390 N/mm^2, terwijl voor de kwaliteit Fe P06 G op een spreiding in de rekgrens van 130 tot 155 N/mm^2 moet worden gerekend. Dus ook hier geldt dat de keuze van een hogere kwaliteit enerzijds een kleinere spreiding tot gevolg heeft en anderzijds een lager niveau.
De mechanische eigenschappen zijn onafhankelijk van de uitvoeringsvorm van de zinklaag (gebloemd, onderdrukte bloem, gematteerd).

A.5 EN 10 152 (1994) - Toleranties volgens EN 10 131 (1993). Elektrolytisch verzinkte koudgewalste platte staalproducten (zie tabel S.5).

Als basis voor de elektrolytisch verzinkte kwaliteiten worden de in tabel S.1 genoemde materialen gebruikt. Omdat elektrolytisch verzinken bij lage temperatuur gebeurt, zal de beïnvloeding van de mechanische eigenschappen minimaal zijn.
De in A.1 gemaakte opmerkingen onder andere ten aanzien van de spreiding in mechanische eigenschappen gaan derhalve ook voor deze kwaliteiten op.

B **Warmgewalste, normaal gegloeide c.q. normaliserend gewalste en thermomechanisch gewalste staalkwaliteiten**

B.1 EN 10 025 (2004) - Toleranties volgens EN 10 029 (1992) (vanaf 3 mm dikte) en EN 10 051 (1997) (zie tabel S.6).
Warmgewalste producten van ongelegeerd constructiestaal.

Opmerkingen:
1. *De in de tabellen gebruikte aanduidingen zijn niet compleet. Voor een volledige aanduiding raadplege men EN 10 025.*
2. *De in de tabel gegeven mechanische eigenschappen gelden loodrecht op de walsrichting.*
3. *Voor mechanische waarden voor grotere materiaaldikten dan in de tabel genoemd raadplege men EN 10 025.*
4. *Aan de standaardkwaliteiten zoals genoemd in tabel S.6 worden geen eisen gesteld ten aanzien van de buigbaarheid. Indien garanties op de buigbaarheid gewenst zijn, dan moet dat bij de bestelling worden overeengekomen. In de materiaalaanduiding komt de geschiktheid voor koudvervormen tot uitdrukking door de letter C aan het eind van de aanduiding.*

In tabel S.7 wordt een overzicht gegeven van de minimumwaarden voor de doorndiameter in mm van de in tabel S.6 genoemde materiaalkwaliteiten, waaraan eisen ten aanzien van de vervormbaarheid worden gesteld.

B.2 EN 10 147 (1995) - Toleranties volgens EN 10 143. Continu dompelverzinkte plaat en band van staal voor constructiedoeleinden (zie tabel S.8).

B.3 EN 10 149-3 (1996) - Toleranties voor strip EU 91-81, voor band met breedte ≥ 600 mm en daaruit geknipte plaat of geslitte band EN 10 051 (1992), voor warmband (breedte <600 mm) EN 10 048 (zie tabel S.9). Platte, normaalgegloeide, producten tot 16 mm dikte met hoge rekgrens voor koudvervormen, (zie ook EN 10 149-1 (1996)).

Opmerking: *Als alternatief voor het normaal gloeien kan ook normaliserend gewalst worden geleverd.*

B.4 EN 10 149-2 (1996) - Toleranties voor strip EU 91-81, voor band met breedte ≥ 600 mm en daaruit geknipte plaat of geslitte band EN 10 051 (1992), voor warmband (breedte <600 mm) EN 10 048.
Platte producten tot 12 mm dikte met hoge rekgrens voor koudvervormen, thermomechanisch gewalste producten (zie ook EN 10 149-1) (zie tabel S.10).

C **Ongelegeerd en laaggelegeerd verenstaalband**

Ongelegeerd en laaggelegeerd verenstaalband kan zowel in zachtgegloeide toestand als in geharde en ontlaten toestand worden geleverd. Het voordeel van de zachtgegloeide toestand is uiteraard de ten opzichte van de geharde en ontlaten toestand betere vervormbaarheid en bewerkbaarheid. Een nadeel kan zijn, dat na de vormgeving in het algemeen een warmtebehandeling noodzakelijk is om optimale veereigenschappen te verkrijgen. Dit soort warmtebehandelingen gaan gepaard met vormveranderingen en oxidatie van de producten. Bij de keuze van een verenstaal moet daarom altijd de afweging worden gemaakt of er kan worden uitgegaan van de geharde en ontlaten toestand, ofwel moet worden uitgegaan van de zachte toestand, waarbij de producten na vormgeving moeten worden gehard en ontlaten.

C.1 DIN 17222 (1979) - Toleranties volgens DIN 1544 (1975). Koudgewalst verenstaalband. Koudgewalst en zachtgegloeid (G) verenstaalband (zie tabel S.11).

C.2 DIN 17222 (1979) - Toleranties volgens DIN 1544 (1975). Koudgewalst verenstaalband. Koudgewalst + gehard + ontlaten verenstaalband (zie tabel S.12).

D. **Roestvast staal**

De aanduiding van deze staalkwaliteiten is gebaseerd op de betreffende Euronormen. Omdat vaak de ASTM aanduidingen worden gebruikt, zijn deze voor de volledigheid ook vermeld.

D.1 EN 10 088 (1995) - Toleranties bij de bestelling overeen te komen op grond van bijlage B van EN 10 088. Plaat en band voor algemeen gebruik (zie ook DIN 17440 (1985) voor warmgewalste plaat en band en DIN 17441 (1985) voor koudgewalste plaat en band) (zie tabel S.13).
Opmerking: *De in deze tabel opgegeven waarden gelden uitsluitend voor de zachtgegloeide resp. de oplosgegloeide en afgeschrikte toestand.*

De ferritische kwaliteiten X 6 Cr 17 en X 5 CrTi 17 moeten bij voorkeur worden verwerkt boven ca. 20 °C. Scherpe buigingen moeten worden vermeden, zeker als de as van buigen evenwijdig aan de walsrichting is. Voor grotere dikten (boven ca. 3 mm) en/of voor het realiseren van scherpere binnenradii verdient het aanbeveling het materiaal voor te verwarmen op 100 tot 300 °C.

Opmerking: *Met name in de 0,2% rekgrens kan een aanzienlijke spreiding optreden. Voor de kwaliteit X 5 CrNi 18 10 bijvoorbeeld kan een spreiding in de 0,2% rekgrens van 235 N/mm^2 tot 375 N/mm^2 in koudgewalste uitvoering optreden. Ook de andere kwaliteiten kunnen een grote spreiding in de mechanische eigenschappen vertonen.*

D.2 DIN 17224 (1982) - Toleranties volgens DIN 59381 (1980). Corrosievast verenstaalband X 12 CrNi 17 7 (zie tabel S.14)

E **Aluminium en aluminium legeringen**

Op het gebied van aluminium en aluminiumlegeringen in plaat en band is momenteel op Europees niveau de norm EN 485 (1994) beschikbaar. Voor de tabellen S.15 t/m S.19 is gebruik gemaakt van deze norm. De systematiek van de aanduiding door nummers wordt behandeld in de publicatie VM 111 "Materialen".

Voor de volledigheid zijn ook de overeenkomstige DIN aanduidingen volgens de vervallen norm DIN 1745 "Bänder und Bleche aus Aluminium und Aluminium-Knetlegierungen mit Dicken über 0,35 mm" vermeld. Met nadruk moet erop worden gewezen dat er tussen DIN 1745 en EN 485-2 verschillen bestaan, zodat een 1 op 1 vergelijking niet mogelijk is.
De toleranties op de afmetingen zijn voor alle genoemde materialen vastgelegd in: EN-485-3, warmgewalste plaat en band en in EN-485-4, koudgewalste plaat en band.

tabel S.1 Koudgewalst vervormingsstaal (zie A.1)

kwaliteit	**toekomstige aanduiding**	**rekgrens** [1] [N/m²] max.	**treksterkte** [N/m²]	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**n-waarde** min.	**doorndiameter D bij buigproef** [2]
Fe P01	DC01	280	270 - 410	28		0
Fe P03	DC03	240	270 - 370	34		0
Fe P04	DC04	210	270 - 350	38	0,180 [3]	0
Fe P05	DC05	180	270 - 330	40	0,200 [3]	0
Fe P06	DC06	180	270 - 350	38	0,220 [4]	0

1) de waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de onderste vloeigrens voor andere materialen.
2) niet in de norm als eis opgenomen. Buighoek 180°, onafhankelijk van de walsrichting.
3) gemeten loodrecht op de walsrichting.
4) gemiddelde van de metingen loodrecht op, evenwijdig aan en onder 45° met de walsrichting.

tabel S.2 Koudgewalst vervormingsstaal met breedte < 600 mm (zie A.2)

kwaliteit	**aanduiding**	**rekgrens** [N/mm²] [1]	**treksterkte** [N/mm²]	**rek** [%] (min.)		**doorndiameter bij buigproef** [2]		**n-waarde** min.
				$L_0 = 80$ mm	$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_o}$	buighoek	D	
DC01	TC	--	270 - 390	28	32	180°	0 × s	
	HK 270	≤ 280	270 - 410	28	32	180°	0 × s	
	HK 290	200 - 380	290 - 430	18	24	90°	≥ 4 × s	
	HK 340	≥ 250	340 - 490					
	HK 390	≥ 310	390 - 540					
	HK 440	≥ 360	440 - 590					
	HK 490	≥ 420	490 - 640					
	HK 590	≥ 520	590 - 740					
	HK 690	≥ 630	≥ 690					
DC03	TC		270 - 370	34	37	180°	0 × s	
	HK 270	≤ 240	270 - 370	34	37	180°	0 × s	
	HK 290	210 - 355	290 - 390	22	26	90°	≥ 4 × s	
	HK 340	≥ 240	340 - 440			90°	≥ 6 × s	
	HK 390	≥ 330	390 - 490					
	HK 440	≥ 380	440 - 540					
	HK 490	≥ 440	490 - 590					
	HK 590	≥ 540	≥ 590					
DC04	TC		270 - 350	38	40	180°	0 × s	
	HK 270	≤ 210	270 - 350	38	40	180°	0 × s	0,18
	HK 290	220 - 235	290 - 390	24	28	90°	≥ 4 × s	
	HK 340	≥ 240	340 - 440			90°	≥ 6 × s	
	HK 390	≥ 350	390 - 490					
	HK 440	≥ 400	440 - 540					
	HK 490	≥ 460	490 - 590					
	HK 590	≥ 560	590 - 690					
DC05	HK 270	≤ 160	270 - 330	40	42	180°	0 × s	0,20
DC06	HK 270	≤ 180	270 - 350	38	40		0 × s	0,22

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de onderste vloeigrens voor andere materialen.
2) Waarden niet in de norm opgenomen, afkomstig uit de literatuur. De buigproef wordt zodanig uitgevoerd dat de as van de buiging evenwijdig aan de walsrichting van het product ligt (s = materiaaldikte).

tabel S.3 Warmgewalst vervormingsstaal (zie A3)

kwaliteit	**rekgrens** [1] [N/mm²] max.	**treksterkte** [N/mm²] max.	**rek** [%] (min.)		**n-waarde** [2]	**doorndiameter D bij buigproef** [3] min.	
			dikte < 3 mm	dikte ≥ 3 mm			
			$L_0 = 80$ mm	$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_o}$		dikte < 2,3 mm	dikte ≥ 2,3 mm
DD11	360	440	25	29		1,5 × s	3 × s
DD12	340	420	27	31		1 × s	1,5 × s
DD13	320	400	30	34	ca. 0,17		
DD14	300	380	33	37			

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de onderste vloeigrens voor andere materialen.
2) Geen waarden in de norm opgenomen. Opgegeven waarde afkomstig uit de literatuur. Gemiddelde van metingen loodrecht op, evenwijdig aan en onder 45° met de walsrichting.
3) Geen waarden in de norm opgenomen. Opgegeven waarden afkomstig uit literatuur. As van buigen is evenwijdig aan de walsrichting. Buighoek 90° (s = materiaaldikte).

tabel S.4 Thermisch verzinkt koudgewalst vervormingsstaal (zie A.4)

kwaliteit [1]	**oude aanduiding**	**rekgrens** [2] [N/mm²] max.	**treksterkte** [N/mm²] max.	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**n-waarde** [3]	**doorndiameter D bij buigproef** [4]
DX51D + Z/ZF	Fe P02 G Z		500	22		Z100 t/m Z275: D = 0 Z350: D ≥ 1 × s Z450 en Z600: D ≥ 2 × s
DX52D + Z/ZF	Fe P03 G Z	300	420	26	ca. 0,15	
DX53D + Z/ZF	Fe P05 G Z	260	380	30		
DX54D + Z/ZF	Fe P06 G Z	220	350	36	ca. 0,22	

1) Achter de Z komt een getal dat de zinklaagdikte in g/m² aangeeft.
2) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de onderste vloeigrens voor andere materialen.
3) Geen waarden in de norm opgenomen. Opgegeven waarden afkomstig uit de literatuur, gemeten loodrecht op de walsrichting.
4) Criterium bij deze buigproef is de hechting van de zinklaag en niet het scheuren van het basismateriaal. Buighoek 180° (s = materiaaldikte).

tabel S.5 Elektrolytisch verzinkt koudgewalst vervormingsstaal (zie A.5)

kwaliteit	**rekgrens** [2] [N/mm²] max.	**treksterkte** [N/mm²]	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**n-waarde** min.	**doorndiameter D bij buigproef** [4]
DC01 + ZE	280	270 - 410	28		0 × s
DC03 + ZE	240	270 - 370	34		0 × s
DC04 + ZE	220	270 - 350	37	0,16 [2]	0 × s
DC05 + ZE	190	270 - 330	39	0,19 [2]	0 × s
DC06 + ZE	190	270 - 350	37	0,20 [3]	0 × s

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de onderste vloeigrens voor andere materialen.
2) Gemeten loodrecht op de walsrichting.
3) Gemiddelde van de metingen loodrecht op, evenwijdig aan en onder 45° met de walsrichting.
4) Niet in de norm als eis opgenomen. Buighoek 180°, zowel loodrecht op als evenwijdig aan de walsrichting (s = materiaaldikte).

tabel S.6 Warmgewalst constructiestaal (zie B.1)

	rekgrens [1] [N/mm²] (min.)		**treksterkte** [N/mm²]		**minimale rek** [%]					
	nominale dikte [mm]				$L_0 = 80$ mm					$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_o}$
	≤ 16	> 16 ≤ 40	< 3	≥ 3 ≤ 100	≤ 1	> 1 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2	> 2 ≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3	≥ 3 ≤ 40
S235	235	225	360-510	340-470	15	16	17	18	19	24
S275	275	265	430-580	410-560	12	13	14	15	16	20
S355	355	345	510-680	490-630	12	13	14	15	16	20

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de bovenste vloeigrens. Bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont moet de 0,2% rekgrens worden bepaald.

tabel S.7 Minimumwaarden voor de doorndiameter voor de in tabel S.6 genoemde materialen (zie B1)

		nominale dikte [mm]								
		> 1 ≤ 1,5	> 1,5 ≤ 2,5	> 2,5 ≤ 3	> 3 ≤ 4	> 4 ≤ 5	> 5 ≤ 6	> 6 ≤ 7	> 7 ≤ 8	> 8 ≤ 10
S235( )C	⊥	3,2	5	6	10	12	16	20	24	32
	//	3,2	5	6	12	16	20	24	32	40
S275( )C	⊥	4	6	8	10	16	20	24	32	40
	//	4	6	8	12	20	24	32	40	50
S355( )C	⊥	5	8	10	12	16	20	24	32	40
	//	5	8	10	16	20	24	32	40	50

( ) Op deze plaats komt een nadere aanduiding te staan die de minimum kerfslagwaarde aangeeft en eventueel een nadere aanduiding wat betreft de levertoestand.
⊥: De as van de buiging is loodrecht op de walsrichting.
//: De as van de buiging is evenwijdig aan de walsrichting.

tabel S.8 Thermisch verzinkt warmgewalst constructiestaal (zie B.2)

kwaliteit	**oude aanduiding**	**rekgrens** [1] [N/mm²] min.	**treksterkte** [N/mm²] min.	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**n-waarde** [2]	**doorndiameter D bij buigproef** [3] min.
S220GD + Z/ZF	Fe E 220 G	220	300	20		1 × s
S250GD + Z/ZF	Fe E 250 G	250	330	19	ca. 0,18	1 × s
S280GD + Z/ZF	Fe E 280 G	280	360	18		2 × s
S320GD + Z/ZF	Fe E 320 G	320	390	17		3 × s
S350GD + Z/ZF	Fe E 350 G	350	420	16		3 × s [4]
S550GD + Z/ZF	Fe E 550 G	550	560	--		--

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de bovenste vloeigrens voor andere materialen.
2) In de norm geen waarden voor n opgenomen. Opgegeven waarden zijn afkomstig uit de literatuur, gemeten ⊥ walsrichting.
3) Criterium bij deze buigproef is de hechting van de zinklaag en niet het scheuren van het basismateriaal. De opgeven minimale doorndiameters gelden voor dikten ≤ 3 mm en een zinkbekledingslaagdikte van ≤ 450 gr/m² tweezijdig; buighoek 180°; s = materiaaldikte.
4) Buigdoorndiameter ≥ 4 × s voor productdikten > 1,5 mm.

tabel S.9 Warmgewalst normaalgegloeid staal (zie B.3)

kwaliteit [1]	**oude aanduiding**	**rekgrens** [1] [N/mm²] min.	**treksterkte** [N/mm²]	**rek** [%] $L_0 = 5{,}65\sqrt{S_o}$ min.	**doorndiameter D bij buigproef** [2] min.
S260NC	Fe E 275-TD	260	370 - 490	28	0 × s
S315NC		315	430 - 550	27	0,5 × s
S355NC	Fe E 355-TD	355	470 - 610	24	0,5 × s
S420NC	Fe E 420-TD	420	530 - 670	22	1 × s

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de bovenste vloeigrens voor andere materialen.
2) De buigproef wordt zodanig uitgevoerd dat de as van de buiging evenwijdig aan de walsrichting van het product ligt. Buighoek 180°; s = materiaaldikte.

tabel S.10 Thermomechanisch gewalst staal (zie B.4)

kwaliteit	**oude aanduiding**	**rekgrens** [1] [N/mm²] min.	**treksterkte** [N/mm²]	**rek** [%] (min.)		**n-waarde** [2] min.	**doorndiameter D bij buigproef** [3] min.
				dikte < 3 mm	dikte ≥ 3 mm		
				$L_0 = 80$ mm	$L_0 = 5{,}65\sqrt{S_o}$		
S315MC		315	390-510	20	24	ca. 0,17	0 × s
S355MC	Fe E 355-TM	355	430-550	19	23	ca. 0,15	0,5 × s
S420MC	Fe E 420-TM	420	480-620	16	19	ca. 0,13	0,5 × s
S500MC		500	550-700	12	14		1,5 × s
S550MC	Fe E 560-TM	550	600-760	12	14		1,5 × s

1) De waarden voor de rekgrens zijn die van de 0,2% rekgrens bij materiaal dat geen duidelijk vloeien vertoont en de bovenste vloeigrens voor andere materialen.
2) Geen waarden in de norm opgenomen. Gegeven waarden afkomstig uit literatuur; gemiddelde uit metingen loodrecht op, evenwijdig aan en onder 45° met de walsrichting.
3) De buigproef wordt zodanig uitgevoerd dat de as van de buiging evenwijdig aan de walsrichting van het product ligt. Buighoek 180°; s = materiaaldikte.

tabel S.11 Koudgewalst en zachtgegloeid verenstaal (zie C.1)

kwaliteit	**treksterkte** [N/mm²] max.	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**doorndiameter $D_{T,180°}$ resp. $D_{L,90°}$** (min.) **bij buigproef** [1] voor banddikten:		
			< 1,0	≥ 1,0 en < 2,0	≥ 2,0 en ≤ 3,0
C(k) 55	610	13	1 mm	2 × s	3 × s
C(k) 60	620	13	1 mm	2 × s	3 × s
C(k) 75	640	12	2 × s	2 × s	3 × s
Ck 101	690	11	2 × s	3 × s	4 × s
55 Si 7	740	10	2 × s	3 × s	4 × s
67 SiCr 5	800	9	2 × s	3 × s	4 × s

1) $D_{T,180°}$ resp. $D_{L,90°}$ = diameter van de buigdoorn waarom de proefstaaf 180° resp. 90° kan worden gebogen (buigproef volgens Euronorm 12-55) zonder dat scheuren optreedt (s = materiaaldikte).
D_T: as van buigen is loodrecht op de walsrichting.
D_L: as van buigen is evenwijdig aan de walsrichting.

tabel S.12 Koudgewalst gehard en ontlaten verenstaal (zie C.2)

kwaliteit	**0,2% rekgrens** [1] [N/mm²] min.	**treksterkte** [2] [N/mm²]	**rek** [%] [1] $L_0 = 80$ mm min.	**doorndiameter D bij buigproef** [4] min.	**dikte waarvoor waarden gelden** [mm] max.
C(k) 55		1150 - 1650			2,0
C(k) 60		1180 - 1680			2,0
C(k) 75	1275	1320 - 1870	6		2,5
Ck 101	1275	1500 - 2100	6	8 × s	2,0
55 Si 7	1080	1300 - 1800	6		2,0
67 SiCr 5	1325	1500 - 2200	5		3,0

1) Niet in de norm opgenomen. Waarden afkomstig uit literatuur. Globaal kan worden gesteld dat de 0,2% rekgrens ca. 100 N/mm² lager zal liggen dan de treksterkte.
2) Bij de bestelling kan een nauwer bereik voor de treksterkte worden vastgelegd. In het algemeen zal de spreiding op de treksterkte minimaal 200 N/mm² bedragen.
3) Niet in de norm opgenomen. Waarde afkomstig uit de literatuur. As van buigen loodrecht de walsrichting (s = materiaaldikte).

tabel S.13 Roestvast staal (zie D.1)

kwaliteit volgens:		**0,2% rekgrens** [N/mm²] min.	**treksterkte** [N/mm²]	**rek** [%] $L_0 = 80$ mm min.	**doorndiameter D bij buigproef** [2] min.	
NEN-EN 10 088	**ASTM**			l + d [1]	⊥	//
X 6 Cr 17	430	240	430 - 630	20	4 × s	n.a.
X 3 CrTi 17	430Ti	230	420 - 600	23	4 × s	n.a.
X 5 CrNi 18 10	304	190	520 - 720	45	1 × s	
X 2 CrNi 18 9	304L	175	450 - 680	45	1 × s	
X 6 CrNiTi 18 10	321	190	500 - 700	40	1 × s	
X 5 CrNiMo 17 12 2	316	200	500 - 700	40	1 × s	
X 2 CrNiMo 17 12 3	316L	200	500 - 700	40	1 × s	
X 6 CrNiMoTi 17 12 2	316Ti	200	500 - 700	40	1 × s	

1) l = gemeten evenwijdig aan de walsrichting.
d = gemeten loodrecht op de walsrichting.
2) Geen eisen in de norm opgenomen. Opgegeven waarden afkomstig uit literatuur.
⊥ wil zeggen dat de as van buigen loodrecht op de walsrichting ligt,
// wil zeggen dat de as van buigen evenwijdig aan de walsrichting is.
n.a. = niet aanbevolen.
Buighoek 180°; s = materiaaldikte.

tabel S.14 Roestvast verenstaal (X 12 CrNi 17 7) (zie D.2)

dikte s [mm]	**toestand**	**treksterkte** [N/mm²]	**doorndiameter D bij buigproef** [1] min.	
			⊥ w.r.	// w.r.
$0,1 < s \leq 0,25$	K1	1700 - 1900	5 × s	22 × s
	K2	2000 - 2200	7 × s	26 × s
$0,25 < s \leq 0,50$	K1	1600 - 1800	5 × s	22 × s
	K2	1900 - 2100	7 × s	26 × s
$0,50 < s \leq 0,75$	K1	1500 - 1700	5 × s	22 × s
	K2	1750 - 1950	10 × s	26 × s
$0,75 < s \leq 1,0$	K1	1400 - 1600	7 × s	22 × s
	K2	1650 - 1850	10 × s	28 × s
$1,0 < s \leq 1,6$	K1	1350 - 1550		
	K2	1550 - 1750		

1) Buighoek 90°; s = materiaaldikte.

tabel S.15 Aluminiumlegering EN AW-1050A (Al 99,5) (zie E) [1]

hardheidsgradatie volgens:		**dikte** [mm]		$R_{p\,0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]		**rek na breuk** A_{50} (min.) [%]	**buigdoorn D** [3] (min.)		**n-waarde** [4]
DIN 1745	EN 485-2	van	tot		min.	max.		180°	90°	
	F [2]	≥ 2,5	150,0		65					
W7	O/H111	≥ 0,2	0,5	20	65	95	20	0 × s	0 × s	0,27
		0,5	1,5	20	65	95	22	0 × s	0 × s	
		1,5	3,0	20	65	95	26	0 × s	0 × s	
		3,0	6,0	20	65	95	29	0,5 × s	0,5 × s	
F8	H12	≥ 0,2	0,5	65	85	125	2	0,5 × s	0 × s	0,05
		0,5	1,5	65	85	125	4	0,5 × s	0 × s	
		1,5	3,0	65	85	125	5	0,5 × s	0,5 × s	
		3,0	6,0	65	85	125	7	1 × s	1 × s	
F11	H14	≥ 0,2	0,5	85	105	145	2	1 × s	0 × s	0,03
		0,5	1,5	85	105	145	3	1 × s	0,5 × s	
		1,5	3,0	85	105	145	4	1 × s	1 × s	
		3,0	6,0	85	105	145	5		1,5 × s	
F15	H16	≥ 0,2	0,5	100	120	160	1		0,5 × s	
		0,5	1,5	100	120	160	2		1 × s	
		1,5	4,0	100	120	160	3		1,5 × s	
	H18	≥ 0,2	0,5	120	140		1		1 × s	
		0,5	1,5	120	140		2		2 × s	
		1,5	3,0	120	140		2		3 × s	
	H19	≥ 0,2	0,5	130	150		1			
		0,5	1,5	130	150		1			
		1,5	3,0	130	150		1			
G9	H22	≥ 0,2	0,5	55	85	125	4	0,5 × s	0 × s	0,17
		0,5	1,5	55	85	125	5	0,5 × s	0 × s	
		1,5	3,0	55	85	125	6	0,5 × s	0,5 × s	
		3,0	6,0	55	85	125	11	1 × s	1 × s	
G11	H24	≥ 0,2	0,5	75	105	145	3	1 × s	0 × s	
		0,5	1,5	75	105	145	4	1 × s	0,5 × s	
		1,5	3,0	75	105	145	5	1 × s	1 × s	
		3,0	6,0	75	105	145	8	1,5 × s	1,5 × s	
G13	H26	≥ 0,2	0,5	90	120	160	2		0,5 × s	0,045
		0,5	1,5	90	120	160	3		1 × s	
		1,5	4,0	90	120	160	4		1,5 × s	
	H28	≥ 0,2	0,5	110	140		2		1 × s	
		0,5	1,5	110	140		2		2 × s	
		1,5	3,0	110	140		3		3 × s	

1) Zie ook DIN 1745: Al99,5.
2) Slechts ter informatie.
3) s = materiaaldikte.
4) Niet in de norm. Opgegeven waarden afkomstig uit literatuur.

tabel S.16 Aluminiumlegering EN AW-5005 (AlMg1) (zie E) [1]

hardheidsgradatie volgens:		**dikte** [mm]		$R_{p\,0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]		rek na breuk A_{50} (min.) [%]	**buigdoorn D** [3] (min.)	
DIN 1745	EN 485-2	van	tot		min.	max.		180°	90°
	F [2]	≥ 2,5	80,0		100				
W11	O/H111	≥ 0,2	0,5	35	100	145	15	0 × s	0 × s
		0,5	1,5	35	100	145	19	0 × s	0 × s
		1,5	3,0	35	100	145	20	0,5 × s	0 × s
		3,0	6,0	35	100	145	22	1 × s	1 × s
F13	H12	≥ 0,2	0,5	95	125	165	2	1 × s	0 × s
		0,5	1,5	95	125	165	2	1 × s	0,5 × s
		1,5	3,0	95	125	165	4	1,5 × s	1 × s
		3,0	6,0	95	125	165	5	1 × s	1 × s
F15	H14	≥ 0,2	0,5	120	145	185	2	2 × s	0,5 × s
		0,5	1,5	120	145	185	2	2 × s	1 × s
		1,5	3,0	120	145	185	3	2,5 × s	1 × s
		3,0	6,0	120	145	185	4		2 × s
F17	H16	≥ 0,2	0,5	145	165	205	1		1 × s
		0,5	1,5	145	165	205	2		1,5 × s
		1,5	3,0	145	165	205	3		2 × s
		3,0	4,0	145	165	205	3		2,5 × s
F19	H18	≥ 0,2	0,5	165	185		1		1,5 × s
		0,5	1,5	165	185		2		2,5 × s
		1,5	3,0	165	185		2		3 × s
F21	H19	≥ 0,2	0,5	185	205		1		
		0,5	1,5	185	205		2		
		1,5	3,0	185	205		2		
G13	H22/32	≥ 0,2	0,5	80	125	165	4	1 × s	0 × s
		0,5	1,5	80	125	165	5	1 × s	0,5 × s
		1,5	3,0	80	125	165	6	1,5 × s	1 × s
		3,0	6,0	80	125	165	8		1 × s
G15	H24/34	≥ 0,2	0,5	110	145	185	3	1,5 × s	0,5 × s
		0,5	1,5	110	145	185	4	1,5 × s	1 × s
		1,5	3,0	110	145	185	5	2 × s	1 × s
		3,0	6,0	110	145	185	6		2 × s
G17	H26/36	≥ 0,2	0,5	135	165	205	2		1 × s
		0,5	1,5	135	165	205	3		1,5 × s
		1,5	3,0	135	165	205	4		2 × s
		3,0	4,0	135	165	205	4		2,5 × s
G19	H28/38	≥ 0,2	0,5	160	185		1		1,5 × s
		0,5	1,5	160	185		2		2,5 × s
		1,5	3,0	160	185		3		3 × s

1) Zie ook DIN 1745: AlMg1.
2) Slechts ter informatie.
3) s = materiaaldikte.

tabel S.17 Aluminiumlegering EN AW-5251 (AlMg2) (zie E) [1]

hardheidsgradatie volgens:		**dikte** [mm]		$R_{p\,0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]		**rek na breuk** A_{50} (min.) [%]	**buigdoorn D** [3] (min.)	
DIN 1745	EN 485-2	van	tot		min.	max.		180°	90°
	F [2]	≥ 2,5	80,0		160				
W16	O/H111	≥ 0,2	0,5	60	160	200	13	0 × s	0 × s
		0,5	1,5	60	160	200	14	0 × s	0 × s
		1,5	3,0	60	160	200	16	0,5 × s	0,5 × s
		3,0	6,0	60	160	200	18		1 × s
F19	H12	≥ 0,2	0,5	150	190	230	3	2 × s	0 × s
		0,5	1,5	150	190	230	4	2 × s	1 × s
		1,5	3,0	150	190	230	5	2 × s	1 × s
		3,0	6,0	150	190	230	8		1,5 × s
F21	H14	≥ 0,2	0,5	170	210	250	2	2,5 × s	0,5 × s
		0,5	1,5	170	210	250	2	2,5 × s	1,5 × s
		1,5	3,0	170	210	250	3	2,5 × s	1,5 × s
		3,0	6,0	170	210	250	4		2 × s
F23	H16	≥ 0,2	0,5	200	230	270	1	3,5 × s	1 × s
		0,5	1,5	200	230	270	2	3,5 × s	1,5 × s
		1,5	3,0	200	230	270	3	3,5 × s	2 × s
		3,0	4,0	200	230	270	3		3 × s
F26	H18	≥ 0,2	0,5	230	255		1		
		0,5	1,5	230	255		2		
		1,5	3,0	230	255		2		
	H22/32	≥ 0,2	0,5	120	190	230	4	1,5 × s	0 × s
		0,5	1,5	120	190	230	6	1,5 × s	1 × s
		1,5	3,0	120	190	230	8	1,5 × s	1 × s
		3,0	6,0	120	190	230	10		1,5 × s
G21	H24/34	≥ 0,2	0,5	140	210	250	3	2 × s	0,5 × s
		0,5	1,5	140	210	250	5	2 × s	1,5 × s
		1,5	3,0	140	210	250	6	2 × s	1,5 × s
		3,0	6,0	140	210	250	8		2,5 × s
G23	H26/36	≥ 0,2	0,5	170	230	270	3	3 × s	1 × s
		0,5	1,5	170	230	270	4	3 × s	1,5 × s
		1,5	3,0	170	230	270	5	3 × s	2 × s
		3,0	4,0	170	230	270	7		3 × s
	H28/38	≥ 0,2	0,5	200	255		2		
		0,5	1,5	200	255		3		
		1,5	3,0	200	255		3		

1) Zie ook DIN 1745: AlMg2 Mn0,3.
2) Slechts ter informatie.
3) s = materiaaldikte.

tabel S.18 Aluminiumlegering EN AW-5754 (AlMg3) (zie E) [1]

hardheidsgradatie volgens:		**dikte** [mm]		$R_{p\,0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]		**rek na breuk** A_{50} (min.) [%]	**buigdoorn D** [3] (min.)		**n-waarde** [4]
DIN 1745	EN 485	van	tot		min.	max.		180°	90°	
	F [2]	≥ 2,5	80,0		190					
W19	O/H111	≥ 0,2	0,5	80	190	240	12	0,5 × s	0 × s	0,22
		0,5	1,5	80	190	240	14	0,5 × s	0,5 × s	
		1,5	3,0	80	190	240	16	1 × s	1 × s	
		3,0	6,0	80	190	240	18	1 × s	1 × s	
F22	H12	≥ 0,2	0,5	170	220	270	4			
		0,5	1,5	170	220	270	5			
		1,5	3,0	170	220	270	6			
		3,0	6,0	170	220	270	7			
F24	H14	≥ 0,2	0,5	190	240	280	3			0,16
		0,5	1,5	190	240	280	3			
		1,5	3,0	190	240	280	4			
		3,0	6,0	190	240	280	4			
F27	H16	≥ 0,2	0,5	220	265	305	2			
		0,5	1,5	220	265	305	3			
		1,5	3,0	220	265	305	3			
		3,0	6,0	220	265	305	3			
F29	H18	≥ 0,2	0,5	250	290		1			0,12
		0,5	1,5	250	290		2			
		1,5	3,0	250	290		2			
G22	H22/32	≥ 0,2	0,5	130	220	270	7	1,5 × s	0,5 × s	
		0,5	1,5	130	220	270	8	1,5 × s	1 × s	
		1,5	3,0	130	220	270	10	2 × s	1,5 × s	
		3,0	6,0	130	220	270	11		1,5 × s	
G24	H24/34	≥ 0,2	0,5	160	240	280	6	2,5 × s	1 × s	
		0,5	1,5	160	240	280	6	2,5 × s	1,5 × s	
		1,5	3,0	160	240	280	7	2,5 × s	2 × s	
		3,0	6,0	160	240	280	8		2,5 × s	
G27	H26/36	≥ 0,2	0,5	190	265	305	4		1,5 × s	
		0,5	1,5	190	265	305	4		3 × s	
		1,5	3,0	190	265	305	5		3 × s	
		3,0	6,0	190	265	305	6		3,5 × s	
	H28/38	≥ 0,2	0,5	230	290		3			
		0,5	1,5	230	290		3			
		1,5	3,0	230	290		4			

1) Zie ook DIN 1745: AlMg3.
2) Slechts ter informatie.
3) s = materiaaldikte.
4) Niet in de norm. Opgegeven waarden afkomstig uit literatuur.

tabel S.19 Aluminiumlegering EN AW-6082 AlSi1MgMn (zie E) [1]

hardheidsgradatie volgens:		**dikte** [mm]		$R_{p\,0,2}$ [MPa]		R_m [MPa]		**rek na breuk** A_{50} (min.) [%]	**buigdoorn D** [2] (min.)	
DIN 1745	EN 485	van	tot	min.	max.	min.	max.		180°	90°
W	O	≥ 0,4	1,5		85		150	14	1 × s	0,5 × s
		1,5	3,0		85		150	16	1 × s	1 × s
		3,0	6,0		85		150	18		1,5 × s
F21	T4 T451	≥ 0,4	1,5	110		205		12	3 × s	1,5 × s
		1,5	3,0	110		205		14	3 × s	2 × s
		3,0	6,0	110		205		15		3 × s
F21	T42	≥ 0,4	1,5	95		205		12		1,5 × s
		1,5	3,0	95		205		14		2 × s
		3,0	6,0	95		205		15		3 × s
F32	T6 T651 T62	≥ 0,4	1,5	260		310		6		2,5 × s
		1,5	3,0	260		310		7		3,5 × s
		3,0	6,0	260		310		10		4,5 × s
F28	T61 T6151	≥ 0,4	1,5	205		280		10		2 × s
		1,5	3,0	205		280		11		2,5 × s
		3,0	6,0	205		280		11		4 × s

1) Zie ook DIN 1745: AlMgSi1.
2) In oplosgegloeide toestand kleinere buigdoorn mogelijk; s = materiaaldikte.

S.3 *Gereedschapmaterialen*

Bij de keuze van het gereedschapmateriaal moet rekening worden gehouden met:

- het aantal met het gereedschap te maken producten (slijtage);
- de mogelijkheid van het gebruik van bijvoorbeeld geharde inzetstukken op de zwaar belaste plaatsen;
- de hoogte van de optredende krachten;
- het productmateriaal dat met het gereedschap moet worden verwerkt, de toelaatbare aftekening en beschadiging;
- economische factoren als verkrijgbaarheid, bewerkbaarheid, prijs per eenheid materiaal.

In tabel S.20 zijn de meest toegepaste materialen en hun gebruikstoestand voor buiggereedschappen samengevat.

tabel S.20 Meest toegepaste materialen voor buiggereedschappen

toepassingsgebied	materiaal (Werkstoffnummer DIN 17007)	norm	hoofdlegerings-bestanddeel	leveringstoestand		eigenschappen in aanbevolen gebruikstoestand		afkoelmedium bij het harden	gebruikstoestand, opmerkingen of speciale behandeling
				R_m [N/mm²]	hardheid	toelaatbare druksp. [N/mm²]	hardheid		
▸ zwaar belast gereedschap ▸ vooral toepasbaar voor ongelegeerd staal, draad en tranenplaat	1 C 45 (1.0503) (constructiestaal)	EN 10083	C 0,42-0,50% Mn 0,5-0,8% Si ≤ 0,40%	ca. 350 afhankelijk van de dikte	200 HB		ca. 600 HV		▸ aanbevolen gebruikstoestand = inductiegehard
▸ licht belast gereedschap ▸ kleine aantallen producten ▸ goedkoop gereedschap ▸ gereedschap is weinig slijtvast ▸ toepasbaar voor ongelegeerd staal, aluminium, messing en brons ▸ speciaal geschikt voor corrosievast staal (aluminium brons)	AMPCO 25		Cu Hfd Al 14,1% Fe 4,7% rest 0,51%	620-720	335 HB	ca. 560	335 HB		▸ aanbevolen gebruikstoestand = leveringstoestand ▸ speciaal geschikt voor corrosievast staal om contaminatiecorrosie te voorkomen ▸ AMPCO 25 is iets brosser dan AMPCO 22 ▸ eigenschappen in de gesmede of geperste toestand weergeven ▸ materiaal kan ook als gietstuk geleverd worden, de mechanische eigenschappen zijn dan iets lager ▸ wordt als inzetstuk gebruikt i.v.m. de hoge kostprijs
	AMPCO 22		Cu Hfd Al Fe	690-725	375 HB	ca. 700	375 HB		
▸ zwaarder belaste gereedschappen ▸ duurder dan bovenstaande materialen ▸ hogere weerstand tegen slijtage dan boven ▸ toepassing voor ongelegeerd staal, aluminium, messing, brons ▸ in genitreerde toestand zeer geschikt voor zetten van aluminium en RVS ▸ in inductie geharde toestand geschikt voor draad, tranenplaat ▸ redelijk groot aantal te produceren producten	40 CrMnMoS 8 6 (1.2312) TQ + T (veredeld staal)	DIN 17350	C 0,40% Cr 1,9% Mn 1,5% Mo 0,20% S 0,06%	1200 afhankelijk van de dikte	300-340 HV	900	300-340 HV	–	▸ aanbevolen gebruikstoestand = leveringstoestand ▸ materiaal wordt veredeld geleverd ▸ beperkte weerstand tegen slijtage ▸ voor gebruik bij RVS en aluminium nitreren, bij tranenplaat en draad inductieharden ▸ door nitreren is de oppervlaktehardheid te verhogen tot ca. 600 HV ▸ door het hoge zwavelgehalte is het materiaal redelijk goed te verspanen, echter minder goed hoogglans te polijsten
	42 CrMo 4 TQ + T (1.7225) (veredeld staal)	NEN EN 100 85	C 0,38-0,45% Cr 0,9-1,2% Mo 0,15-0,30%	1200 afhankelijk van de dikte	300-340 HV	900	300-340 HV	–	▸ aanbevolen gebruikstoestand = leveringstoestand ▸ materiaal wordt veredeld geleverd ▸ beperkte weerstand tegen slijtage ▸ voor gebruik bij RVS en aluminium nitreren ▸ door nitreren is de oppervlaktehardheid te verhogen tot ca. 600 HV ▸ het materiaal is slechter verspaanbaar dan 40 CrMnMoS 8 6, maar beter verkrijgbaar, goedkoper en beter polijstbaar
▸ zwaar belast gereedschap ▸ grote weerstand tegen slijtage ▸ groot aantal te produceren producten (volgbuiggereedschappen) ▸ gereedschap wordt duurder ▸ toepasbaar voor ongelegeerd staal, aluminium, messingbrons	90 MnCrV 8 (1.2842) (gelegeerd hardbaar staal)	DIN 17350	C 0,90% Mn 2,0% Cr 0,3% V 0,1%	–	210 HB	2550	56-62 HRc	olie/ zoutbad	▸ aanbevolen gebruikstoestand = gehard ▸ staal moet in de geharde conditie worden toegepast ▸ staal wordt bij het harden in olie afgeschrikt: enige vervorming ▸ beperkte weerstand tegen adhesieve slijtage, wel goed tegen abrasieve slijtage ▸ wordt vooral toegepast bij hoge krachten op het gereedschap
▸ als boven, echter speciaal geschikt voor corrosievast staal	X 155CrVMo 12 1 (1.2379) (gelegeerd hardbaar staal)	DIN 17350	C 1,55% Cr 12,0% Mo 0,8% V 0,8% Mn 0,3% Si 0,3%		230 HB	2800-3100	60-62 HRc	lucht/ olie/ zoutbad	▸ aanbevolen gebruikstoestand = gehard ▸ om contaminatiecorrosie te voorkomen moet het geharde staal nog een behandeling ondergaan, die bestaat uit: - of nitreren: dit geeft enigszins een bescherming tegen contaminatiecorrosie - of het gereedschap voorzien van een PVD laag van TiN: dit geeft een zeer goede bescherming tegen contaminatiecorrosie ▸ wordt vooral toegepast wanneer hoge slijtageweerstand van belang is
▸ zeer zwaar belast gereedschap ▸ zeer grote aantallen producten (volgbuiggereedschappen) ▸ kleine producten ▸ zeer duur gereedschap ▸ zeer goede weerstand tegen slijtage	S 6-5-2 (1.3343)		C 0,9% Si 0,5% Mn 0,4% Co 1,0% Cr 3,5-4,5% Mo 4,6-5,3% V 1,7-2,2% W 5,7-6,7%		225-280 HB		60-64 HRc	lucht/ olie/ zoutbad	▸ wordt vooral toegepast bij extreem hoge krachten op het gereedschap ▸ grote weerstand tegen slijtage

In de praktijk worden voor de vrijbuig-, matrijsbuig- en zwenkbuiggereedschappen voornamelijk 1 C 45 (na inductieharden) en 42 CrMo 4 (TQ + T) als materiaalsoort toegepast. Bij extreem belaste kantpersgereedschappen kan hoogwaardiger materiaal als inzetstuk worden toegepast, bijvoorbeeld 90 MnCrV 8. In strijkbuiggereedschappen, zoals in de meeste volgbuiggereedschappen worden, i.v.m. de hogere processnelheden ook hoogwaardigere materialen gebruikt (bijv. 90 MnCrV 8, X 155CrVMo 12 1 of S 6-5-2).

Door middel van het toepassen van hardings- of oppervlaktebehandelingsprocédés kunnen de eigenschappen van de gereedschappen worden verbeterd. Nitreren, inductieharden, vlamharden en laserharden zijn alternatieven.

Nitreren is aan te bevelen voor ondermatrijzen die worden ingezet om aluminium, corrosievast staal of verzinkte staalplaat te buigen. Koudlas wordt hiermee tegengegaan en het schoonhouden van de gereedschappen is eenvoudiger. Met inductie-, vlam- en laserharden zijn grotere gehardelaagdiktes te realiseren. Niet alleen de slijtagebestendigheid wordt hierdoor verhoogd, ook de plaatselijke drukbelastbaarheid wordt hoger, hetgeen belangrijk is bij het buigen van draad of tranenplaat.

S.4 *Smeermiddelen*

Bij het vrijbuigen en zwenkbuigen worden zelden smeermiddelen gebruikt, omdat het contact tussen gereedschap

en productmateriaal relatief licht is. Soms wordt er een beschermfolie op de plaat gebruikt. Bij het strijkbuigen en matrijsbuigen (zeker in volgbuiggereedschappen, bij grote buigradii en/of grote materiaaldikten) komt smering vaker voor.
De smeermiddelen worden toegepast om het contact tussen gereedschap en productmateriaal te verminderen of te voorkomen. Het dient vooral voor het reduceren van wrijving en aanladen van het product- op het gereedschapmateriaal (koudlassen).

Wanneer er smeermiddelen worden gebruikt, dan hebben deze in het algemeen een viscositeit tussen 30 en 130°cSt. Tabel S.21 geeft voor een aantal materialen een indicatie voor het type smeermiddel dat kan worden gebruikt. Voor diepergaande informatie over smeermiddelen wordt bovendien verwezen naar de VM-Publicatie VM 111 "Materialen".

tabel S.21 Indicatie voor de keuze van smeermiddelen. De viscositeitsaanduidingen in deze tabel hebben uitsluitend betrekking op olie. Verder worden andere toepasbare smeermiddelen genoemd

productmateriaal	**viscositeit in relatie tot het proces**		**opmerkingen/ beperkingen**
	L	**L; M**	
staal	1; 2 E	2; 3 E	
verzinkt staal	1 E	2; 3 E	emulsies zonder S, S_1 en P; voorzichtig in verband met snel optreden van witte vlekken bij onderling contact van de producten; pH ≤ 8,8.
aluminium en -legeringen	1 E; F	2 E; F	bij folie mag ook emulsie worden gebruikt; bij emulsie moet de pH-waarde ≤ 9,0 zijn, zonder S, S_1 en P.
roestvast staal 304	1; 2 E; F	2 E; F	gebruik bij folie, ook vette, grof disperse emulsies of oliën, enz. zonder S.
roestvast staal 430	1; 2 E; F	2; 3 E; F	als roestvast staal 304
koper en -legeringen	1; 2 E	1; 2; 3 E	oliën of emulsies zonder S, S_1 en P.

procesindeling:
L = licht
M = middel

viscositeit smeermiddelen:
1 < 30
2 30 - 70
3 70 - 130

F = folie
E = emulsie (olie in water)

S = actieve zwavelverbindingen
S_1 = inactieve zwavel
P = fosforkoolwaterstoffen

Supplement "machines en gereedschappen"

M.1 *Inleiding*

In dit supplement "Machines en gereedschappen" worden de meest voorkomende machines en gereedschappen, nodig voor het uitvoeren van de buigbewerkingen, besproken.

Het is evenwel zeer gewenst ook kennis te nemen van de algemene publicatie VM 112," Machines en gereedschappen", waarin de volgende onderwerpen worden besproken:
- persen en randapparatuur;
- bouw en eigenschappen van de persen waarmee, met behulp van specifieke gereedschappen als buigstempels en volgsnijbuigstempels, producten worden vervaardigd;
- aanschaf en onderhoud van persen en randapparatuur;
- opstellen van een specificatie voor aanschaf van een machine;
- aan- en afvoer van materiaal en producten;
- gereedschappen;
- de interactie tussen pers en gereedschap;
- aanschaf en onderhoud van gereedschap;
- wisselen en spannen van gereedschap;
- meten van producten;
- instructies en veiligheid;
- overzicht van normen voor machines en gereedschappen voor het vervormen van plaat.

De keuze voor de aanschaf van productiemiddelen, machines, gereedschappen en randapparatuur, wordt in sterke mate bepaald door:
- de ervaring met bepaalde productieprocessen;
- het huidige en/of gewenste productiepakket;
- het soort producten dat wordt vervaardigd;
- de te leveren aantallen producten en de grootte van de productieruns;
- de vereiste nauwkeurigheid van de producten;
- de opbouw van het bestaande machinepark;
- de graad van mechanisatie en automatisering.

Om uiteindelijk tot de juiste keuze voor aanschaf van de productiemiddelen te komen, zijn ook andere dan louter technische aspecten van belang.
Daarover in het kort het volgende.

Het merendeel van de bedrijven beschikt over een ondernemingsplan, waarin de ondernemer, met ondersteuning van de staf, zijn visie op het bedrijf heeft beschreven. Een onderdeel daarvan is een investeringsplan, waarin is aangegeven wanneer welke investering moet worden gedaan bij een zekere situatie. Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen:
a. Vervangingsinvestering: bijvoorbeeld een machine wordt vervangen door een nieuwe met dezelfde mogelijkheden.
b. Uitbreidingsinvestering: bijvoorbeeld aanschaf van een machine met meer of andere productiemogelijkheden, nodig voor een nieuw product of technologie.

Het valt buiten het bestek van deze publicatie verder op de materie in te gaan, zodat wordt volstaan met het noemen van enkele criteria, zoals onder meer:
- flexibel investeringsbeleid, d.w.z. kunnen inspelen op technologische ontwikkelingen;
- seriegrootte van de te leveren producten;
- bezettingsgraad van het beschikbare machinepark;
- investeringsalternatieven;
- universele of specifieke productiemiddelen;
- technische en economische levensduur;
- terugverdientijd van de investering;
- rendement op geïnvesteerd vermogen;

Naast de economische zijn ook de organisatorische consequenties bij het introduceren van nieuwe machines, gereedschappen of technologieën, van belang.

Met het bovenstaande is globaal aangegeven dat investeren een complexe materie is, waarbij zowel technische, economische als organisatorische aspecten moeten worden afgewogen.

Dit supplement heeft tot doel inzicht te geven in de technische mogelijkheden van de verschillende machines en gereedschappen.
Omdat de bewerking "buigen" echter in zeer veel variaties wordt uitgevoerd, van eenvoudig inlegwerk op universele machines tot zeer geavanceerde CNC bestuurde processen op specifieke machines, is het gewenst het besprekingsgebied voor dit supplement enigszins af te bakenen.

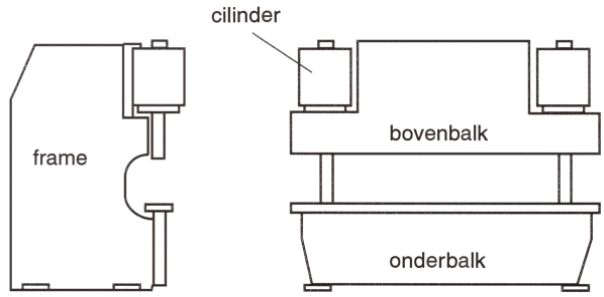
De volgende onderwerpen komen aan de orde:
- de universele kantpersen, zowel boven- als onderaangedreven uitvoeringen;
- de universele zwenkbuigmachines;
- de strijkbuigmachines;
- de buigautomaten;
- hulpmiddelen als bombering en spanmiddelen;
- gereedschappen voor genoemde machines.

Opmerking: *De persen voor onder andere volggereedschappen zijn reeds besproken in de algemene publicatie VM 112 "Machines en gereedschappen".*

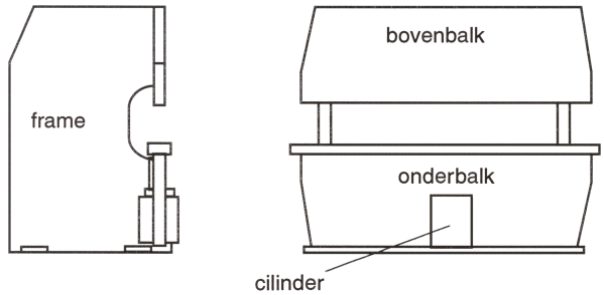
M.2 *Universele machines*

M.2.1 *De kantpers*

De kantpers is een op plaatbuigen gerichte, verticaal bewegende pers.
In de meest elementaire vorm bestaat de pers uit een frame, een onderbalk met daarop eventueel een tafel, een bovenbalk en een aandrijving die, afhankelijk van de soort pers, voor de verplaatsing van een van de balken zorgt. Er bestaan zowel boven- als onderaangedreven persen (zie figuur M.2.1 en M.2.2).



figuur M.2.1 Kantpers met hydraulische bovenaandrijving



figuur M.2.2 Kantpers met hydraulische onderaandrijving

Voor het positioneren van de te buigen plaat is een aanslagsysteem nodig dat aan de onderbalk, of perstafel, is bevestigd. Bij persen met bovenaandrijving, gewoonlijk twee hydraulische cilinders, is de onderbalk vast en beweegt de bovenbalk.
Bij persen met onderaandrijving, meestal een hydraulische cilinder, is de bovenbalk vast en beweegt de onderbalk, hetgeen inhoudt dat ook het aanslagsysteem de beweging meemaakt. Het gevolg is dat de constructie zwaarder wordt. Daarom worden kantpersen met onderaandrijving

alleen gebruikt voor het lichtere buigwerk. Een voordeel is overigens wel de slanke bouwwijze van de bovenbalk en de vrije ruimte erachter.

Het overgrote deel van de kantpersen heeft bovenaandrijving en een vaste onderbalk. De persbalk moet een nauwkeurig te regelen verticale slag kunnen maken. Deze slag is namelijk bepalend voor de buignauwkeurigheid van de kantpers (indringdiepte).

Er zijn in de kantpersenbouw veel verschillende uitvoeringen mogelijk. In deze paragraaf wordt een aantal aspecten - die alle uitvoeringen gemeen hebben - toegelicht, te weten:
- de aandrijving;
- het frame;
- de stijfheid;
- de hoofd- en hulpfuncties.

M.2.1.1 *De aandrijving*

De benodigde energie voor het vervormen van het materiaal wordt via de persbalk toegevoerd. De krachtbron is vrijwel altijd een elektromotor.

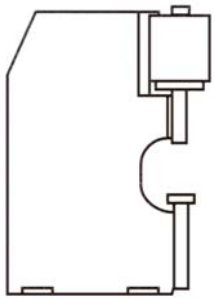
De daardoor opgewekte kracht kan op de volgende wijzen worden overgebracht:
- mechanisch.
- hydraulisch, via hydraulische pomp en hydraulische cilinders:
  - met mechanische diepte-aanslag;
  - met elektronische diepte-aanslag.
- servo mechatronisch, via servomotoren en transmissie (zie figuur M.2.3).

figuur M.2.3 Servo mechatronische kantpers

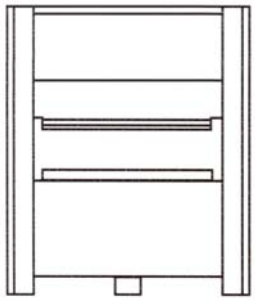
Het type aandrijving heeft veel invloed op de mogelijkheden van de pers. In tabel M.2.1 worden een aantal eigenschappen van de verschillende aandrijvingen vergeleken.
Een mechanische kantpers is bijzonder geschikt voor hoge productiesnelheden bij een vaste slaglengte, een hydraulische en servo mechanische kantpers voor vrij programmeerbare slaglengten en snelheden.

M.2.1.2 *Het frame*

De perskracht wordt opgevangen door het frame.
Gebruikelijke bouwprincipes zijn:
- het C-frame, zie figuur M.2.4;
- het O-frame, zie figuur M.2.5.



figuur M.2.4 Kantpers met C-frame



figuur M.2.5 Pers met portaal-frame

Het C-frame geeft een vrije toegang vanaf de zijkant van de kantpers. Dit geeft voordelen voor het uitschuiven van lange, doosvormige producten en voor het wisselen van gereedschappen vanaf de zijkant.
Een O-frame is stijver dan een C-frame en heeft een symmetrisch veergedrag en is daardoor, voor dezelfde perskracht, lichter geconstrueerd.

M.2.1.3 *De stijfheid*

Het bovengereedschap (stempel) wordt bevestigd aan de persbalk. Het ondergereedschap (matrijs) wordt bevestigd op de onderbalk.

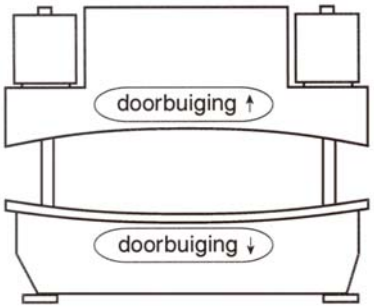
tabel M.2.1 Indicatie van maximale waarden en afmetingen van mechanisch, hydraulisch en servomechanisch aangedreven persen

uitvoering	**conventionele besturing**		**numerieke besturing**	
type aandrijving	**mechanisch**	**hydraulisch**		**servo mechanisch**
type diepte-aanslag	mechanisch (vaste slag)	mechanisch	elektronisch	elektronisch
maximum perskracht	4500 kN	20.000 kN	20.000 kN	2000 kN
gemiddelde perssnelheid	20 mm/sec	10 mm/sec	10 mm/sec	20 mm/sec
geschikt voor ponsen	tot 100 % van de maximum perskracht	tot 50 % van de maximum perskracht	tot 50 % van de maximum perskracht	tot 50 % van de maximum perskracht
omsteltijd voor verschillende hoeken	lang	lang	kort	kort
nauwkeurigheid diepteregeling	matig	matig	goed	goed
geschikt voor excentrische belasting	minder geschikt	minder geschikt	uitermate geschikt	geschikt
kans op overbelasting	groot	klein	klein	klein
tonnageregeling	onnauwkeurig	nauwkeurig	nauwkeurig	nauwkeurig
mogelijkheid tot matrijsbuigen	aanwezig	aanwezig	aanwezig	aanwezig

De bedoeling van een kantpers is dat het drukvlak van de persbalk parallel blijft aan het drukvlak van de onderbalk.

Doorbuigen van een hydraulisch aangedreven pers

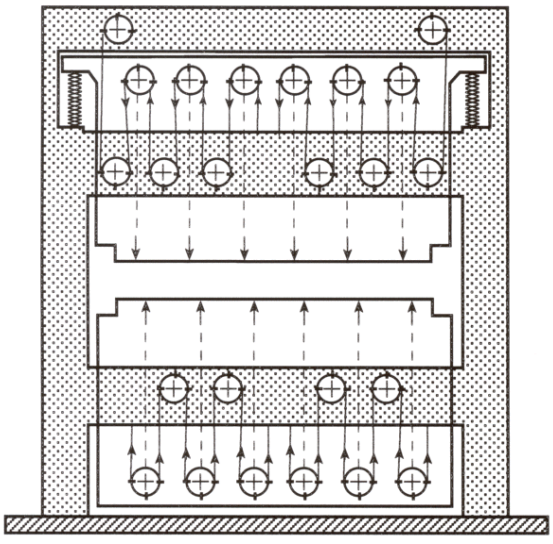
Doordat op een hydraulisch aangedreven kantpers de aandrijfkrachten, c.q. reactiekrachten meestal aangrijpen op twee punten van de bovenbalk, c.q. de onderbalk, vertonen deze balken bij belasting een doorbuiging (figuur M.2.6)
Deze doorbuiging van de persbalk en de onderbalk geeft, wanneer geen tegenmaatregelen als bomberen of voorspannen worden genomen, een parallelliteitsafwijking. Dit resulteert in een hoekafwijking in het midden ten opzichte van de zijkanten van de kantpers. Voorts is een gelijkloopbesturing nodig, die voorkomt, dat de persbalk niet evenwijdig blijft aan de onderbalk.
Bij het bomberen of het voorspannen wordt de doorbuiging van de persbalk of de onderbalk gecorrigeerd door bol maken van het drukvlak. Dit wordt ingesteld aan de hand van de te verwachten perskracht. Bij conventionele kantpersen wordt dit handmatig gedaan. Bij numeriek bestuurde kantpersen wordt dit meestal door middel van een "programma" mechanisch of hydraulisch ingesteld (zie § 4.1).



figuur M.2.6 Parallelliteitsafwijking, doorbuiging, tengevolge van de buigkrachten

Doorbuigen van een servo-mechanisch aangedreven pers

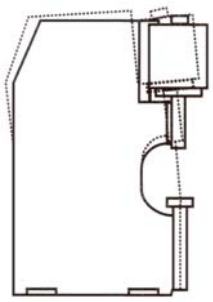
Doordat op een servo-mechanisch aangedreven kantpers de aandrijfkrachten aangrijpen op meerdere punten over de volle lengte van de persbalk, zal deze pers bij belasting aanmerkelijk minder doorbuigen (zie figuur M.2.7). Wanneer dit principe voor zowel de onder- als de bovenbalk wordt toegepast, kunnen compensatiemaatregelen tegen het doorbuigen geheel achterwege blijven.



figuur M.2.7 Reduceren van de doorbuiging door gelijkmatige verdeling van de aandrijf- c.q. reactiekrachten

Uitvering van het C-frame

De stijfheid van het C-frame bepaalt in hoge mate de weerstand tegen uitvering. Door de uitvering kan een hoekafwijking ontstaan (zie figuur M.2.8).



figuur M.2.8 Uitvering C-frame

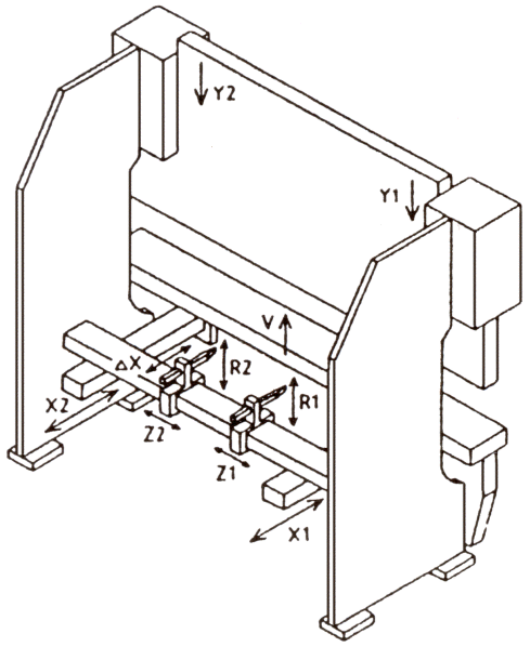
De hoekafwijking wordt bij kantpersen veelal met een elektronische diepte-aanslag gecompenseerd, door een zogenaamd belastingonafhankelijk meetframe.

Bij een O-frame zal het uitveren in mindere mate optreden, omdat het frame in deze richting symmetrisch is opgebouwd en daardoor alleen op trek wordt belast.

M.2.1.4 *De hoofd- en hulpfuncties*

Een kantpers kan een aantal bewegende delen hebben (zie ook figuur M.2.9), die nodig zijn voor het functioneren, zoals:
- de persbalkverstelling (Y-as);
- de horizontale achteraanslagverplaatsing (X-as);
- de verticale achteraanslagverplaatsing (R-as);
- de horizontale achteraanslagvingerverplaatsing (Z-as);
- het voorspannen van de onderbalk (V-as).

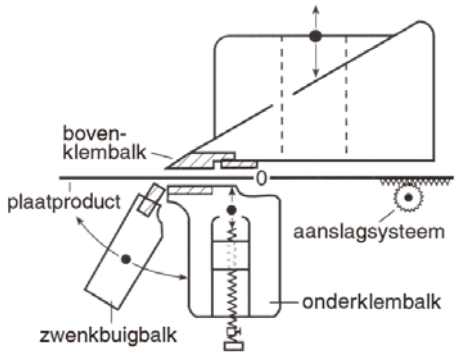
De verschillende hulpfunctie-assen worden voornamelijk toegepast om de in- en omsteltijden te verkorten.



figuur M.2.9 Overzicht van hoofd- en hulpfunctie assen op een kantpers

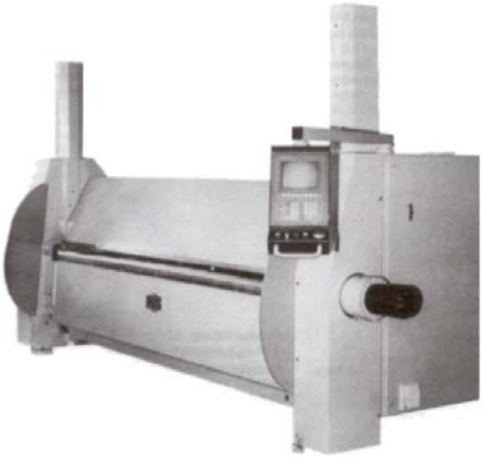
M.2.2 *De zwenkbuigmachine*

De machines die volgens het zwenkbuigprincipe werken worden dikwijls zetbank, vingerzetbank of zwenkbuigmachine genoemd.
Weliswaar hebben de verschillende machines eigen kenmerken, maar het basisprincipe is gelijk.
De belangrijkste functies van de zwenkbuigmachine zijn weergegeven in figuur M.2.10.



figuur M.2.10 Functies bij een zwenkbuigmachine

Het productmateriaal wordt gepositioneerd door een aanslagsysteem en geklemd tussen de onderklembalk en de bovenklembalk, vervolgens wordt de buiging uitgevoerd door de zwenkbuigbalk.
Het meest voorkomende type machine bestaat uit twee gekoppelde zijstaanders, waartussen de drie eerdergenoemde balken zijn opgenomen (zie figuur M.2.11).

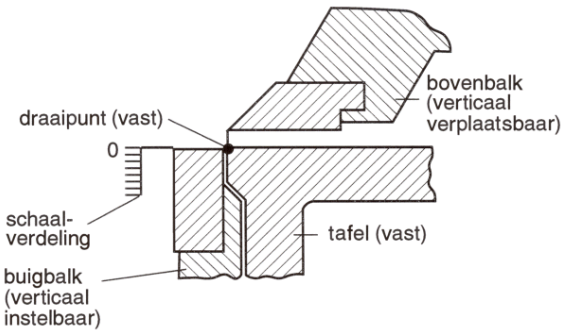


figuur M.2.11 Zwenkbuigmachine met twee staanders

Van dit type machine bestaan meerdere uitvoeringsvormen:

1. **De machine met een vaste opstelling van zowel de tafel als het draaipunt, scharnierpunt, van de buigbalk**

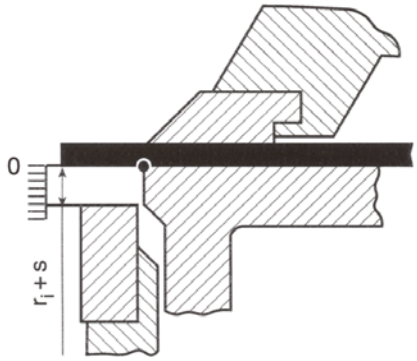
   Bij deze machine (zie figuur M.2.12) vallen de hoekpunten van de tafel en van de druklijst samen met het draaipunt van de buigbalk.
   De bovenbalk kan in verticale richting worden verplaatst, zodat het product kan worden geklemd.



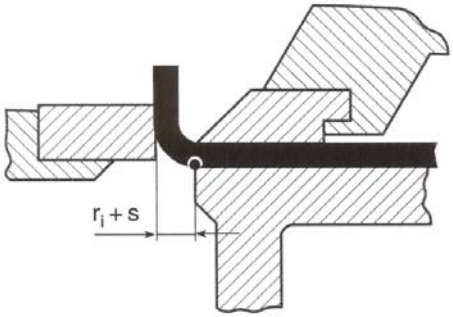
figuur M.2.12 Machine met een vaste opstelling van zowel de tafel als het draaipunt, scharnierpunt, van de buigbalk

   De buigbalk is eveneens in hoogte instelbaar.
   In de figuren M.2.13 en M.2.14 is de situatie voor en na het buigen weergegeven.

   Uit die figuren blijkt dat de buigbalk moet worden versteld over een afstand $r_i + t$ mm.



figuur M.2.13 Afstellen van de buigbalk

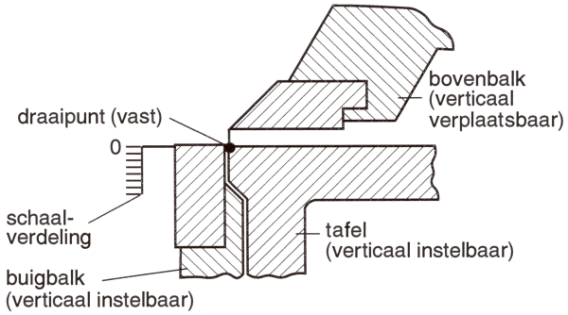


figuur M.2.14 Gebogen product

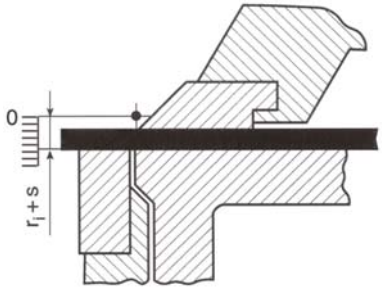
   Opmerking: *Een nadeel van deze machine is dat het eerste contact tussen de buigbalk en het productmateriaal een lijncontact is, waardoor het product kan beschadigen.*

2. **De machine met een verticaal instelbare tafel en buigbalk ten opzichte van het vaste draaipunt van de buigbalk**

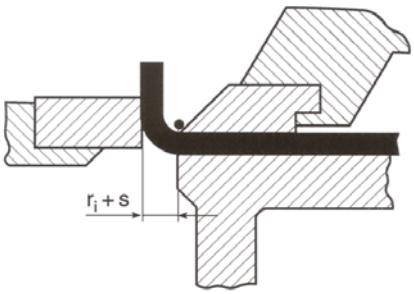
   Bij deze machine (zie figuur M.2.15) liggen de hoekpunten van de tafel en van de druklijst in een verticale lijn met het draaipunt van de buigbalk.
   De bovenbalk en de buigbalk zijn in hoogte verstelbaar.
   In de figuren M.2.16 en M.2.17 is de situatie voor en na het buigen weergegeven.



figuur M.2.15 Machine met een verticaal instelbare tafel en buigbalk ten opzichte van het vaste draaipunt van de buigbalk



figuur M.2.16 Afstellen van de buigbalk en de tafel



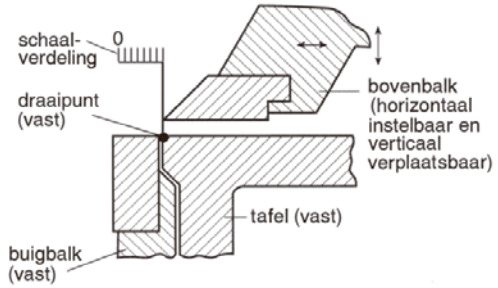
figuur M.2.17 Gebogen product

Uit de figuren blijkt dat zowel de buigbalk als de tafel over een afstand $r_i + t$ mm, omlaag moeten worden gebracht.

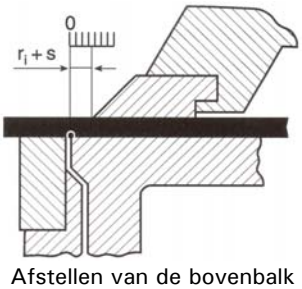
Opmerkingen:
- gedurende het uitvoeren van de buigbewerking is sprake van een raakvlak tussen de buigbalk en het productmateriaal;
- deze machine-uitvoering is geschikt voor het realiseren van grote buigradii.

3. **De machine met een horizontaal verstelbare bovenbalk ten opzichte van het vaste draaipunt van de buigbalk**

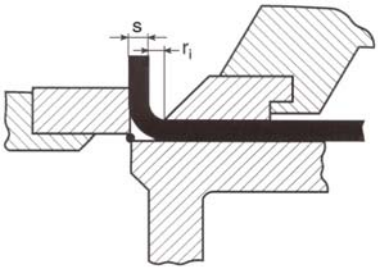
Bij deze machine (zie figuur M.2.18) valt het hoekpunt van de tafel samen met het draaipunt van de buigbalk. De bovenbalk is over een beperkte afstand verticaal instelbaar, ten behoeve van het klemmen van het productmateriaal, en is eveneens in horizontale richting instelbaar. In de figuren M.2.19 en M.2.20 is de situatie voor en na het buigen weergegeven.
Uit die figuren blijkt dat de bovenbalk, ten opzichte van het draaipunt, $r_i + t$ mm in horizontale richting moet worden verplaatst.



figuur M.2.18 Machine met een horizontaal verstelbare bovenbalk ten opzichte van het vaste draaipunt van de buigbalk



figuur M.2.19 Afstellen van de bovenbalk



figuur M.2.20 Gebogen product

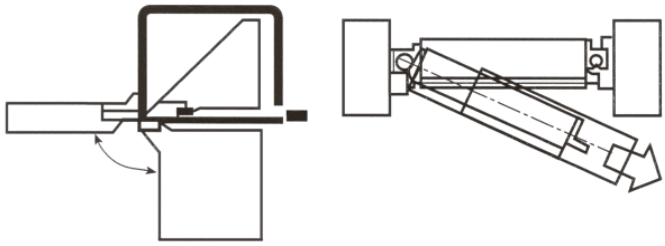
Opmerkingen:
- gedurende het gehele buigproces is er sprake van een raakvlak tussen buigbalk en materiaal;
- deze machine-uitvoering wordt overwegend toegepast bij de lichtere zwenkbuigmachines.

4. **Speciale uitvoeringen van zwenkbuigmachines**

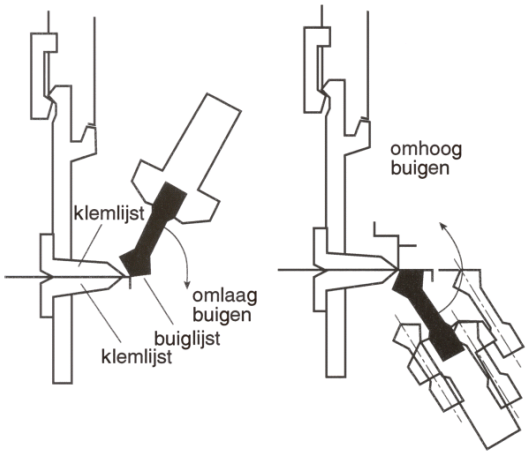
De zwenkbuigmachines worden voortdurend verder ontwikkeld en verbeterd, waardoor het toepassingsgebied wordt vergroot.

Als voorbeelden worden genoemd:

a. De zwenkbuigmachine met uitzwenkbare bovenste klembalk, zodat bijvoorbeeld ook gesloten kokers kunnen worden gebogen en uitgenomen (zie figuur M.2.21).
b. De zwenkbuigmachine met de mogelijkheid om in twee richtingen te buigen, waardoor het omkeren van het product komt te vervallen (zie figuur M.2.22). Overigens kan deze mogelijkheid via meerdere machineconstructies worden gerealiseerd.



figuur M.2.21 Zwenkbuigmachine met uitzwenkbare bovenste klembalk



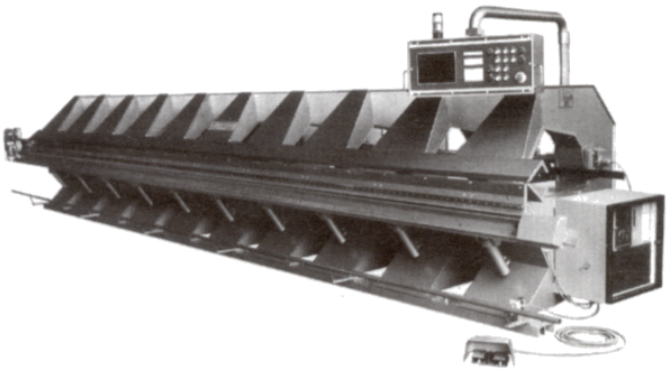
figuur M2.22 Omhoog en omlaag buigen bij zwenkbuigmachines

c. Naast de machines met twee zijstaanders bestaan er ook machines met meer gekoppelde, C-vormige, staanders. Deze machines worden dan ook meerstaander of langzetbank genoemd.
De afstanden tussen deze staanders zijn dusdanig klein, dat er, onder normale omstandigheden, geen sprake is van doorbuigen.
De machine is geschikt voor het buigen van lange producten, met eenvoudige profielen, uit dunne plaat (zie figuur M.2.23).

Tenslotte een afsluitende opmerking ten aanzien van zwenkbuigen: Om strijken te voorkomen is de huidige tendens de cirkelvormige baan van de buigbalk te vervangen door een kromme.

M.2.2.1 *De aandrijving*

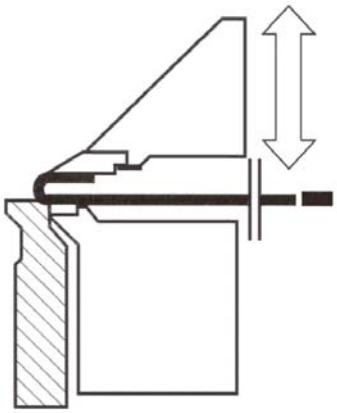
De zwenkbuigmachines zijn in verschillende uitvoeringen verkrijgbaar. Van oudsher bekend is de machine met volledige handbediening. Vervolgens de machine met mechanische aandrijving van de buigbalk en de bovenklembalk.



figuur M.2.23 De meerstaander of langzetbank

Tenslotte zijn bij verdere automatisering ook de verstellingen van de onderklembalk en de buigbalk gemotoriseerd en bij de CNC uitvoeringen servobestuurd.
De verstellingen van de onderklembalk en de buigbalk zijn elektromechanisch. Bij de lichtere machines worden ook de buigbalk en de bovenklembalk op deze wijze aangedreven, zwaardere machines hebben hiervoor hydrocilinders of -motoren.

Bij aandrijving van de buigbalk door een aandrijfeenheid zijn de uiteinden voor de gelijkloop gekoppeld via een torsie-as. Zwaardere machines hebben tweezijdige aandrijving, met dikwijls servohydraulische gelijkloopbesturing.
Hetzelfde geldt voor de bovenklembalk, die bovendien vaak niet alleen programmeerbaar is op drukmeting, maar ook op wegmeting voor hol omzetten (zie figuur M.2.24).



figuur M.2.24 Buigbewerking met op diepte geprogrammeerde bovenklembalk

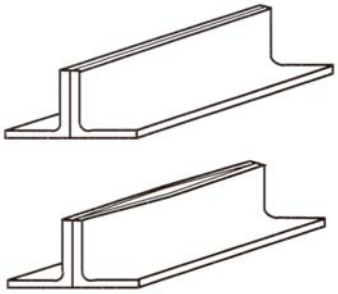
M.2.2.2 *Het frame*

De perskracht moet worden opgevangen door het frame.
In de normale uitvoering is sprake van twee gekoppelde staanders, waarin de balken zijn opgenomen.
Bij het meerstaander type daarentegen bestaat het frame uit een aantal gekoppelde C-vormige staanders.
Dit frame is naar verhouding minder stijf.

M.2.2.3 *De stijfheid*

Ook bij het zwenkbuigen is sprake van doorbuiging, in dit geval van de buigbalk en de bovenklembalk.
Het resultaat bij grotere productlengten is een groter wordende buigradius naar het midden van het product en het buigen in de lengte (zie figuur M.2.25).

Om de verzwaring van de buigbalken ten behoeve van het verhogen van de stijfheid te beperken, wordt bomberen toegepast (zie § 4.1).
Bij het meerstaander type kan door de uitvering van de C-frames een hoekafwijking aan het product ontstaan.



figuur M.2.25 Afwijking aan het product als gevolg van het doorbuigen van de assen

M.2.2.4 *Bewegingsmogelijkheden*

Een zwenkbuigmachine kan tot maximaal vijf assen bezitten.
De bewegingsmogelijkheden zijn:
- aanslagsysteem (soms met twee onafhankelijke aanslagen);
- de buighoek met zwenkhoek en hoogtepositie;
- de beweging van de bovenklembalk;
- de beweging van de onderklembalk.

M.2.3 *De strijkbuigmachine*

Het strijkbuigproces wordt vooral toegepast in specifieke volggereedschappen en in eveneens specifieke gereedschappen op een kantpers.
Daarnaast bestaan CNC bestuurde universele machines waarin strijkbuigen wordt toegepast.
In deze publicatie wordt volstaan met een beperkte beschrijving van deze machine.
Bij de strijkbuigmachine wordt het materiaal gepositioneerd door een aanslagsysteem en vervolgens geklemd. Daarna wordt het materiaal gebogen door een bovenstempel of strijkmes.
Om beschadiging van het product te voorkomen, door de strijkende beweging van de stempel, wordt soms gebruikgemaakt van afrollen over de buigradius, als variant op de bewegende stempel.
Deze machines worden gewoonlijk voorzien van zowel een omhoog als omlaag werkende buigeenheid, zodat omkeren van het product niet nodig is.
Strijkbuigmachines zijn weliswaar universeel, maar worden toch hoofdzakelijk toegepast voor het buigen van producten met een relatief groot rechthoekig vlak, aan twee of meer zijden voorzien van te buigen profielen met beperkte afmetingen.
CNC strijkbuigmachines kunnen worden geleverd van beperkt tot uitgebreid geautomatiseerd (zie figuur M.2.26).

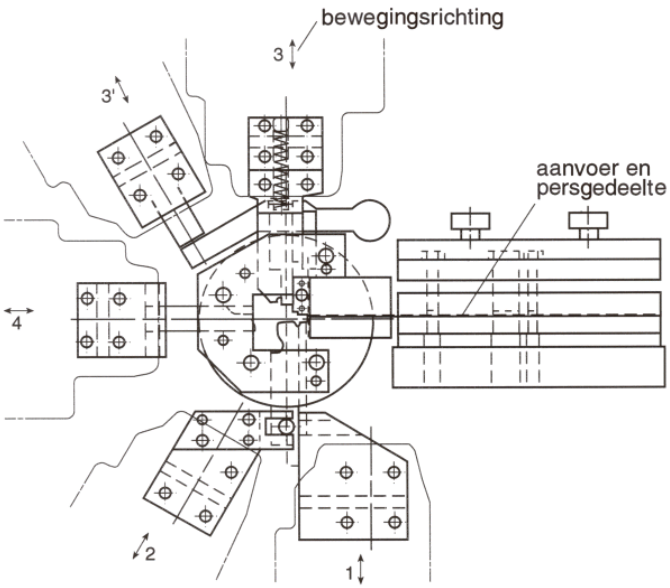
figuur M2.26 Automatische buigcel

M.2.4 *De meerslede-automaat*

De meerslede-automaat (zie figuur M.2.27 en M.2.28) die in deze paragraaf summier wordt besproken is vooral bedoeld voor het vervaardigen van relatief kleine gebogen producten, in grote aantallen.

De meerslede-automaat bestaat uit twee gedeelten:
1. een persgedeelte voor de plaatsing van een snijelement;
2. een buiggedeelte voor de plaatsing van de noodzakelijke buigers.

De constructieve uitvoering van het buiggedeelte (zie ook figuur M.2.27 is dusdanig, dat rondom het buigcentrum opgestelde sleden door middel van aangedreven nokken



figuur M.2.27 Principe van de meerslede-automaat. 1 t/m 4 zijn buigers

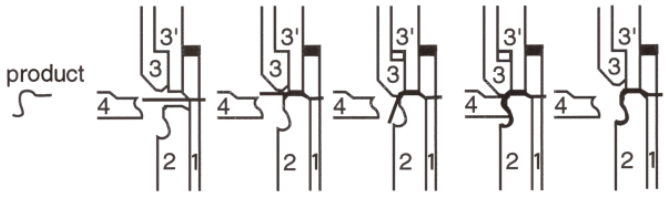
figuur M.2.28 Meerslede-automaat

naar genoemd buigcentrum kunnen worden bewogen.
De buigers zijn op de sleden gemonteerd. In het buigcentrum kan, indien nodig, een buigkern van achteren naar voren worden bewogen.

Het totale proces verloopt als volgt:
- het materiaal, meestal op rol en op breedte gesneden, wordt ingevoerd in het snij-element;
- in een aantal fasen wordt de uitslag van het product gesneden. Het product blijft daarbij met de band verbonden, d.w.z. de band dient als transportsysteem;
- vervolgens wordt het product in de buiggroep gebogen, door de verschillende buigers die op de sleden zijn bevestigd;
- afhankelijk van de wijze van afleveren van het product, losse producten of product in de band, wordt het product al of niet losgesneden.

Naast het produceren van gebogen producten leent de automaat zich uitstekend voor montagedoeleinden.
Via verdergaande mechanisaties kunnen onderdelen worden aangevoerd en, samen met het gebogen product, worden samengesteld tot een halffabrikaat.

In figuur M.2.29 is schematisch het buigen van een voorbeeldproduct weergegeven. De genummerde buigers komen overeen met die van figuur M.2.27.



figuur M.2.29 Weergave van de individuele buigbewerkingen door de buigers

M.3 *Gemeenschappelijke onderwerpen*

Hoewel er wezenlijke verschillen zijn in het werken met eerder genoemde machines, waartoe ook de in VM 112 besproken persen behoren, zijn er toch voldoende overeenkomsten om een aantal onderwerpen in het algemeen te bespreken.

M.3.1 *De besturing*

De besturing controleert de bewegingen van de assen. De veiligheidsvoorzieningen zijn gekoppeld aan deze besturing, zodat de pers niet op een ongecontroleerde wijze in beweging kan komen.
De besturing kan op verschillende manieren worden uitgevoerd. Bij conventionele persen moet de machinesteller de instelling per buiging direct aan de machine uitvoeren, zoals diepte, snelheid, maximale kracht en de achteraanslagwaarde.
Bij CNC bestuurde persen kunnen de instellingen via het beeldscherm worden veranderd en opgeslagen.

De mate van automatisering is afhankelijk van de wensen en/of de noodzakelijkheid. Hierbij is het noodzakelijk om onderscheid te maken tussen automatisering van de besturing (commando's aan de assen) en de automatisering van de input voor de besturing.
Computergeïntegreerd produceren en flexibel automatiseren is op een CNC bestuurde pers mogelijk. Dit kan onder andere door middel van:
1. Een CAD-module, waarin grafische informatie wordt opgeslagen. Deze maakt het mogelijk:
   - de productietekening in te voeren, te maken en van de maatvoering te voorzien;
   - de geometrische gegevens van het gereedschap te verwerken;
   - de machineconfiguratie te tekenen.
2. Een CAE-module. Deze maakt het mogelijk:
   - de optimale aanpak voor een buigopdracht te berekenen, gelet op de geometrische gegevens van het gereedschap en van de machine;
   - de voorgestelde oplossing op het scherm te simuleren.
3. Een CAM-module. Deze wordt gebruikt voor:
   - het ontwikkelen van het NC programma voor het besturen van de pers;
   - het opslaan van het productprogramma, het corrigeren en het opnieuw opslaan.

Opmerking: *CAD = Computer Aided Design;*
CAE = Computer Aided Engineering;
CAM = Computer Aided Manufacturing.

M.3.2 *De steltijd*

De steltijd wordt mede bepaald door:
- de producteisen, bijvoorbeeld maatvoering, hoeknauwkeurigheid, rechtheid. Naarmate de eisen hoger zijn zal de steltijd toenemen, doordat meer proefbuigingen nodig zijn;
- de gereedschapopname, d.w.z. de wijze van opspannen van het gereedschap en de daarvoor te gebruiken spanmiddelen (zie ook § 5.1.9);
- het instellen van de aanslagen bij kantpersen en zwenkbuigmachines.

Bij serieproductie wordt gewoonlijk gebruik gemaakt van een achteraanslagsysteem met handbediening of CNC bestuurd.

M.3.3 *De veiligheid*

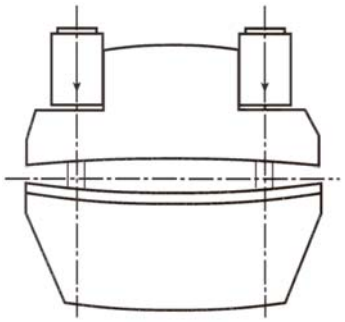
De veiligheidsaspecten zijn beschreven in de CE-richtlijnen, waaraan moet worden voldaan. Bijzondere aandacht bij het opstellen van de technische instructies verdient de veiligheid.
Ter beveiliging van de machinebediener en de omstanders kunnen verschillende faciliteiten aanwezig zijn.

- **tweehandenbediening**
  Met de tweehandenbediening kan de bedieningsman de pers uitsluitend in werking stellen door met elk van de handen tegelijkertijd een bedieningsknop in te drukken. De pers zal de gehele slag maken wanneer de bedieningsman de beide knoppen ingedrukt houdt.
  Het bekneld raken van de bedieningsman tussen bovenstempel en ondermatrijs is hierdoor uitgesloten.
  Omstanders kunnen wel bekneld raken.
- **tweehanden- met voetbediening**
  Deze bedieningswijze werkt hetzelfde als hierboven omschreven, echter met dit verschil dat de persbalk vlak boven de plaat, op een afstand kleiner dan 6 mm, stopt, waarna met het voetpedaal de persbeweging opnieuw kan worden gestart.
  Het bekneld raken van de bedieningsman tussen bovenstempel en matrijs is hierdoor uitgesloten. Het is evenwel wel mogelijk dat, door de vorm van het product, de bedieningsman tijdens de buigbewerking bekneld raakt tussen het product en de bovenbalk.
- **lichtscherm**
  Toepassing van een lichtscherm heeft twee mogelijkheden:
  a. beveiliging gedurende de beweging van de bovenbalk tot op een afstand <6 mm van het product, waarna het product tegen de aanslag wordt gelegd en de buiging, via voetbediening, wordt afgemaakt;
  b. beveiliging gedurende de gehele beweging van de bovenbalk.

M.4 *Hulpmiddelen*

M.4.1 *Bombering*

Tijdens het buigproces vervormen de boven- en onderbalk van de kantpers en de buigbalken in de zwenkbuigmachine elastisch, onder invloed van het krachtenspel (zie figuur M.4.1).



figuur M.4.1 Doorbuigende kantpers

Deze vervorming verstoort de parallelliteit van de buiglijnen. Bij de kantpers dringt de bovenstempel (of puntgereedschap) in het midden van de machine minder diep in de matrijs (of groefgereedschap), wat ongewenste hoekafwijkingen in het gebogen product tot gevolg heeft. Bij de zwenkbuigmachine ontstaan deze hoekafwijkingen door een niet gelijkmatige buigspleet over de werklengte van de machine.
Ook bij strijkbuiggereedschappen kan de vervorming in het machineframe tot problemen leiden. Hier betreft het niet alleen vormafwijkingen in het product, maar, wanneer een zuilengestel wordt toegepast, ook de niet parallelle loop van de verschillende geleidingszuilen.

Het compenseren van de elastische vervorming geschiedt door het "ondervullen" van de gereedschappen. Bij iedere specifieke belastingsituatie (afhankelijk van onder meer de productmateriaalsoort, de -dikte, de lengte van de buiglijn, de grootte van de V-opening van de ondermatrijs, enz.) behoort een specifieke ondervulling om de parallelliteit van de buiglijnen te realiseren.

Bij de meest primitieve wijze van ondervullen wordt gebruik gemaakt van reepjes papier of latoenkoper.
Dit vereist echter het nodige inzicht en ervaring van de persoon die moet ondervullen. Bovendien is de bewerking zeer tijdrovend.

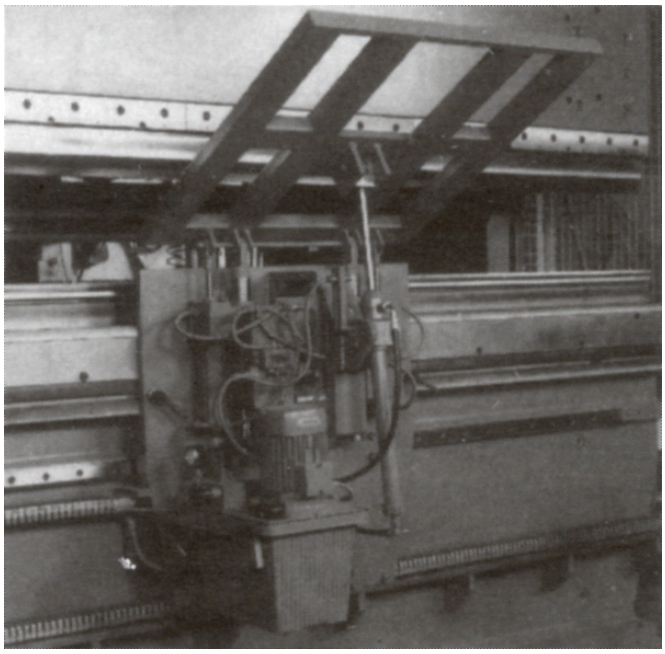
De bombeerinrichting is een hulpmiddel ten behoeve van het ondervullen. Dit hulpmiddel kent meerdere uitvoeringsprincipes, die sterk verschillen qua prijs en functionaliteit:

1. Bombeerspie in tussenstuk. Oplossing in de bovenbalk. Via de bediening van duw- en trekbouten (om de 100 mm) moet men van geval tot geval de juiste correctiecurve opbouwen. Dit is tijdrovend en vergt inzicht van de operator. Het resultaat is slechts via proefbuigingen vast te stellen.
   In de praktijk kiest men een "gemiddelde curve", hetgeen inhoudt dat men eigenlijk nooit helemaal volledig compenseert. Plaatselijk corrigeren is mogelijk. Ongemerkt stelt men tolerantieproblemen in de machine/gereedschapconfiguratie gelijktijdig met het bomberen uit.
2. Een reeks van uniforme wiggeparen die individueel moeten worden ingesteld. De oplossing kan worden toegepast in of op de onderbalk of de tafel. De werking en de voor- en nadelen zijn gelijk aan de onder punt 1 genoemde.
3. Een reeks van, qua hellingshoek verschillende, wiggeparen die centraal worden versteld. De verstelling kan manueel of CNC geschieden.
   Toepassing in of op de onderbalk of tafel.
   De compensatiecurve is specifiek voor de doorbuigingsituatie op de betreffende machine gedefinieerd. De operator behoeft niet over deze kennis te beschikken.
   Er kan eenvoudig worden gekozen welke waarde tussen 0 en 100% bombering het meest overeenstemt met de actuele buigopgave.
   Deze bombeerinrichting compenseert de elastische vervorming, niet de tolerantie-afwijkingen in de machine-/gereedschapconfiguratie.
4. Een of meerdere cilinders in de onderbalk die een sandwichconstructie heeft. Een in de machine geïntegreerde oplossing. De tafel is gemonteerd op de middelste plaat van de sandwich. Deze zet zich hydraulisch af ten opzichte van de beide buitenste sandwichplaten, zodanig dat een bolling ontstaat.
   De bolling compenseert de doorbuiging gelijkmatiger naarmate er meer cilinders worden toegepast.
   Bij een complexe variant van het hydraulisch systeem is een plaatselijke compensatie van tolerantie-afwijkingen in de machine/gereedschapconfiguratie tot op zekere hoogte mogelijk.
5. Twee lange lijsten waarin verschillende vlakken zijn aangebracht, conform de wiggeparen bij 3. De vlakken met de verschillende hellingshoeken zijn onder een tweede hoek bewerkt.
   De bediening geschiedt centraal en kan manueel of CNC worden doorgevoerd.
   Toepassing in of op de onderbalk of tafel.
   De verdere beschrijving is die van punt 3, met de kanttekening dat de in punt 5 beschreven bombeerinrichting naast de compensatie van de elastische vervorming ook plaatselijk de tolerantie-afwijkingen in de machine-/gereedschapconfiguratie kan uitstellen.

M.4.2 *Plaatvolgsysteem (buighulpen)*

Bij het buigen van grote en/of dunne platen op een kantpers kan het materiaal vervormen, als gevolg van het omhoog zwaaiende materiaal.
Tot de extra toebehoren van de pers behoort een plaatvolgsysteem (buighulpen), dat voor ondersteuning van de plaat zorgt, gedurende het buigen.
Een van de methodes is een hydraulisch aangedreven volgsysteem dat wordt gecontroleerd door de besturing van de pers (zie figuur M.4.2).

Tijdens de neergaande beweging van de bovenstempel bewegen de armen van dit systeem omhoog, teneinde de plaat in zijn opgaande beweging te ondersteunen. Aan het einde van de bewerking wordt het volgsysteem geleidelijk ontlast.



figuur M.4.2 Plaatvolgsysteem

M.4.3 *Meten en corrigeren van de indringdiepte*

Afhankelijk van de automatiseringsgraad is het mogelijk elektronische meet- en regelsystemen op de (kant)pers aan te brengen. Hierdoor is het mogelijk tijdens de uitvoering van het proces te meten en bij te sturen. Met behulp van meetlinialen en een elektrische cel wordt de verplaatsing van de bovenstempel ten opzichte van de tafel, continu gemeten. De gemeten waarden worden door de microcomputer verwerkt en gecontroleerd. Door verschil in opvering van de zijframes bij bijvoorbeeld a-symmetrische belasting treedt een verschil van de diepte-instelling op.
Via meetframes wordt deze afwijking gecorrigeerd. De indringdiepte kan met een nauwkeurigheid van 0,01 mm worden geregeld.

M.4.4 *Meten en corrigeren van de buighoek*

M.4.4.1 *Bij kantpersen*

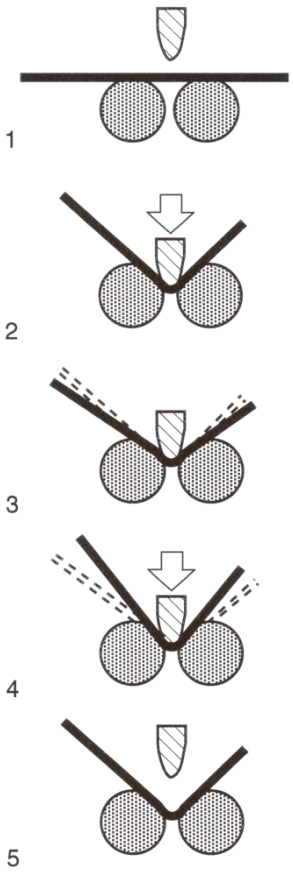
Er bestaan meerdere systemen om de buighoek te meten en te corrigeren tijdens het uitvoeren van het buigproces. Bij het volgende systeem bestaat de ondermatrijs uit twee draaibare lijsten. Het hoekmeetsysteem meet de hoekverdraaiing van die lijsten.
De bewerking verloopt als volgt (zie figuur M.4.3):

- het product wordt gebogen over de ingestelde hoek en vervolgens ontlast (2 en 3);
- de terugvering wordt gemeten en de buighoekcompensatie berekend;
- het product wordt verder gebogen met de berekende terugvering (4 en 5).

Deze methode is minder geschikt voor het buigen van dunne plaat, omdat de kantelbare buiglijsten klein moeten zijn en dus kwetsbaar zijn. In dit geval is een lasermeting, zoals die door LVD wordt toegepast beter geschikt.

M.4.4.2 *Bij zwenkbuigmachines*

Voor CNC zwenkbuigmachines bestaan hoekmeetsystemen die tijdens het proces meten en via de besturing het proces regelen. Bij het starten van de buigbewerking wordt de opnemer van de buigbalk ingeschakeld door een contact met het materiaal.
Als na het buigen het contact tussen het product en de opnemer van de buigbalk wordt verbroken, dus aan het einde van de terugvering, wordt de bijbehorende hoekpositie doorgegeven aan de besturing. Daar wordt de nog te buigen hoek, gelet op de grootte van de terugvering, berekend.



figuur M.4.3 Alternatief buigsysteem waarbij tegelijkertijd de momentane hoek kan worden gemeten

Tenslotte wordt de gecompenseerde hoek gebogen. Bij gelijkblijvende omstandigheden kan dan voor de volgende producten deze nieuwe buighoek worden toegepast.

M.5 *Gereedschappen*

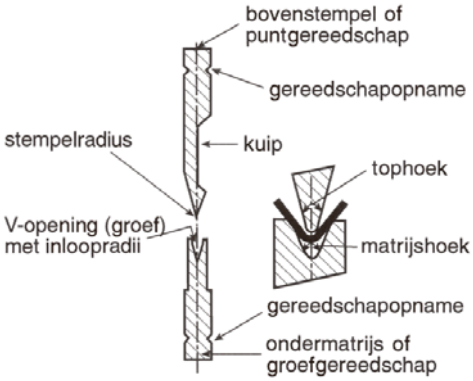
M.5.1 *Gereedschappen voor kantpersen en zwenkbuigmachines*

Buiggereedschappen kennen vele uitvoeringsvormen. Afhankelijk van de keuze van het buigproces worden vrijbuig-, strijkbuig-, matrijsbuig- en zwenkbuiggereedschappen onderscheiden.

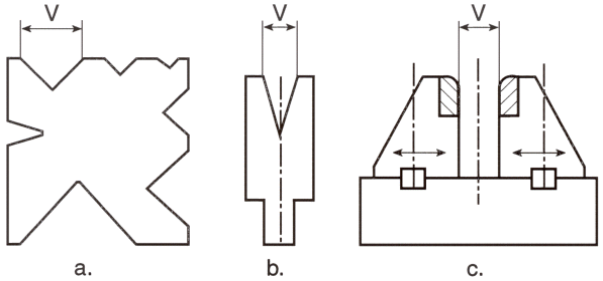
M.5.1.1 *Vrijbuiggereedschappen*

Dit type gereedschappen (zie figuur M.5.1) is bedoeld voor universeel gebruik op een kantpers. Voor het gebruik is steeds een set, bestaande uit een bovenstempel en ondermatrijs (ook wel punt- en groefgereedschap genaamd) benodigd. De bovenstempels worden traditioneel aan de bovenbalk van de machine bevestigd en de ondermatrijzen op de tafel of direct op de onderbalk. Bij de ondermatrijzen kent men de multi-V blokmatrijzen, de enkel-V opzet- of insteekmatrijs en de traploos verstelbare-V varianten (figuur M.5.2a t/m c).

Daar het benodigd tonnage bij het vrijbuigen relatief gering is, zijn deze gereedschappen in het algemeen slank geconstrueerd. Deze slankheid vermindert de kans dat de plaat tijdens het buigen op een andere plaats dan bij de buigradii met de gereedschappen in aanraking komt (collisie).
Slankheid en belastbaarheid van de gereedschappen zijn onderling strijdig. Moderne berekeningsmethoden (EEM) maken het mogelijk de optimale vorm van het gereedschap te kiezen bij een gegeven belastbaarheid.
De tophoek van de bovenstempel en de matrijshoek van de ondermatrijs zijn bij vrijbuiggereedschap relatief klein



figuur M.5.1 Vrijbuiggereedschap



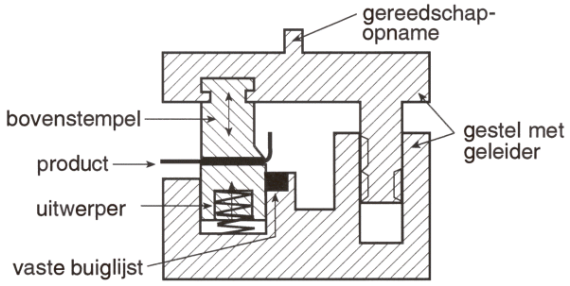
figuur M.5.2 a. = blokmatrijs; b. = opzetstempel; c. = verstelbaar onderstempel

(figuur M.5.1). Voor de tophoek wordt veelal 28 of 30° gekozen, voor de matrijshoek, tot een V-opening van 24 mm, 30°. Bij een V-opening groter dan 24 mm is de matrijshoek veelal 40, 60, 86 of 88°. Via de diepte-instelling van de persbalk is zodoende met een set gereedschappen iedere gewenste producthoek tussen 30 en 180° bereikbaar.
De in de praktijk met vrijbuiggereedschappen te bereiken hoeknauwkeurigheden liggen bij ±30', waarbij wel aan voorwaarden als materiaal uit één charge, proefbuigen en corrigeren, moet worden voldaan. Bij gelijkblijvende stempelradius wordt de inwendige productradius van de gebogen plaat kleiner, naarmate de V-opening van de ondermatrijs kleiner is.
De stempelradius moet kleiner zijn dan de inwendige productradius. Zie verder hoofdstuk 2 "Procesbeschrijving".

Door toepassing van geavanceerde productietechnieken is het mogelijk om vrijbuiggereedschappen, met kleinere toleranties rond de nominale maten, tegen acceptabele kosten te vervaardigen. Dit verklaart de sterke opmars van de kortere, maximale deellengte 515 mm, uitwisselbare gereedschappen.
De modulaire opbouw van het gereedschappakket, de mogelijkheid om stapsgewijs te investeren, te kunnen bijkopen zonder een model aan te leveren en de grote hanteerbaarheid van de gereedschapseenheden behoren tot de voordelen voor de gebruiker.

M.5.1.2 *Strijkbuiggereedschappen*

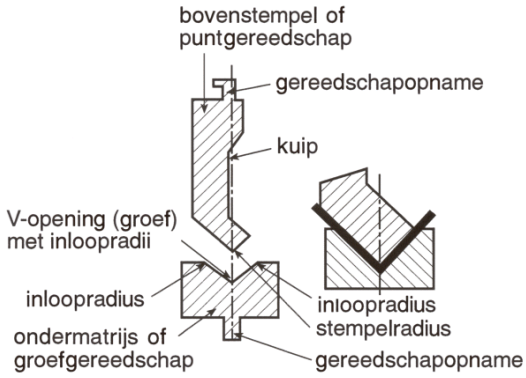
Een gereedschapconfiguratie voor strijkbuigen bestaat uit een bewegende strijkende bovenstempel, een vaste buiglijst waarlangs wordt afgestreken en een neerhouder, c.q. uitwerper, die de plaat vasthoudt.
Deze drie lijsten moeten, afhankelijk van de plaatdikte, ten opzichte van elkaar worden gepositioneerd.
Voor gebruik op een (kant)pers is het derhalve noodzakelijk de genoemde lijsten op te nemen in een (zuilen)gestel. Zodoende ontstaat een samengesteld gereedschap (figuur M.5.3).
De te bereiken producthoek ligt tussen de 90 en 180°, met een hoeknauwkeurigheid van ±30'.
Wanneer men de constructie complexer maakt en de lineaire beweging van de pers omzet in een roterende beweging, kunnen ook kleinere hoeken worden bereikt.
Door de spleetgrootte tussen de bewegende bovenstempel en de vaste buiglijst te variëren kan men de gewenste inwendige productradius aan de gebogen plaat bereiken.
Deze productradius kan relatief klein worden, mede afhankelijk van het materiaal.
Doordat het materiaal eenzijdig wordt geklemd, kunnen, afhankelijk van de uitvoering van het strijkbuiggereedschap, kleinere beenlengten worden gebogen dan bij vrijbuig- en matrijsbuiggereedschappen.



figuur M.5.3 Strijkbuiggereedschap

M.5.1.3 *Matrijsbuig- of kalibreergereedschappen*

Dit type specifieke gereedschappen (zie figuur M.5.4), voor een bepaalde materiaalsoort, -dikte en buighoek, is bedoeld voor gebruik op een kantpers.
Voor het gebruik is steeds een op elkaar afgestemde set boven- en ondergereedschappen nodig om tijdens het buigen een volledige sluiting te laten ontstaan tussen bovenstempel, plaat en onderstempel (zie detail figuur M.5.4).
Daar het benodigd tonnage bij het matrijsbuigen veel hoger ligt dan bij het vrijbuigen, zijn de gereedschappen minder slank geconstrueerd. Dit beperkt de inzetbaarheid ten opzichte van de vrijbuiggereedschappen in verband met collisie. Met dit soort gereedschappen is wel een kleinere inwendige productradius aan het gebogen product te bereiken. Ook de resulterende hoeknauwkeurigheid ligt hoger dan bij het gebruik van vrijbuiggereedschappen.
Wanneer aan de eerder genoemde voorwaarden wordt voldaan, is een hoeknauwkeurigheid van ±10' haalbaar.



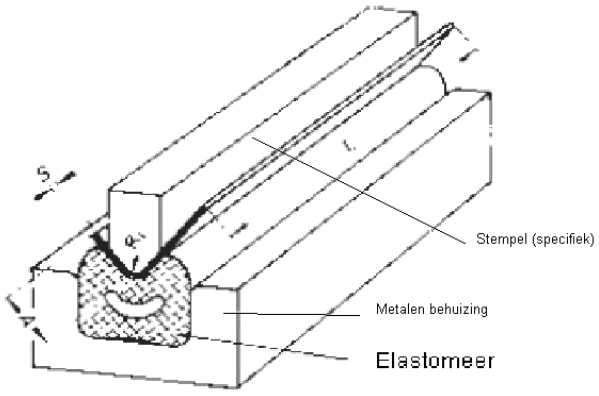
figuur M.5.4 Matrijsbuiggereedschap

M.5.1.4 *Elastomeergereedschappen*

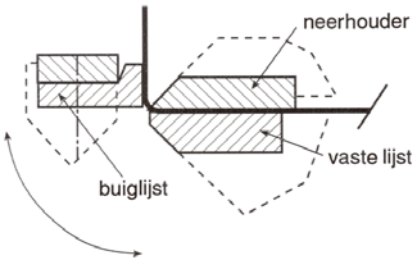
Het gereedschap bestaat normaliter uit een specifiek deel, dat van metaal gemaakt is en een universeel deel, het elastomeer. De normaal gebruikelijke elastomeersoort is polyurethaan met een hardheid van 60-90 ShoreA.
Het elastomeer is opgesloten in een metalen behuizing (zie figuur M.5.5). Daar de krachten op het gereedschap vrij fors zijn, dient de constructie robuust uitgevoerd te zijn.

M.5.1.5 *Zwenkbuiggereedschappen*

Deze gereedschappen komen overeen met de drie genoemde lijsten die bij het strijkbuigen zijn behandeld. Ook hier is sprake van een bewegende buiglijst, een vaste (tafel)lijst en een neerhouder (zie ook figuur M.5.6).



figuur M.5.5 Elastomeergereedschap



figuur M.5.6 Zwenkbuiggereedschap

In plaats van toepassing in een gestel dat vervolgens op een (kant)pers kan worden opgespannen, worden deze gereedschappen direct in de zwenkbuigmachine opgenomen. Deze machine vervult daarmede ook de rol van gestel ten behoeve van de onderlinge positionering van de gereedschappen. In principe bieden deze gereedschappen, in combinatie met de zwenkbuigmachine, dezelfde mogelijkheden als de strijkbuiggereedschappen. Door de draaiende zwenkbalk is met zwenkbuiggereedschappen een groter hoekbereik mogelijk, en wel tussen de 30 en 180°.
In de praktijk ligt de hoeknauwkeurigheid op ±60'.

M.5.1.6 *Gereedschapmaterialen*

Ten aanzien van de materialen moet er gekozen worden op grond van de volgende overwegingen:
- belastbaarheid van het gereedschap;
- slijtagebestendigheid (standtijd);
- te buigen productmateriaal, de toelaatbare aftekening en beschadiging;
- economische factoren als verkrijgbaarheid, bewerkbaarheid, prijs per eenheid materiaal.

In de praktijk worden voor de vrijbuig-, matrijsbuig- en zwenkbuiggereedschappen voornamelijk 1 C 45 en 42 CrMo 4 als gereedschapmateriaal toegepast. In strijkbuiggereedschappen worden, in verband met de hogere processnelheden, hoogwaardigere materialen gebruikt. In het supplement "Materialen" wordt een overzicht gegeven van de meest gebruikte gereedschapmaterialen bij het buigen.

Door middel van het toepassen van hardings- of oppervlaktebehandelingsprocédé's kunnen de eigenschappen van de gereedschappen worden verbeterd.
Nitreren, inductieharden, vlamharden en laserharden zijn alternatieven.
Zo is het nitreren aan te bevelen voor ondermatrijzen die worden ingezet om aluminium, corrosievast staal of verzinkte staalplaat te buigen. Dit nitreren geeft een harde schil met een hardingsdiepte van enkele tienden mm en een zeer dichte structuur. Koudlas wordt zodoende tegengegaan en het schoonhouden van de gereedschappen is eenvoudiger.
Met inductie-, vlam- en laserharden zijn grotere laagdiktes te realiseren. Zodoende is niet alleen de slijtagebestendigheid te verhogen, maar ook de plaatselijke drukbelastbaarheid. Dit laatste is bijvoorbeeld bij het buigen van draad of tranenplaat van belang.

M.5.1.7 *Gereedschapconstructies*

Een buiggereedschap heeft in principe twee functionele gedeelten:
a. de buigradius of buigradii, het gedeelte dat in contact komt met het productmateriaal en daarmee de buigfunctie vervult;
b. de gereedschapopname, het gedeelte waarmee het gereedschap verbonden is met de machine en daarmede de opspanfunctie vervult (figuur M.5.1 en M.5.4).

Het eerste gedeelte is bepalend voor de technische uitkomst van het buigproces (zie hoofdstuk 2 "Procesbeschrijving").

Het tweede gedeelte, de opname, is via de wissel- en de stelhandelingen, de -tijden en de inzetvrijheid, bepalend voor:
1. De economische aspecten;
2. De veiligheidsaspecten;
3. De ergonomische aspecten van het gebruik van de gereedschappen;
4. De mate van universeel zijn.

ad 1: Als de productiviteit van de buigmachine tot uitdrukking wordt gebracht door de verhouding van de totale investering in machine en gereedschappen en de totale hoeveelheid output per tijdseenheid, dan is deze productiviteit hoger naarmate de wissel- en steltijden lager zijn. Dit laatste wordt onder meer bereikt door gereedschappen te gebruiken die universeler en vrijer inzetbaar zijn.
De vorm van de opname bepaalt of er van zelfcentrering en -positionering, omkeerbaarheid, vorm en krachtgeslotenheid en daarmee stabiliteit van het opgespannen gereedschap sprake is.

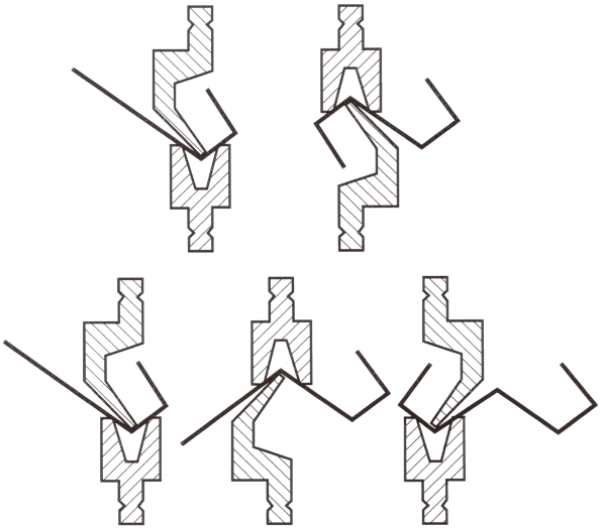
ad 2: De vorm van de opname speelt een grote rol bij de gebruiksveiligheid van het gereedschap, met name bij gebruik in de bovenbalk. Er worden verschillende oplossingen toegepast om ongewenst uitvallen van het gereedschap bij het wisselen te voorkomen. Voorbeelden zijn een spiebaan in de opname, waar een spie, die aan de klemplaat of aan de bovenbalk bevestigd is, invalt, of een lip aan de opname, die in een spiebaan in de klemplaat of bovenbalk valt.
Deze oplossing staat alleen horizontaal wisselen toe en blijft een gevaar inhouden als de klemplaten onbegrensd geopend kunnen worden. Er worden ook bedienbare veiligheidsvoorzieningen in de opname toegepast.
Dit maakt veilig verticaal wisselen van gereedschappen mogelijk, zowel manueel als automatisch, bijvoorbeeld door een robot.

ad 3: De vorm van de opname bepaalt, in samenhang met het gereedschapopname gedeelte aan de machine, in welke mate ergonomisch verantwoord gereedschapwisselen mogelijk is. Met name bij verticaal wisselen speelt dit een rol. In de meest ideale situatie kan men de gereedschappen met twee handen blijven hanteren tijdens het wisselen en behoeft men geen hand vrij te maken voor het bedienen van een pal of het aandraaien van een klemplaat, of iets dergelijks.

ad 4: Het al of niet symmetrisch zijn van de opname ten opzichte van de hartlijn van het gereedschap bepaalt de inzetvrijheid van een gereedschap.
Met name bij het gebruik van kuip- of zwanehalsgereedschappen is een symmetrische opname een voordeel: de kuip kan naar believen aan de voor- of achterzijde worden geplaatst, zodat de kans op collisie minimaal is (zie figuur M.5.7).
Het toepassen van dezelfde opname aan bovenstempel en ondermatrijs stelt de gebruiker in staat bovenstempels op de onderbalk en ondermatrijzen in de bovenbalk te plaatsen. Zodoende kan ook naar beneden worden gekant (zie figuur M.5.7).

Symmetrie

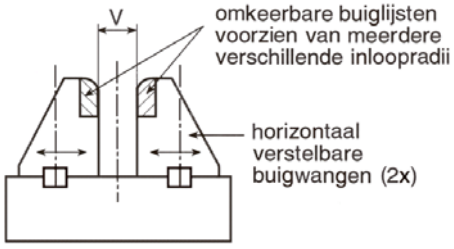
Bij plaatsing van twee sets gereedschappen naast elkaar op een kantpers, waarvan een set traditioneel opgespannen (stempel boven en matrijs onder) en de andere set omgekeerd (stempel onder en matrijs boven), is het mogelijk meerdere buigingen aan een product uit te voeren zonder het product te moeten omdraaien (zie figuur M.5.7).



figuur M.5.7 Voordeel van symmetrische opname

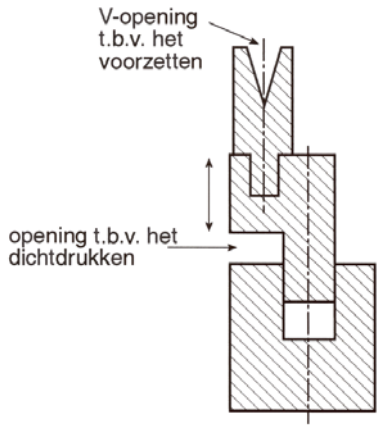
Naast de enkelvoudige punt- en groefgereedschappen bestaan voor de kantpers onder andere de volgende gereedschapconstructies:

- **Het verstelbare onderstempel**
  Deze maakt het mogelijk de grootte van de V-opening traploos in te stellen. Hierdoor is het mogelijk, (zie figuur M.5.8):
  - de inwendige productradius van het gebogen product, gegeven de stempelradius, binnen grenzen in te stellen;
  - zeer snel een andere grootte van de V-opening in te stellen. Verstelling is zowel manueel als, geïntegreerd in de CNC besturing, motorisch mogelijk;
  - door draaien of wisselen van de buiglijsten snel de gewenste matrijs-inloopradius in te stellen.



figuur M.5.8 Verstelbaar onderstempel

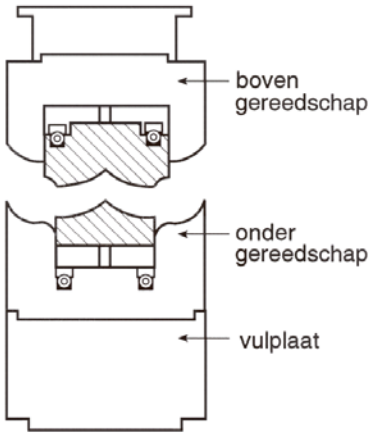
- **Het dichtdrukstempel**
  Deze maakt het mogelijk het product 180° om te zetten. Het gereedschap bestaat in mechanische (verende) en hydraulische uitvoering.
  Het voordeel van de hydraulische uitvoering is dat wanneer de hydrauliek is uitgeschakeld, er sprake is van een stabiele opspanunit, waarin naar believen opzetgereedschappen met verschillende V-openingen kunnen worden geplaatst. Ten behoeve van het dichtdrukken wordt de hydrauliek dan geactiveerd.
  Commandering geschiedt ofwel via een voetpedaal, ofwel door de CNC besturing van de kantpers (zie ook figuur M.5.9).



figuur M.5.9 Dichtdrukstempel

- **Stempelcombinatie**
  Het begrip stempelcombinatie is een vlag die een zeer brede lading dekt (figuur M.5.10).

  Een stempelcombinatie bestaat uit een boven- en een onderstempel, die voor een productspecifieke toepassing in onderlinge samenhang zijn ontworpen.
  In het algemeen worden met een stempelcombinatie in een persbeweging van de machine meerdere buigingen gecombineerd uitgevoerd.



figuur M.5.10 Stempelcombinatie

M.5.1.8 *Stellen (stelplan)*

Bij het stellen draait alles om de parallelliteit van de buiglijnen, dat wil zeggen de parallelliteit tussen de buigradius aan de bovenstempel en de inloopradii aan de ondermatrijs.
Bij het vrijbuigen is deze parallelliteit het meest kritisch, omdat de gereedschappen tijdens het buigen geen vorm gesloten geheel vormen met het product en het krachtenspel minder groot is.
Bij matrijsbuigen daarentegen bestaat de kans dat geringe stelfouten tijdens het buigen geëlimineerd worden door het opsouperen van spelingen en elastische vervorming in de machine-/gereedschapconfiguratie.

Bovengereedschappen zullen in het algemeen in de langsrichting van de machine de rechtheid van de bovenbalk overnemen.
In de hoogterichting zal het gereedschap onder invloed van de perskracht tegen de spanvlakken gaan aanliggen. De rechtheid van de buiglijn is dan afhankelijk van de nauwkeurigheid van machine en gereedschap. In de hoogterichting is door het plaatselijk ondervullen nog wat te corrigeren. Bepaalde typen bombeerinrichtingen maken het mogelijk naast het corrigeren van de elastische vervorming van de kantpers, ook plaatselijk correcties van de buiglijn te maken.

Ondergereedschappen vergen een aanpak die wordt bepaald door het systeem waartoe zij behoren.

De blokmatrijzen richt men uit naar de buiglijn van het bovengereedschap.
In de praktijk geschiedt dit door het voorzichtig aan laten lopen van het bovengereedschap in de V-opening van de ondermatrijs, wanneer de matrijs grof is voorgepositioneerd en nog niet vaststaat.
Bij opzetgereedschappen die in een gereedschapsleuf in tafel of bed van de machine worden gezet, merklijn aan de voorzijde, is stellen niet nodig.
De ligging van de beide inloopradii zijn hier het gevolg van de nauwkeurigheden van het machinebed en het gereedschap.

Wanneer de gereedschappen op de tafel in een opspanbak worden gebruikt, dient deze eenmalig te worden uitgelijnd. Hierbij gaat men te werk als bij een blokmatrijs. Wanneer de speling in de gereedschapsleuf van de tafel, het bed of de opspanbak te groot is om de gereedschappen los in te steken, dan dient men de gereedschappen tegen de referentiezijde van de sleuf te spannen. Dit kan door middel van spanboutjes of, indien gewenst, automatisch via hydraulische klemlijsten.

Bij gereedschapsystemen die na het spannen van de gereedschappen een vorm- en krachtgesloten opname realiseren, behoeft niet te worden gesteld.
Deze systemen staan automatisch wisselen door bijvoorbeeld een robot toe.

Bij strijkbuiggereedschappen dient men, naast de parallelliteit van de buiglijnen, ook de eventuele zuilen van het gestel te controleren op onderlinge parallelliteit en parallelliteit met de bewegingsrichting van de pers, om wringen en schranken te voorkomen.

M.5.1.9 *Onderhoud en revisie*

Onderhoud en revisie dienen gericht te zijn op het behoud van onbeschadigde buigradii, parallelliteit tussen drukvlak aan de opnamezijde en de buigradius of -radii en de rechtheid.
Licht inoliën van de gereedschappen is voldoende om corrosie te vermijden.
Het schoonhouden van de punt van de bovenstempel en de V-opening van de ondermatrijs tijdens een productierun is van wezenlijk belang.
Met name wanneer van de gebogen plaat de walshuid loslaat of wanneer er bij het buigen van corrosievast staal, zink of aluminium materiaal aan de gereedschappen aanlaadt, is schoonmaken een vereiste.
Wanneer aan dit aspect onvoldoende aandacht wordt geschonken, is het gevolg verstoring van de buigradii en verhoogde vlaktedruk tijdens het buigen, waardoor maatafwijkingen en beschadigingen aan het product kunnen ontstaan.

Gereedschappen zijn in het algemeen te reviseren. Gelet dient te worden op het behouden, respectievelijk opnieuw aanbrengen van de eventuele harde functionele vlakken en het niet verminderen van de belastbaarheid van de gereedschappen.
Revisie kan zich niet altijd beperken tot de buigradii. Veelal dient allereerst de opname te worden nabewerkt om een zuiver opspanvlak ten behoeve van de revisie van de buigradii te realiseren.

M.5.1.10 *Spanmiddelen*

Spanmiddelen spelen een belangrijke rol ten aanzien van de productiviteit van een buigmachine.
Zij zijn bepalend voor de stel- en wisseltijden. Bij het gereedschap wisselen spelen twee factoren een rol:
a. de snelheid van het daadwerkelijk klemmen en lossen.
b. de snelheid waarmee een nauwkeurige positionering van de gereedschappen in de machine kan worden gerealiseerd (zie ook § 5.1.8 Stellen).

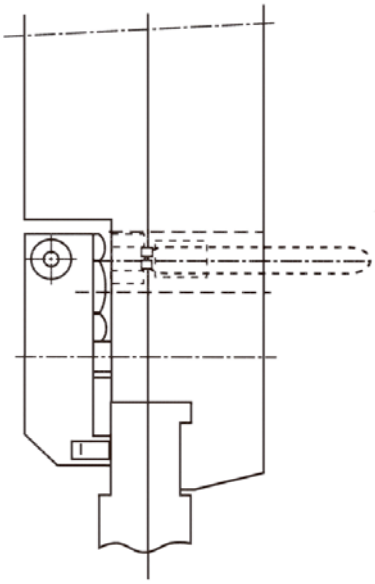
Dit hulpmiddel kent meerdere uitvoeringsprincipes, die sterk verschillen qua prijs en functionaliteit.

Bovenbalk

1. Klemplaten worden met behulp van bouten tegen de bovenbalk gespannen. De bovenbalk is zodanig bewerkt dat het gereedschap zowel in horizontale als in verticale richting tegen de machinereferentievlakken kan gaan aanliggen. Het aanliggen in horizontale richting wordt bepaald door de spankracht die de klemplaten op de gereedschappen uitoefenen.
   In het geval dat de klemplaten een onderbroken klemlijn vormen en/of in het geval dat de klemplaten onder invloed van de spankracht van de bouten vervormen (doorbuigen), zal de spankracht op de gereedschappen over de werklengte van de machine niet gelijkmatig zijn. Dit kan, afhankelijk van de stijfheid van het gereedschap, een niet-rechte buiglijn tot gevolg hebben. Ook het klemmen van kleine delen is in het algemeen problematisch. In verticale richting wordt het aanliggen onder perskracht gerealiseerd. Het maken van een loze bewerkingsslag teneinde het gereedschap aan te drukken, is bij deze spanmethodiek gemeengoed.

   Het lossen en klemmen is een tijdrovende zaak, omdat een veelheid aan bouten moet worden bediend. Uit veiligheidsoverweging is alleen horizontaal wisselen (schuiven) toelaatbaar.

2. Klemplaten die voorzien zijn van hydraulische cilinders en zodoende, met centrale bediening, de gehele werklengte van de machine klemmen of lossen.
   De lossende slag moet begrensd zijn om ongewild eruit vallen van de gereedschappen te voorkomen. Dit heeft tot gevolg dat alleen horizontaal kan worden gewisseld. De problematiek ten aanzien van het aanliggen van de gereedschappen en het klemmen van kleine delen is zoals beschreven onder 1 (figuur M.5.11).

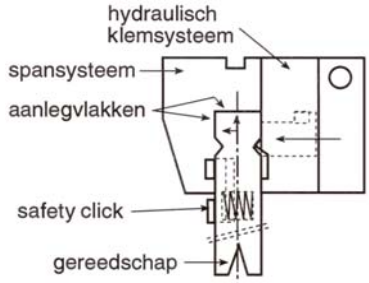


figuur M.5.11 Hydraulische klemplaat

3. Klemplaten die voorzien zijn van hydraulische cilinders en zodoende, met centrale bediening, de gehele werklengte van de machine klemmen of lossen.
   De lossende slag kan plaatselijk worden vergroot door het bedienen van een mechanisme. Dit maakt het uitnemen en inbrengen van afzonderlijke gereedschapdelen in verticale richting mogelijk.
   De problematiek ten aanzien van het aanliggen van de gereedschappen en het klemmen van kleine delen is ook hier zoals beschreven onder 1.

4. Een spansysteem dat naast de klemmiddelen ook voorziet in de aanlegvlakken voor de gereedschappen.
   Dit systeem wordt eenmalig bevestigd en staat vervolgens razendsnel en nauwkeurig klemmen en positioneren van de gereedschappen toe.

De klemmiddelen zijn manueel of automatisch, hydraulisch, te bedienen.
Na het inschakelen van de klemming ontstaat er een vorm- en krachtgesloten opspanning. Dit geeft een hoge, bedieneronafhankelijke, positioneernauwkeurigheid.
Deze positioneernauwkeurigheid is van belang om, in combinatie met de nauwkeurig vervaardigde gereedschappen, de buigradius daar te positioneren waar de CNC besturing hem verwacht.
De insteltijden op de pers worden daardoor drastisch gereduceerd. Een bijkomend voordeel van de aan de pers gemonteerde spanvlakken is de mogelijkheid deze in een hogere nauwkeurigheidsklasse te bewerken, dan met machineframe-onderdelen doorgaans mogelijk is en de spanvlakken desgewenst te kunnen harden, zodat de nauwkeurigheid ook in de tijd beter is te handhaven.
Tevens neemt de kwetsbaarheid van de machine af, doordat de gereedschapaanlegvlakken nu eenvoudig zijn na te bewerken (zie figuur M.5.12)



figuur M.5.12 Modulair spansysteem

Onderbalk of tafel

Alle hierboven genoemde systemen worden ook op de onderbalk toegepast. De problematiek ten aanzien van het aanliggen van de gereedschappen en het klemmen van kleine delen is gelijk aan hetgeen beschreven is onder 1 bij de bovenbalk, met uitzondering van het verticaal wisselen. Verticaal wisselen is op de onderbalk bij alle systemen mogelijk, omdat hier het risico van ongewild uitvallen niet aanwezig is.

M.5.2 *Volgsnijbuiggereedschappen*

Inleiding

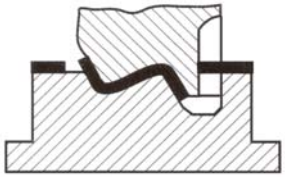
In de publicatie VM 112, hoofdstuk 4, worden de volggereedschappen besproken.
Dit supplement bevat dan ook alleen de voor het buigen noodzakelijke, aanvullende informatie.

Het buigen van producten op excenterpersen wordt gedaan door middel van een specifiek gereedschap, bijvoorbeeld een volgsnijbuigstempel.
De mogelijkheden van het buigen zijn beperkt, omdat slechts de verticale beweging van de stoter ter beschikking staat.
In de volgsnijbuigstempels op excenterpersen gaat daarom de voorkeur steeds uit naar het te buigen product zodanig in de strook te positioneren, dat de noodzakelijke buigbewerking van boven naar beneden kan worden uitgevoerd.
Een aandachtspunt is het krachten-, c.q. buigevenwicht in een gereedschap. Grote zijdelingse krachten kunnen verbuigingen en afwijkingen in het gereedschap veroorzaken en daardoor de maatvoering van het product beïnvloeden.
Er zijn/komen steeds meer producten, waarbij alleen een buigbewerking van boven naar beneden niet voldoende is; er moet van beneden naar boven en zelfs in horizontale richting worden gebogen.
Hiervoor zijn verschillende oplossingen mogelijk, zie daarvoor § 5.2.1 Gereedschapconstructies.

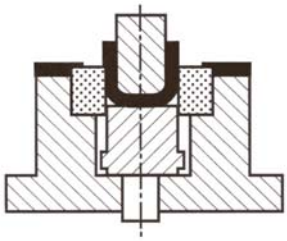
M.5.2.1 *Gereedschapconstructies*

Bij het buigen in volgsnijbuigstempels op excenterpersen wordt vaak gekozen voor het strijkbuigprincipe in verband met de verticale beweging van de pers.

In de figuren M.5.13 en M.5.14 worden de constructie van V- en U-buigers weergegeven.



figuur M.5.13 Constructie van een V-buiger

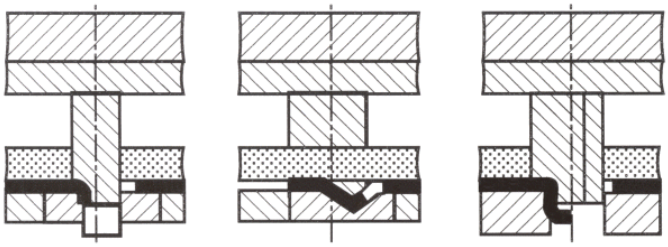


figuur M5.14 Constructie van een U-buiger

Bij de bepaling van de buigvolgorde en de constructie moet rekening worden gehouden met het lossen van het product van de buiger, in verband met het transport van de band of de strook door het gereedschap.
Per positie in de stempel is het gewenst een buiging uit te voeren. De zijdelingse buigkrachten die door een buiging worden veroorzaakt, moeten worden voorkomen of gecompenseerd.
Ondanks de beperkte bewegingsmogelijkheden van een excenterpers zijn toch meerdere buigconstructies mogelijk.

1. **Buigen van boven naar beneden**

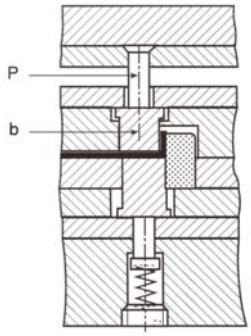
   In de figuur M.5.15 wordt een aantal voorbeelden gegeven van het buigen van boven naar beneden.



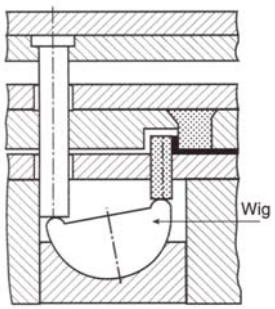
figuur M.5.15 Drietal voorbeelden van het buigen van boven naar beneden

2. **Buigen van beneden naar boven**

   In dit geval wordt de buiging uitgevoerd door de verende leiplaat. Om de buiger goed te laten aankomen wordt in de draagplaat een pen P gemonteerd die, in de onderste stand, de buiger b laat kalibreren (zie figuur M.5.16). Figuur M.5.17 laat hetzelfde zien, maar nu met behulp van een wigmechanisme.



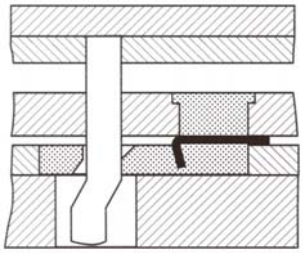
figuur M.5.16 Kalibreren van de buiging door middel van een aanslagpen (P) die de buiger (b) op het buigproduct drukt



figuur M.5.17 Kalibreren van de buiging door middel van het bewegen van een wig die de buiging nadrukt

3. **Buigen in horizontale richting**

De horizontale verplaatsing van de buiger wordt via schuiven en nokken verkregen (zie figuur M.5.18).

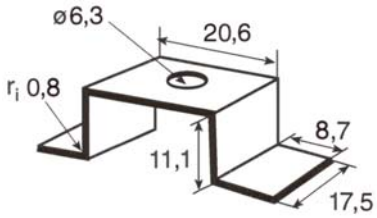


figuur M.5.18 Horizontale verplaatsing van de buiger door middel van schuiven en nokken

M.5.2.2 *Voorbeeld volgsnijbuigen*

Het vervaardigen van de beugel volgens tekening (zie figuur M.5.19), door middel van een enkelvoudig volgsnijbuiggereedschap.

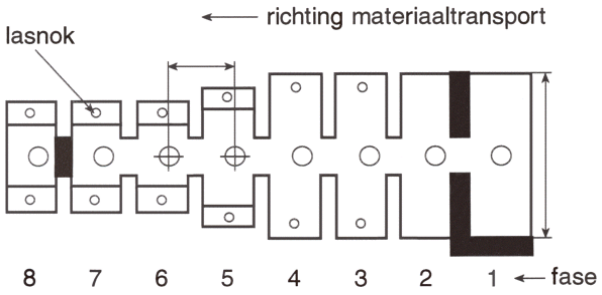
Na het berekenen van de uitslag van het product, nodig voor het bepalen van de materiaalbreedte en de maatvoering van het gereedschap, wordt een strookopzet gemaakt. Met de strookopzet is tevens de uitvoering van het gereedschap bepaald.
Het product wordt in acht stappen of fasen gemaakt (zie figuur M.5.20).



figuur M.5.19 Voorbeeld van een product dat door middel van een enkelvoudig volgsnijbuiggereedschap is gemaakt

Fase 1: Snijden van het gat en de uitslag
2: Loze fase
3: Indrukken van de lasnokken
4: Loze fase
5: Eerste buiging (U-vorm)
6: Tweede buiging (eindvorm)
7: Loze fase
8: Lossnijden van het product

Opm. 1: De loze fasen zijn nodig om een voldoende stabiel gereedschap te kunnen vervaardigen.
2: Gedurende het transport van de productband wordt het aanwezige gat als zoekergat gebruikt, zodat de opzet van 22,2 mm steeds wordt gerealiseerd.
3: Elke slag van de pers geeft een product.



figuur M.5.20 Strookopzet

M.5.2.3 *Gereedschapmateriaal en smering*

Voor de keuze van de toe te passen gereedschapmaterialen en gegevens omtrent de smering, wordt in beperkte mate naar het supplement "Materialen" verwezen en naar de publicatie VM 111, "Materialen".

M.5.2.4 *Stellen*

Een excenterpers kan alleen in verticale richting in diepte worden versteld. De onderlinge verhoudingen in een gereedschap kunnen hierdoor niet wijzigen.
Soms is het mogelijk buigverhoudingen in het gereedschap op de pers te wijzigen, meestal moet het evenwel worden gedemonteerd.
Een en ander is afhankelijk van de constructie.

M.5.2.5 *Onderhoud en revisie*

Het onderhoud vindt plaats na het maken van een run of bij het bereiken van een regelgrens.
Dit wordt uitgevoerd volgens een instructie. Gebrekkig onderhoud en vervuiling van het gereedschap leidt tot versnelde slijtage (zie ook § 4.4 van VM 112).

M.5.3 *Gereedschappen voor een buigautomaat*

De buigmogelijkheden op buigautomaten zijn uiteraard veel groter dan op excenterpersen. De gereedschappen bestaan uit twee delen, een snij- en een buiggedeelte. Het snijgedeelte vormt de strook dusdanig voor, dat nadien alle buigbewerkingen kunnen worden uitgevoerd in het buiggedeelte.
De buiggereedschappen zijn op aangedreven sleden gemonteerd. Als extra kan een eventueel noodzakelijke buigkern van achteren naar voren worden bewogen. De sleden worden d.m.v. een nokkentijdplan naar het te vormen product bewogen.
Door deze onafhankelijke sleden is men zeer vrij in het bepalen van een buigvolgorde, zodat zeer complexe vormen kunnen worden gebogen.

Literatuur

[1] Streefland, G.J.J.; IOP-Metalen Gebruikersrapportage Beklede Plaat: 'buigen en beslissen', TNO-rapport 92P/011724/STR, november 1992.
[2] Romanowski, W.P.; Handboek voor de moderne stanstechniek, Kluwer, Deventer, 1966.
[3] Lange, K.; Lehrbuch der Umformtechnik, Band 3 - Blechumformung, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
[4] TNO Metaalinstituut; Cursusboeken 1, 2 en 3, Machinale Plaatbewerking - Buigen.
[5] Metals Handbook, - Volume 14 - Forming and Forging, ASM, Ohio 1970 (in Nederland verkrijgbaar via de Bond voor Materialenkennis, Zwijndrecht).
[6] Westra, J.; Machines voor het vrijbuigen, zwenkbuigen en strijkbuigen van plaat, MB Productietechniek, Jrg. 61, No. 1/2, januari/februari 1995, pp. 14-31.
[7] Muiser, J.N., Steggink, A.G.P. en van Winsum, W.P.; Productietechnieken voor de werktuigbouw - Deel 1B Niet-verspanende technieken, Educaboek Culemborg, 1985.
[8] Oehler, G.; Biegen, Carl Hander Verlag, München, 1963.
[9] Ramaekers, J.A.H., Houtackers, L.J.A. en Peeters, P.B.G.; Plastisch bewerken van metalen, OMTEC, Mierlo, 1987.
[10] Ising, G.; Genaubiegen auf Schwenkbiegemaschinen, Blech Rohre Profile 39, (1992) 10, pp. 781-785.
[11] Ising, G.; Schwenkbiegemaschine mausert sich zum Bearbeitungszentrum, Bänder Bleche Rohre 2-1991, pp. 29-33.
[12] VM 111 - Materialen (vormgeven van dunne metaalplaat); Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 2008.
[13] VM 112 - Machines en gereedschappen (vormgeven van dunne metaalplaat); Vereniging FME-CWM, Zoetermeer, 2009.

Trefwoorden

	blz.
(achter)aanslag	22, 26-27, 42-45, 47-49
bombering	25, 42, 49
bramen	11
buigdoornmiddellijn	29
buighulp	27, 49
buigkracht	8-9, 13-15, 17-18, 20-22, 27, 44, 55
buiglijn	11-13, 16, 18-19, 22-27, 30, 49, 53-54
buiglijst	17, 24, 50-51, 53
buigspleet	13-15, 18, 22-23, 25, 49
buigverlies	16, 18-19, 25-26, 29
buigvolgorde	18, 24, 27, 55-56
correctiefactor	12-13, 19-22
dooddrukken	15, 24
elastische vervorming	10-11, 13, 15, 24, 49, 53
gatvervorming	18, 23
gereedschapconstructie	14-15, 52-53, 55
gereedschapmateria(a)l(en)	7, 15, 39, 41, 52, 56
hoektolerantie	22
inloopradius	12-13, 18, 23, 27, 53
(inwendige) productradius	8, 11-13, 18, 21-22, 24, 26-28, 51, 53
inwendige spanningen	25, 29
kalibreren	15-16, 20, 22, 24, 55, 56
matrijsbuigen	8-9, 14-16, 20, 22-24, 26, 41, 43, 51, 53
minimale buigradius	9, 11, 18, 29
natuurlijke radius	8, 12, 14, 18, 27
neerhouder	8, 51
neutrale lijn	9-11, 18, 20, 22
opspanbak	54
plastische vervorming	9-13
platine	26-27
randvervorming	10
restspanningen	9-10, 25
sinaasappelhuid	30
slijtage	11, 14-16, 25, 30, 39-40, 52, 56
smering	11, 13, 41, 56
strijkbuigen	8, 13-18, 20, 22-26, 41, 47, 51
terugvering	8-11, 13-18, 22-24, 26, 29, 50
uitlijning	13, 25
(plaat)uitslag	11, 13, 15-16, 18-20, 23-24, 26-27, 47, 56
uitslagbepaling/-berekening	11, 18-20, 26
V-opening	12-13, 18, 21-23, 25-28, 49, 51, 53-54
verstevigingsexponent	12, 18, 29
vrijbuigen	8, 12-13, 15-16, 18-26, 30, 40, 50-51, 53
walsrichting	11, 18, 23, 25-26, 29, 31-35
wrijving	11, 13-14, 41
zwenkbuigen	8-9, 16-18, 20, 22, 24-26, 40, 46-47

FME CWM

Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
T (079) 353 11 00
F (079) 353 13 65
E alg@fme.nl
I www.fme.nl