

## IOP-M dieptrekken : deel 2: de systematische maakbaarheids analyse

**Citation for published version (APA):**

Zande, van der, J. W. I., Kessels, M. W. H., Ramaekers, J. A. H., & Streefland, G. J. J. (1992). *IOP-M dieptrekken : deel 2: de systematische maakbaarheids analyse*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA1427). Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1992

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

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

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

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

**Technische Universiteit Eindhoven**

**Faculteit Werktuigbouwkunde**

**Vakgroep Produktietechnologie & Automatisering**

**Laboratorium voor Omvormtechnologie**

**IOP-M Dieptrekken.**

**Deel 2: De Systematische Maakbaarheids Analyse.**

**ir. J.W.I. van der Zande**

**ir. M.W.H. Kessels.**

**dr.ir. J.A.H. Ramaekers.**

**ir. G.J.J. Streefland.**

**TUE Onderzoeksrapport**

**december 1992**

**IOPM-D-120**

**WPA: 1427**

## SAMENVATTING.

In de industrie bestaat grote behoefte aan een analyse, waarmee de maakbaarheid van dieptrekproducten reeds in een vroeg stadium kan worden getoetst. De in het kader van het IOPM-dieptrekproject gebruikte definitie voor maakbaarheid is de volgende:

*" Een produkt is maakbaar als het via de gekozen procesmethode met de gekozen gereedschappen en materialen zonder falen en binnen de gestelde kwaliteitseisen kan worden gemaakt. "*

Het blijkt vaak moeilijk te zijn om tijdens de ontwerpfase en de fabricagevoorbereidingsfase de haalbaarheid (bijvoorbeeld de maakbaarheid van een bepaald produkt) te toetsen. Dit probleem wordt veroorzaakt door de grote complexiteit van het dieptrekproces, de grote variëteit in vormen, materialen en fabricagemethoden en het gegeven dat, bij gebrek aan fundamentele modelvorming, de kennis binnen bedrijven vaak bestaat uit de kennis van meestal oudere vaklieden. Met name bij personele en/of produkt vernieuwingen blijken er dan problemen te ontstaan.

In dit rapport wordt primair ingegaan op een ordeningsmethode, op basis van geometrische en procestechnische eigenschappen. Deze indeling berust op een splitsing van de produktgeometrie in basisvormen.

Om naar maakbaarheid te kijken wordt eerst gekeken naar de oorzaken van afkeur van een produkt. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen falen en optredende defecten.

Vervolgens wordt een methodiek besproken, waarmee de maakbaarheid van dieptrekproducten kan worden getoetst. Hierbij wordt gebruik gemaakt van dezelfde basisvormen. Voor deze toetsing staan drie analysemethoden ter beschikking:

- Empirie.
- Modellen (plastisch).
- Simulaties (EEM).

Uit gesprekken met de industrie is naar voren gekomen dat de indeling en de maakbaarheidsanalyse zeer bruikbaar zijn. De invulling van de maakbaarheidsanalyse is echter nog niet volledig. Dit wordt veroorzaakt doordat de modellen en de simulaties nog niet toepasbaar zijn voor niet-symmetrische produktgeometrieën.

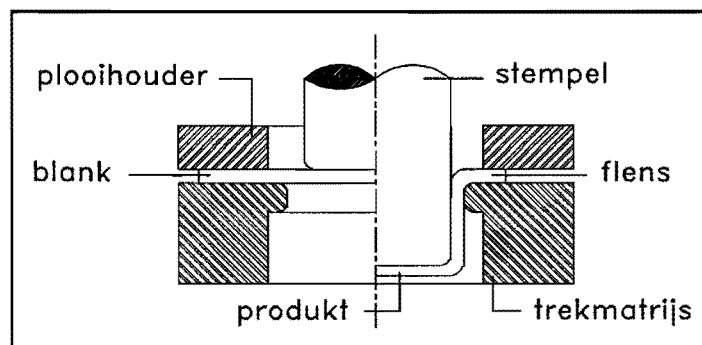
# INHOUD.

<b>SAMENVATTING.</b> . . . . .	2
<b>1. INLEIDING.</b> . . . . .	4
<b>2. DE ONTWERPCYCLUS.</b> . . . . .	6
<b>3. INDELING VAN DIEPTREKPRODUKTEN.</b> . . . . .	7
3.1. Indeling door middel van basisvormen . . . . .	7
3.1.1. Indelen van de buitencontour in basisvormen. . . . .	7
3.1.2. Indelen van de dwarsdoorsnede in basisvormen . . . . .	9
3.2. Indeling dieptrekprodukten in produktfamilies. . . . .	11
<b>4. HET OPSTELLEN VAN EEN SYSTEMATISCHE     MAAKBAARHEIDSANALYSE.</b> . . . . .	15
4.1 Faal- en defectvormen. . . . .	15
4.2. Ter beschikking staande analysemethoden. . . . .	17
4.2.1. Het hanteren van empirische gegevens. . . . .	17
4.2.2. Modelleringen . . . . .	19
4.2.3. Numerieke simulaties. . . . .	20
4.3. De algemene oplosprocedure . . . . .	22
4.3.1. Bepaling van de input . . . . .	22
4.3.2. De toetsing op maakbaarheid . . . . .	26
4.3.3. De output . . . . .	27
4.4. De eigenlijke maakbaarheidsanalyse . . . . .	28
4.4.1. Voorbeeld 9. . . . .	32
<b>5. RESUMÉ.</b> . . . . .	41
<b>LITERATUUR.</b> . . . . .	43
<b>BIJLAGE 1: Het modelleren van plastische processen.</b> . . . . .	45
<b>BIJLAGE 2: De Eindige Elementen Methode (E.E.M.).</b> . . . . .	50

## 1. INLEIDING.

In de plaatvervormende industrie is dieptrekken (zie figuur 1) een veel voorkomende fabricagemethode. Dieptrekken is een complex proces dat wordt beïnvloed door een groot aantal factoren [1]. In de nu volgende alinea wordt een definitie van dieptrekken gegeven. Voor een uitvoerige beschrijving van het dieptrekproces wordt naar deel één [IOP 110] verwezen.

*Onder dieptrekken wordt die bewerking verstaan waarbij uit plaatmateriaal een beker- of bakvormig produkt wordt gevormd. Bij dit proces stroomt het materiaal, dat voor de vorming van de wand van het produkt benodigd is, voornamelijk toe vanuit de flens.*



Figuur 1: Dieptrekken.

Een produkt wordt ontwikkeld in de ontwerpcyclus, waarin maakbaarheid over het algemeen centraal hoort te staan. De mogelijkheden om een dieptrekprodukt reeds in een vroeg stadium op maakbaarheid te toetsen zijn echter beperkt. In de industrie wordt in de meeste gevallen nog zwaar geleund op de bij personen aanwezige ervaringskennis. Deze kennis is echter moeilijk overdraagbaar of extrapoleerbaar op afwijkende produktvormen.

In het kader van het IOPM-dieptrekproject is gewerkt aan het toegankelijker maken van het dieptrekproces. Het verkrijgen van procesinzicht is hierbij een belangrijk aspect. Het biedt namelijk de mogelijkheid om in de toekomst meer voorspellend te werk te gaan en opgedane ervaring in te bedden. De verslaglegging van dit project bestaat uit zes onderdelen:

- |   |   |            |
|---|---|------------|
| 1 | De algemene inleiding.  | [IOPM 110] |
| 2 | De systematische maakbaarheidsanalyse.                                | [IOPM 120] |
| 3 | Het handboek voor de maakbaarheid van dieptrekprodukten.              | [IOPM 130] |
| 4 | Meer gedetailleerde informatie met betrekking tot het dieptrekproces. | [IOPM 140] |
| 5 | De meetrapporten.   | [IOPM 150] |
| 6 | De symbolenlijst.   | [IOPM 101] |

Uit een onderzoek naar de ontwerpcyclus kwam naar voren dat de werkvoorbereider de meest geschikte persoon is om een maakbaarheidsanalyse voor op te stellen. Dit is de man die over de meeste kennis, met betrekking tot het dieptrekproces, beschikt en in contact staat met de andere betrokken partijen.

Er is een groot scala aan mogelijke dieptrekprodukten. Dit grote aantal zorgt, in combinatie met het aantal invloedsfactoren, voor een complexe Ausgangssituatie als men op maakbaarheid wil toetsen. Er zal daarom eerst aandacht worden besteed aan het bepalen van een indeling van dieptrekprodukten, die zowel geometrische als procestechnische aspecten in zich herbergt.

Nadat deze indeling tot stand is gekomen zal een algemeen geldige systematiek worden ontwikkeld, waarmee een produkt op maakbaarheid kan worden getoetst. Uit deze systematiek wordt duidelijk dat het door middel van uitwisselbare modules mogelijk is om alle produkten uit de indeling op maakbaarheid te toetsen. Deze toetsing kan op drie manieren plaatsvinden:

1. Door middel van empirisch bepaalde gegevens.
2. Door middel van modellen.
3. Door middel van simulatietechnieken ( EEM ).

Niet alle modules zijn op het ogenblik met alle drie de methoden te vullen. In een groot aantal gevallen zal moeten worden volstaan met empirisch bepaalde gegevens en een aantal modules zal nog leeg blijven, omdat daar nog geen onderzoek naar is gedaan. Zodra echter de modellen en de simulatietechnieken uitgebreid kunnen worden naar niet rotatiesymmetrische ( 3-D ) geometriën, is de indeling voor het grootste deel te vullen.

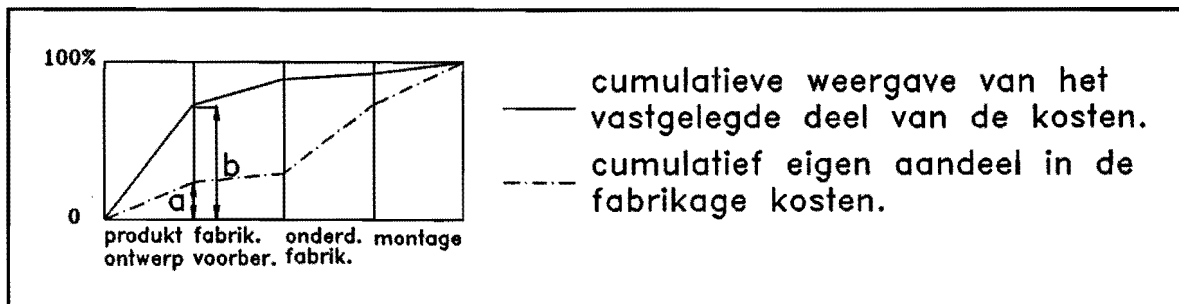
Er is op de TU Eindhoven onderzoek gedaan naar de haalbaarheid van een systematische maakbaarheidsanalyse [2]. Dat onderzoek is gebruikt als Ausgangssituatie voor dit rapport.

In de maakbaarheidsanalyse wordt geen rekening gehouden met de proceskeuze zelf of economische aspecten. In de praktijk zullen deze twee factoren echter goed overwogen moeten worden. Dit viel echter buiten het kader van het IOPM-Dieptrekproject.

## 2. DE ONTWERPCYCLUS.

Van idee tot werkelijk produkt wordt een aantal fasen doorlopen. Hier worden de volgende fasen beschouwd:

- produkt-ontwerp
- produktie-ontwerp
- produktie



Figuur 2: Weergave opbouw kostprijs van een produkt in de serie- en massafabricage.

In figuur 2 is weergegeven hoe de kostprijs van een produkt in de serie- en massafabricage is opgebouwd [3,4]. Naast het eigen aandeel in de fabricagekosten (a), wordt er een groot gedeelte van de uiteindelijke totale kosten vastgelegd (b). Wordt een produkt in dit stadium reeds op maakbaarheid getoetst, dan zal de communicatie tussen produkt-ontwerper en produktie-ontwerper (werkvoorbereider) aanmerkelijk verbeteren. In de praktijk verschilt dit van bedrijf tot bedrijf. Uit gesprekken met bedrijven is gebleken dat deze samenwerking in belangrijke mate de doorloopsnelheid en de kwaliteit van het eindprodukt bepaald.

Aan de bovenstaande drie fasen kan nog een belangrijke vierde partij, de gereedschappmaker, worden toegevoegd. De gereedschappen leggen namelijk ook beperkingen op aan het ontwerp.

In samenspraak met de praktijk is gekozen voor de werkvoorbereider als doelgroep. Deze beheerst vaak in voldoende mate de noodzakelijke kennis om met een maakbaarheidsanalyse te kunnen omgaan. Het zou echter de voorkeur verdienen om reeds in de produktontwerpfase op maakbaarheid te toetsen. Vaak ontbreekt het hier echter aan de nodige kennis van het productieproces. Een intensieve samenwerking tussen alle betrokken partijen is noodzakelijk voor een goed verloop van produkt-ontwerp tot produktie.

Naast de parameters die het werkelijke proces beïnvloeden zijn er meerdere factoren die het eindresultaat bepalen. Één van die factoren is bijvoorbeeld de werksituatie op de vloer. Deze factoren worden niet verder uitgewerkt, maar als een bedrijf een optimaal productieproces nastreeft zal het hier zeker aandacht aan moeten besteden.

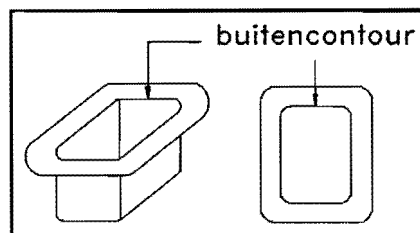
### 3. INDELING VAN DIEPTREKPRODUKTEN.

#### 3.1. INDELING DOOR MIDDEL VAN BASISVORMEN.

In de inleiding is er reeds op geattendeerd dat het scala van dieptrekprodukten legio is. Het is daarom noodzakelijk een ordening aan te brengen. Deze ordening behoort tot stand te komen via een systematiek die toepasbaar blijft met voortschrijdende produktcomplexiteit. Daarnaast is gezocht naar een indeling, die groepen met specifieke deformatie-eigenschappen bij elkaar plaatst.

Een dieptrekprodukt is op te splitsen in een buitencontour en een dwarsdoorsnede die langs de buitencontour wordt afgewikkeld. In de volgende paragrafen wordt daar verder op ingegaan.

##### 3.1.1. INDELEN VAN DE BUITENCONTOUR IN BASISVORMEN.



Figuur 3: Buitencontour van een produkt.

De flens van een produkt volgt de buitencontour (zie figuur 3), waardoor deze drie mogelijke deformatieprocessen kan ondergaan: stuiken, strekken en buigen. Hierbij dient de kanttkening te worden gemaakt dat over de gehele buitencontour wordt gebogen over de matrijsradius. Als het buigproces het enige deformatieproces is wordt het betreffende gebied hier met de naam buigzone aangeduid.

- stuiken: Het stuiken treedt op als de inwendige hoek van het produkt kleiner is dan  $180^\circ$ . Dit veroorzaakt een verdikking van de flens.



- buigen: Het begrip buigen geldt voor die gebieden waar de inwendige hoek precies  $180^\circ$  is. Dit is dus een recht lijnstuk waarbij het materiaal uit de flens alleen over de matrijsradius wordt gebogen.

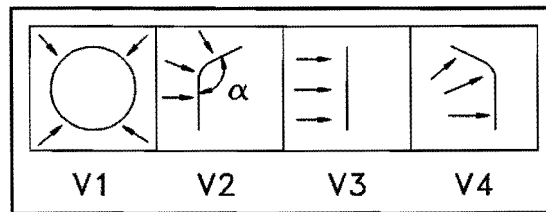


- strekken: Bij produkten die een inwendige hoek bezitten, die groter is dan  $180^\circ$ , moet het materiaal strekken om de radius te kunnen volgen. Dit heeft een diktevermindering tot gevolg, waardoor eerder scheuren kan optreden.





Studie heeft er toe geleid dat het opdelen van de buitencontour in geometrische segmenten en de samenhang met de deformatieprocessen resulteert in de volgende vier basisvormen (zie figuur 4).



Figuur 4: Indeling dieptrekprodukten in basisvormen.

De pijlen die in figuur 4 staan weergegeven, geven de materiaalstroom vanuit de flens aan.

### Basisvorm V1.

Deze basisvorm symboliseert de grote groep ronde produkten die vervaardigd worden door middel van dieptrekken. Over de gehele flens treedt stuiken op.

### Basisvorm V2.

Deze basisvorm wordt gevormd door een cirkelsegment dat een inwendige hoek heeft die kleiner is dan  $180^\circ$ . Hier treedt in de flens stuik op, basisvorm V1 is een bijzondere vorm van V2.

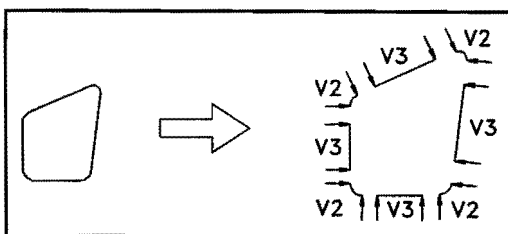
### Basisvorm V3.

Dit wordt de buigzone genoemd, het materiaal ondergaat in de flens geen deformaties.

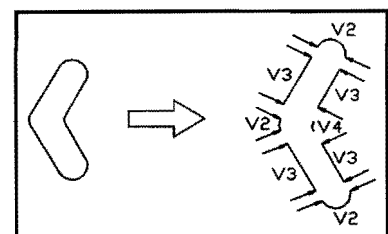
### Basisvorm V4.

Deze basisvorm wordt gevormd door een cirkelsegment dat een inwendige hoek heeft die groter is dan  $180^\circ$ . Hier treedt in de flens strekken op, waardoor het materiaal verdunt.

Om één en ander te verduidelijken zijn in figuur 5 twee typische buitencontouren opgedeeld in basisvormen.



Figuur 5a : Deling van de buitencontour.

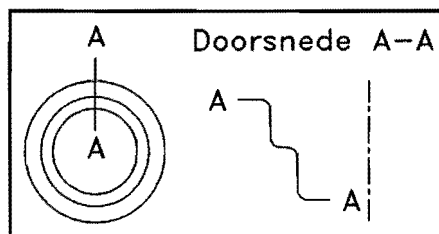


Figuur 5b: Deling van de contour.

Bij de opdeling van de produktcontour in cirkel- en lijnsegmenten wordt nog geen rekening gehouden met de overgangsgebieden die ontstaan als gekeken wordt naar de deformatieprocessen. Wel is hier al de kanttekening te maken dat de basisvormen V2 en V4 voor problemen zullen zorgen. Met name bij V4 zal, door de flensverduunning en de daarmee samenhangende wandverduunning, eerder gevaar voor scheurvorming ontstaan.

### 3.1.2 INDELEN VAN DE DWARSDOORSNEDE IN BASISVORMEN.

De basisvormen zoals ze in de vorige paragraaf zijn gepresenteerd hebben betrekking op het bovenaanzicht van een produkt. Verdere uitbreiding van deze basisvormen heeft betrekking op de dwarsdoorsnede van het produkt (zie figuur 6).

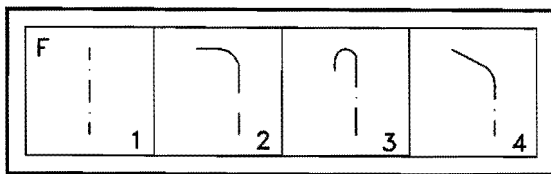


Figuur 6: afbeelding dwarsdoorsnede.

De dwarsdoorsnede zorgt ervoor dat het produkt driedimensionaal beschreven wordt. Er wordt bij deze onderverdeling uitgegaan van een gelijk blijvende doorsnede over de gehele contour van het produkt. Dit houdt in dat de dwarsdoorsnede over de gehele buitencontour wordt afgewikkeld.

De dwarsdoorsnede van een diepgetrokken produkt wordt verdeeld in drie zones:

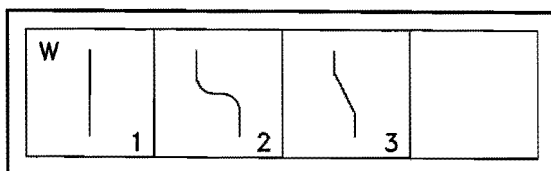
**F** De al of niet aanwezige flens van het eindprodukt (zie figuur 7).



Figuur 7: Mogelijke dwarsdoorsneden van de flens.

- 1 : geen flens.
- 2 : rechte flens.
- 3 : omgekraalde flens.
- 4 : scheve flens.

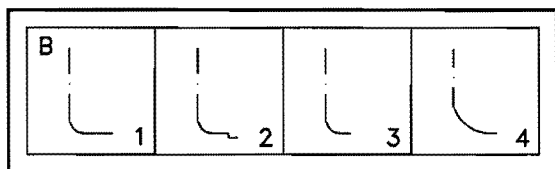
**W** De gevormde wand van het eindprodukt (zie figuur 8).



Figuur 8: Mogelijke dwarsdoorsneden van de wand.

- 01 : rechte wand.
- 02 : getrapte wand.
- 03 : conische wand.

**B** De bodem van het eindprodukt (zie figuur 9).



- 1 : vlakke bodem.
- 2 : bodem met strekzone.
- 3 : bodem met gat.
- 4 : bolle bodem.

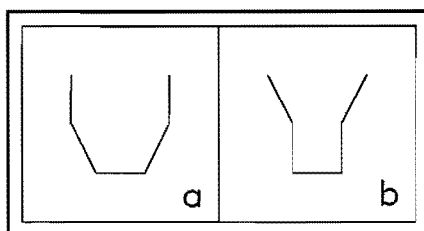
*Figuur 9: Mogelijke dwarsdoorsneden van de bodem.*

Deze drie groepen moeten onderling combineerbaar zijn en daarnaast combineerbaar met de eerste groep basisvormen.

Voor groep B geldt dat er onderling ook nog combinaties mogelijk moeten zijn. De in dat geval gehanteerde notatie is als volgt:

W13 : Dit houdt in dat het produkt van buiten naar binnen beschouwd eerst een rechte wand heeft, die overgaat in een schuine wand (zie figuur 10a).

W31 : Dit houdt in dat een produkt van buiten naar binnen beschouwd eerst een schuine wand heeft, die overgaat in een rechte wand (zie figuur 10b).



*Figuur 10: Voorbeeld van mogelijke wandcombinaties.*

Uit de indeling naar basisvormen en de indeling naar dwarsdoorsneden kan nu een indeling naar produktfamilies gedestilleerd worden.

### 3.2. INDELING DIEPTREKPRODUKTEN IN PRODUKTFAMILIES.

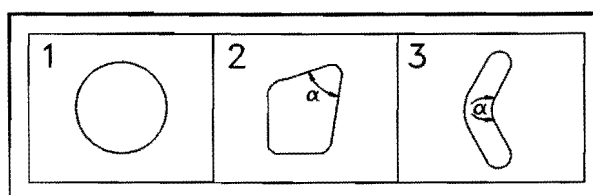
De opsplitsing van de buitencontour van een dieptrekprodukt in basisvormen heeft het voordeel dat een indelingssystematiek gehanteerd kan gaan worden. Deze systematiek gaat niet alleen op voor geometrische overeenkomsten, maar ook voor specifieke deformatie-eigenschappen. De indeling van de produktfamilies is als volgt (zie figuur 11):

- 1 Rotatiesymmetrische dieptrekprodukten waarin zich in de flens alleen stuikzones bevinden.
- 2 Dieptrekprodukten waarbij de deformatiezones in de flens zijn samengesteld uit stuikzones en buigzones.
- 3 Dieptrekprodukten waarbij de deformatiezones in de flens zijn samengesteld uit stuik-, buig-, en strekzones.

Onder buigzone wordt hier die zone verstaan waarbij het materiaal in de flens geen deformatie ondergaat. Uiteraard wordt er over de hele contour gebogen over de matrijsradius. Het begrip buigzone is echter een ingeburgerde term.

Parallel aan de hierboven beschreven indeling van de produktfamilies loopt de indeling op basis van combinaties van de basisvormen:

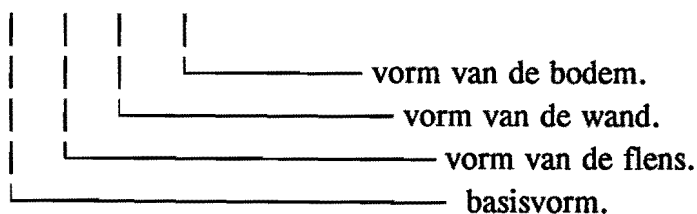
- 1 basisvorm V1.
- 2 basisvormen V2 en V3.
- 3 basisvormen V2, V3 en V4.



Figuur 11: Indeling produktfamilies.

De onderverdeling van de produktfamilies zelf wordt gedaan op basis van de dwarsdoorsneden. Het aantal mogelijke combinaties van de dwarsdoorsnedezones is groter dan vijftig. Om dit visueel te verduidelijken door middel van een overzichtstekening is niet zinnig. Er is hier dan ook gekozen voor een algemene notatie:

V1.F1.W01.B1



Een produkt uit familie twee zal dus zijn opgebouwd uit twee soorten basisvormen, waarbij de basisvormen afwijkende geometrieën kunnen hebben (denk daarbij aan de hoekradius).

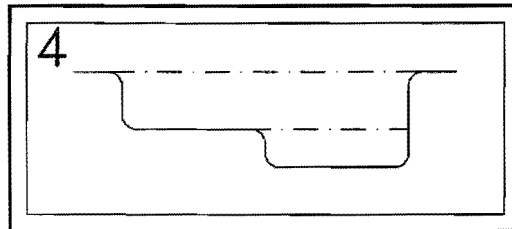
De grote groep produkten met een niet gesloten contour is niet meegenomen in de indeling. Door de basisvorm te beschouwen waar het produkt uit bestaat is vaak toch een indicatie met betrekking tot de maakbaarheid te verkrijgen.

In de indeling worden nog twee andere produktfamilies opgenomen. Deze families zijn afwijkend om twee verschillende redenen:

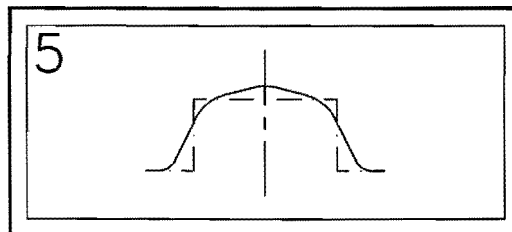
**Produktfamilie 4:** Het produkt is geometrisch niet te vangen in de eerste indeling. Dit houdt in dat de dwarsdoorsnede van het produkt niet over de gehele contour gelijk is ( zie figuur 12 ).

**Produktfamilie 5:** Het produkt wordt via een afwijkende methode gefabriceerd. Dit houdt in dat er geen "normaal" trekschema gehanteerd wordt ( zie figuur 13 ).

De symbolen van deze families zijn als volgt:



*Figuur 12: Produktfamilie 4.*



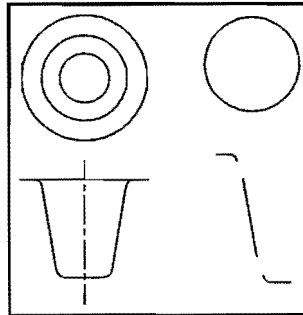
*Figuur 13: Produktfamilie 5.*

Produktfamilie vijf wordt naar het franse woord Oeillet genoemd. Dit betekend vetergat en slaat op het kleine ringetje dat in dit gat zit. Dit produkt wordt op een bijzondere manier gefabriceerd en is gekozen om deze groep te symboliseren.

De produktfamilies vier en vijf worden niet uitgewerkt, zij dienen alleen om aan te geven dat er nog produkten denkbaar zijn die niet in de indeling opgenomen kunnen worden.

Er volgen nu drie voorbeelden die aangeven hoe een produkt wordt verdeeld in basisvormen en dwarsdoorsneden. De produktfamilie waartoe het produkt behoort volgt hieruit vanzelf.

#### Voorbeeld 1:



*Figuur 14: Voorbeeld 1.*

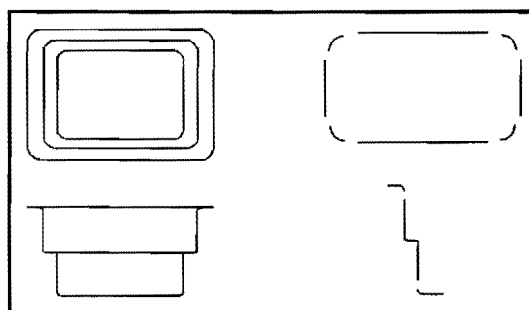
Het produkt in figuur 14 wordt onderverdeeld in één basisvorm V1. Hieruit kan al de conclusie worden getrokken dat het produkt in produktfamilie één wordt geplaatst, indien de dwarsdoorsnede over het gehele produkt gelijk is. Gaan we nu kijken naar de dwarsdoorsnede van deze basisvorm dan zijn daarin drie gebieden te onderscheiden:

- rechte flens
- conische wand
- rechte bodem

Dit leidt tot een totale codering van het produkt:

V1.F2.W03.B1.

#### Voorbeeld 2:



*Figuur 15: Voorbeeld 2.*

Het produkt in figuur 15 wordt onderverdeeld in twee verschillende basisvormen V2 en V3. de hoekradii van het produkt zijn in dit geval allemaal gelijk , maar deze kunnen bij andere produkten verschillend zijn. Volgens de indeling in basisvormen is dit produkt nu onder te brengen in produktfamilie twee. Er wordt nu verder gekeken naar de dwars-doorsnede van deze basisvormen. Volgens de gestelde voorwaarden moeten alle basis-vormen dezelfde doorsnede vertonen. Dit is bij dit produkt het geval, zodat het toegestaan is om hier mee

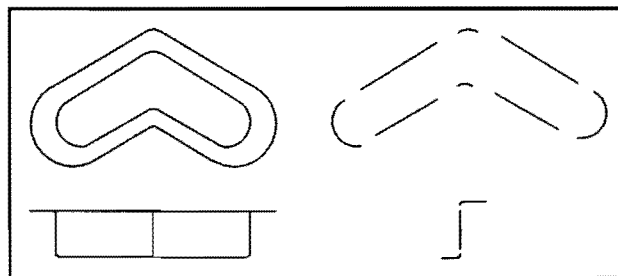
verder te werken. We onderscheiden hier weer de drie verschillende gebieden:

- rechte flens
- getrapte wand
- rechte bodem

Het produkt wordt nu samengesteld uit deze basisvormen nadat deze apart zijn beschouwd. Het produkt wordt dus door een combinatie van twee notaties beschreven.

V2.F2.W02.B1 en V3.F2.W02.B1.

**Voorbeeld 3:**



*Figuur 16: Voorbeeld 3.*

Het produkt in figuur 16 wordt onderverdeeld in drie verschillende basisvormen V2, V3 en V4. Aangezien het produkt over de gehele buitencontour een zelfde dwarsdoorsnede heeft is dit produkt onder te verdelen in produktfamilie drie. Ook hier geldt weer dat er vervolgens nader naar de dwarsdoorsnede van de basisvormen wordt gekeken. We onderscheiden de volgende vormen:

- rechte flens
- rechte wand
- rechte bodem

Dit produkt is opgebouwd uit drie verschillende basisvormen die in een later stadium weer aan elkaar gekoppeld dienen te worden. De notaties voor de volgende vormen is als volgt:

V2.F2.W01.B1 en V3.F2.W01.B1. en V4.F2.W01.B1.

N.B.

Zoals in de voorbeelden duidelijk naar voren is gekomen blijft de combinatie na de notering van de basisvorm hetzelfde. Dit is inherent aan de gelijkblijvende dwarsdoorsnede.

## 4. HET OPSTELLEN VAN EEN SYSTEMATISCHE MAAKBAARHEIDSANALYSE.

### 4.1 FAAL- EN DEFECTVORMEN.

Om een produkt op maakbaarheid te kunnen toetsen moet eerst worden vastgelegd wat onder 'maakbaar' dient te worden verstaan. De in het kader van het dieptrekproject gebruikte definitie luidt:

*" Een produkt is maakbaar als het via de gekozen procesmethode met de gekozen gereedschappen en materialen zonder falen en binnen de gestelde kwaliteitseisen kan worden gemaakt. "*

In de definitie is sprake van "zonder falen". Dit begrip is opgenomen omdat het optreden van falen altijd leidt tot de conclusie dat het produkt niet maakbaar zal zijn. Falen staat namelijk een voltooiing van de dieptrekslag in de weg. Scheuren ( falen ) onder trek treedt op als in één van de lokale insnoeringen een kritische waarde van rek of spanning wordt overschreden. In de literatuur spreekt men in dit geval van een grensvorming. Twee bij dieptrekken regelmatig voorkomende faalvormen zijn [5]:

- Het uitscheuren van de bodem.
- Het ontstaan van scheuren in de wand van het produkt.

In de voor het begrip "maakbaar" gepresenteerde definitie is verder sprake van kwaliteitseisen waaraan een produkt moet voldoen. Voor deze kwaliteitseisen worden criteria opgesteld waaraan het produkt kan worden getoetst. Zoals in het verdere verloop van deze paragraaf nog zal blijken, zijn niet alle kwaliteitseisen van het produkt even streng.

Als een produkt niet aan de gestelde kwaliteitseisen voldoet komt dit doordat er sprake is van een ontoelaatbaar defect. Er wordt dus een duidelijk onderscheid gemaakt tussen falen en defecten en daarnaast tussen toelaatbare en ontoelaatbare defecten. In analogie met Eshel, Barash en Johnson [6] wordt gebruik gemaakt van de volgende definitie voor een 'defect'.

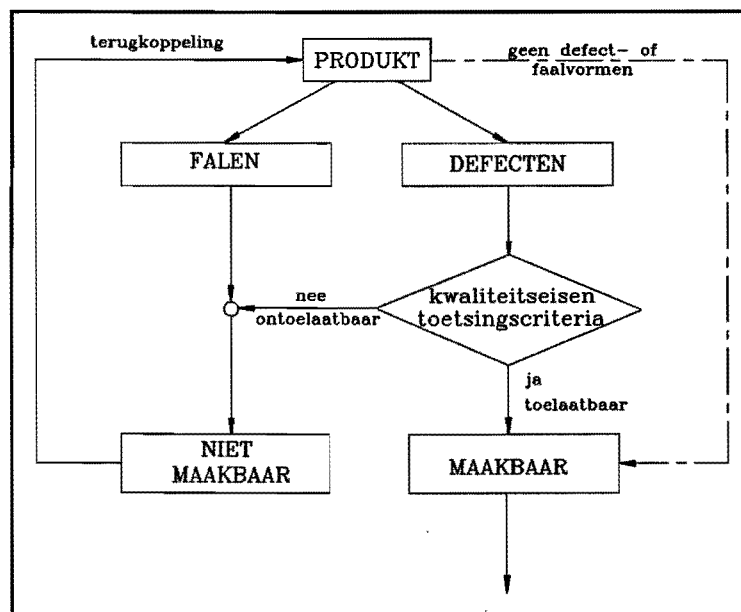
Een defect is een ongewenste geometrie of oppervlakte afwerking.

In geval van een defect wordt de kritische spanning niet overschreden en de dieptrekslag kan in zijn geheel worden voltooid. Defecten kunnen worden onderverdeeld in drie groepen:



- Defecten die betrekking hebben op de globale geometrie van het produkt.  
Voorbeelden zijn:
  - Ploovorming in de flens of in de wand van het produkt.
  - Oorvorming.
  
- Defecten die optreden aan het oppervlak van het produkt.  
Voorbeelden zijn:
  - Sinaasappelhuid.
  - Krassen.
  - Lüderslijnen.
  - Oppervlakteruwheid.
  
- Defecten die betrekking hebben op de maat- en vormtoleranties van het produkt.  
Voorbeelden zijn:
  - Variabele wanddikte.
  - Onvlakheid, onrondheid e.d. t.g.v. terugvering.

Om één en ander visueel te verduidelijken is in figuur 17 een diagram gepresenteerd.



Figuur 17: Overzicht falen en defecten.

Zoals reeds werd gesteld zijn niet alle kwaliteitseisen even streng. De defecten kunnen dan ook worden onderverdeeld in toelaatbare en ontoelaatbare defecten, zoals uit volgend duidelijk is:

Als de kofferbak van een auto een lichte plooiing vertoont zal dit niet tot afkeur van het produkt leiden aangezien het geen zichtdeel betreft, dit is dus in deze situatie een toelaatbaar defect. Is deze zelfde plooiing echter aanwezig in het portier van een auto dan zal dit onherroepelijk tot afkeur, dus een ontoelaatbaar defect leiden, omdat het een in het oog springende oppervlakte afwijking is.

Combinaties van kwaliteitseisen zijn mogelijk. De werkvoorbereider dient echter zelf aan te geven met welke criteria en binnen welke grenzen moet worden getoetst.

## **4.2. TER BESCHIKKING STAANDE ANALYSEMETHODEN.**

Om een produkt of productieproces te analyseren zijn een drietal bronnen van informatie aanwezig:

- Empirie
- Modellen ( plastisch )
- Simulaties ( Numeriek )

In de praktijk wordt ook in deze volgorde gebruik gemaakt van deze methode. Empirie is namelijk een snel afschattmiddel en de andere methoden vereisen meer tijd en inzicht van de gebruiker en daarnaast is meer voor-informatie noodzakelijk. In de nu volgende paragrafen zal daar verder op worden ingegaan.

### **4.2.1. Het hanteren van empirische gegevens.**

Veel onderzoekers hebben zich reeds bezig hebben gehouden met het dieptrekken van plaat. Zij hebben voor verscheidene produktvormen resultaten bereikt en gepresenteerd. Onder empirie wordt het volgende verstaan:

*Geordende ervaringsgegevens in tabellen, met kentallen. Soms theoretisch afgeleid en/of ondersteund zo niet, dan is het moeilijk om buiten het proefgebied zaken te voorspellen.*

Het nadeel van de empirische aanpak is dat gegevens slechts binnen een bepaald gebied ( materialen en procescondities ) geldig zijn. Indien dit gebied niet duidelijk afgebakend is, kan niet met zekerheid worden gezegd of het produkt wel of niet maakbaar is.

Er ontstaat dus een "grijs" gebied; "misschien maakbaar". Nader onderzoek met modellen of simulaties kan hier soms een antwoord geven.

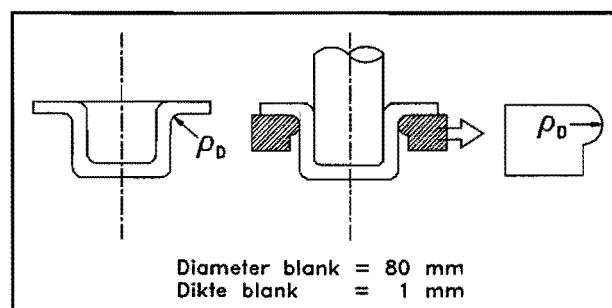
Het feit dat een gedeelte van de literatuur reeds tientallen jaren oud is zou de indruk kunnen wekken dat de gegevens niet meer betrouwbaar zouden zijn. Dit met het oog op verbeterde materialen en beter beheersbare procescondities. Door het controleren van een tabel van Romanovski [7] door TNO [8] is echter aangetoond dat veel van deze gegevens nog steeds geldig zijn. De indicaties "dieptrekstaal" en "grote produkten" zijn echter te relatief. De materiaalspecificaties zijn op het ogenblik in een zo ver gevorderd stadium dat er niet voldoende gegevens uit de literatuur te halen zijn. Één van de grootste problemen die zich bij het werken met gegevens uit de literatuur voordoet is dat er regelmatig tegenstrijdigheden in voorkomen. Dit is waarschijnlijk te wijten aan de hierboven weergegeven gang van zaken. De materiaal- en procescondities zijn niet gespecificeerd, waardoor een grote spreiding in de resultaten ontstaat. Een andere mogelijkheid kan zijn dat er met verschillende definities van maakbaarheid is gewerkt. Bij het ene naslagwerk zal een hoger uitvalpercentage worden geaccepteerd dan bij het andere. Deze criteria worden over het algemeen niet vermeld. Om nu niet alle beschikbare literatuur mee te blijven nemen heeft er reeds een eerste voorselectie plaatsgevonden. Dit heeft geleid tot de volgende naslagwerken:

- Romanovski ( ROM ). [7]
- Eshel, Barash and Johnson ( EBJ ). [6]
- TNO ( TNO ). [8]

Deze werken komen uit verschillende tijdvakken en hebben daarnaast een verschillende achtergrond. Ook deze werken geven een zekere spreiding in de resultaten. In het geval dat de onderlinge verschillen groot zijn en er zijn er twee die relatief dicht bij elkaar liggen, dan wordt het gedeelte dat overlapt als grens genomen. Bijvoorbeeld:

#### Voorbeeld 4:

De toegestane grenzen voor de afronding van de buigradius van de trekking voor een produkt zoals hieronder wordt afgebeeld zijn als volgt:



*Figuur 18: Keuze afrondingsstraal trekking.*

Romanovski:	$\rho_D = ( 15-20 )s_0$
Eshel, Barash and Johnson:	$\rho_D = ( 4-10 )s_0$
TNO:	$\rho_D = ( 5-15 )s_0$

Hier wordt duidelijk dat er grote verschillen kunnen zijn. We nemen nu aan dat de waarden die ROM heeft gevonden in de huidige situatie te veilig zijn. Het verschil tussen EBJ en TNO is niet goed te definiëren. Beide zijn volgens de literatuur praktisch getoetst en hebben toch een behoorlijke afwijking. Aangezien er in de SMA gebruik dient te worden gemaakt van een grote betrouwbaarheid wordt nu het gebied gekozen dat elkaar overlapt:

$$( 5-10 ) s_0$$

Op deze manier blijft er echter een gebied over, waarin de verschillende naslagwerken elkaar tegenspreken. Dit gebied is het grijze gebied, er kan niet duidelijk aangegeven worden in welk geval wel en wanneer niet mag worden afgeweken van deze waarden.

De analysemethoden door middel van analytische modellen en eindige elementen ( zie de volgende paragrafen ) zijn hier geschikter voor. Liggen de waarden echter binnen de empirische grenzen dan mag er van worden uitgegaan dat het produkt op dat aspect maakbaar is.

#### 4.2.2. Modelleringen.

Op het moment dat bij de empirische methode de maakbaarheid van een produkt in het grijze gebied komt te liggen, kan worden gekozen voor een meer gedetailleerde analyse methode.

Één van de kenmerken van het hanteren van een modellering is, dat het mogelijk is om een deelprobleem te beschouwen. Een modellering maakt namelijk in bijna alle gevallen gebruik van deeloplossingen, die in een later stadium worden samengevoegd tot een totale oplossing.

Modellen van omvormprocessen worden ontwikkeld met behulp van methoden uit de plasticiteitsmechanica ( zie bijlage 1 ). Hierbij wordt altijd uitgegaan van een idealisering van de werkelijkheid. De oplossingen zijn dus benaderingen, waarbij toetsing essentieel is. Toetsing heeft plaatsgevonden door middel van laboratorium experimenten en door middel van confrontatie met praktijkervaring ( empirie ).

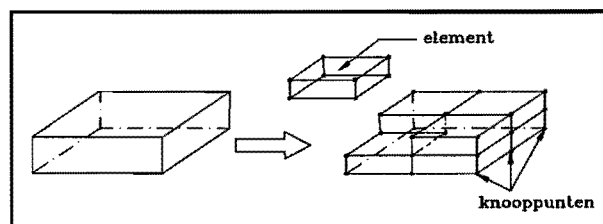
Modellen worden altijd specifiek voor een produktfamilie met analoge vormen ontwikkeld. Dit ontwikkelen is werk voor specialisten en kost vrij veel tijd ( weken tot maanden ). Tot nu toe zijn vrijwel alleen rotatiesymmetrische produkten geanalyseerd. Toepassing op niet rotatiesymmetrische geometriën biedt nog veel problemen.

Indien procesmodellen beschikbaar zijn bieden ze wel veel voordelen. Op eenvoudige wijze is dan een parameter onderzoek mogelijk.

#### 4.2.3. Numerieke simulaties.

Alvorens er wordt ingegaan op de voor- en nadelen van de Eindige Elementen Methode (E.E.M.) ten opzichte van de andere twee ter beschikking staande analysemethoden zal zeer beknopt uiteen worden gezet hoe de eindige elementen methode in zijn werk gaat. Een uitvoeriger beschrijving is terug te vinden in bijlage 2.

De Eindige Elementen Methode (E.E.M.) is één van de meest toegepaste numerieke simulatiemethoden. Bij deze methode wordt een lichaam of een constructie in een eindig aantal kleine discrete delen, de elementen, opgedeeld ( zie figuur 19). De elementen zijn met elkaar verbonden via knooppunten. Het netwerk van knooppunten en elementen dat op deze wijze wordt verkregen noemt men de mesh.



*Figuur 19: Het opdelen van een lichaam in discrete delen.*

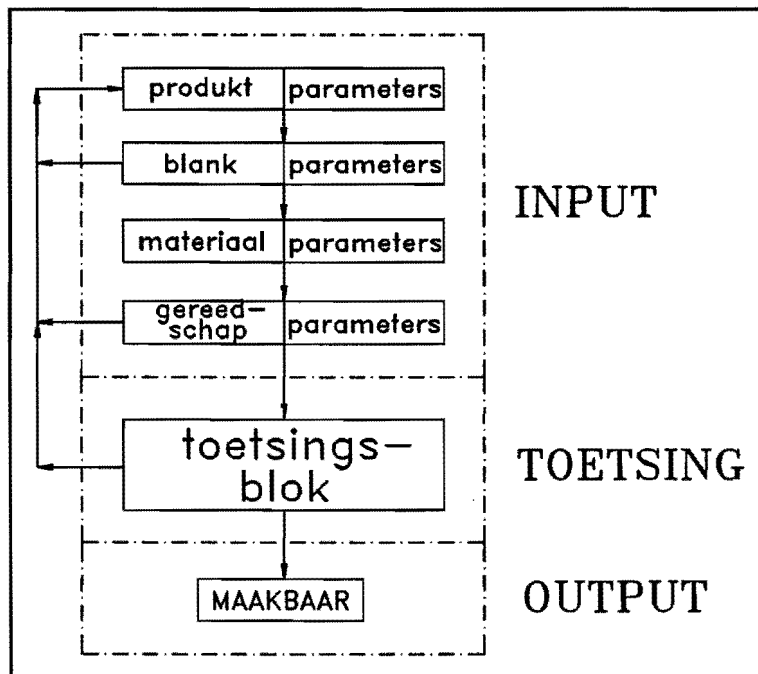
Er zijn op dit moment een groot aantal eindige elementen pakketten beschikbaar. Deze kunnen ruw-weg gesproken worden onderverdeeld in algemene en speciale toepassingspakketten. De eerste categorie kan voor een groot aantal probleemgebieden worden gebruikt, terwijl de tweede categorie voor één bepaald probleemgebied is ontwikkeld. In het IOP-M Dieptrekproject is gewerkt met de pakketten GIFTS [9] en ABAQUS [10].

GIFTS is een lineair elastisch eindig elementen pakket dat toegepast kan worden om een eerste indicatie te verkrijgen over de spanningsverdeling in de wand van het vierkante dieptrekproces [11]. De twee grootste voordelen van GIFTS zijn het feit dat het pakket reeds op een eenvoudige PC kan worden gebruikt en dat de rekentijden beperkt blijven, doordat er in het elastische gebied wordt gerekend. De rekentijden zijn natuurlijk wel afhankelijk van de gebruikte PC.

ABAQUS [12,13] is een "non linear general purpose" eindig elementen pakket, dat niet op een PC werkzaam is. Om met het pakket te werken dient een werkstation aangeschaft te worden. De aanschafkosten van zo'n werkstation bedragen al snel fl. 25.000,-. De kosten voor het gebruik van ABAQUS bedragen op jaarbasis \$ 10.000 . Ofschoon volgens velen de eindige elementen methode de methode van de toekomst is, zijn dit zeker voor het midden en klein bedrijf aanzienlijke kosten. Gelet op het feit dat het gebruik van het pakket van de gebruiker zeer veel kennis en inspanning vereist. De verwachting is echter dat er in de toekomst een groot aantal expertbureau's zal ontstaan voor het verrichten van eindig elementen onderzoek. De kwaliteit van de analist is namelijk even belangrijk als de kwaliteit van het gebruikte pakket voor het uiteindelijke resultaat. Ook voor deze resultaten geldt dat ze getoetst dienen te worden. De resultaten die verkregen worden met behulp van de eindige elementen methode zijn in het algemeen nauwkeuriger dan de resultaten van de ander twee analysemethoden. Het kost echter meer tijd en moeite om deze resultaten te verkrijgen. Één van de grootste voordelen van deze methode is zijn algemene toepasbaarheid. De ontwerper is namelijk in staat om parameters te variëren waardoor meerdere produkten geanalyseerd kunnen worden. De mogelijkheden tot het simuleren van drie-dimensionale niet rotatie-symmetrische produkten zullen zich in de toekomst alleen nog maar verbeteren.

### 4.3. DE ALGEMENE OPLOSPROCEDURE.

Om de maakbaarheid van een dieptrekproduct te bepalen is een algemene oplosprocedure ontwikkeld. De totale procedure wordt in figuur 20 weergegeven.



Figuur 20: Algemene oplosprocedure voor de maakbaarheidsbepaling.

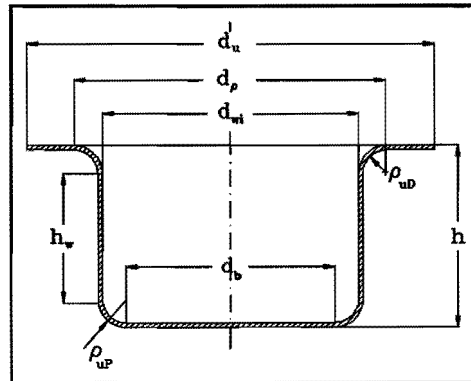
De invulling van bepaalde stappen verschilt echter per produktvorm. Er wordt nu per onderdeel van de maakbaarheidsbepaling een toelichting gegeven. Daarbij dient er op te worden gelet, dat voor de verschillende analysemethoden een andere input mogelijk kan zijn.

#### 4.3.1. BEPALING VAN DE INPUT.

De input bestaat uit die gegevens, die noodzakelijk zijn om een produkt op maakbaarheid te kunnen toetsen. De betreffende parameters worden door het produktontwerp voorgeschreven of door middel van regels aangenomen.

### a) Het eindprodukt.

Het eindprodukt wordt door de produktontwerper aangeleverd. In figuur 21 wordt de algemene vorm van een mogelijk ontwerp gegeven.



Figuur 21: Voorbeeld van een produktontwerp.

Uit het ontwerp volgt slechts één parameter die gebruikt zal worden bij de maakbaarheidsbepaling en dat is het stempeloppervlak:

$$A_p = \text{Stempeloppervlak} \quad [\text{mm}^2]$$

### b) De blank.

Uit het produktontwerp wordt de blank bepaald. Dit kan op drie manieren gebeuren:

- M.b.v. oppervlakteinvariantie (plaatdikte is constant)
- M.b.v. volumeinvariantie
- M.b.v. een praktijkmethode

Hierbij moet rekening worden gehouden met de vorm van de blank. De vorm bepaalt in het geval van niet rotatiesymmetrische producten voor een belangrijk deel het verloop van het proces. De blankafmetingen zorgen voor een aantal parameters:

$$s_0 = \text{Oorspronkelijke dikte van de blank} \quad [\text{mm}]$$

$$A_B = \text{Oppervlakte van de blank} \quad [\text{mm}^2]$$

$$\text{De blankcontour (specifieke blankafmeting)} \quad [\text{mm}]$$

Uit deze gegevens kan de globale dieptrekverhouding worden bepaald:

$$\beta_0 = \sqrt{A_B / A_p}$$



### c) Het materiaal.

In voorkomende gevallen kan de werkvoorbereider nog invloed uitoefenen op de materiaalkeuze. Dit kan de doorslag geven voor de maakbaarheid bij een kritisch productieproces. Er is echter een groot verschil tussen de benodigde materiaalparameters voor de verschillende analysemethoden.

In het geval gebruik wordt gemaakt van empirisch bepaalde gegevens is het vaak voldoende om te volstaan met de opmerking dat gebruik is gemaakt van materiaal met dieptrek-kwaliteit. In de meeste gevallen gelden de gehanteerde gegevens dan voor dat materiaal. Worden er bandbreedtes aangegeven binnen de gegevens voor bijvoorbeeld goede omstandigheden en slechte omstandigheden, dan spelen de materialen daar ook een rol in.

Wordt er gebruik gemaakt van modelleringen dan zullen meerdere materiaalparameters bekend moeten zijn. Deze gegevens worden niet altijd standaard door de leverancier aangeleverd. Afhankelijk van de seriegrootte en de "risicomarge" ( afstand tot de kritische grens ), moet toch aandacht aan het nauwkeurig bepalen van de materiaaleigenschappen worden geschonken. Hiermee zijn kosten verbonden ( technologische trekproef, metallografisch onderzoek e.d. ). Het goedkoopste is, om op basis van empirische regels, veilige condities te kiezen.

Voor de eindige elementen methode geldt hetzelfde als voor de modellering. In een aantal gevallen hebben de beschikbare pakketten minder parameters en in een aantal gevallen meer parameters nodig dan de modellering. Meer gedetailleerde informatie dan die noodzakelijk voor de empirische gegevens is altijd noodzakelijk.

In het geval een produkt door de empirie als zijnde makkelijk maakbaar wordt getoetst is het niet nodig om meer moeite te doen om alle parameters te bepalen. In deel één en deel vier is meer informatie met betrekking tot de materiaalparameters gegeven.

#### d) Het gereedschap.

Een aantal gereedschapsafmetingen worden min of meer vastgelegd door de vorm van het produkt ( bijvoorbeeld de contour ). Andere belangrijke afmetingen zijn nog vrij te kiezen ( bijvoorbeeld de afrondingsstralen van trekking en stempel ). Dit kan ook betekenen dat het produkt nog een nabewerking moet ondergaan (denk daarbij aan een kalibratieslag).

Voor de werkvoorbereider geldt dat de gereedschappen de mogelijkheid bieden om mee te variëren. Er is onderzoek gedaan naar de waarden van deze parameters en hiervoor zijn in de literatuur relaties gevonden waaraan gereedschappen moeten voldoen [IOP 130, IOP 140].

Deze relaties zijn in verschillende naslagwerken anders, waardoor er geen eenduidig voorschrift gegeven kan worden voor de gereedschapsafmetingen. De verschillen worden veroorzaakt door uiteenlopende oorzaken. Één van de oorzaken is het feit dat de materialen en procescondities vaak niet voldoende zijn gespecificeerd om er een werkelijk verband tussen te kunnen leggen. Een andere oorzaak is de gehanteerde definitie van maakbaarheid, dit houdt in dat de één een uitvalpercentage van vijf en de ander van tien procent accepteert. Dit wordt vaak niet vermeld in de naslagwerken, zodat daar een bandbreedte door ontstaat.

Bij de gereedschappen worden ook de smeermiddelen ondergebracht. Dit zorgt voor twee andere parameters:

$\mu_1$	= Wrijvingscoëfficiënt tussen flens en gereedschap	[-]
$\mu_2$	= Wrijvingscoëfficiënt tussen flens en matrijsradius	[-]

Ten aanzien van twee punten kan nu op maakbaarheid worden getoetst.

- Ten eerste wordt de globale dieptrekverhouding bepaald. Deze mag een bepaalde waarde niet overschrijven. Dit wordt getoetst in een later stadium.
- Ten tweede moeten de afrondingsstralen van de gereedschappen bepaald worden door middel van relaties die empirisch bepaald zijn. Als deze stralen groter zijn dan de stralen die in het produkt opgenomen zijn dan zal een vervolgbewerking noodzakelijk zijn.

In het geval dat het niet is toegestaan om een vervolgbewerking plaats te laten vinden zal het produktontwerp moeten worden aangepast.

### 4.3.2. DE TOETSING OP MAAKBAARHEID.

Nadat de noodzakelijke parameters zijn bepaald is het mogelijk om het gekozen proces op maakbaarheid te gaan toetsen. Daarbij wordt voornamelijk gekeken naar de eerste trek.

#### Het filter.

Het produkt moet worden getoetst op de gestelde kwaliteitseisen (zie paragraaf 4.1.). Hiervoor wordt gebruik gemaakt van één of meer van de ter beschikking staande analysemethoden. Voordat een methode echter toegepast mag worden dient te worden getoetst of de methode wel geldig is voor het probleem. Een aantal analysemethoden heeft namelijk een beperkt geldigheidsgebied. Indien aan dit filter wordt voldaan kan het produkt op de betreffende kwaliteitseis worden getoetst.

Wordt er echter niet aan het filter voldaan dan zal de uitkomst van de analyse zijn dat er geen uitspraak over de maakbaarheid kan worden gedaan. Dit wil echter niet zeggen dat het produkt niet maakbaar is.

#### Voorbeeld 5.

Een voorbeeld van een filter is de instelling van de plooihouderdruk bij de eerste trek volgens Romanovski [7]. Indien de relatieve materiaaldikte  $s/2r_{w0}$  groter is dan 0,017 dan is geen plooihouderkracht nodig. Wordt in dit geval de plooihouderkracht toch ingesteld volgens de formule dan zullen de resultaten onvoorspelbaar worden.

#### Voorbeeld 6.

Een tweede voorbeeld is de geldigheid van tabellen met betrekking tot de materiaaleigenschappen. Veel van de gepresenteerde tabellen zijn geldig voor dieptrekstaal, waarbij niet wordt aangegeven binnen welke parametergrenzen dit materiaal dient te liggen. Er zal hier worden aangenomen dat de staalsoorten geldig zijn, maar bij bijvoorbeeld aluminium zal de uitkomst zijn dat hier geen uitspraak over gedaan kan worden.

#### Voorbeeld 7.

Als laatste voorbeeld wordt hier een modellering genomen. In een modellering wordt vaak een aantal parameters binnen bepaalde grenzen verondersteld. Indien deze parameters zich in het eindprodukt buiten deze grenzen bevinden is de uitkomst niet betrouwbaar. Dit wil niet zeggen dat ze niet juist is, het is echter niet getoetst.

### **Het toetsingscriterium.**

Om te kijken of aan een gestelde kwaliteitseis is voldaan wordt een criterium opgesteld, waaraan getoetst zal worden. Het meest gebruikte criterium is het breukcriterium waarbij de maximaal optredende spanning gelijk wordt gesteld aan de kritische spanning. Indien geen criterium voorhanden is, wordt gebruik gemaakt van empirie of wordt een gefundeerde aanname gedaan. Door middel van analysemethoden kan nu een uitspraak over de maakbaarheid worden gedaan.

Het criterium bepaalt op welke kwaliteitseis de maakbaarheidsanalyse zich richt. Het is niet wenselijk om in de analyse alle criteria te hanteren. Sommige berekeningen zijn langdurig en de mogelijkheid bestaat dat een produkt als niet maakbaar geanalyseerd wordt op een niet gestelde kwaliteitseis.

### **4.3.3. DE OUTPUT.**

Als een produkt aan al de gestelde eisen voldoet zal de output zijn dat het produkt zeer waarschijnlijk geproduceerd kan worden. Indien niet aan de kwaliteitseisen wordt voldaan zal de output "waarschijnlijk niet maakbaar" zijn. (Het woord waarschijnlijk wordt gehanteerd, omdat in de praktijk is gebleken dat produkten die volgens de theorie niet maakbaar waren wel geproduceerd konden worden.) Er kunnen nu drie verschillende stappen worden ondernomen afhankelijk van de bedrijfssituatie en het kostenaspect:

- Er wordt een trekschema opgesteld.
- Het produktontwerp wordt aangepast.
- Er wordt voor een ander fabricageproces gekozen.

Daarnaast is het mogelijk dat de uitspraak van het systeem zal zijn; "misschien maakbaar" dat er een mogelijkheid bestaat dat het wel gemaakt kan worden. Op dat moment bevindt het produkt zich in een grijs gebied, waardoor er nog beter gekeken zal moeten worden naar de instelling van een aantal parameters. Verderop in dit rapport zal hier nog op worden teruggekomen.

#### 4.4. DE EIGENLIJKE MAAKBAARHEIDSANALYSE.

In de voorgaande hoofdstukken is gebleken dat een produkt wordt onderverdeeld in gebieden die basisvormen worden genoemd. Uit deze splitsing volgen vaak al automatisch de probleemgebieden. Om deze gebieden op maakbaarheid te toetsen staan drie oplossingsmethoden ter beschikking. Indien gebruik gemaakt wordt van empirie of modellen dan blijkt dat deze vaak lokaal naar maakbaarheid kijken, daar waar een EEM-analyse vaak een geheel produkt beschouwt.

De maakbaarheid wordt betrokken op falen en defecten, waartussen een duidelijk onderscheid is gemaakt. Doordat de empirische en modelmatige methode vaak de mogelijkheid bieden om deelproblemen van een produkt te analyseren wordt in eerste instantie het produkt opgedeeld in basisvormen. Dan worden alle deelproblemen in eerste instantie op falen getoetst, omdat dit altijd tot afkeur leidt. Daarna worden alle deelproblemen aan de gestelde criteria ( die door de werkvoorbereider zijn bepaald uit de gestelde kwaliteitseisen ) getoetst.

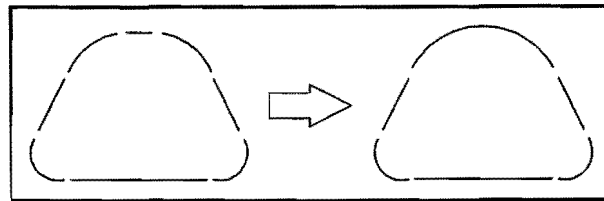
Indien voor alle deelproblemen geldt dat ze niet tot afkeur leiden, komt een globaal criterium. In dit globale criterium dienen de interacties tussen de basisvormen onderling en een criterium voor het produkt in z'n geheel opgenomen te zijn.

Om aan te geven wat het verschil is tussen een lokaal en een globaal criterium wordt nu gekeken naar de dieptrekverhouding van een rond produkt en de dieptrekverhouding van een hoek in een vierkante bak. Voor het ronde produkt geldt dat het is opgebouwd uit één basisvorm. De verhouding tussen de straal van de blank en de gemiddelde straal van het produkt geldt hier als een globaal criterium. Het betreft namelijk een maat voor de maakbaarheid van het gehele produkt. Bij een vierkante bak geldt dat de hoek een basisvorm is van het gehele produkt. Als zodanig geldt daar dan ook een andere grens voor met betrekking tot de maakbaarheid. Zien we dat een dieptrekverhouding van  $\beta_{0max} = 2$  over het algemeen de grens is voor het globale criterium, nu geldt voor het lokale verschijnsel dat de verhouding op kan lopen tot  $\beta_{0max} = 5$ . Daarnaast geldt volgens de definitie weer voor het globale criterium  $\beta_0 = \sqrt{(A_{blank}/A_{stempel})}$  en de maximale waarde van deze dieptrekverhouding ligt weer in de ordegrootte van twee.

Het moge duidelijk zijn dat de basisvormen elkaar onderling beïnvloeden. De hoek in een bakvormig produkt veroorzaakt een stuikspanning in de flens. Deze stuikspanning zal zich zoveel mogelijk willen verspreiden, waardoor de buigzone ook ( zij het in mindere mate ) wordt beïnvloed door deze stuikspanning. Dit kan er toe leiden dat het aantal basisvormen, nadat is gebleken dat de onderlinge interactie erg groot is, wordt aangepast.

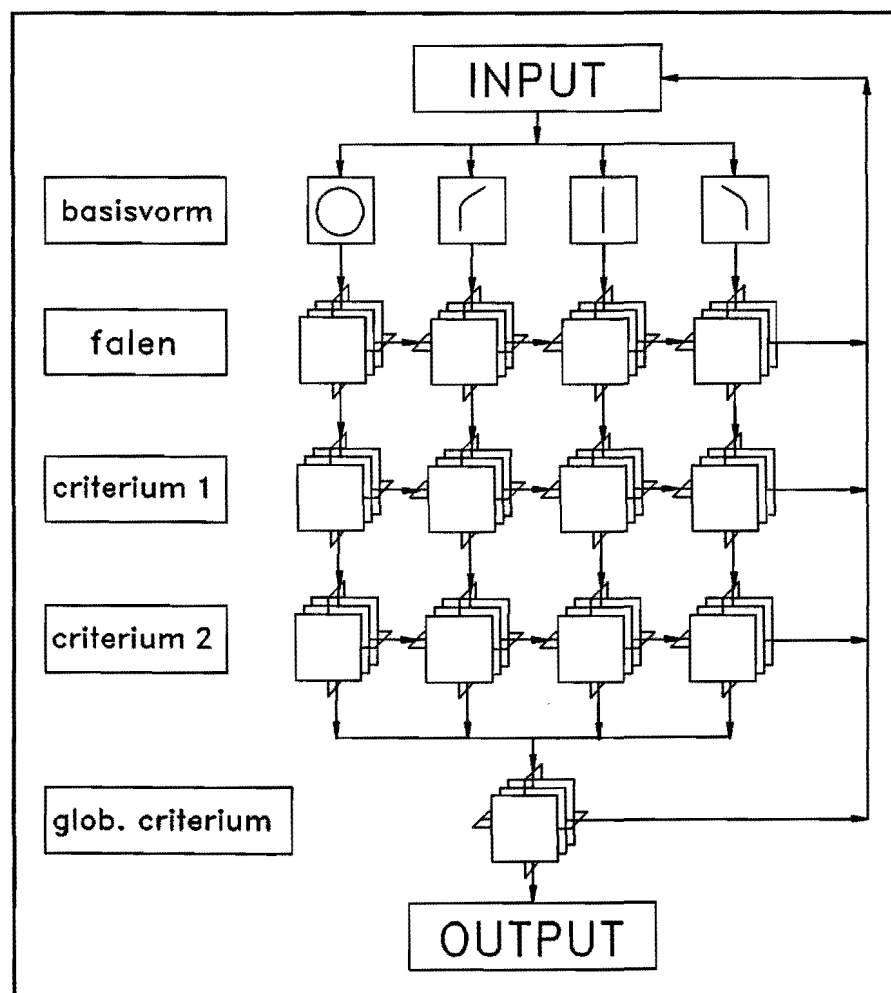
### Voorbeeld 8.

Indien de lengte van de wand tussen twee cirkelsegmenten dusdanig klein is, dat daar evenveel stuikspanning heerst als in de flens, wordt in de berekening gedaan alsof het cirkelsegment doorloopt ( zie figuur 22 ).



Figuur 22: *Samenvoegen van basisvormen.*

De invulling van het toetsingsblok uit figuur 20 staat weergegeven in figuur 23.



Figuur 23: *Invulling van het toetsingsblok.*

Hierbij dient te worden bedacht dat voor iedere dwarsdoorsnede een dergelijk diagram gevuld dient te worden. Dankzij de indeling van het produkt in een familie, komt men dan bij een dergelijk diagram uit. Nadat het produkt dan is verdeeld in basisvormen worden alle lokale delen beschouwd. Dit houdt dus in dat indien een produkt vier hoeksegmenten heeft, dat basisvorm V2 vier keer doorlopen dient te worden indien de afmetingen van deze segmenten verschillen. De interacties worden in het globale gedeelte bepaald. Het is mogelijk dat dit in de toekomst ook in het lokale gedeelte gedaan wordt, met de specifieke kwaliteitseis in het achterhoofd. Op het ogenblik is het bepalen van de interacties nog niet overal mogelijk, waardoor deze allen bij elkaar geplaatst zijn.

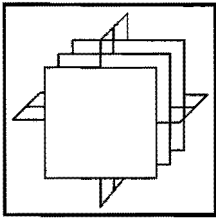
Zoals al gezegd is dient, de werkvoorbereider zelf aan te geven op welke kwaliteitseisen wel en op welke niet dient te worden getoetst. De terugkoppeling van het systeem naar de gebruiker is erg belangrijk. Het kan namelijk zijn dat met kleine ingrepen een produkt toch als maakbaar wordt geanalyseerd, als onmiddellijk na een afkeuring wordt teruggekoppeld naar de gebruiker. Dit stelt de gebruiker dus in staat om snel te reageren en niet pas aan het eind van de cyclus een uitspraak te krijgen, waarvan de achtergrond niet meer duidelijk is. Daarnaast is een open systeem belangrijk om de informatie die in het bedrijf aanwezig is te kunnen inbrengen.

Er is al gesproken wat de output van een dergelijk systeem zou kunnen zijn. De uitspraak "maakbaar" moet zeer betrouwbaar zijn.

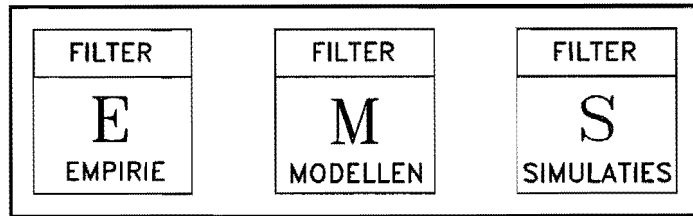
De uitspraak dat het eventueel maakbaar is maar dat er geen zekerheid gegeven kan worden, slaat op dat gedeelte waar de verschillende naslagwerken elkaar tegenspreken. Bij de ene auteur wordt hetzelfde produkt als maakbaar gezien, daar waar de ander zegt dat het produkt niet maakbaar is. Veel van deze aspecten hangen samen met de keuze van machines, smeermiddelen, gereedschappen en materialen. In deel drie wordt zoveel mogelijk aangegeven welke auteur wat beweert en op grond waarvan. Een ervaren werkvoorbereider zal op deze manier in wisselwerking met het systeem snel weten welke auteur en welke waarden voor zijn bedrijf van toepassing zijn. Zo kan scherper tegen de grenzen van het proces aan geproduceerd worden en aansluitend beter geconcurrereerd worden

Als de output van het systeem is dat er geen uitspraak gedaan kan worden of "waarschijnlijk niet maakbaar" is, dan heeft de gebruiker nog een extra optie. In deel vier wordt namelijk dieper ingegaan op de achterliggende theorie. Hierbij moet worden gedacht aan bijvoorbeeld materiaaleigenschappen en gereedschapsafmetingen. Een verantwoord omgaan met deze meer theoretische benaderingen vraagt echter kennis van en ervaring met deze systemen. Het is niet eenvoudig om hieruit betrouwbare conclusies te trekken. Een onervaren gebruiker bevindt zich hier op glad ijs.

Voor de drie mogelijke analysemethoden om de kwaliteitseisen aan een criterium te toetsen, wordt het symbool uit figuur 24 gehanteerd. Dit is te splitsen in de drie blokken zoals weergegeven in figuur 25:



Figuur 24: Het criteriumblok.

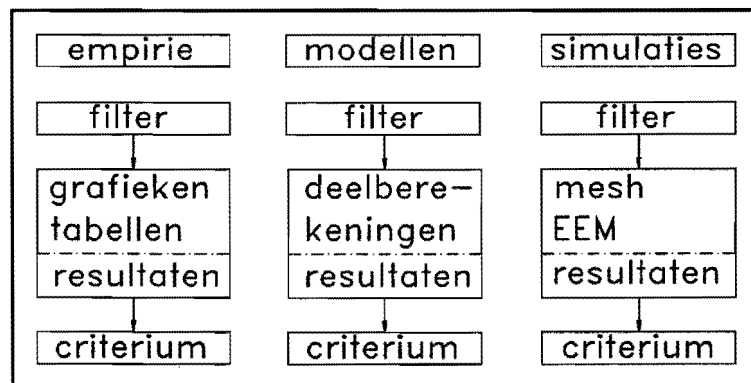


Figuur 25: Mogelijke analysemethoden.

Deze blokken zijn off-line geplaatst, zodat er de mogelijkheid is tot het kiezen van de gewenste methode. Hierbij wordt uitgegaan van voldoende vakkennis van de gebruiker.

De mogelijkheid tot het overslaan van een criterium wordt hier niet aangegeven, evenmin worden alle mogelijke informatiestromen aangegeven. Dit is gedaan met het oog op de overzichtelijkheid van het diagram.

In het criteriumblok worden de produktspecifieke stromingsdiagrammen ingevuld. Dit kan in modulevorm, zodat voor iedere produktvorm een andere module geplaatst kan worden. De algemene methodieken worden in figuur 26 weergegeven.



Figuur 26: Algemene methodiek analysemethoden.

Er zal nu een voorbeeld gegeven worden met betrekking tot maakbaarheid. Er is daar al op gelet dat de input aan waarden voldoet die door de empirie voorgeschreven wordt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van gespecificeerde stroomdiagrammen uit het criteriumblok. Uit dit voorbeeld volgt dat voor de criteria geldt dat deze niet geheel onafhankelijk van elkaar kunnen worden uitgevoerd. Denk daarbij aan het bekend moeten zijn van de plooihouddruk, voordat de benodigde dieptekracht kan worden bepaald.

We zullen ons in dit voorbeeld bezig houden met de meest voorkomende faaloorzaak, namelijk breuk. Er zal nu stap voor stap gekeken gaan worden naar de maakbaarheid van het produkt.

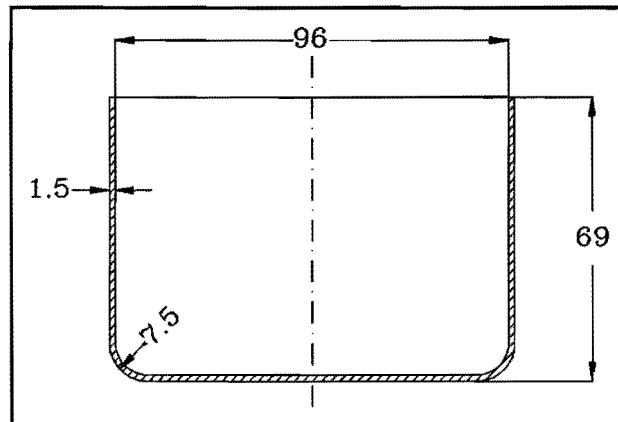


#### 4.4.1. Voorbeeld 9.

Bepaling van de input.

#### Het eindprodukt (produktontwerp).

Het produktontwerp is het eerste dat wordt gepresenteerd. In figuur 27 staat het produkt dat in dit voorbeeld wordt behandeld.



Figuur 27: Voorbeeld eindprodukt V1.F1.W01.B1.

In dit voorbeeld wordt gebruik gemaakt van een rond stempel waarvan de stempelbuitendiameter gelijk is aan de binnendiameter van het eindprodukt. In het geval van ronde producten mag de stempeldiameter of stempelradius i.p.v. het stempeloppervlak worden gehanteerd. De stempelradius bedraagt:

$$r_p = \text{Stempelradius} \quad 48.0 \text{ [mm]}$$

#### Blankbepaling.

Er wordt hier gebruik gemaakt van de formule op basis van oppervlakteinvariantie [7]:

$$2 r_{u0} = \sqrt{d_b^2 + 2\pi\rho_{uP}d_b + 8\rho_{uP}^2 + 4d_{wu}h_w}$$

Hierin zijn de waarden als volgt:

$$d_1 = 81 \text{ mm}$$

$$d_2 = 96 \text{ mm}$$

$$h = 60 \text{ mm}$$

$$r = 7.5 \text{ mm}$$

De waarde  $h_w$  geeft hier de hoogte van de wand aan en niet de hoogte van het produkt.

Hieruit volgt dat voor de blank een diameter wordt gekozen van:

$$2r_{u0} = 185 \text{ mm.}$$

Voor de blankdikte wordt de dikte van het eindprodukt genomen. Ondanks het feit dat er bij de overgang tussen bodem en wand een verdunning ontstaat en er boven in de wand door stuik in de flens een verdikking ontstaat. Dit is toegestaan, omdat er geen expliciete eisen met betrekking tot het dikteverloop gesteld zijn. Indien dit wel het geval is wordt over het algemeen vloeï- of duntrekken toegepast. Nu wordt de blankdikte dus:

$$s_0 = 1.5 \text{ mm.}$$

Uit deze gegevens kan de globale dieptrekverhouding worden bepaald:

$$\beta_0 = \sqrt{A_B / A_P}$$

Vergelijking van  $\beta_0$  met een kritische waarde  $\beta_{0max}$  levert een eerste indicatie voor de maakbaarheid van een produkt. Uitwerking van het voorbeeld geeft dat de verhouding tussen de stralen van de blank en het stempel gelijk is aan de dieptrekverhouding.

Voor de dieptrekverhouding geldt nu:

$$\beta_0 = \frac{r_{u0}}{r_P}$$

In het voorbeeld geldt dat  $\beta_0 = 1.93$ . Deze waarde is een belangrijke parameter in het bepalen van de maakbaarheid van een dieptrekprodukt.

Op de werkbladen in deel drie wordt voor rotatiesymmetrische produkten de uiteindelijke formule gepresenteerd die nodig is voor de bepaling van de blank. Voor complexe produktvormen wordt een methode gegeven om de blankvorm te bepalen.

## Het materiaal.

Omdat we in het voorbeeld gebruik gaan maken van de drie verschillende analysemethoden zijn verschillende materiaalparameters nodig. In dit geval is gekozen voor een dieptrekbaar materiaal met de volgende materiaaleigenschappen:

C	= Karakteristieke deformatieweerstand	600 [N/mm <sup>2</sup> ]
n	= Verstevingsexponent	0,23 [-]
$\epsilon_0$	= Voordeformatie	0,001 [-]
R	= Normaalanisotropie	1 [-]
$\Delta R$	= Planaire anisotropie	0 [-]
E	= Elasticiteitsmodulus	210.000 [N/mm <sup>2</sup> ]
$\nu$	= Dwarscontractiecoëfficiënt	0,29 [-]

In deel drie wordt een korte uiteenzetting gegeven van de eigenschappen van staalsoorten en aluminiumsoorten. Voor meer gedetailleerde informatie over de materiaaleigenschappen wordt verwezen naar deel één en vier.

## De gereedschappen.

In het voorbeeld zijn de afrondingsstralen van de bodem van het produkt zodanig;

$$\rho_D = \rho_P = 5s_0$$

dat de literatuur daarin geen problemen voorziet (zie deel drie V1.F1.W01.B1). De afrondingsstraal van het stempel wordt dus hetzelfde gekozen als de afrondingsstraal van de bodem. Aangezien het eindprodukt geen flens heeft kan de afrondingsstraal van de trekkring binnen gegeven grenzen, vrij worden gekozen. Het oppervlak tussen de trekkring is bij complexere produkten noodzakelijk om de afmetingen van de trekkring te bepalen. In ons voorbeeld is gebruik gemaakt van een rond produkt waardoor alleen de straal van de trekkring noodzakelijk is. De maat van de trekspleet volgt uit een eenvoudige formule:

$$T_s \geq \sqrt{\frac{r_{u0}}{r_p}} s_0$$

Daaruit wordt de straal van de trekking bepaald:

$$r_{Di} = r_p + T_s$$

$\rho_D$	= Afrondingsstraal van de trekking	7.5 [mm]
$\rho_P$	= Afrondingsstraal van de trekstempel	7.5 [mm]
$r_{Di}$	= Straal van de trekking	50.3 [mm]
$T_s$	= Afmeting van de trekspleet	2.1 [mm]

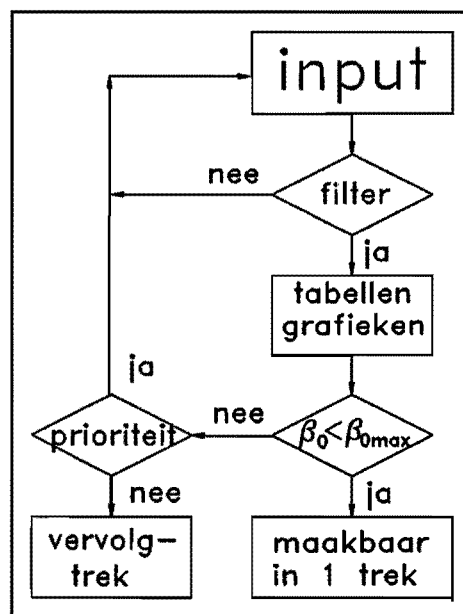
Op de werkbladen wordt ervan uitgegaan dat de afmetingen van produkt en gereedschappen gelijk zijn op de plaatsen waar het materiaal en de gereedschappen contact maken. In de praktijk zal het materiaal de gereedschappen niet altijd perfect volgen. Er zal op dit moment nog gebruik gemaakt blijven worden van empirie om te kijken of de gekozen afmetingen binnen de toegestane grenzen liggen.

Bij de gereedschappen zijn ook de wrijvingscoëfficiënten opgenomen, voor dit voorbeeld zijn de volgende waarden genomen.

$\mu_1$	= Wrijvingscoëfficiënt tussen flens en gereedschap	0.05 [-]
$\mu_2$	= Wrijvingscoëfficiënt tussen flens en matrijsradius	0.10 [-]

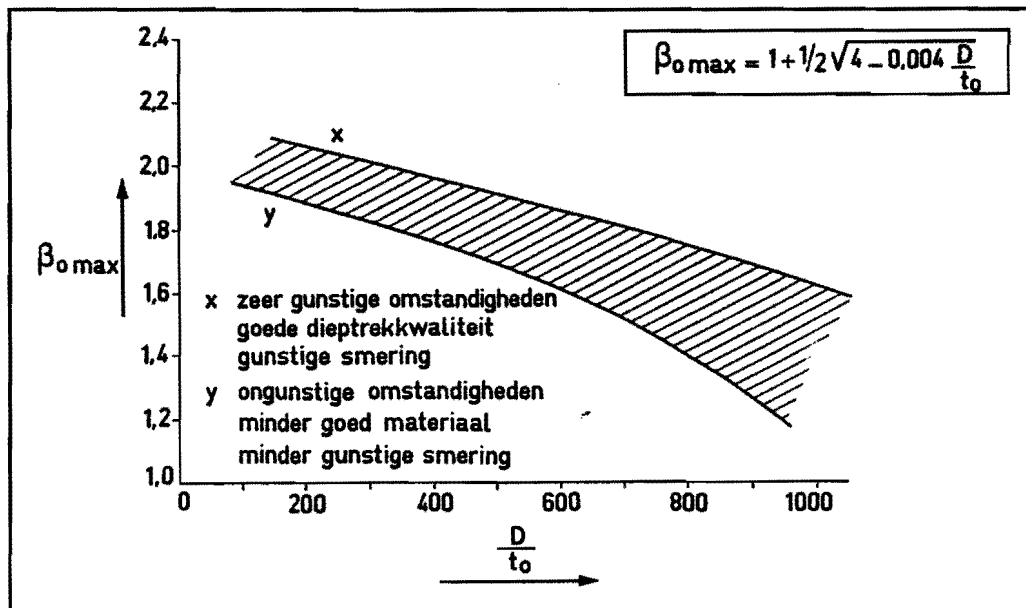
### Empirie.

Bij empirische gegevens wordt gebruik gemaakt van het meer uitgewerkte diagram, zoals in figuur 28 staat weergegeven.



Figuur 28: Stroomdiagram voor empirisch breukcriterium.

Als een dieptrekprodukt via empirische gegevens op maakbaarheid met betrekking tot breuk wordt getoetst, wordt in dit geval gebruik gemaakt van de indicatiegrafiek volgens TNO [8] (zie figuur 29). Deze grafiek heeft in de praktijk aangetoond zeer werkbaar te zijn voor de eerste trek.



Figuur 29: Indicatiegrafiek m.b.t. de eerste trek volgens TNO.

We hebben nu alle gegevens die de input bepalen, waardoor we een specifiekere dieptrekverhouding kunnen definiëren. Voor de dieptrekverhouding geldt nu:

$$\beta_0 = \frac{2r_{w0}}{r_P + r_{Di}}$$

Invullen van de waarden geeft voor  $\beta_0 = 1,88$ .

Met de globale dieptrekverhouding, zoals die samen te stellen is na het bepalen van de blankgeometrie, is een goede indicatie te verkrijgen met betrekking tot de maakbaarheid. Op het moment dat die in de hierboven gepresenteerde grafiek al kritisch blijkt moge het duidelijk zijn dat er beter naar het proces gekeken zal moeten worden.

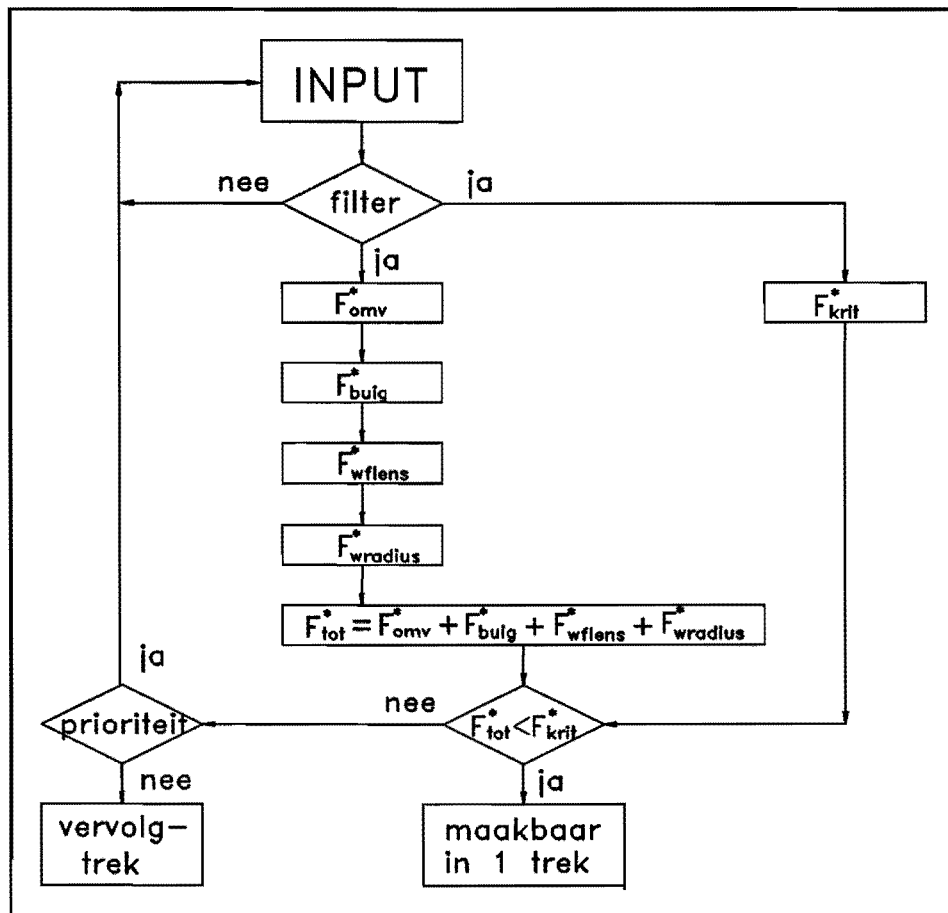
Gaan we nu in de grafiek volgens figuur 33 kijken in welk gebied dit produkt ligt, dan zien we dat voor de relatieve plaatdikte;

$$2r_{w0}/s_0 = 123$$

geldt dat de maximale dieptrekverhouding rond de twee ligt. Dit produkt is dus maakbaar met betrekking tot breuk. Normaal gesproken zou de maakbaarheidsanalyse hiermee afgerond zijn. Voor de duidelijkheid worden nu de andere methoden alsnog behandeld.

## Modellen.

Voor de modellen geldt opnieuw dat er volgens een vast stramien wordt gewerkt. In een modellering worden verschillende probleemgebieden onderscheiden en deze worden dan afzonderlijk opgelost. In een later stadium worden deze deeloplossingen samengevoegd tot een totaalresultaat ( zie figuur 30 ).



Figuur 30: Stromingsdiagram voor modelmatig breukcriterium.

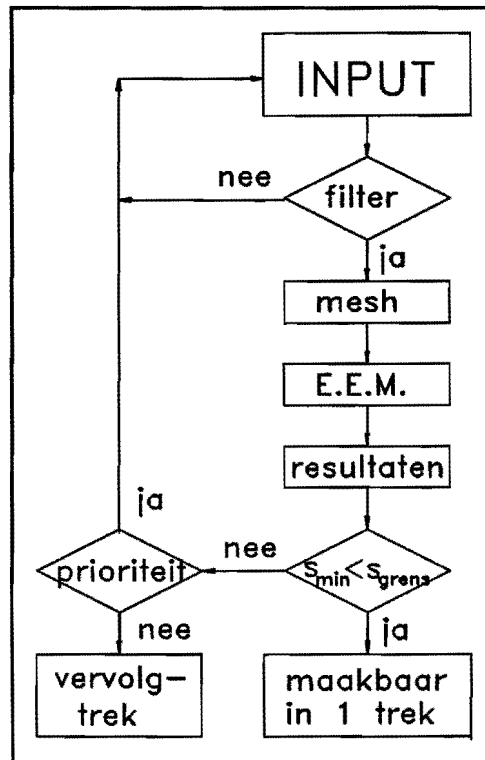
We gebruiken in dit voorbeeld een model dat door de TUE is ontwikkeld [14]. Dit leidt tot het resultaat van de berekening die op de TUE is uitgevoerd is:

$$\beta_{0max} = 2,13$$

De totale en de kritische kracht worden aan elkaar gelijkgesteld in dit model. Om de geldigheid van het model te bepalen zijn er verschillende producten experimenteel getoetst. Vergelijking van de experimenten met de theorie leverde bevredigende resultaten op. Op de werkbladen van deel drie staan de gehanteerde formules niet weergegeven, wel wordt aangegeven waar, indien het product misschien maakbaar is, meer gedetailleerde informatie beschikbaar is.

## Simulaties.

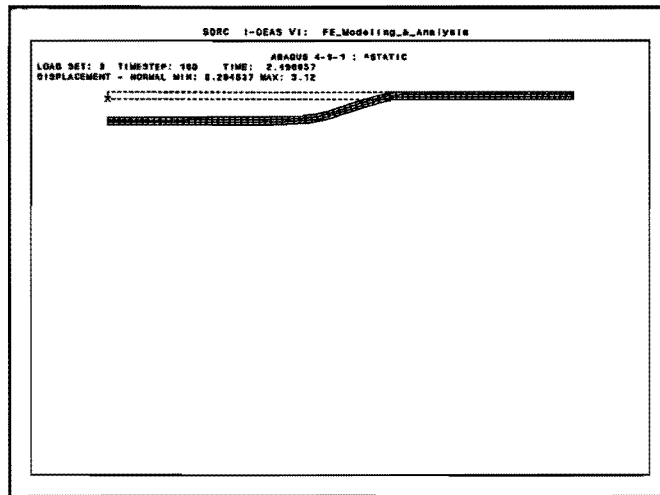
Ook simulatietechnieken werken volgens een vaste oplossingsroutine. In een notedop wordt hier die systematiek nogmaals herhaalt ( zie figuur 31 ).



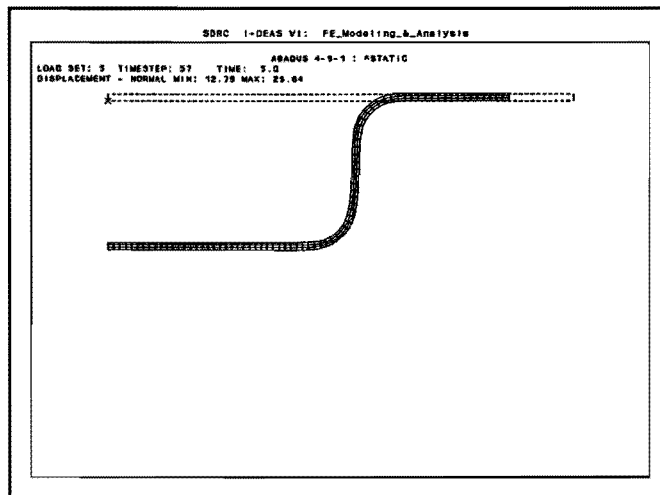
Figuur 31: Stroomdiagram voor breuksimulatie.

Het probleem dat zich bij simulaties voordoet is dat er niet echt een faalcriterium voorhanden is of gevonden wordt. Er worden wel in bepaalde gevallen dusdanige resultaten verkregen, dat logischerwijs kan worden verondersteld dat het produkt faalt. Hier komt opnieuw het belang van de bediener van het pakket naar voren.

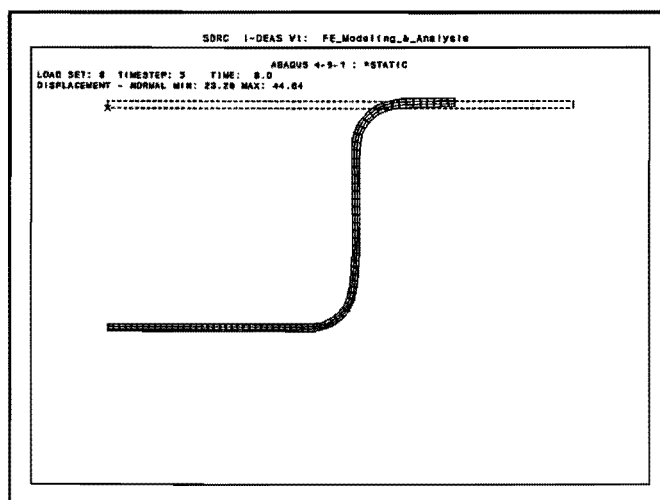
De uitgevoerde simulatie is uitgevoerd met behulp van het eindige elementen pakket Abaqus. Dit is een numerieke simulatie waarbij het zichtbaar maken van de momentane geometrie niet onmiddellijk te realiseren is. We kunnen echter het proces verduidelijken door gebruik te maken van tussentoestanden. Door het omzetten van de data in plaatjes kan een indruk verkregen worden van de geometrie van het eindprodukt. Op de volgende pagina's staan vier dieptrefkassen van het voorbeeldprodukt weergegeven.



*Figuur 32: Intrekfase bij het dieptrekken.*

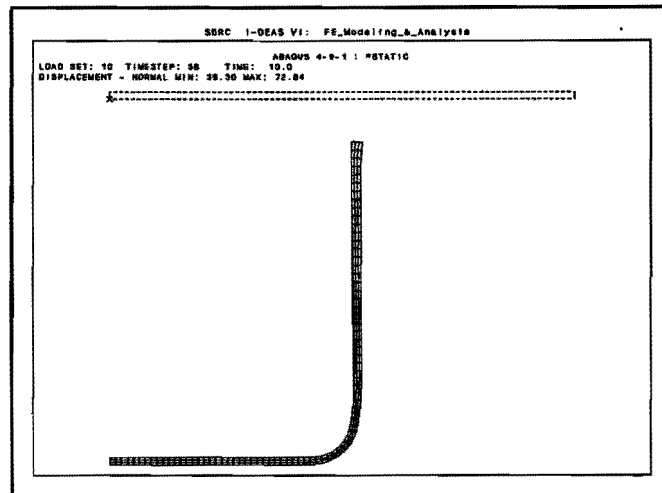


*Figuur 33: Vervolgfase eerste trek.*



*Figuur 34: Vervolgfase eerste trek.*





*Figuur 35: Doorgetrokken fase ( eindprodukt ).*

Er is in de eindcontour van het produkt geen duidelijke insnoering te constateren op de overgang van bodem naar wand. Het is bekend dat dit de zwakste schakel is van het produkt.

Het is natuurlijk niet nodig om in het geval, zoals hierboven gepresenteerd alle drie de analysemethoden te gebruiken. Op het moment dat uit de empirie volgt dat het produkt ruim binnen de grenzen blijft, mag er van uit worden gegaan dat dit ook zo is. Pas op het moment dat de empirie in het grijze gebied terecht komt, zal gebruik gemaakt gaan worden van de meer geavanceerde analysemethoden. De modellen lenen zich dan prima om een produkt lokaal te beschouwen, maar ook het gehele produkt kan ( indien er een model voorhanden is ) worden beschreven. De simulatietechnieken beschouwen over het geheel het gehele produkt. Ze vragen grote reken Capaciteiten, dure pakketten en een bedieningsexpert. Deze zaken zorgen er vaak voor dat de wat kleinere bedrijven dit niet zelf in huis kunnen halen. Een EEM- bureau kan in dit geval uitkomst brengen.

Voor een gedetailleerder voorbeeld van de uitgewerkte maakbaarheidsanalyse wordt verwezen naar appendix A [IOP 131].

## 5. RESUMÉ.

Een produkt doorloopt tijdens zijn 'leven' een aantal verschillende fasen. Gedurende de ontwerpfase van het produkt wordt echter de basis van de uiteindelijk met de fabricage van het produkt verbonden kosten vastgelegd. Uit onderzoek is naar voren gekomen dat de produktie-ontwerper (werkvoorbereider) de meest geschikte persoon is voor het hanteren van een maakbaarheidsanalyse. Dit ondanks het feit dat het de voorkeur zou verdienen om reeds in de produktontwerpfase op maakbaarheid te toetsen. Een goede communicatie tussen de betrokken partijen is dan ook noodzakelijk voor een goed verloop van ontwerp tot produktie.

Er is een indeling voor dieptrekprodukten ontwikkeld die met voortschrijdende produktcomplexiteit toepasbaar blijft. Een dieptrekprodukt is op te splitsen in een buitencontour (bovenaanzicht van het produkt) en een dwarsdoorsnede, die langs de buitencontour wordt afgewikkeld. Op deze wijze wordt een drie dimensionale beschrijving van het produkt verkregen. Door vervolgens de buitencontour op te delen in geometrische segmenten, rekening houdend met de procestechnische aspecten (stuiken, buigen en strekken), is tot een indeling van de buitencontour in een viertal basisvormen gekomen. De dwarsdoorsnede van het diepgetrokken produkt wordt onderverdeeld in drie zones, flens, wand en bodem, die onderling en daarnaast met de basisvormen combineerbaar zijn. Uit de indeling naar basisvormen en de indeling naar dwarsdoorsneden werd tot een indeling naar produktfamilies gedestilleerd.

De gebruikte systematiek kan zowel worden toegepast op produkten met een gesloten, als op produkten met een niet gesloten contour. De belangrijkste voorwaarde die aan de indeling wordt gesteld, is het constant zijn van de dwarsdoorsnede over de gehele contour. Er kan door middel van een lokale analyse in een aantal gevallen wel een indicatie met betrekking tot de maakbaarheid verkregen worden.

Als een dieptrekprodukt op maakbaarheid wordt getoetst, kan dit gebeuren op een groot aantal kwaliteitseisen. In het gepresenteerde voorbeeld is voornamelijk gekeken naar breuk en plooivorming. Voor het verrichten van de controle op kwaliteitseisen zijn drie analysemethoden beschikbaar te weten: de empirische methode, de modelmatige methode en numerieke simulatie. De laatste twee methoden zijn het laatste decennium steeds actueler (populairder) geworden. Indien gebruik wordt gemaakt van empirische gegevens is het vaak moeilijk om de achterliggende theorie en procescondities te traceren. Er is echter een enorme hoeveelheid ervaring in deze methode verwerkt.

De numeriek simulatie methode is op het ogenblik de meest tot de verbeelding sprekende methode. Er zijn reeds drie-dimensionale simulatiepakketten op de markt en de gebruikersvriendelijkheid zal in de toekomst alleen nog maar toenemen.

Als voorbeeld is een rond produkt genomen. Het zou echter interessanter zijn om een complexer produkt te nemen. De recente ontwikkelingen op het gebied van modelleringen en de EEM-pakketten duiden er op dat dit in de nabije toekomst mogelijk wordt. Juist de onderverdeling van een hoekig produkt in basisvormen en toetsing op maakbaarheid, zou een goede test zijn.

In de analyse wordt vooral uitgegaan van de eerste trek. Op het moment dat trekschema's noodzakelijk worden, wordt het toetsen op maakbaarheid zeer complex. Het aantal denkbare trekschema's is dusdanig groot, dat er voor niet ronde produkten in de literatuur bijzonder weinig over te vinden is.

De gepresenteerde analyse geeft een indicatie of een produkt maakbaar is. In de praktijk is bewezen dat een produkt dat volgens de literatuur niet maakbaar was wel degelijk gemaakt kon worden. Dit geeft aan dat de output van de analyse een gefundeerde indicatie geeft en geen wetmatigheid is. Een werkvoorbereider krijgt hier dus de mogelijkheid om op basis van ervaring of creativiteit zijn eigen weg te gaan.

De maakbaarheidsanalyse stelt een werkvoorbereider in staat een produkt te toetsen dat hij nog nooit heeft gefabriceerd. Vooral binnen de wat kleinere bedrijven is vaak een onzekerheid waar te nemen met betrekking tot nieuwe vormen. Dit probleem wordt op deze manier enigszins ondervangen.

## LITERATUUR.

- [1] J.F. Siekirk Process Variable Effects on Sheet Metal Quality.  
Journal Applied Metalworking Vol.4 no 3, July '86.
- [2] J.W.I. v.d. Zande Een Systematische Maakbaarheidsanalyse. In het  
bijzonder van conische dieptrekprodukten.  
TUE, WPA 1390, IOPM-D 046, (sept. '92).
- J.W.I. v.d. Zande Een Systematische Maakbaarheidsanalyse. In het  
bijzonder van conische dieptrekprodukten. Bijlagen.  
TUE, WPA 1391, IOPM-D 047, (sept. '92).
- [3] G.C.M. v.d. Ven Proceskeuze op basis van kostprijsanalyse.  
TUE, WPA 0817, (nov. '89).
- [4] J.A.H. Ramaekers Plastisch Bewerken van Metalen.  
L.J.A. Houtackers 4e druk, ISBN 90-6808-007-5  
P.B.G. Peeters Mierlo (sept. '90).
- [5] K.J.A. Daly Defects bij axisymmetrische  
J.A.H. Ramaekers dieptrekprodukten.  
TUE, WPA 0996, IOPM-D 001, (dec. '91).
- [6] G. Eshel Rulebased modelling for planning  
M. Barash axisymmetrical deep-drawing.  
W. Johnson Journal of mechanical working technology, 14,  
Elsevier Science Publishers B.V. ('86) Amsterdam.
- [7] W.P.Romanovski Handboek voor de moderne stanstechniek.  
AEE Kluwer Deventer z.j.
- [8] Machinale plaatbewerking.  
TNO Metaalinstituut Apeldoorn. Cursus dieptrekken.
- [9] H. Giesen Practicum Fundamentele Werktuigkunde Gifts-  
handleiding. Dictaat 3486 TUE ('91).

- [10] M.W.H. Kessels Eindige Elementen Simulaties van het dieptrekprocedé.  
TUE, WPA 1163, (aug. '91).
- M.W.H. Kessels Eindige Elementen Simulaties van het dieptrekprocedé.  
Bijlagen.  
TUE, WPA 1163, (aug. '91).
- [11] R. Hens
- [12] Abaqus: User's, Examples and Theory Manuals  
Hibbitt, Karlson and Sörensen, Inc.
- [13] M.W.H. Kessels Een werkwijze voor het gebruik van Abaqus in  
combinatie met I-deas; Abaqus een FEM pakket voor  
algemeen gebruik.  
TUE, WPA 1165, (aug. '91).
- [14] J. v. Lieshout Eenvoudige modellering voor een axisymmetrisch  
dieptrekprodukt, TUE, WPA 0911, (febr.'92).

## Bijlage 1: Het modelleren van plastische processen. (\*)

De analyse van plastische processen heeft als doel: het beschrijven van de tijdens het plastisch deformeren optredende fenomenen. Dit leidt dan over het algemeen tot een parameterstudie om de invloed van een aantal procesparameters op het proces te bestuderen. Aan de hand van deze parameterstudie kan men de procesparameters vervolgens zo optimaal mogelijk kiezen.

Als voorbeeld kan de beschrijving van een vierkant dieptrekprodukt dienen. De optimale blankvorm bij dit dieptrekproces kan op verscheidene manieren worden gedefinieerd, bijvoorbeeld op basis van minimum restmateriaal ( dit is vooral binnen de massa-industrie van groot belang ). Als men een beschrijving heeft van het inlopen van de flens bij het vierkant dieptrekproces, dan kan men de blankvorm gaan variëren en op deze manier de optimale blankvorm zoeken.

In het algemeen zijn er binnen de plasticiteitsmechanica twee analytische methoden gangbaar, namelijk de bovengrensmethode en de ondergrensmethode. Deze zullen in het nu volgende kort worden besproken.

### Bovengrensmethode.

Deze methode, die uitgebreid beschreven staat in [1], gaat als volgt in zijn werk. Aan de hand van het deformatiepatroon zoals dit wordt waargenomen, bijvoorbeeld door experimenten m.b.v. gerasterde proefstukken of door observaties in de produktie, wordt een snelheidsmodel geformuleerd. Dit snelheidsveld moet zodanig worden geformuleerd dat het te beschrijven effect gesimuleerd kan worden. Dit betekent gewoonlijk dat er vrijheidsgraden ( vrije parameters ) in de modellering worden opgenomen. Als bijvoorbeeld uit de experimenten blijkt dat de snelheid in een punt, in een zekere richting evenredig is met de coördinaat in die richting en niet afhangt van de andere coördinaten, dan zal de snelheid in die richting binnen het snelheidsveld worden gedefinieerd als

$$\dot{u}_z = \alpha z \dot{u}$$

In de bovenstaande vergelijking voor de snelheid in de z-richting komt slechts één vrije parameter ( $\alpha$ ) voor.

Een voorbeeld van een snelheid met twee vrije parameters ( $\beta, \gamma$ ) is

$$\dot{u}_\phi = \beta \phi^\gamma \dot{u}$$

(\*) Auteur ir. R.J.J.M. Sniekers.

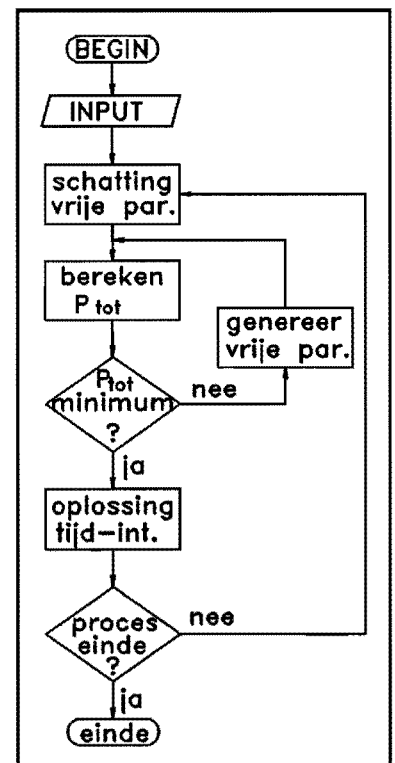
Het snelheidsveld, dat voor de modellering wordt gebruikt, dient aan een aantal mathematisch geformuleerde fysische eisen te voldoen. Onder deze eisen vallen onder andere:

- De compatibiliteit met zijn omgeving, dit wil in feite zeggen dat het geformuleerde snelheidsmodel zodanig moet zijn, dat aan de randvoorwaarden wordt voldaan. Het materiaal mag bijvoorbeeld niet het gereedschap in vloeien.
- De incompressibiliteit van het snelheidsmodel. Deze eis houdt in dat de dichtheid van het materiaal constant blijft ( volumeïnvariantie).
- De continuïteit van het snelheidsmodel. Dit wil zeggen dat er geen snelheidsprongen mogen voorkomen binnen een model.

Als het snelheidsmodel geformuleerd is dienen aan de hand hiervan alle vermogenstermen te worden bepaald. Hiertoe behoren de deformatie-, afschuif-, wrijvings- en remvermogens.

Alle niet stationaire processen zullen in de tijd opgelost moeten worden, zodat een stapsgewijze of incrementele oplossing wordt verkregen. De oplosstrategie wordt getoond in figuur 1.

Bij aanvang van het dieptrekproces, als de stempel net op de blank rust, is zowel de geometrie als de rekgeschiedenis van de blank volledig bekend. Door nu het totale vermogen te berekenen en dit te optimaliseren naar de vrije parameters, kunnen deze vrije parameters worden bepaald. Als de voor de vrije parameters gevonden waarden in het snelheidsveld worden ingevuld zijn de waarden van de snelheden in elk punt bekend. Als deze snelheden vervolgens in de tijd worden geïntegreerd (snelheid x tijd = verplaatsing) wordt de nieuwe geometrie en rekgeschiedenis gevonden. Door de resulterende geometrie en rekgeschiedenis als input te beschouwen voor de volgende processtep, kan de bovenstaande rekenmethode herhaald worden totdat het echte proces geëindigd is.



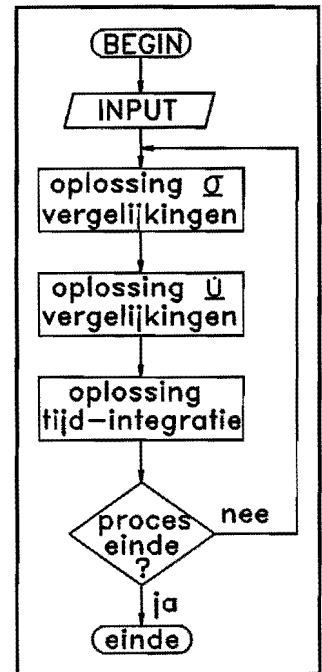
Figuur 1: Flowchart bovengrens-methode.

Deze methode wordt de bovengrensmethode genoemd omdat het snelheidsveld dat gevonden wordt in het beste geval de werkelijkheid exact beschrijft. In het algemeen is het geformuleerde snelheidsveld slechts een redelijke benadering van de werkelijkheid. Aangezien ieder deeltje echter zodanig tracht te deformeren dat de hoeveelheid energie die door dat deeltje moet worden opgenomen minimaal is, zal dus het echte snelheidsveld minder energieconsumptie vereisen dan het gemodelleerde snelheidsveld. De berekende vermogens liggen dus hoger dan de werkelijk benodigde vermogens [1]. Uit onderzoek [2,3,4] is gebleken dat deze vermogensoverschating tot ongeveer 20 procent gaat. Nadeel van deze methode is dat er geen spanningen mee kunnen worden berekend vanwege het feit dat de Levy - von Mises relaties niet inverteerbaar zijn [5,6].



## Ondergrensmethoden.

Bij deze methode gaat men uit van een spanningsmodel. Dit spanningsmodel wordt door middel van evenwichtsbeschouwingen afgeleid [5]. Ook wordt gebruik gemaakt van de vloeivoorwaarde; met behulp van de vloeivoorwaarde kan men één spanning elimineren. Als men een beschrijving heeft van de optredende spanningen, dan kunnen vervolgens met behulp van de incrementale Levy - von Mises relaties de reksnelheden worden bepaald. Aan de hand hiervan kan vervolgens een differentiaalvergelijking voor het snelheidsveld worden opgesteld. Het oplossen van de differentiaalvergelijking levert een beschrijving van het snelheidsveld op. Met behulp van tijdsintegratie kan dan het procesverloop in de tijd worden gevolgd. Dit alles is in een flowchart weergegeven in figuur 2.



Figuur 2: Flowchart ondergrensmethode.

Ook bij deze methodiek wordt uitgegaan van de initiële situatie, waarbij het stempel net op de blank rust. De geometrie en rekgeschiedenis van de blank zijn ook nu volledig bekend. Na het oplossen van de spanningsvergelijkingen kunnen de vergelijkingen voor de (rek) snelheid worden opgelost. Met behulp van tijdsintegratie kan hieruit de geometrie en rekverdeling aan het eind van deze stap worden bepaald. Deze eindgeometrie en rekverdeling dienen weer als input voor de volgende stap.

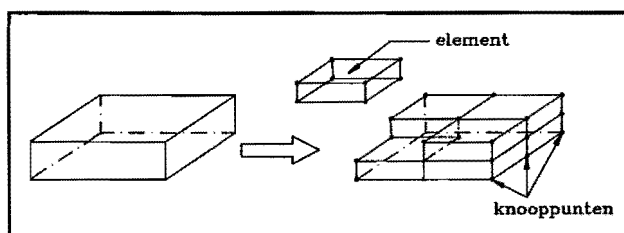
Voordeel van deze methode is dat het eindresultaat relatief snel te berekenen is. Er hoeft immers geen optimalisatie uitgevoerd te worden uitgevoerd. Een goed uitgewerkt model beschrijft de werkelijkheid vrij nauwkeurig. Daarnaast is complete informatie, alle rekken en spanningen zijn bekend, voorradig. Nadeel van deze methode is de grote hoeveelheid researchinspanning die vereist is om tot een goed resultaat te komen. Vaak ontstaat er een stelsel differentiaalvergelijkingen gecombineerd met algebraïsche vergelijkingen welke onderling gekoppeld zijn, een zogenaamde DAE ( Differential Algebraic Equations ) systeem [7]. Het oplossen van zo'n systeem is vooralsnog specialistenwerk. Deze methode wordt ondergrensmethode genoemd omdat het gevonden spanningsmodel natuurlijk ook weer enigszins afwijkt van de werkelijkheid. De werkelijke spanningen verrichten maximale arbeid, de berekende spanningen altijd minder, zodat de resulterende vermogens van de modellering lager zullen liggen dan de werkelijke [5].

- [1] W. Prager  
Ph.S. Hodge                      Theory of perfectly plastic solids  
S.I. : Wiley: Chapman & Hall (1951)
- [2] A.N. Bramley  
F.H. Osman                      Metal flow prediction in forging and extrusion using  
using UBET. (1979)
- [3] H. Kudo                      An upper bound approach to plane-strain forging and  
extrusion I & II  
International Journal Mechanical Science, Vol. 1,  
Pergamon Press Ltd. (1960)
- [4] M. Kiuchi  
Y. Murata                      Study on application of UBET  
Proceedings 4th. International Conference Production  
Engineering (1980)
- [5] R. Hill                      The mathematical theory of plasticity.  
Oxford Clarendon Press, 1950
- [6] S.M. Hoogenboom              Technische Plasticiteitsleer  
Dictaat TUE 4406
- [7] R.J.J.M. Sniekers  
S.M. Hoogenboom.              Modellen en analyse : De matrijsbocht.  
IOPM-D 016, WPA 1220

## Bijlage 2: De Eindige Elementen Methode (E.E.M.).

In de komende paragrafen zal beknopt worden ingegaan op de eindige elementen methode en de procedure die bij de eindige elementen methode wordt gevolgd. Tevens zal de werking van twee eindige elementen pakketten kort worden besproken. Enerzijds een lineair elastisch, GIFTS, en anderzijds een "non linear general purpose", ABAQUS, eindig elementen pakket. Er zal hier niet worden ingegaan op de theoretische en mathematische achtergronden van de eindige elementen methode. Voor een meer gedetailleerde beschrijving wordt verwezen naar de diverse handboeken die op dit gebied beschikbaar zijn.

De eindige elementen methode is een numerieke analyse techniek die binnen de werktuigbouwkunde veelvuldig wordt toegepast. Bij deze analyse techniek wordt een constructie of een lichaam in kleine discrete delen opgedeeld ( zie figuur 3 ). Deze discrete delen worden de eindige elementen genoemd. De elementen zijn via knooppunten met elkaar verbonden. Het geheel van knooppunten en elementen dat op deze wijze wordt verkregen, wordt de mesh genoemd.



figuur 3: Het opdelen van een lichaam in discrete delen.

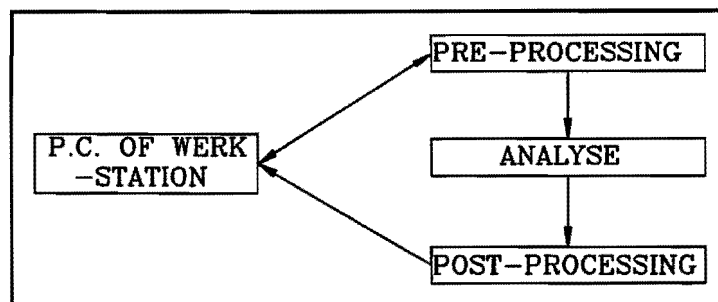
De eindige elementen methode werd voor het eerst op kleine schaal toegepast in de vijftiger jaren. Tegenwoordig wordt de eindige elementen methode op veel grotere schaal toegepast o.a. bij het oplossen van problemen in de omvormtechniek. Aanvankelijk ging het hierbij uitsluitend om problemen uit het massief omvormgebied. De laatste jaren worden echter ook plaatvormprocessen met succes opgelost.

### De procedure van een eindige elementen analyse.

Een eindige elementen analyse kent drie hoofdfasen, te weten:

- De pre-processing fase: het aanmaken van het eindige elementen model voor de analyse fase.
- De analyse fase: het doorrekenen van het probleem.
- De post-processing fase: het verwerken van de uit de analyse fase verkregen resultaten.

Deze fasen, die schematisch zijn weergegeven in figuur 4, zullen nu achtereenvolgens kort worden besproken.



figuur 4: De fasen tijdens een eindige elementen analyse.

### De pre-processing fase.

Tijdens de pre-processing fase wordt eerst de probleemgeometrie gedefinieerd. In geval van het dieptrekproces is dit de blank. Binnen deze geometrie wordt vervolgens de mesh aangebracht. Bij het aanbrengen van de mesh dienen een aantal belangrijke keuzes gemaakt te worden, aangezien de kwaliteit van de mesh van doorslaggevende invloed is op de nauwkeurigheid van de numerieke resultaten. Er dienen keuzes gemaakt te worden met betrekking tot:

- Het elementtype.  
De meeste eindige elementen pakketten hebben een uitgebreide elementenbibliotheek. Voor de meeste problemen bestaat er minimaal één geschikt elementtype. Het elementtype dat voor de modellering wordt gekozen moet echter wel bij het probleem passen. Het heeft bijvoorbeeld geen zin om een ronde blank met vierkante elementen te modelleren als er ook ringvormige elementen zijn of om een vlakspanningsprobleem (plane stress) te modelleren met een vlakke rek (plane strain) element.
- De elementverdeling.  
Hoeveel elementen worden er binnen de probleemgeometrie gedefinieerd? Zijn er plaatsen waar grote spannings- en/of rekgradiënten optreden en dus behoefte bestaat aan een fijnere elementverdeling? Gewoonlijk worden er een drietal proefruns uitgevoerd. Één met een grove mesh, één met een zeer fijne mesh en één met een normale mesh. Door de verkregen resultaten en de benodigde rekentijden met elkaar te vergelijken wordt een beslissing genomen over het aantal elementen en de verdeling daarvan waarmee de uiteindelijke runs worden uitgevoerd.

Het aanbrengen van de mesh kan op een drietal manieren gebeuren:

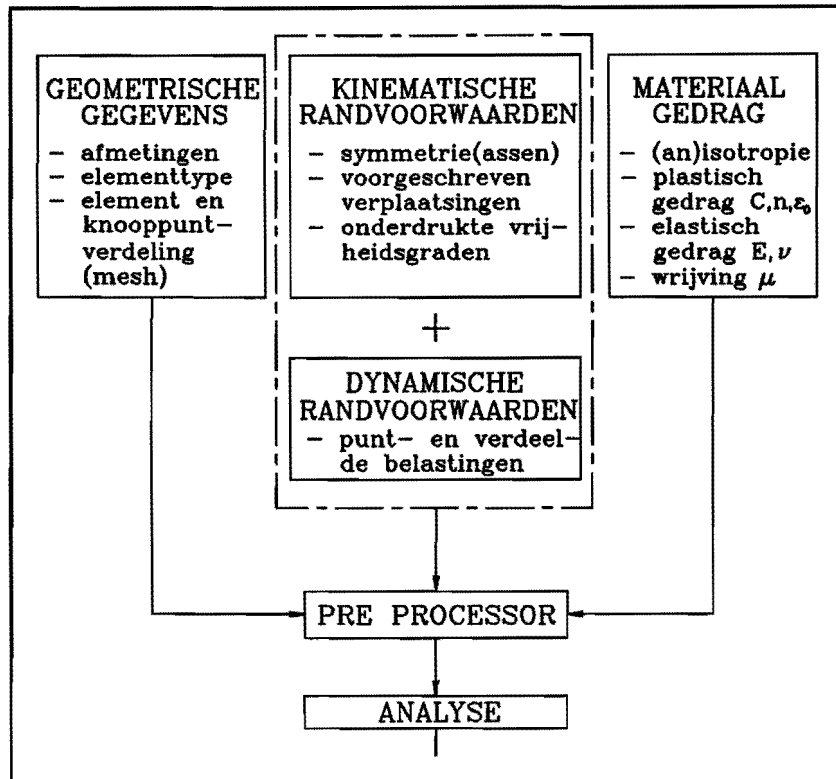
- Met de hand. Dit is een arbeidsintensieve methode. De knooppunten worden één voor één ingevoerd, waarna de elementen gegenereerd worden door met de muis de respectievelijke knooppunten aan te pikken.
- Met behulp van een mapped-mesh generator. Op deze wijze worden de elementen automatisch, gelijkmatig binnen een van te voren gedefinieerde contour verdeeld. De mesh zoals die is afgebeeld in figuur 4 is dus een mapped mesh.
- Met behulp van een free-mesh generator. Deze wordt gebruikt als het gewenst is om op een bepaalde positie een fijnere elementverdeling te verkrijgen.

Als de mesh binnen de probleemgeometrie gereed is wordt er een zeker materiaalgedrag aan de gedefinieerde elementen toegekend. Hierbij moet gedacht worden aan het definiëren van het elastische en plastische gedrag van de elementen. Er wordt met nadruk over gedefinieerde elementen gesproken, omdat de grenzen van de probleemgeometrie in contact kunnen komen met andere lichamen. Bij het dieptrekproces zijn er bijvoorbeeld delen van de blank die in contact komen met het stempel en/of de plooihouder en de matrijs. Veel eindige elementen pakketten bezitten speciale elementen voor het definiëren van dergelijke contactsituaties. Aan deze elementen wordt geen elastisch en plastisch gedrag, maar een contact- en wrijvingsgedrag toegekend. Voor gedetailleerdere informatie wordt verwezen naar de manuals van de verschillende eindige elementen pakketten of naar. Als laatste worden in de pre-processing fase de randvoorwaarden gedefinieerd. Deze zijn onder te verdelen in dynamische randvoorwaarden, bijvoorbeeld de positie en richting van een punt- of verdeelde belasting, en kinematische randvoorwaarden, bijvoorbeeld voorgeschreven verplaatsingen en/of onderdrukte vrijheidsgraden. Onder een vrijheidsgraad wordt een mogelijke bewegingsrichting van een knooppunt verstaan. Het maximale aantal vrijheidsgraden is zes, namelijk de drie verplaatsingen in de hoofdrichtingen en de drie rotaties om de hoofdassen.

De invoer tijdens de pre-processing fase is nogmaals schematisch weergegeven in figuur 5.

### **De analyse fase.**

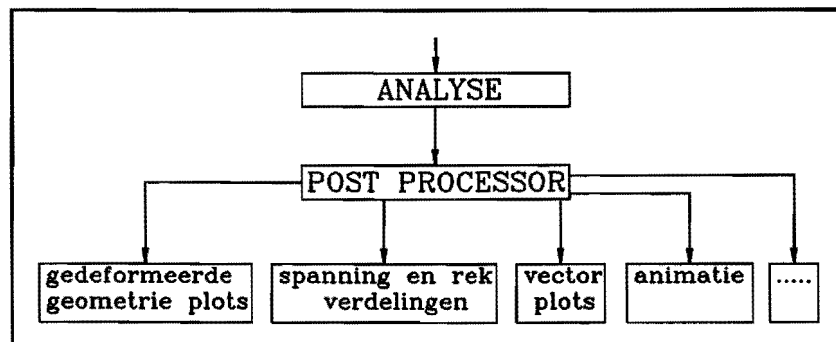
Tijdens de analyse fase wordt het gedurende de pre-processing fase aangemaakte probleemmodel doorgerekend. Gedurende deze fase neemt het benodigd aantal bytes spectaculair toe. De grootte van de invoerfile is namelijk in de orde van enkele kilobytes terwijl de totale grootte van de verschillende uitvoerfiles in de orde van enkele megabytes ligt.



figuur 5: De invoer van de pre-processor.

### De post-processing fase.

De post-processor is een programma dat de gebruiker de mogelijkheid biedt om de na afloop van de analyse fase verkregen resultaten te evalueren. De berekende resultaten kunnen grafisch, met behulp van een plotter of een beeldscherm of alfa-numeriek, met behulp van een printer of een beeldscherm worden weergegeven. De uitvoeren van de post-processor kan verschillende vormen aannemen ( zie figuur 5 ). Mogelijke voorbeelden zijn gedeformeerde geometrie plots en grafieken met de rekverdeling.



figuur 24: De uitvoer van de post-processor.

## GIFTS

GIFTS is een eindig elementen pakket dat wordt toegepast voor lineair elastisch materiaalgedrag. Het pakket is in tegenstelling tot vele andere eindige elementen pakketten, bijvoorbeeld ABAQUS, dus niet in staat om plastische berekeningen uit te voeren. Dit betekent echter niet dat het pakket niet kan worden gebruikt bij de numerieke analyse van het dieptrekproces waarbij elastische en plastische vervormingen optreden. Het pakket kan worden gebruikt om een eerste indicatie over de invloed van bepaalde parameters, bijvoorbeeld de blankdikte of de wandhoogte bij het vierkant dieptrekken, te verkrijgen of om trends te voorspellen. Één van de grootste voordelen van GIFTS is het feit dat het pakket reeds op een eenvoudige PC kan worden gebruikt. Er hoeft dus geen extra werkstation voor te worden gekocht. Bijkomend voordeel van GIFTS is dat de rekentijden beperkt blijven doordat er in het elastische gebied wordt gerekend. Deze rekentijden zijn wel afhankelijk van de gebruikte PC.

GIFTS bestaat uit een aantal processoren die in analogie met de bij een eindige elementen analyse optredende hoofdfasen onderverdeeld kunnen worden in:

- preprocessoren,
- rekenprocessoren en
- postprocessoren.

Elk van deze processoren vraagt bij het opstarten om een "jobname". Alle gegevens die betrekking hebben op een zeker probleem worden door deze "jobname" gekarakteriseerd. Als er een probleem moeten worden doorgerekend worden er door GIFTS een aantal files onder de werkende directory aangemaakt die allen dezelfde filenaam, de "jobname", bezitten, echter met verschillende uitgangsextensies. Deze files vormen te samen de database van het betreffende probleem. Al de gegevens die benodigd zijn voor het uitvoeren van de berekening zijn in de database terug te vinden. De resultaten worden door de verschillende eveneens naar deze database toegeschreven.

De belangrijkste preprocessoren in geval van een 2-dimensionaal probleem zijn:

- **BULKM** Met behulp van deze preprocessor kunnen 2-dimensionale meshes worden gemaakt, uitgaande van drie- of vierzijdige grids. Dit is afhankelijk van het aantal lijnstukken waardoor de deelgebieden worden omsloten. De materiaalgegevens en de diktes van de afzonderlijke grids dienen binnen deze preprocessor opgegeven te worden.
- **LOADBC** Met behulp van deze preprocessor kunnen de kinematische en dynamische randvoorwaarden van het probleem worden opgegeven.

Voor 3-dimensionale problemen heeft GIFTS soortgelijke preprocessoren. Deze zullen hier niet worden besproken, informatie over deze processoren is terug te vinden in de GIFTS manuals.

Nadat de voor de probleembeschrijving benodigde gegevens met behulp van de preprocessoren zijn ingevoerd vindt de eigenlijke berekening plaats. De berekening wordt uitgevoerd in een aantal deelstappen, elke stap wordt uitgevoerd door één processor. Het is mogelijk om de reeks van processoren die benodigd is voor het uitvoeren van een berekening met behulp van een macro-commando aan te roepen. Voorbeelden van dergelijke macro's zijn:

- MSTATIC Met behulp van dit commando worden de spanningen en verplaatsingen ten gevolge van een statische belasting berekend.
- MGAPAN Voor het berekenen van contactproblemen.

De berekende resultaten kunnen worden weergegeven met behulp van een postprocessor, bijvoorbeeld RESULT.

## ABAQUS

Abaqus is een commercieel "non linear general purpose" eindig elementen pakket, dat niet gebruikt kan worden op de P.C.. Om met het pakket te werken dient een werkstation aangeschaft te worden. De aanschafkosten van zo'n werkstation bedragen ca. fl 25.000,-

Met "general purpose" wordt bedoeld dat het pakket in een groot aantal probleemgebieden kan worden toegepast, met andere woorden het pakket is niet speciaal geschikt voor een zeker probleemgebied. Met "non linear" wordt aangeduid dat het pakket kan worden toegepast op zowel lineaire als non-lineaire problemen. De non-lineaire problemen kunnen zowel fysisch, het materiaal gedraagt zich niet langer volgens de wet van Hooke, met andere woorden er bestaat een niet lineair verband tussen de spanningen en rekken in het materiaal, als geometrisch, de optredende vervormingen zijn zo groot dat er bij de berekening van de element-stijfheidsmatrix niet meer mag worden uitgegaan van de ongedeformeerde geometrie van de elementen, zijn.

Abaqus is in het bezit van een eigen pre- en post-processing optie. De nadruk ligt bij Abaqus echter op het zo betrouwbaar mogelijk uitvoeren van de analyse. Dit gaat veelal ten koste van de pre- en post-processing optie. In veel gevallen wordt dan ook gebruik gemaakt van een externe pre- en post-processor, bijvoorbeeld I-deas. Een pre-processor is een programma dat de gebruiker de mogelijkheid biedt om een invoerfile of iets soortgelijks te maken van een te analyseren eindige elementen probleem.



Over het algemeen wordt begonnen met het definiëren van de geometrie van het te analyseren probleem. De geometrie wordt beschreven met behulp van geometrische entiteiten zoals punten, lijnen en cirkelbogen. Als de geometrie gedefinieerd is worden de mesh-areas aangemaakt. Dit zijn de gebieden waarin de mesh komt te liggen. Voordat de mesh wordt gegenereerd dient eerst nog de elementgrootte te worden ingesteld. Dit kan gebeuren door een globale elementgrootte aan te geven of door het aantal elementen op een geometrische entiteit voor te schrijven. Als de mesh goed is bevonden kunnen vervolgens een aantal elkaar opvolgende belastingstappen met bijbehorende randvoorwaarden worden geformuleerd.

De met behulp van de pre-processor gemaakte invoerfile dient wel nog in een voor Abaqus leesbare invoerfile te worden vertaald. Dit gebeurt door de met behulp van I-deas gemaakte invoerfile door een conversie programma te sturen, waardoor de Abaqus invoerfile ontstaat.

Als de invoerfile gereed is kan de berekening worden opgestart. Het programma zal hierop reageren met een aantal vragen die voor zichzelf spreken. De belangrijkste vragen, zijn de vraag naar de naam van de uit te voeren job en de vraag naar de naam van de invoerfile. Omwille van de overzichtelijkheid worden deze namen gewoonlijk hetzelfde genomen. Als de jobnaam bekend is worden door het pakket, in analogie met GIFTS, een aantal bij de job behorende files aangemaakt, die allen de naam van de job met een zekere extensie krijgen.

Als de berekening succesvol is verlopen, is het mogelijk om de verkregen resultaten, spanningen, rekken, verplaatsingen, enzovoorts binnen één van de Abaqus post-processoren, Abapost en Abaplot, of met behulp van een externe post-processor bijvoorbeeld I-deas te bekijken. Als gebruik wordt gemaakt van een externe post-processor moeten de uitvoerfiles natuurlijk eerst in voor de post-processor leesbare file worden vertaald.

Deze simulatiemethode wordt door velen de methode van de toekomst genoemd. Het nadeel van een dergelijke methode is dat ze nog zeer veel inspanning en kennis van de gebruiker vraagt. De mogelijkheid tot het simuleren van drie-dimensionale vormen wordt in de nabije toekomst mogelijk.

De voordelen die de laatste twee methoden ten opzicht van de eerste hebben is de algemene toepasbaarheid. Aangezien de ontwerper zelf in staat is om parameters te variëren zal een groter scala producten met eenzelfde pakket bestreken kunnen worden.

Een nadeel is dat gebruiker goed op de hoogte moet zijn van de grenzen van het pakket. Ook inzicht in de uiteindelijke resultaten is, zeker bij EEM, niet eenvoudig te verkrijgen.