

IDE 240 (636)

Konstruktieleer 2

Deel: Kunststoffen

auteurs:

† prof. ir. A. Anemaat
prof. ir. J.L. Spoormaker

bewerkt door:

ir. M.J.M. van der Zwet

ir. A.J. Heidweiller
dr. ir. J.C.M. de Bruijn

met medewerking van:

ing. R. van den Boogaard
G. Schut
R. Grabijn

Technische Universiteit Delft
Subfaculteit van het Industrieel Ontwerpen

September 1998

Inhoud

Hoofdstuk 1. Inleiding

Hoofdstuk 2. Materiaal

2.1 Inleiding	2-1
2.1.1 Indeling kunststoffen	2-1
2.1.2 Toepassing van kunststoffen	2-2
2.2 Materiaalkeuze	2-3
2.2.1 Inleiding	2-3
2.2.2 Checklist	2-3
2.2.3 GO / NO GO eisen	2-4
2.2.4 Kwantitatieve eisen of wensen	2-8
2.3 Literatuur	2-15

Hoofdstuk 3. Verwerkingstechniek

3.1 Inleiding	3-1
3.2 Parameters voor technologiekeuze	3-3
3.2.1 Vormeigenschappen	3-3
3.2.2 Kostprijs	3-5
3.2.3 Logistieke eisen	3-6
3.2.4 Andere parameters	3-7
3.3 Technologiekeuze	3-7
3.4 Praktijkvoorbeeld technologie- en materiaalkeuze	3-8
3.5 Literatuur	3-13

T. S.
HSA

Hoofdstuk 4. Product geometrie en constructieregels

4.1 Inleiding	4-1
4.2 Algemene constructieregels	4-1
4.3 Vormschepping, product en matrijs	4-2
4.4 Matrijsdeling en deelnaad	4-4
4.5 Lossingsschuinte	4-8
4.6 Wanddikten en wanddikteverschillen	4-9
4.7 Inval	4-13
4.8 Vergroting van de stijfheid	4-15
4.9 Grote doosvormige producten	4-19
4.10 Gaten	4-23
4.11 Ondersnijdingen	4-25
4.12 Letters en cijfers	4-26
4.13 Schroefdraad	4-27
4.14 Zwakke delen in product en matrijs constructies	4-29
4.15 Inserts	4-30
4.16 Outserttechniek	4-38
4.17 Scharnieren	4-40
4.18 Literatuur	4-43

Hoofdstuk 5. Sterkte- en stijfheidsaspecten van kunststoffen

5.1	Inleiding	5-1
5.2	Visco-elastisch gedrag	5-2
5.3	Lineair visco-elastisch gedrag	5-3
5.4	Kruipmetingen	5-5
5.5	De invloed van de temperatuur	5-9
5.6	Belasting, spanning en rek	5-12
5.6.1	Statische belasting	5-12
5.6.2	Stootbelasting	5-14
5.6.3	Dynamische belasting	5-17
5.6.4	Vermoeiing	5-22
5.7	Dimensioneren	5-27
5.7.1	Dimensioneren op basis van een faalspanning	5-27
5.7.2	Dimensioneren op basis van een faalrek	5-31
5.8	Voorbeeldopgaven	5-34
5.9	Literatuur	5-49

Hoofdstuk 6. Constructieve aspecten

6.1	Inleiding	6-1
6.2	Spanningsconcentraties	6-1
6.3	Verende elementen	6-4
6.4	Verstijven van constructies	6-5
6.4.1	Stijfheidsaspecten van verribben	6-5
6.4.2	Sterkteaspecten van verribben	6-7
6.4.3	Verhoging van de torsiestijfheid	6-9
6.5	Klikverbindingen	6-10
6.5.1	Toelaatbare vervorming	6-10
6.5.2	Sluitkracht van een klikverbinding	6-12
6.5.3	Berekening van een klikvinger	6-14
6.5.4	Berekening van een torsie klikverbinding	6-19
6.5.5	Berekening van een cilindrische klikverbinding	6-22
6.6	Persverbindingen	6-28
6.7	Toepassingen van klik- en persverbindingen	6-34
6.8	Voorbeeldopgaven	6-43
6.9	Literatuur	6-52

Hoofdstuk 7. Verbindingstechnieken

7.1	Schroefdraadverbindingen	7-1
7.1.1	Inserts	7-2
7.1.2	Zelftappers	7-7
7.1.3	Andere schroefdraad verbindingen	7-12
7.2	Lasverbindingen	7-13
7.2.1	Elektrisch lassen	7-14
7.2.2	Heetgas-lassen	7-17
7.2.3	Heetelement-lassen	7-18
7.2.4	Wrijvingslassen	7-21
7.3	Diverse verbindingen	7-30
7.3.1	Klinken	7-30

7.3.2	Felsen	7-31
7.3.3	Niet integrale klikverbindingen	7-32
7.3.4	Lijmen	7-33
7.4	Literatuur	7-34

Bijlage A **Checklist materiaalkeuze kunststof product**

Bijlage B **Checklist keuze verwerkingstechnologie**

Hoofdstuk 1. Inleiding

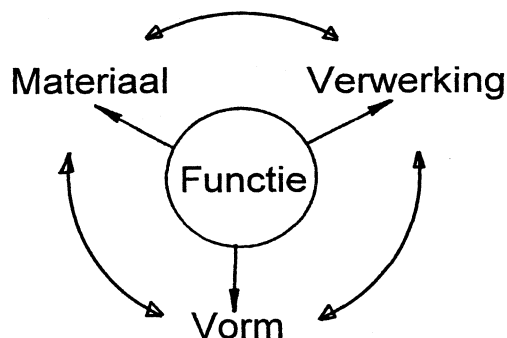
Bij het produceren van duurzame gebruiksgoederen is de toepassing van kunststoffen niet meer weg te denken. De belangrijkste argumenten voor het toepassen van kunststoffen zijn:

- men kan gecompliceerde onderdelen fabriceren
- de verwerkingskosten zijn betrekkelijk laag
- geen of weinig nabewerkingen aan het product
- door samenvoegen van functies in een product worden de montagekosten geringer
- men heeft een grote vrijheid in vormgeving

Bij het toepassen van kunststoffen moet men wel rekening houden met eigenschappen die beperkingen kunnen veroorzaken. Deze beperkingen zijn onder andere:

- de brandbaarheid
- de lage sterkte bij hogere temperaturen
- de grote vervormbaarheid
- de geringe hardheid
- de geringe temperatuursbestendigheid

Door de grote verscheidenheid van eigenschappen van de kunststoffen moet een lange reeks keuzecriteria afgehandeld worden voordat een technische en economisch optimale kunststof voor een bepaalde toepassing gevonden is. De materiaalkeuze is niet een op zichzelf staand gebeuren bij het ontwerpen of construeren (figuur 1.1). Centraal staat de functie van het product, en daar omheen staan een drietal belangrijke grootheden die ook elkaar onderling beïnvloeden.



figuur 1.1 De 'ontwerpdriehoek'

In de hoofdstukken 2 en 3 worden achtereenvolgens de aspecten behandeld van materiaalkeuze en het verwerkingsproces

In hoofdstuk 4 komen aspecten met betrekking tot de geometrie of vorm aan de orde. Hierbij worden constructieregels besproken die met name voor de vormgeving van kunststof

producten van belang zijn. De constructieregels hangen in grote mate samen met de verwerking en de materiaalkeuze.

De sterkte- en stijfheidsaspecten van kunststoffen worden als onderdeel van de materiaalkeuze in hoofdstuk 5 behandeld. Daarbij wordt nader ingegaan op de invloed van de tijd en de temperatuur op het mechanisch gedrag van kunststoffen.

In hoofdstuk 6 wordt een aantal constructieve aspecten besproken die specifiek zijn voor het construeren in kunststoffen. Het gaat hierbij met name om de relatie tussen de geometrie en de sterkte- en stijfheidsaspecten.

Na de fabricage van de onderdelen volgt de montage tot een samengestelde constructie. In hoofdstuk 6 komen in dit verband klikverbindingen reeds aan de orde. In hoofdstuk 7 worden de niet-geïntegreerde verbindingstechnieken voor kunststoffen behandeld.

Hoofdstuk 2. Materiaal

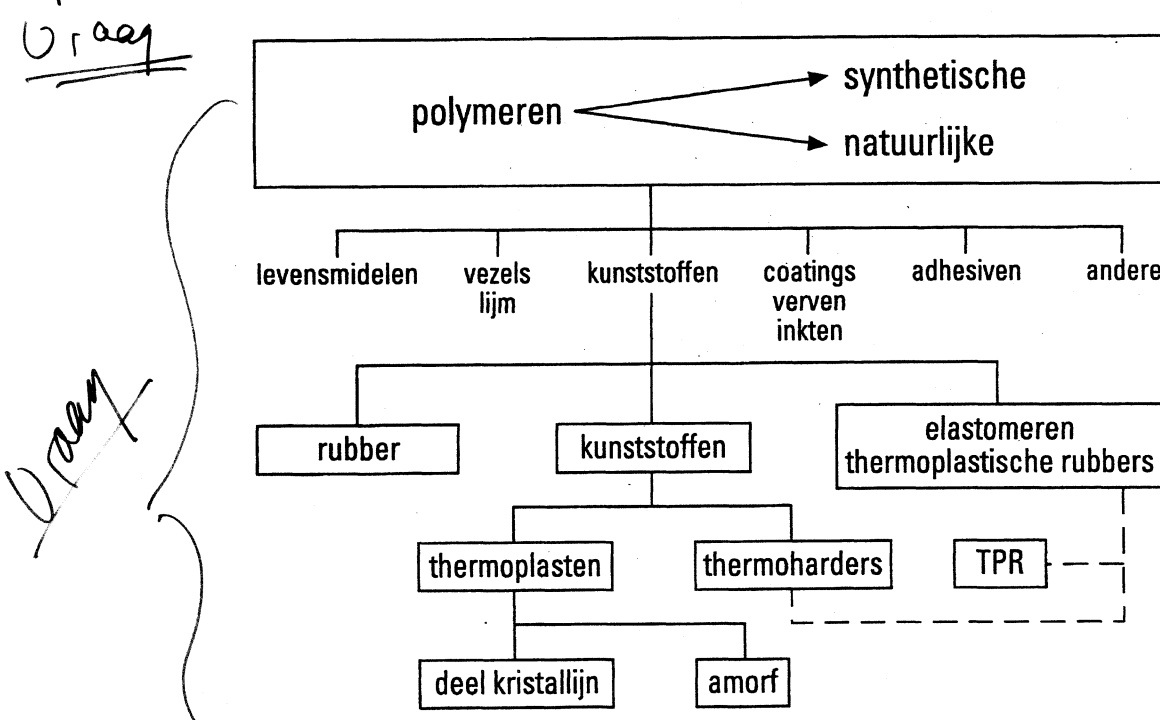
2.1 Inleiding

2.1.1 Indeling kunststoffen

Kunststoffen (polymeer inclusief toevoegingen) kunnen op verschillende manieren worden geclassificeerd, één daarvan is een indeling naar herkomst. In figuur 2.1 is een indeling gegeven van polymeren bestaande uit natuurlijke- of synthetische grondstoffen.

Praktisch alle kunststoffen zijn samengesteld uit polymeren waaraan diverse componenten zijn toegevoegd, om aan de wensen van de gebruiker tegemoet te komen.

Zoals figuur 2.1 laat zien zijn kunststoffen onder te verdelen in thermoplasten en thermoharders. Thermoplasten zijn onvernette systemen die bij temperatuurverhoging vloeibaar worden en die na afkoelen weer de vaste vorm aannemen.



figuur 2.1 Indeling van kunststoffen naar herkomst.

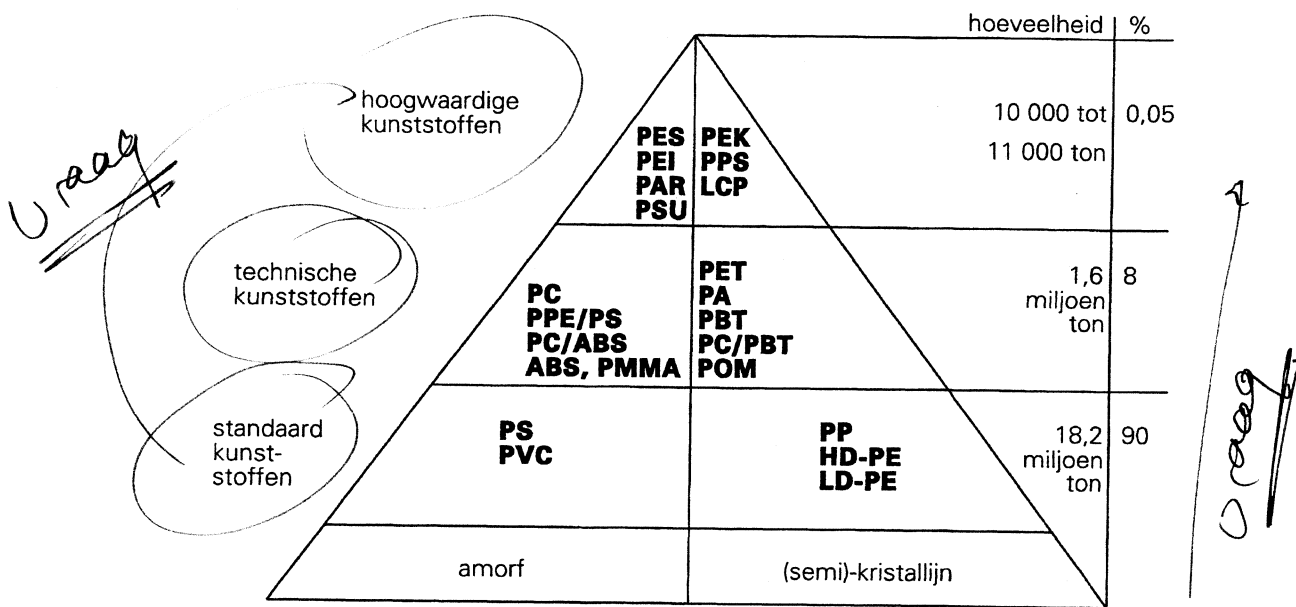
Vraag

De thermoplasten zijn t.a.v. hun structuur te verdelen in amorfe- en (semi-) kristallijne kunststoffen. De kunststoffen met een amorfe structuur zijn normaliter transparant en de kunststoffen met een (semi-) kristallijne structuur zijn over het algemeen niet transparant (wel opaal) leverbaar. Thermoharders zijn netwerk systemen, die bij temperatuurverhoging uitharden en na uitharding niet meer plastisch worden bij temperatuursverhoging.

De thermoplasten zijn t.a.v. het volume en de prijs te verdelen in de volgende drie groepen: de standaard kunststoffen (commodities), technische kunststoffen (engineering plastics) en hoog temperatuur bestendige (high performance) kunststoffen (figuur 2.2).

Naast deze thermoplasten kennen we verder ook de zgn. speciale kunststoffen zoals de siliconen en de fluorpolymeren. De siliconen en de fluorpolymeren zijn niet zozeer vanwege hun mechanische eigenschappen, maar vooral vanwege hun bijzondere eigenschappen zoals; chemische bestendigheid, geringe wrijvingscoëfficiënt, oxydatieve en zuiver thermische- en lichtstabiliteit van groot belang.

De langeduur gebruikstemperatuur bedraagt voor de standaard kunststoffen maximaal 90°C, voor de technische kunststoffen maximaal 140°C. Voor de hoog temperatuur bestendige kunststoffen ligt het maximum tussen 160°C en 260°C. Uit figuur 2.2 blijkt dat er een enorm verschil bestaat per groep voor wat betreft de kunststofproductie in West Europa uitgedrukt in tonnen per jaar. 90% (=ca. 18,2 miljoen ton) van het omzetvolume wordt bepaald door de 'big four' standaard kunststoffen: polyetheen, polypropreen, polystyreen en polyvinylchloride. Verder bestaat het omzetvolume voor 8% (=ca. 1,6 miljoen ton) uit technische kunststoffen en slechts voor 0,05% (= ca. 11000 ton) uit de hoogtemperatuur bestendige kunststoffen.



figuur 2.2 Indeling van thermoplastische kunststoffen naar performance, omzetvolume en prijs.

2.1.2 Toepassing van kunststoffen

De enorme groei in het gebruik en ontwikkeling van kunststoffen is toe te schrijven aan een goede combinatie van hun mechanische eigenschappen t.o.v. traditionele materialen, met als sprekend voordeel de lage dichtheid, waardoor producten lichter kunnen worden vervaardigd, en de hoge productiesnelheid (met name van het spuitgiet- en extrusieproces).

De ontwikkeling op het gebied van blends (combinaties van twee of meer kunststoffen) verhoogde de toepasbaarheid voor specifieke producten en met de introductie van vulstoffen, zoals glas-, koolstof- en aramide vezels verbeterde men de mechanische eigenschappen van de

kunststoffen en met name de stijfheid van de materialen. Het specifieke kunststofgericht ontwerpen draagt veel bij in de verdere ontwikkeling van deze materialen. De mogelijkheid om naast de esthetische-, en toepassings-eisen een product te vervaardigen met verregaande integratie van diverse onderdelen en de ontwikkeling van kunststof producten door middel van massafabricage hebben bijgedragen tot de groei van de kunststoffen.

Enkele toepassingsgebieden waar kunststoffen op grote schaal worden toegepast zijn: transportsector, communicatie en dataverwerkingsindustrie, water- en voedselvoorziening, verpakkingsindustrie, bouwsector, sanitaire voorzieningen, keuken en woninginrichting, medische toepassingen, vrije tijdsbesteding en textieltoepassingen.

2.2 Materiaalkeuze

2.2.1 Inleiding

De wensen van de gebruiker zijn te onderscheiden in een reeks tijd- en temperatuursafhankelijke primaire- en secundaire eigenschappen.

Onder de primaire eigenschappen wordt verstaan: ^{uraag} dimensiestabiliteit (vormvastheid), sterkte, rek, modulus, ~~kruip~~, uitzettingscoëfficiënt, slagvastheid (vaak tot een lage temperatuur), brandbaarheid, dielektrische eigenschappen, optische eigenschappen en het lange termijn gedrag.

Onder de secundaire eigenschappen verstaan we de kenmerken die betrekking hebben op het oppervlak ~~van de kunststoffen~~ ^{uraag} zoals: glans, kleurstabiliteit, wrijvingscoëfficiënt, oppervlaktespanning en de mogelijkheid tot lakken en bedrukken met betrekking tot de hechting.

Het toepassen van kunststof mag nooit een doel op zich zijn bij het ontwikkelen van een product. Vaak bestaan er alternatieven bijvoorbeeld metalen of hout. De ontwerper moet besluiten of hij een kunststof mogelijk naast andere materialen als alternatief ziet voor zijn ontwerpprobleem. Als men reeds eerder besloten heeft dat kunststof toepasbaar is voor het product of als kunststof de enige mogelijkheid is voor het betreffende product, kan de afweging achterwege blijven. De materiaalkeuze kan langs verschillende wegen tot stand komen zoals uit de volgende punten blijkt.

- Men heeft goede ervaringen met gelijke of ongeveer gelijke producten. Het ligt voor de hand dat dezelfde materialen gekozen worden.
- Er bestaan tabellen die ingedeeld zijn naar materiaalsoorten. Bij elk type kunststof staan de belangrijke eigenschappen en een opsomming van producten waarin dit materiaal met succes is toegepast (ref. 2). Men kan bij de materiaalkeuze van deze tabellen gebruik maken.
- De materiaalleverancier kan hulp bieden bij de materiaalkeuze. Men moet er wel aan denken dat de materiaalspecialist van een leverancier een advies kan geven voor een materiaal uit het eigen assortiment, deze keuze is niet altijd optimaal. Ook kunnen onafhankelijke instituten hulp bieden bij de materiaalkeuze.
- Voor producten of onderdelen met andere functionele eisen dan die men gewend is, zal men aan de hand van tabellen met materiaaleigenschappen moeten vaststellen welke materialen men wel of niet kan toepassen.

2.2.2 Checklist

Voor elk kunststof product of onderdeel van een product wordt een specificatie van eisen opgesteld. Deze eisen omschrijven de voorwaarden waaraan het onderdeel moet voldoen om de functie gedurende lange tijd te kunnen vervullen. Dit kunnen bijvoorbeeld mechanische eisen zijn zoals een voorgeschreven stijfheid bij een bepaalde temperatuur. We moeten ook rekening houden met de klimatologische omstandigheden waaronder het product moet kunnen functioneren. Voor een goede werking van een onderdeel, moet men soms strenge eisen stellen aan de nauwkeurigheid en aan de oppervlaktegesteldheid. Deze factoren hebben een sterke relatie met de fabricagemethode en met de materiaalkeuze. Men mag ook de eisen niet vergeten die de overheid of onafhankelijke keurbureau's voorschrijven, deze eisen staan meestal los van het functioneren van het product. In deze gevallen gaat het om de veiligheid van de gebruiker van het product.

In de bijlagen is een checklist opgenomen waarin de belangrijkste eisen zijn opgenomen die men aan een product of een onderdeel van een product kan stellen. Voordat een materiaal gekozen wordt moeten alle onderdelen van deze checklist doorlopen worden.

Om een materiaalkeuze systematisch te laten verlopen dient men onderscheid te maken tussen eisen (GO / NO GO eisen) en wensen.

Op eisen moet met "ja" (= GO) of met "nee" (= NO GO) antwoorden. Bij twijfel moet een nader onderzoek worden verricht voor men ja of nee kan zeggen. Op deze wijze voert men direct een aantal materialen af die niet bruikbaar zijn.

Bij de volgende stap moet het wensenpakket vergeleken worden met de kwantitatieve gegevens van de kunststoffen. In eerste instantie is het niet van belang of de vereiste drempelwaarde maar net of ver wordt overschreden. Na deze vergelijking zijn weer een aantal materialen afgevallen. Uit de overblijvende reeks kan het beste materiaal voor de specifieke toepassing gekozen worden. Men kan daartoe bijvoorbeeld gebruik maken van de keuzemethode van Eekels (ref. 3). Daarbij wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde Harrisprofielen. In hoofdstuk 3 wordt een voorbeeld uitgewerkt. Spelen de kosten een belangrijke rol, dan zal slechts één materiaal overblijven dat voldoet aan de eisen en dat een minimum kostprijs oplevert.

Bij het bepalen van de minimum kosten moeten we de kosten van het materiaal meenemen maar ook de verwerkingskosten en in sommige gevallen ook de gereedschapskosten.

2.2.3 GO / NO GO eisen

De checklist is zo uitgevoerd dat eerst de GO / NO GO eisen afgewerkt worden met een "ja" of "nee" en daarna de wensen. De checklist begint met de benaming en de functie van het product en daarna volgt de seriegrootte. De seriegrootte en de bestelserie zijn van belang voor de proceskeuze, zie hiervoor hoofdstuk 3. Als de proceskeuze is gemaakt wordt door deze keuze een aantal materialen uitgesloten (ref. 2, 4 en 5).

Het spuitgieten van onderdelen laat een grote mate van vrijheid toe in de constructie van het product. Door zink- en draadvonken van matrijzen kunnen meerdere functies in één onderdeel geïntegreerd worden. Een ontwerp met weinig onderdelen wordt in het algemeen als een beter ontwerp aanvaard dan een ontwerp met veel onderdelen.

Een gedeelte van de kosten wordt bepaald door nabewerkingen en montage. De montagekosten kunnen beïnvloed worden door een goede keuze van de verbindingstechniek,

zie hoofdstuk 6 en 7. Deze keuze is afhankelijk van de eisen die aan het product gesteld worden. Door deze keuze vallen weer een aantal materialen af (ref. 2 en 5).

Esthetische eisen

De eisen die aan het uiterlijk van het product worden gesteld leggen beperkingen op aan technologie en materiaal. Als een glanzend oppervlak wordt geëist kan men geen glasvezel gevulde thermoplasten toepassen. Eist men een gelakt oppervlak dan zijn semi-kristallijne materialen moeilijk toepasbaar. Door de eisen die men aan het oppervlak stelt vallen weer een aantal materialen af (ref 2, 5 en 6).

Chemische bestandheid

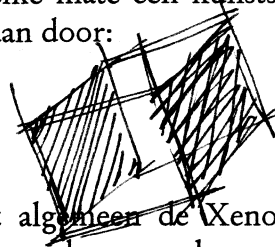
Bij het opstellen van het eisenpakket moet men vastleggen met welke chemische stoffen het product in aanraking komt. Aan de hand van tabellen kan men vaststellen welke materialen toepasbaar zijn en welke niet (ref. 2, 4, 7, 8 en 10).

Wil men het echt goed doen dan moet men weten welke stoffen in welke concentraties bij welke temperatuur met het product in aanraking komen. Uit bestandheidstabellen van de diverse grondstofleveranciers kan men een keuze maken. Voor mechanisch belaste onderdelen die in aanraking komen met chemische stoffen moet men nog rekening houden met milieu-spanningsbroosheid. Voor een globale materiaalkeuze kan men gebruik maken van de bovengenoemde tabellen.

Weersbestandheid en bestandheid tegen energierijke straling en organismen.

De weersbestandheid van kunststoffen is afhankelijk van een aantal factoren die tezamen het "klimaat" bepalen. Daarom zal de aantasting van kunststoffen onder verschillende weersomstandigheden anders verlopen. Of en in welke mate een kunststof bestand is tegen weersinvloeden kan in versnelde mate worden nagegaan door:

- kunstmatig versnelde veroudering
- natuurlijk versnelde veroudering



Voor een kunstmatig versnelde veroudering wordt algemeen de Xenontest toegepast. De proefstukken worden bestraald met een lamp waarvan de spectrale verdeling overeenkomt met die van het zonlicht. De temperatuur is instelbaar en men kan speciale gassen toevoegen en men kan het laten regenen. Bij natuurlijk versnelde veroudering worden de proefstukken continu buiten getest. Thermoharders zijn in het algemeen beter bestand tegen weersinvloeden dan thermoplasten. De UV bestandheid van thermoplasten kan verbeterd worden door het toevoegen van stabilisatoren, meestal voegt men roet (carbonblack) toe. De bestandheid van kunststoffen tegen weersinvloeden, energierijke straling en organismen zijn in ref. 7 en 8 weergegeven.

Bij de materiaalkeuze moet men er zich wel van vergewissen dat men het juiste type materiaal gekozen heeft binnen een zelfde materiaalbenaming.

Bestandheid van levensmiddelen en medicijnen tegen kunststoffen

Voor kunststoffen die in aanraking komen met levensmiddelen en medicijnen gaat het in de eerste plaats niet om de aantasting van de kunststof maar om de migratie van stoffen uit de kunststof in de levensmiddelen of in de medicijnen. Deze stoffen zijn: weekmakers, stabilisatoren, kleurstoffen en vulstoffen. Richtlijnen worden uitgevaardigd door de Warenwet; Bundesgesundheitsamt (BGA) in Duitsland; Food and Drug Administration (FDA) in Amerika en andere overheidsinstellingen in diverse landen. De

grondstofleveranciers hebben lijsten met materialen die door overheidsinstanties goedgekeurd zijn voor het verpakken van levensmiddelen en medicijnen.

Verder is het van belang dat de kunststof niet gekleurd wordt door koffie, thee, vruchtensappen, groentenat en vele andere stoffen. Grondstofleveranciers kunnen hierover uitsluitel geven.

Brandbaarheid en brandvertraging

Verbranding is een proces waarbij afbraak en ontleding plaats vinden onder invloed van hoge temperaturen. Heeft een kunststof een warmteverlies dat groter is dan de warmte die bij verbranding vrij komt, dan zal bij het verwijderen van de vuurhaard het vuur uitgaan. De materialen die dit brandgedrag vertonen noemt men zelfdovend. Blijft de kunststof doorbranden, dan noemt men de kunststof niet-zelfdovend. In ref. 2 en 4 zijn de belangrijkste kunststoffen ingedeeld naar zelfdovendheid en niet-zelfdovendheid. De mate van zelfdovendheid kan uitgedrukt worden in de zogenaamde zuurstofindex van een materiaal (ref. 10). Deze testmethode is beschreven in ASTM standaard D 2863. Door toevoegingen van bepaalde chemische stoffen aan het materiaal, kan men de mate van zelfdovendheid doen toenemen.

Aan de toepassing van kunststoffen in sectoren die gevaar inhouden voor personen bij een optredende brand zijn wettelijke regels gesteld. Deze verhoogde risicosectoren zijn:

- de bouwwereld
- de luchtvaart
- de vervoersector
- de elektrotechniek

De instituten die zich met de veiligheid bezighouden schrijven bij bepaalde constructies een bepaalde zelfdovendheidsklasse voor. Er zijn testen ontwikkeld voor het bepalen van het brandgedrag van kunststoffen die meer op praktijk gericht zijn dan de bepaling van de zuurstofindex. Met behulp van deze testen kan men de kunststoffen indelen in brandbaarheidsklassen of in zelfdovendheidsklassen. Het ISO en de nationale normalisatie instituten van diverse landen ontwikkelen keuringsmethoden. Enkele belangrijke nationale normen zijn:

- NEN in Nederland
- DIN in Duitsland
- ANSI/ASTM in de Verenigde Staten
- BS in Engeland

De nationale veiligheidsinstituten zoals KEMA, VDI in Duitsland, en UL in de Verenigde Staten, schrijven veiligheidseisen voor aan constructies evenals de internationale instituten (IEC 707). Het komt steeds meer voor dat de nationale voorschriften afgeleiden zijn van de voorschriften van de internationale instituten.

De IEC, dit is "International Electrotechnical Commission" geeft diverse voorschriften voor elektrische apparatuur. Het blad IEC 65 omvat "Safety requirements for main operated electronic and related apparatus for household and similar general use". Het blad geeft regels voor afscherming, isolatie en brandveiligheid. Verder bestaat ook de CEE, dit is "International Commission on rules for the approval of electrical equipment". Bij export van

producten naar diverse landen moet men voldoen aan de internationale eisen maar ook aan de nationale eisen als deze eisen zwaarder zijn dan de internationale eisen.

Enkele veel voorgeschreven brandbaarheidstesten zijn:

- | | | | |
|-------------------------|------------------------|------------|-----------|
| • Gloeidoortest | VDI 0470 | CEE 7 | |
| • Gloedraadtest | VDE 0471/2 | DIN 57471 | |
| • Gloeistaafstest | VDE 0304 | DIN 535459 | ISO R 181 |
| • Vlamtest | VDE 0471/5 | DIN 57471 | |
| • High Amp Arc Ignition | UL subject 746 A (HAI) | | |
| • Hot Wire Ignition | ASTM D 3874 (HWI) | | |

In de elektronische industrie wordt veel gebruik gemaakt van de Amerikaanse norm UL subject 94 van "Underwriters Laboratories Inc.". Deze norm beschrijft "Tests for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances".

In de testen van UL subject 94 worden drie punten bekeken:

- de tijdsduur waarover de kunststof blijft branden na het wegnemen van de vuurhaard
- de afstand waarover de vlam zich verplaatst
- de mogelijkheid dat brandende druppels een katoenen doek op 300 mm afstand kan doen ontbranden

UL subject 94 kent 8 brandbaarheidsklassen waarvan V0, V1, V2 en HB de belangrijkste zijn. Bij de eerste drie klassen hangt de proefstaaf vertikaal, bij de laatste wordt de proefstaaf horizontaal opgesteld.

Men moet er rekening mee houden dat als een materiaal in een bepaalde klasse valt, het product daar niet aan hoeft te voldoen; het al of niet voldoen aan de eis hangt voornamelijk af van de wanddikte van het product.

Grondstoffenleveranciers geven altijd de UL subject 94 klasse op van hun materialen. Voor de materiaalkeuze moet men goed opletten dat men het juiste type uit een materialengroep kiest.

Voor de automobielenindustrie en voor de andere risicogroepen bestaan afzonderlijke normen die men bij de materiaalkeuze en de constructie moet raadplegen. Voor de automobielensector geldende normen: MVSS 302 "Motor Vehicles Safety Standards Flammability of Interior Materials in Passenger Cars" (USA), in Europa gelden DIN 75200, ISO 3795, UTAC.ST 13-502 en NEN 3883.

In de luchtvaart geldt: FAR 25.853 (Federal Aviation Regulation) voor brandbaarheidstesten voor grote passagiersvliegtuigen; FAR 23 voor kleine motorvliegtuigen; In Europa geldt JAR (Joint Airworthiness Requirements) voor de brandveiligheid.

In het railverkeer gelden UIC 564-2 en DIN 54341.

In de bouwwereld geldt NEN 1076, ISO DR 1715 en DIN 4102.

Als er eisen zijn gesteld aan de brandbaarheid zullen ook nu weer een aantal materialen afvallen, die niet aan deze eisen voldoen.

2.2.4 Kwantitatieve eisen of wensen

Bij de reeks kenmerken die begint bij 8 (Fysische eisen) op de checklist in bijlage A voldoet een materiaal, indien een eigenschap van een materiaal een waarde bereikt die gelijk is of hoger is dan de vereiste drempelwaarde voor het product. Sommige eisen kunnen direct vertaald worden in eigenschappen die de kunststof moet bezitten. Andere eisen moeten eerst omgerekend worden voor men ze kan vergelijken met materiaaleigenschappen. Verder moet men er rekening mee houden dat bijvoorbeeld wettelijke voorschriften eisen dat elektrische isolatoren een bepaalde temperatuurbestandheid moeten hebben, men mag dan beide eisen niet los van elkaar zien.

Fysische eisen

Soortelijke massa (DIN 53479 ISO 1183)

Soms kan de waarde van de soortelijke massa van het materiaal deel uitmaken van de materiaalkeuze. Bij vliegwielen is een hoge soortelijke massa wenselijk om de afmetingen beperkt te houden.

Voor fijnmechanische onderdelen die snelle bewegingen maken kan een laag gewicht noodzakelijk zijn om de massacrachten binnen de perken te houden. Als de soortelijke massa niet belangrijk is voor de materiaalkeuze, is het toch nuttig deze waarde van het materiaal op het eisenblad in te vullen, omdat dit een ruggesteun kan zijn bij het bepalen van het materiaalaandeel in de kostprijs. De soortelijke massa van diverse kunststoffen is weergegeven in ref. 2.

Vochtopname (DIN 53495)

De eisen die aan een kunststof worden gesteld met betrekking tot de vocht opname komen voort uit vereiste elektrische isolatiewaarden van het materiaal of uit de vereiste materiaal nauwkeurigheid onder verschillende klimatologische omstandigheden. Vocht kan ook nog schimmelgroei bevorderen. Men moet nagaan of voor bepaalde productgroepen klimatologische testen zijn voorgeschreven. Meestal zijn dit gestandaardiseerde klimaatproeven. (IEC 68-2). De vochtopname van een aantal materialen is weergegeven in ref. 7.

Gas- en dampdoorlaatbaarheid

De gas en dampdoorlaatbaarheid van een kunststof speelt in de verpakkingen en in de verpakkingsfolies een belangrijke rol. De gas- en dampdoorlaatbaarheid van een aantal kunststoffen zijn te vinden in ref. 7 en 9.

Optische eisen

De kunststoffen hebben een belangrijke plaats veroverd in optische producten, bijvoorbeeld in brillen, fotoapparatuur, verlichting van auto's en autowegen en in de laserbesturing van elektronische apparaten.

In het algemeen hebben kunststoffen een grotere lichtdoorlaatbaarheid dan bepaalde soorten optisch glas. Door de lagere brekingsindex van kunststoffen ten opzichte van die van optisch glas zijn de reflexieverliezen kleiner. Kunststofoptiek kan ook voorzien worden van een antireflexiecoating, waardoor de lichtdoorlaatbaarheid nog meer geaccentueerd wordt.

De voordelen van kunststof optiek zijn:

-
- gering gewicht
 - betere slagsterkte
 - montagevoorzieningen kan men tegelijk meespuitgieten

Nadelen van kunststof optiek zijn:

- de invloed van de temperatuur op de maatvoering en op de brekingsindex is groot
- minder krasvast
- bij sommige kunststoffen heeft de vochtopname invloed op de maatvoering

Gegevens over optische eigenschappen zijn te vinden in ref. 2, 7 en 8.

Thermische eisen

Soortelijke warmte

De soortelijke warmte is van belang voor het bepalen van de benodigde energie bij het opwarmen van kunststof. (ref. 2)

Warmtegeleidingscoëfficiënt

De warmtegeleidingscoëfficiënt is van belang bij materialen die voor warmte-isolatie moeten dienen. (ref. 2)

Uitzettingscoëfficiënt

De uitzettingscoëfficiënt is van belang als kunststoffen moeten samenwerken met materialen met een veel kleinere uitzettingscoëfficiënt, zoals bij kunststoflagers en voor kunststofassen. Bij temperatuurveranderingen kunnen ontoelaatbare vervormingen of ontoelaatbare spelingen optreden. Kunststoffen met vulmiddelen vertonen een kleinere uitzettingscoëfficiënt dan dezelfde kunststoffen zonder vulmiddelen. Met glasvezelgevulde kunststoffen kunnen beter samenwerken met metalen dan de onge vulde. (ref. 2 en 7)

Gebruikstemperatuur

De thermoplasten verweken bij een bepaalde temperatuur, deze verwekingstemperatuur is afhankelijk van het type materiaal. De ontwerper is geïnteresseerd bij welke maximum temperatuur een product zal kunnen blijven functioneren. De minimum toelaatbare temperatuur is van belang bij stootbelastingen, omdat vooral bij semi-kristallijne materialen de slagsterkte bij een lage temperatuur terugloopt. Gegevens over de gebruikstemperaturen van diverse materialen zijn te vinden in ref. 2 en 7.

Om de toelaatbare temperatuur van diverse materialen met elkaar te kunnen vergelijken zijn verschillende testen ontwikkeld. Deze testen zijn:

- Bepaling van de deformatietemperatuur volgens Martens, DIN 53458; DIN 53462 en VDE 0302. (vierpunts-buigproef).
- Bepaling van de Vicat-verwekingstemperatuur VSP (Vicat Softening Point) methode A (10 N) of methode B (50 N); DIN 534660. ISO R 306 (naald met 1 mm² oppervlak)
- Heat deflection temperature under load (HDT), ASTM D 648; DIN 53461 en ISO R 75 methode A (1,85 MPa) of methode B (0,46 MPa). (driepunts buigproef)
- Temperature Index UL subject 746 B (Ti).

Bij elektrische isolatiematerialen wordt een maximum gebruikstemperatuur voorgeschreven volgens een van de eerste drie genoemde methoden.

Het onderlinge verband tussen de verschillende temperatuurtesten is terug te vinden in ref. 10.

Producten moeten soms voldoen aan testen van diverse keurbureau's. Zo zijn in de norm IEC 68-2 een aantal klimaattesten weergegeven voor elektronische apparaten. Enkele van deze testen zijn:

Non operationeel	Operationeel
Dampheat steady state	Dampheat cyclic
Dry heat	Cold
Cold	Low air pressure
	Solar radiation
	Change of temperature

Het zal duidelijk zijn dat de toegepaste metalen ook deze testen moeten kunnen weerstaan.

Elektrische eisen

Kunststoffen bezitten in het algemeen goede elektrische eigenschappen. De invloed van de temperatuur op de elektrische eigenschappen van kunststoffen is veel groter dan bij metalen, zo daalt de isolatieweerstand van alle kunststoffen bij stijgende temperatuur. Andere grootheden die invloed hebben op de elektrische eigenschappen zijn:

- de tijdsduur van de elektrische belasting
- de frequentie van de stroom (voor diëlektrische toepassingen)
- de vochtopname
- de aanwezigheid van verontreinigingen in het materiaal of op het oppervlak
- de vulstof, weekmaker, zelfdovende middelen, UV absorberende en warmte stabiliserende stoffen

Men kan in de elektrotechniek drie gebieden onderscheiden waarin kunststoffen om hun specifieke eigenschappen worden toegepast. Deze drie gebieden zijn niet scherp van elkaar te scheiden.

1. Kunststoffen toegepast als diëlektricum in condensatoren en kunststoffen toegepast in de hoogfrequenttechniek. De belangrijkste eigenschappen zijn:
 - de diëlektrische verliesfactor $\tan\delta$
 - de diëlektrische constante ϵ_r
2. Kunststoffen toegepast als isolatiemateriaal in de elektronica en in de zwakstroomtechniek. De isolatieweerstand en de oppervlakteweerstand zijn van belang.
3. Kunststoffen toegepast in de hoogspanningstechniek. Nu zijn de isolatiewaarden, de doorslagsterkte, de kruipstroomsterkte en de diëlektrische verliesfactor van belang.

Ad. 1 Diëlektrische eisen

Bij condensatoren en in de hoogfrequenttechniek zijn de diëlektrische constante ϵ_r en de verliesfactor $\tan\delta$ van belang. De constante ϵ_r geeft aan hoeveel groter de capaciteit van een condensator wordt met kunststof als diëlektricum vergeleken met dezelfde condensator met lucht als diëlektricum.

Voor condensatoren moet er zo min mogelijk afhankelijk zijn van de frequentie en van de temperatuur. Het vermogen dat in een elektrisch wisselveld verloren gaat is:

$$p = U^2 \cdot \omega \cdot e_r \cdot \tan \delta$$

In deze formule is:

p	= vermogensverlies
U	= spanning
ω	= frequentie
e_r	= diëlektrische constante
$\tan \delta$	= diëlektrische verliesfactor

oraag

Om de warmteontwikkeling zo klein mogelijk te houden moet het product $e_r \cdot \tan \delta$ klein zijn. Apolaire kunststoffen zoals PE, PP en PTFE hebben een zeer kleine verliesfactor die bijna niet afhankelijk is van de temperatuur en van de frequentie. In ondergrondse hoogspanningskabels waarin U groot is moet $e_r \cdot \tan \delta$ ook zo klein mogelijk zijn..

Voor spanningen die kleiner zijn dan 15KV kan PVC als isolatiemateriaal worden toegepast. Voor spanningen van 75 tot 150 KV past men PE toe met een gegarandeerd minimum aan insluitsels of verontreinigingen.

Voor hoogfrequent lassen van kunststoffen komen materialen in aanmerking met een hoge $e_r \cdot \tan \delta$. Gegevens over $e_r \cdot \tan \delta$ van verschillende materialen kan men vinden in ref. 2, 7, 8, 9 en 10.

Ad. 2 Elektrische isolatie

oraag

In de elektronica en in de zwakstroom techniek dienen kunststoffen als constructiemateriaal en als isolatiemateriaal tussen spanningvoerende onderdelen. Door miniaturisatie van apparaten en onderdelen moet het volume en het oppervlak van de kunststofdelen steeds kleiner worden. Aan de isolatie eigenschappen moet men steeds hogere eisen stellen. In verband met de veiligheid moeten elektrische apparaten aan bepaalde isolatienormen voldoen. Deze normen zijn vastgelegd in IEC 32i IEC 65; IEC 130; IEC 335; IEC 512; IEC 968; CEE 10; CEE 11; UL 1410 enz. De in deze normen voorgeschreven testen omvatten ook langeduur testen en klimatologische testen.

Isolati weerstand

oraag

De isolati weerstand is de elektrische weerstand van kunststof tussen twee geleidende oppervlakken. De specifieke isolati weerstand wordt gegeven door:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{d} \text{ in ohm.cm}$$

In deze formule is:

ρ	= de specifieke isolati weerstand in ohm cm.
R	= de gemeten isolati weerstand tussen de elektroden in ohm
A	= het oppervlak van de elektroden in cm^2
d	= de dikte van het proefstuk in cm.

De specifieke isolatieweerstand is afhankelijk van:

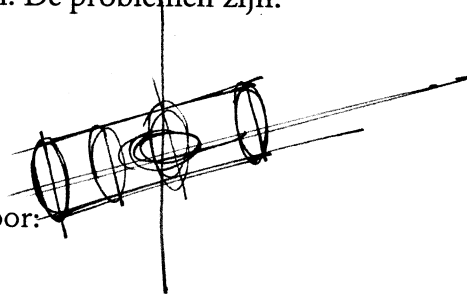
- de temperatuur
- de tijd
- het vochtgehalte

Oppervlakteweerstand (VDE 0303, T3)

De oppervlakteweerstand geeft inlichtingen over de isolatietoestand van het oppervlak van de kunststof (ref. 2).

De oppervlakteweerstand is afhankelijk van de luchtvochtigheid en van verontreinigingen op het oppervlak. De afhankelijkheid van de oppervlakteweerstand van de dikte van het proefstuk en van de vorm en de plaats van de elektroden zijn er de oorzaak van dat de resultaten van verschillende meetmethoden niet met elkaar vergelijkbaar zijn. De goede oppervlakteweerstand van kunststoffen kan de oorzaak zijn van het vasthouden van oppervlakteladingen. Deze oppervlakteladingen kunnen bij de fabricage en ook bij het gebruik van het product problemen veroorzaken. De problemen zijn:

- aantrekken van stof
- kleven van folies
- vonkoverslag bij aanraking



Deze problemen kunnen worden voorkomen door:

- antistatische toevoegingen, zoals roet
- geleidende vulstoffen

Welke waarden voor de oppervlakteweerstand moeten worden nagestreefd hangt af van de eisen die aan het product worden gesteld, als richtlijn kunnen de volgende waarden dienen voor de oppervlakte weerstand in ohm:

10^{14}	statische oplading
$10^{12} - 10^{13}$	verminderde neiging tot statische oplading
$< 10^9$	geen statische oplading
$< 5 \cdot 10^4$	geleidend oppervlak

N.B. In een vochtige omgeving zijn deze waarden lager.

Ad. 3 Elektrische sterkte

Doorslagsterkte

De doorslagsterkte is het quotiënt van de doorslagspanning en de tussen de elektroden gemeten dunste plaats van het kunststof monster. De doorslagspanning is afhankelijk van de tijd, de frequentie, de spanningstoename per tijdseenheid en van de temperatuur.

Ook heeft het vochtgehalte van de kunststof, de dikte van het proefstuk en de vorm van de elektroden invloed op de doorslagsterkte. De doorslagspanning is afhankelijk van de dikte van het proefstuk, ondanks het feit dat deze waarde in KV/cm wordt opgegeven. De oorzaak is dat een dik monster meer onvolkomenheden en verontreinigingen bevat dan een dun monster.

Gegevens over de doorslagsterkte zijn te vinden in ref. 2, 7, 9, 10 en 24. De norm IEC 243 behandelt de hoogspanningsisolatie.

Kruipstroomsterkte

Vraag

Als op een oppervlak verontreinigingen en vocht aanwezig zijn kan tussen twee elektroden een kruipstroom optreden. Er ontstaat een vlamboog die het oppervlak aantast. Er ontstaat een doorslag als het materiaal van het oppervlak tot een voldoende hoeveelheid koolstof is ontleed. De meting van de kruipstroomsterkte is genormaliseerd in IEC 112 en in DIN 53480 (VDE 0303TI). De methode K van VDE 0303 komt overeen met IEC 112. Deze methode bestaat uit het bepalen van de spanning waarbij een kruipstroom van 0,5 A ontstaat nadat 50 druppels van een zoutoplossing F op een schoon kunststof oppervlak tussen twee elektroden zijn gevallen. De afstand tussen de elektroden bedraagt 4 mm. De aanduiding van de kruipstroomsterkte van een materiaal is bijvoorbeeld DIN 53480 K_C 175. De waarde wil zeggen dat de kruipstroomsterkte 175 Volt bedraagt volgens methode C. De norm VDE 0303 geeft nog twee andere kruipstroomsterkten, namelijk K_B en K_A . De waarde K_B is op dezelfde wijze bepaald als K_C maar dan met een zoutoplossing A. De uitvoering van de methode K_A geschiedt onder een constante spanning van 380 Volt met zoutoplossing A. De aanduiding van de kruipstroomsterkte is in de onderstaande tabel weergegeven.

Tabel 2-1 Aanduiding van kruipstroomsterkte

Aanduiding	aantal druppels	Groefdiepte in mm
K_{A1}	1 tot 10	
K_{A2}	11 tot 100	
K_{A3a}	101	> 2
K_{A3b}	101	>1 > 2
K_{A3c}	101	>1

De methoden K_A en K_B zijn niet opgenomen in IEC 112. Grondstofleveranciers geven toch nog kruipstroomwaarden op volgens K_A en K_B . De kruipstroomsterkte van diverse materialen is opgegeven in ref. 7, 8 en 9.

Volgens de methode ASTM . D 495 wordt de kruipstroomsterkte bepaald met een elektrische vlamboog tussen twee elektroden. De tijd die nodig is om een kruipspoor te vormen is een maat voor de kruipstroomsterkte.

U.L. (Underwriters Laboratories) heeft ook een test voor het bepalen van de kruipstroomsterkte, namelijk de "High Voltage Tracking Rate" UL Subject 746A (HVTR). Gedurende 2 minuten wordt een vlamboog getrokken tussen twee elektroden die van elkaar af bewegen tot de vlamboog weer ontstaat. Na twee minuten wordt de lengte van de geleidende kruipweg gemeten in inches en door twee gedeeld. De ontstane waarde is een maat voor de kruipstroomsterkte. Kunststoffen met aromatische verbindingen hebben een kruipstroomsterkte die veel lager is dan die van kunststoffen die geen aromatische verbindingen bezitten.

Tribologische eisen

Wrijving en slijtage zijn belangrijke factoren als een kunststof als glijmateriaal wordt toegepast, bijvoorbeeld in tandwielen, lagers en nokkenschijven. De wrijving en de slijtage hangen af van:

-
- de vlaktedruk tussen beide delen
 - de glij snelheid
 - de temperatuur van het loopvlak
 - de beide glijmaterialen
 - de ruwheid van beide vlakken
 - het smeermiddel of het afwezig zijn van enig smeermiddel

Doay

Gegevens over lagers en tandwielen, toegepaste materialen en gebruiksomstandigheden zijn weergegeven in ref. 7, 11, 12, 13, 17 en 18.

Maat- en vormtoleranties

Hobby

Bij het produceren van kunststof producten kan het realiseren van vooraf bepaalde maat en vormtoleranties een belangrijke rol spelen. De maat en vormtoleranties worden evenals de materiaalkeuze in de constructiefase van de productontwikkeling vastgelegd. De maat- en vormtoleranties maken geen deel uit van de materiaalkeuze. De constructieve vormgeving en de materiaalkeuze zijn gebeurd en aan de hand van het gekozen materiaal zijn de minimaal haalbare toleranties vastgelegd. (Zie hoofdstuk 8 Toleranties, ref. 24, DIN 16901 en ref. 14).

Toch kan het een enkele maal voorkomen dat bij noodzakelijke zeer kleine toleranties de rollen worden omgekeerd en men een materiaal kiest met een zeer kleine krimp en dus ook met een zeer kleine krimpspreiding (ref. 2). Bij niet correct in kunststof geconstrueerde producten zal men semi-kristallijne of glasvezelgevulde materialen vermijden en kiezen voor amorfe materialen om vormafwijkingen zoveel mogelijk te beperken.

Mechanische eisen

Doay

Een materiaalkeuze op mechanische eisen, bijvoorbeeld op een voorgeschreven maximum vervorming is niet direct mogelijk. Met behulp van de materiaaleigenschappen van de tot nu overgebleven materialen kan men door een juiste dimensionering van het product binnen bepaalde grenzen voldoen aan de gestelde eisen. Dit geldt ook voor de isolatiedikte van kunststoffen in het deel "elektrische eisen". In combinatie met een minimale kostprijs is de materiaalkeuze op mechanische eisen wel mogelijk. In een volgend hoofdstuk wordt ingegaan op de minimum kostprijs.

De dimensionering van producten kan geschieden met materiaal eigenschappen die in diverse tabellen en grafieken zijn weergegeven. (ref. 2, 7, 9, 15, 16, 19 en 20).

Bij slag en stootbelasting moet de energie in de constructie opgenomen worden zonder dat de constructie breekt. De beschikbare mogelijkheden om deze toestand te bereiken zijn:

- grote afrondingen in de hoeken (kerfwerking vermijden)
- slap construeren
- materialen toepassen met een hoge slagsterkte

In Hoofdstuk 5 en 6 wordt dieper ingegaan op de mechanische eigenschappen.

Milieu

Doay

Bij het ontwerpen van producten of wijzigingen van bestaande concepten dient men aandacht te geven aan het milieuaspect. Het product kan consequenties hebben voor het milieu bij de vervaardiging, tijdens het gebruik of wanneer het product tenslotte in het afvalstadium raakt. Inmiddels zijn overal in de wereld wetten in werking of in voorbereiding die het milieu tegen ongewenste beïnvloeding moeten beschermen. Het is van groot belang dat in een vroeg

stadium van het ontwerpen het milieuaspect wordt onderkend, zodat niet in een latere fase kostbare correctiemaatregelen moeten worden getroffen. Onder milieuschadelijkheid wordt verstaan: stofeigenschappen, zoals giftigheid - waaronder carcinogeniteit, mutageniteit en teratogeniteit - afbreekbaarheid en (bio)accumulatie, die een ernstig risico inhouden. In internationaal verband zijn stoffen op grond van hun milieuschadelijke eigenschappen op zwarte lijsten geplaatst. Het in het milieu brengen van deze stoffen dient gezien hun eigenschappen vermeden te worden.

De lijst van zwarte stoffen voor het milieubeleid heeft een richtinggevende betekenis voor overheden belast met vergunningsverlening en voor de betrokken bedrijven. Voor stoffen van de lijst van zwarte stoffen wordt een maximale brongerichte aanpak voorgestaan. Naast de zwarte lijst, EEG 76/46L en 83/477 bestaan er grijze lijsten met stoffen die in een aantal landen ook als zwart worden behandeld. Voor cadmium bestaat in Nederland het "Cadmiumbesluit Wet milieugevaarlijke stoffen", voor speelgoed bestaat de norm EN 71 die het maximale cadmiumgehalte aangeeft.

In punt 14 van de checklist in bijlage A zijn punten opgenomen bedoeld om milieurisico's te voorkomen door:

- tijdig milieudeskundige personen te informeren over de implicaties van gewijzigde of nieuwe producten
- de ontwerpers te attenderen op de risico's van hun materiaalkeuze
- van materiaalleveranciers te eisen dat hun materiaal geen stoffen bevat die op de zwarte lijst voorkomen, of als bepaalde stoffen wel voorkomen op de zwarte lijst hoe men moet handelen om aan de wettelijke voorschriften te voldoen

2.3 Literatuur

1. F. Irrgang, Globale economische vergelijking van kunststofverwerkingsprocessen, Uitgave: Rijksnijverheidsdienst april 1982.
2. M.W. van Dalen, Kunststoffen en toepassingen, IO bijzondere onderwerpen 5, TU Delft
3. Eekels/Roozenburg, Ontwerpmethodologie IO 24, Hoofdstuk 14 Evalueren en kiezen, TU Delft
4. Praktikum Metaalkunde, Mt 7A, TU Delft
5. Systematische Werkstoffauswahl für Kunststoffproducte, IKV TH Aachen 1978
6. M.W. van Dalen, Lakken en verven, I.O. Bijzondere onderwerpen 4, TU Delft
7. K. Oberbach, Kunststoff-Kenwerte für Konstrukteure, Carl Hanser Verlag München 1980
8. G. Schreijer, Konstruieren mit Kunststoffen, Carl Hanser Verlag, München
9. H. Domininghaus, Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf.
10. A.K. v.d. Vegt, Kunststoffen, Dictaat TU Delft.
11. G. Erhard / E. Strickle, Maschinenelementen aus Thermoplastischen Kunststoffen, Band 2 Lager und Antriebsselemente, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
12. VDI 2541, Gleitlager aus Thermoplastischen Kunststoffen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf

-
13. VDI 2545, Zahnrad aus Thermoplastischen Kunststoffen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
 14. Geijer / Gemmer / Strelow, Qualitätsformteile aus thermoplastischen Kunststoffen, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
 15. R. Taprogge, Construern mit Kunststoffen, Werkstoffeigenschaften Gestaltung Festigkeit Kunststoffen, VDI Taschenbucher T21, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1974
 16. Menges, Taprogge, Kunststoffkonstruktionen Rechenbeispiele, VDI Taschenbucher T38, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1974
 17. Kunststofflagers VM 31, Educaboek B.V. Culemborg
 18. Stiomak / tht, Materiaalkeuze in de werktuigbouwkunde, Educaboek Culemborg, Stam technische boeken
 19. B. Carlowitz, Tabellarische Übersicht über die Prüfung von Kunststoffen, Kunststoff-Verlag
 20. B.S. Benjamin, Structural design with plastics, Van Nostrand Reinhold Company New York
 21. General Electric, Engineering Structural Foam, Design Guide
 22. Battenfeld-Symposium 1982, Schaum reist Locher in den Kompakt-Markt, Battenfeld-Maschinenfabriken GmbH, Meinerszhagen
 23. Bangert, Vorausbekimmen des Fließfrontverlaufs in Spritzgiess Werkzeugen, Kunststoffe 75 (1985) 12 S.889
 24. J.L. Spoormaker, e.a. Konstruktieleer 4, IDE 440, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen, TU Delft, 1996

Softwareprogramma's met materiaaleigenschappen en -keuze:

1. CAMPUS, Bayer, Basf en Hoechst
2. EPOS, ICI
3. E.D.D., General Electric
4. POLY BASE, DSM
5. DACAPO, AKZO

Op internet zijn veel gegevens te vinden over materiaaleigenschappen van kunststoffen op de sites van met name de grote grondstofleveranciers.

Hoofdstuk 3. Verwerkingstechniek

3.1 Inleiding

Voor de productontwerper is de kennis van de diverse verwerkingstechnieken belangrijk. Deze kennis moet de volgende punten omvatten:

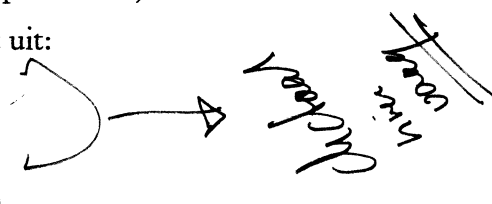
- inzicht in het fabricageproces en de daarbij behorende kosten
- de voor- en nadelen van de ene fabricagetechniek ten opzichte van een andere
- welke materialen kan men verwerken met een bepaalde verwerkingstechniek
- de mogelijkheden en de beperkingen van een bepaalde verwerkingstechniek
- de invloed van de verwerking op bepaalde eigenschappen van het toegepaste materiaal

In dit hoofdstuk wordt alleen het toepassen van kunststoffen behandeld, de processen voor het fabriceren van producten uit andere materialen worden niet besproken.

Bij de fabricage van kunststof onderdelen wordt minstens eenmaal de plastische of vloeibare fase doorlopen. Het vormgeven van kunststoffen kan tijdens deze plastische fase geschieden. Het aldus ontstane product kan een eindproduct zijn of een halffabrikaat.

Het vormgeven van kunststoffen bestaat uit:

- het verwerken van kunststoffen
- het bewerken van kunststoffen



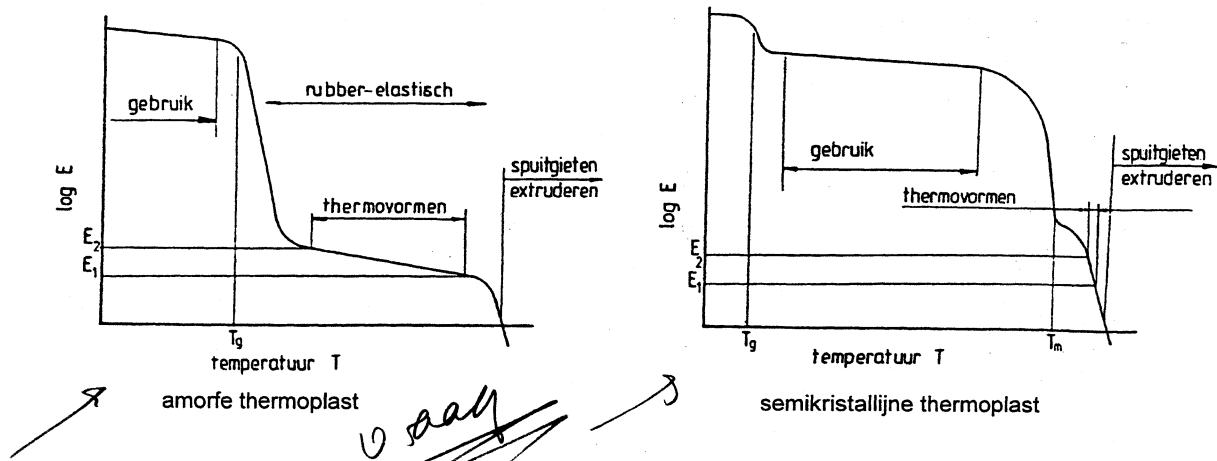
Bij het verwerken van kunststoffen gaat men uit van een vormloos materiaal zoals granulaat of poeder en de verwerking verloopt via de plastische of vloeibare fase. Bij de verwerking is bijna altijd sprake van een gereedschap of matrijs waarin de vorm van het product is vastgelegd.

Het bewerken van kunststoffen gaat uit van een halffabrikaat. Dit is een product dat al via de plastische fase een bepaalde vorm heeft gekregen zoals plaat, folie of staf. Tijdens het bewerken wordt de vorm van het halffabrikaat gewijzigd.

Bij het verwerken en bewerken van kunststoffen is het verschil tussen thermoplasten en thermoharders van belang. Zelfs het verschil tussen amorge en semi-kristallijne thermoplasten kan van belang zijn. Amorge kunststoffen bezitten een glaspunt T_g boven de kamertemperatuur. Beneden T_g is het materiaal hard, daarboven wordt het materiaal rubberelastisch tot T_m waarbij het materiaal plastisch of enigszins vloeibaar (figuur 3.1 links) is.

Sommige semi-kristallijne kunststoffen zoals PP, PE en POM hebben een T_g beneden kamertemperatuur. Het rubberelastisch gebied strekt zich van kamertemperatuur uit tot aan de smelt van de kristallijne gebieden (figuur 3.1 rechts). Andere semi-kristallijne materialen zoals PA en PETP hebben een glaspunt T_g dat boven kamertemperatuur ligt. Vacuümvormen van deze materialen kan problemen opleveren. De bewerkingstemperatuur voor

vacuümvormen van PE en PP ligt tussen nauwe grenzen, het vacuümvormen van PA plaat is nauwelijks mogelijk.



figuur 3.1 Toepasbare verwerkingstechnologie per temperatuursgebied voor een amorphe en een semi-kristallijne kunststof.

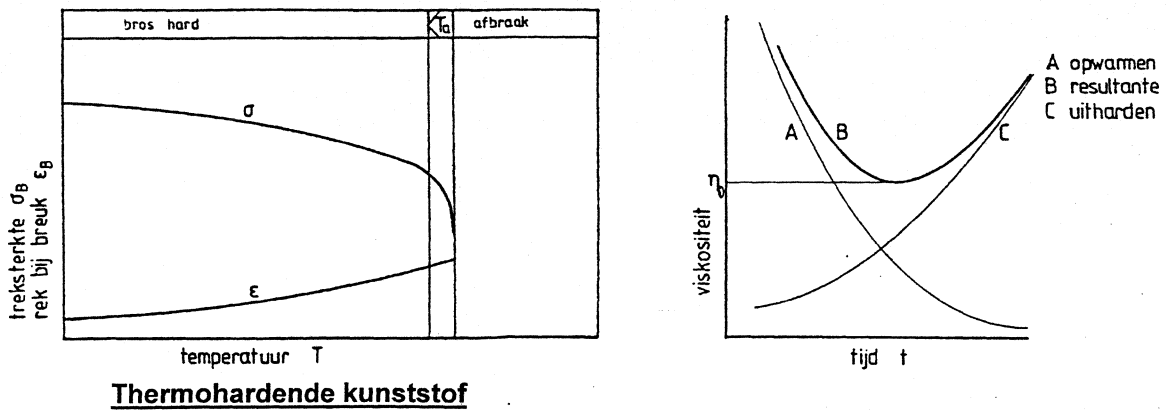
De verwerking van thermoplasten kan in principe in vier verschillende fasen geschieden:

- In de plastische of vloeibare fase, de temperatuur ligt boven T_m . De meest bekende technieken zijn extrusie, spuitgieten, rotatiegieten en lassen.
 - In de rubberelastische toestand, de temperatuur ligt tussen het glaspunt T_g het smeltpunt T_m . De meest bekende technieken zijn blazen en vacuümvormen.
 - In harde toestand, voor amorphe kunststoffen beneden het glaspunt T_g en voor semi-kristallijne materialen boven of onder T_g . De technieken zijn het koud vervormen en de verspanende bewerkingen.
 - Uit een oplossing, zoals lijmen, filmgieten en strijken.
- Handwritten note: 'vraag' with a bracket around the first three items.

Een geheel andere bewerking die bij de fabricage van folie en bij blazen van vaten wordt toegepast is het verstrekken. Het materiaal wordt in een of twee richtingen opgerekt waardoor de sterkte en de transparantie bij semi-kristallijne materialen toenemen. Het verstrekken vindt plaats in het rubberelastische gebied, voor amorphe materialen bij een temperatuur van $T_g + (20 \text{ tot } 400 \text{ } ^\circ\text{C})$ en voor semi-kristallijne materialen bij $T_m - (10 \text{ tot } 200 \text{ } ^\circ\text{C})$.

Een thermoharder vertoont geheel andere eigenschappen gedurende de verwerking dan een thermoplast. Thermoharders bezitten geen uitgesproken vloeibare fase. De viscositeit daalt als het materiaal verwarmd wordt (figuur 3.2 lijn A). Door de temperatuurverhoging treedt een groei van het moleculaire netwerk op waardoor de viscositeit toeneemt, lijn C. De resultante van deze lijnen geeft de viscositeit weer als functie van de tijd. Rond het minimum, de viscositeit is daar η_0 , moet de vormgeving in het gereedschap voltooid zijn. Verder kan het materiaal niet meer gewijzigd worden door een plastische vervorming. De enige bewerking die op een thermoharder kan worden toegepast is een verspanende bewerking.

Handwritten note: 'vraag' with a bracket around the entire paragraph.



figuur 3.2 Gedrag van een thermoharder gedurende de verwerking.

Het is de keuze van de fabricagemethode die de vormgeving en een groot deel van de kosten van de kunststofverwerking bepaalt; elke methode heeft zijn specifieke kwaliteiten en beperkingen. Voor een overzicht, evenals voor- en nadelen en summiere ontwerprichtlijnen wordt verwezen naar (1) en (7).

3.2 Parameters voor technologiekeuze

vragen

Om een vergelijking te kunnen maken tussen de verschillende technieken zullen de kenmerken die de verwerkingstechnieken gemeen hebben vergeleken moeten worden. Deze kenmerken zijn in te delen naar vorm, logistiek van de productie en natuurlijk ook van de kostprijs.

3.2.1 Vormeigenschappen

Voor de kunststof producten moet per bewerkingsmethode worden geanalyseerd welke beperkingen de verwerkingsprocessen veroorzaken op de vorm van het product. De belangrijkste mogelijkheden en beperkingen zijn ook in (1) opgenomen. We zullen deze in het kort hieronder weergeven:

Productafmetingen

Hiermee worden de minimale en de maximale maat bedoeld, die met een bepaalde techniek praktisch haalbaar zijn.

Wanddikte

Zowel een dikke als een dunne wand kunnen een belemmering vormen bij de keuze van de fabricagemethode. Grote wanddikten leveren vaak problemen op door een ontoelaatbare krimp. Dunne grote wanden vormen bijvoorbeeld een belemmering voor het volvloeien van het product met viskeuze harsen.

Nauwkeurigheid

Zeer nauwkeurige maten kunnen vaak alleen bij precisiespuitgieten worden gehaald en dan nog alleen voor kleine afmetingen. Bij andere technieken liggen bijvoorbeeld de toleranties rond 0,5% van de opgegeven maat en bij de gebruikelijke afmetingen van de betreffende

techniek. Van belang kan zijn dat soms kleinere toleranties mogelijk zijn door nabewerking van de producten.

Oppervlaktekwaliteit

Met oppervlaktekwaliteit wordt niet alleen de ruwheid van het oppervlak bedoeld. Ook glans, golving, inval, lakbaarheid en textuur worden onder dit hoofd meegenomen. Voor processen met een kwalitatief slecht oppervlak kan voor toonbankartikelen overwogen worden een textuur in de matrijs aan te brengen of het oppervlak met een spetterlak te behandelen. Onder dit hoofdstuk speelt ook de materiaalkeuze een belangrijke rol.

Inserts

Onder inserts worden hier meestal halffabrikaten verstaan die tijdens het verwerkingsproces vast verbonden worden met het kunststof product. De inserts hebben een functie bij het verbinden van verschillende producten, voor extra verstijving of voor elektrische geleiding.

Vormbeperkingen

Een fabricagemethode geeft de mogelijkheid een bepaalde productvorm te realiseren. Zo ligt het voor de hand dat bij de verwerking van plaatmateriaal min of meer plaatvormige producten zullen ontstaan.

Versterken met vezels

Wapening maakt hoge mechanische belastbaarheid mogelijk. Naarmate de lengte van de vezels langer is en de sterkte en de stijfheid van de vezel groter is, is een technologie in staat producten voor kleine vervormingen en de zware belastingen voort te brengen.

Tabel 3-1 Toepasbaarheid van kunststoffen in processen.

	Spuitsieten	Extruderen	Thermovormen	Blazen	Persen	Lamineren, Wikkelen	Gieten, RIM, Dompelen
PC	+	+	+	+	-	-	-
Styreenpolymeren	++	+	++	+	-	-	-
PVC	-	++	+	++	-	-	+
PMMA	+	++	+	-	-	-	+
PPO/PS	+	+	-	-	-	-	-
PA	++	+	-	-	-	-	-
POM	++	+	-	-	-	-	-
Polyolefinen	++	++	-	++	-	-	-
PETP/PBTP	+	+	-	-	-	-	-
Fluorpolymeren	+	+	-	-	-	-	-
PF	+	-	-	-	++	-	-
MF	-	-	-	-	+	-	-
UP	+	-	-	-	++	++	+
EP	+	-	-	-	+	+	+
PI	-	-	-	-	-	-	-
PUR hard	-	-	-	-	-	-	++

(++ zeer goed, - niet mogelijk of gebruikelijk)

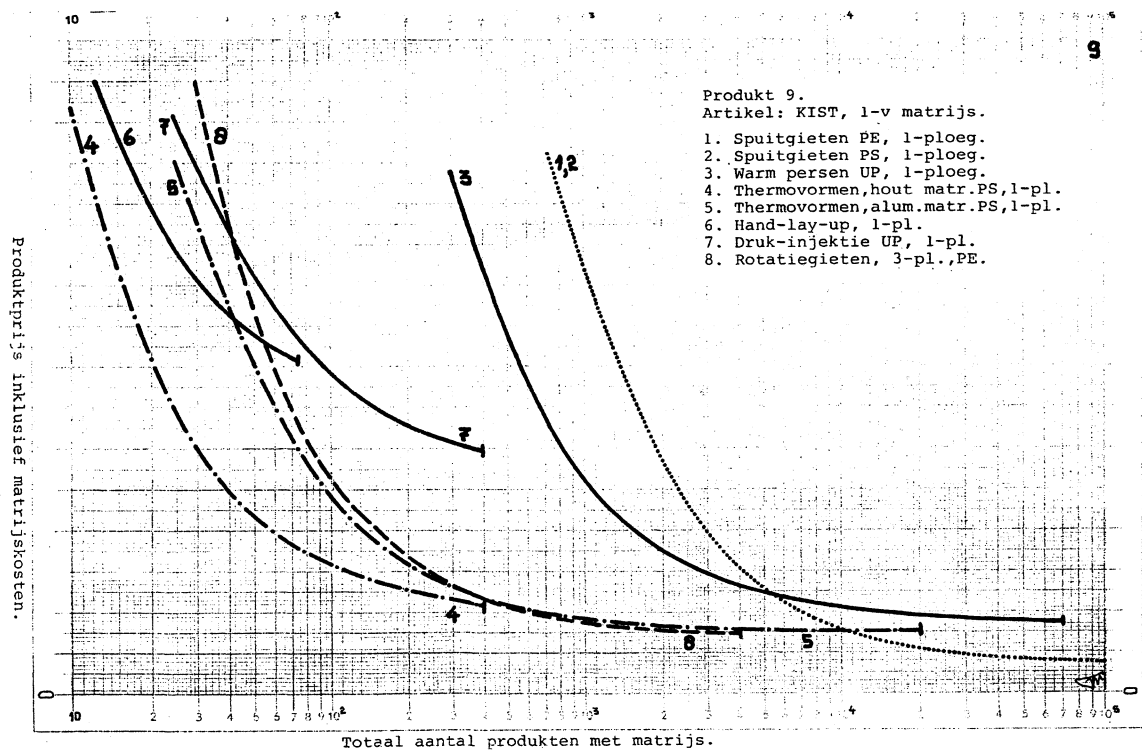
Mogelijke materialen

Een aantal thermoplastverwerkende technieken geeft de mogelijkheid te kiezen uit een scala van materialen. Thermoharder verwerkende technieken zijn beperkter in hun materiaalkeuze. In Tabel 3-1 is een zeer globaal overzicht gegeven van verschillende materialen voor een aantal verwerkingstechnieken. Mocht een bepaalde eigenschap van een kunststof noodzakelijk zijn voor een ontwerp, dan komen uiteraard alleen die technieken in aanmerking die de desbetreffende kunststof kunnen verwerken.

3.2.2 Kostprijs

Een algemeen geldende kostenvergelijking tussen de verwerkingstechnieken is niet mogelijk, omdat diverse grootheden een rol spelen. Een vergelijking kan alleen gemaakt worden aan een concreet voorbeeld. In figuur 3.3 zijn de fabricagekosten van een kist weergegeven als functie van de seriegrootte met diverse verwerkingstechnieken als parameter. Deze grafiek is overgenomen uit Irrgang (ref. 2). De afmetingen van de kist zijn 750 x 600 x 300 mm. De kostprijs van een product is opgebouwd uit drie delen: materiaalkosten, loon- en machinekosten en de gereedschapskosten, daarnaast spelen ook de montagekosten een rol.

Bij grote tot zeer grote productieaantallen geldt globaal dat de materiaalkosten ongeveer 40 tot 50% bedragen van de prijs van het onderdeel. Het gereedschapsaandeel ligt rond 15%. Gaan de productieaantallen naar beneden dan zal het aandeel gereedschappen in de productprijs toenemen. De productieprijs zal meestal ook toenemen. Hieronder volgen nog een aantal opmerkingen over de drie genoemde delen van de calculatie.



figuur 3.3 De invloed van de fabricagetechniek op de kostprijs.

Materiaal

Het materiaal is de belangrijkste kostenpost bij massafabricage. Het streven is er op gericht de hoeveelheid maal de volumeprijs minimaal te maken. Voor bijvoorbeeld grote delen in kleine series kan men in plaats van een goedkope thermoplast een veel meer kostende PUR nemen. De totale kosten van het product kunnen lager zijn, omdat nu geen kostbare spuitgietmatrijs nodig is maar een veel goedkopere matrijs. Ook de machinekosten zijn lager dan die van een grotere spuitgietmachine.

Man- en machinekosten

De tarieven van de diverse verwerkingstechnieken kunnen zeer uiteenlopen. De investering van een grote spuitgietmachine is vele malen meer dan die van een thermovorm-machine.

Gereedschapskosten

De gereedschapskosten die bij de diverse verwerkingstechnieken behoren lopen ver uiteen. Grote spuitgietmatrijzen zijn zeer duur, matrijzen voor thermovormen of voor lamineren zijn veel goedkoper. Bij deze laatste technieken zullen de loonkosten als regel hoger zijn dan bij spuitgieten. De gereedschapskosten worden bij de goedkeuring, dus bij de start van de productie, doorbelast naar de opdrachtgever. Bij een productontwikkeling met een grote onzekerheid van slagen op de markt kan men bewust voor een technologie met lage gereedschapskosten kiezen om een eventuele "Capital-loss" te beperken.

3.2.3 Logistieke eisen

De verwerking van de producten en de besturing van de productie kunnen invloed hebben op de technologiekeuze. Een beperkt aantal punten wordt hieronder aangehaald.

Levertijd van het eerste product

De tijd van productidee tot de aanloop van de productie kan bij een keuze die bepaald is bijvoorbeeld op prijs veel te lang zijn. Door het opleggen van een bepaalde krappe tijd kan uitgezien worden naar een technologie met een korte levertijd voor de gereedschappen. Dit geldt voor een of enkele delen uit het geheel van het samengestelde product en wel die producten die het kritieke pad bepalen. Grote gespuitsgiete kunststof onderdelen vormen dikwijls het kritieke pad.

Wijzigingen

Wijzigingen in kunststof producten betekenen altijd wijzigingen in matrijzen. Het materiaal en de bouw of de opbouw van de matrijs speelt hierbij een rol. Zijn op bepaalde plaatsen wijzigingen te verwachten dan bestaat bij stalen matrijzen de mogelijkheid op die plaatsen losse inzetstukken te gebruiken. Kan men van tevoren hierover geen uitspraken doen dan kan men naar een andere verwerkingstechniek kijken met goedkopere matrijzen of men laat de keuze vallen op een goedkope proefmatrijs.

Leverancier

Men kan de voorkeur geven aan een bepaalde verwerkingstechniek die door een voldoende aantal leveranciers in de nabijheid bedreven wordt. Een enkele leverancier of een paar leveranciers van een technologie op grote afstand kan problemen opleveren met de bevoorrading op de juiste voorgeschreven tijd; denk bijvoorbeeld aan aantallen per tijdseenheid, de transportkosten en het reageren op kwaliteitsproblemen.

Bestelseries

Aan de grootte van bestelseries hangt ook een prijskaartje. Bij de toeleverancier is een relatie aanwezig tussen aanloopkosten bij een bestelling en de optimale productiegrootte. Door kleine bestelseries te eisen kunnen de voorraadkosten bij de toeleverancier oplopen als de aanloopkosten zeer hoog zijn, bijvoorbeeld bij werken met zeer gecompliceerde systemen. Het kan dan soms noodzakelijk zijn een andere fabricagetechniek toe te passen.

3.2.4 Andere parameters

Bij de technologiekeuze kunnen nog andere parameters een rol spelen dan die welke hier genoemd zijn. Het is uitgesloten dat hier een volledige lijst weergegeven kan worden. In tabel 3-2 is een kwalitatieve waardering gegeven van een aantal fabricage technieken en in bijlage B is als geheugensteun een aantal aandachtspunten in een checklist weergegeven.

tabel 3-2 Kwalitatieve waardering van fabricagetechnieken.

	Th.plasten Spuitgieten	Th.harders Spuitgieten	Thermoharders Persen	Lamineren	Extruderen	Blaasvormen	vacuümvormen	Rotatiegieten	Thermoplasten schuimen	PUR schuimen
Vrijheid van vormgeving	++	++	+	+/-	-	-	-	+	++	+
Materiaal keuzebeperking	++	-	+/-	-	+/-	-	-	-	+	-
Materiaal economisch verbruik	++	+	+	-	++	+	-	+	+	-
Tijd van productidee tot fabricage	-	--	-	++	+/-	+	++	++	-	+/-
Geschiktheid voor: Kleine series	-	--	+	++	-	+	++	++	--	+
Middelgrote series	+	+	++	-	+	-	-	+	+	+
Massa	++	++	+	-	++	++	-	-	++	-
Toepasbaarheid voor grote producten	-	-	+	++	+	+	++	++	-	++
Vereiste ruimte	-	-	+	++	-	-	-	-	-	+/-
Loonkosten	++	-	-	-	++	++	-	-	++	+
Fabricagetijd	++	-	-	-	++	+	-	-	+	-
Machinekosten	-	--	+	++	-	-	++	-	-	+
Gereedheidskosten	-	-	+/-	++	++	+	++	-	-	-

++ zeer goed, - niet mogelijk of gebruikelijk

3.3 Technologiekeuze

Bij het vergelijken van alternatieve verwerkingsmethoden worden de verschillende aspecten of parameters beoordeeld en moet men door afweging van de verschillende beoordelingen tot een oordeel komen. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van de zogenaamde Harris profielen (ref. 3). In een Harrisprofiel worden op een vierpuntsschaal verschillende aspecten beoordeeld. Door een grafische voorstelling waarbij twee kleuren gebruikt worden ontstaat snel een beeld van de kwaliteit van de alternatieven. Het probleem is hiermee nog niet opgelost, want het oplossen van een ontwerpprobleem is het combineren van vorm, materiaal en de fabricagetechniek (ref. 4). Dit wil zeggen dat niet één van deze grootheden geoptimaliseerd kan worden zonder dat de twee andere meegenomen worden (ref. 5).

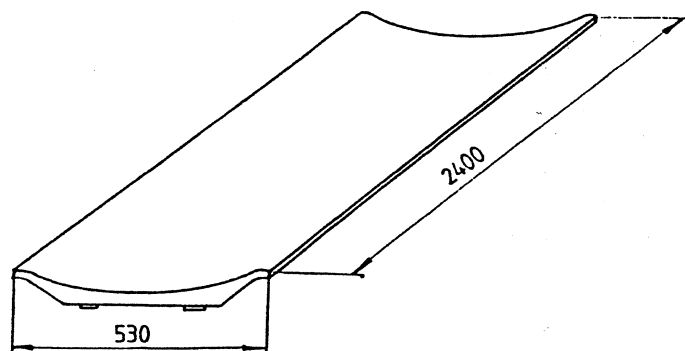
Kenmerkend is de iteratieve manier van werken, deze werkwijze is nodig om de stappen die tijdens de synthesefase gemaakt worden te verifiëren en eventueel bij te stellen.

3.4 Praktijkvoorbeeld technologie- en materiaalkeuze

Om het voorgaande te verduidelijken wordt een voorbeeld gegeven van een productontwerp waarbij de technologie en materiaalkeuze extra wordt toegelicht. De materiaalkeuze volgt in een van de volgende hoofdstukken. Alvorens een selectie mogelijk is het noodzakelijk dat er een goed eisen en wensenpakket voor het toekomstige product bestaat. Er is een onderscheid gemaakt tussen eisen en wensen, eisen zijn die criteria waaraan het product moet voldoen. Als aan een eis niet voldaan wordt moet het betreffende ontwerp afgewezen worden. Voordat men naar een kunststof gaat zoeken moet men zich afvragen of kunststof een goede toepassing is of dat een metaal of een ander materiaal bekeken moet worden. Wij gaan hier vanuit dat alleen een kunststof is toegelaten. Uit het eisen en wensenprogramma vloeien de eisen en wensen voort van de technologie en voor het materiaal. Als voorbeeld wordt hier een patiëntentafel gekozen voor een magnetic resonance systeem (figuur 3.4).

De afgeleide eisen voor de technologie zijn:

- Producten tot 2400 mm moeten mogelijk zijn
- Het product moet binnen 2 maanden leverbaar zijn bij een nabestelling.



figuur 3.4 Patiënten tafelblad voor een magnetic resonance systeem

De technologiewensen van belangrijk tot minder belangrijk zijn:

- Het oppervlak moet glad en strak zijn.
- De wand is aan beide zijden beheersbaar.
- De levertijd van eerste levering is kort.
- Er zijn minstens twee leveranciers die de technologie toepassen.
- Verwerking van inserts moet mogelijk zijn.
- Geen inval bij ribben.
- Het product moet stabiel zijn.
- De technologie moet goedkoop zijn bij kleine series (bestelserie van 5 stuks moet kunnen).

Een aantal technologieën kunnen we direct laten vervallen.

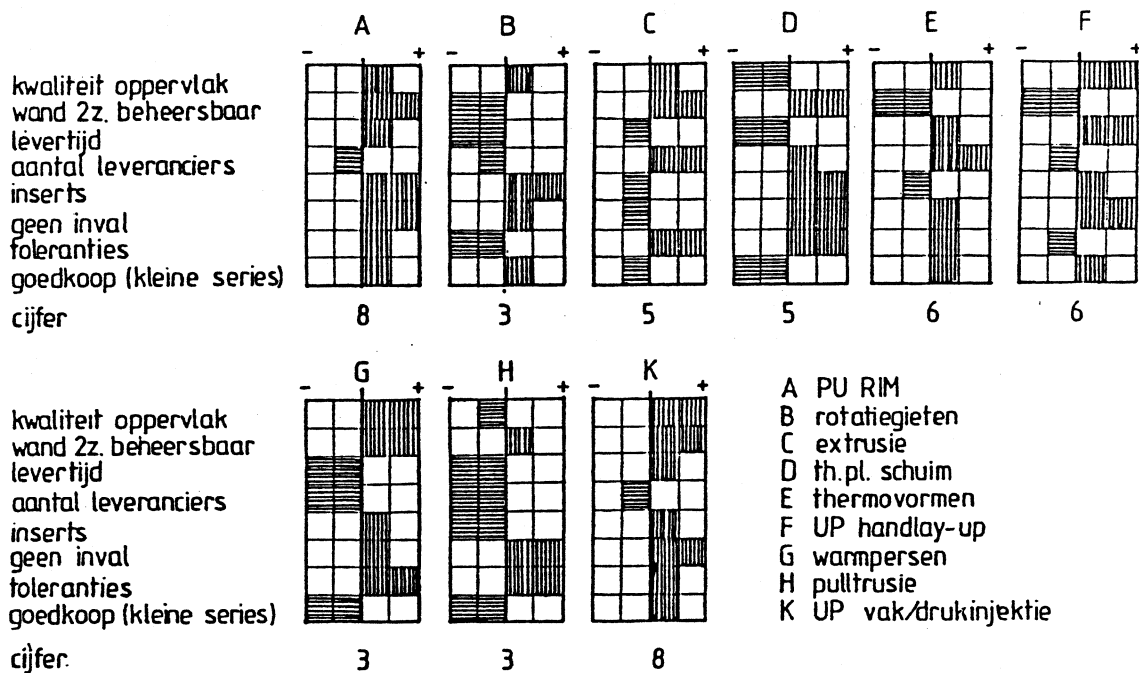
- Spuitgieten: te duur bij kleine series
- Wikkelen: gaat moeilijk door beperking van vormgeving
- Gieten: te groot en daardoor inwendige spanningen
- Verspanen: gaat uit van een halffabrikaat, veel afval

Thermoplasten schuimen zou ook af kunnen vallen om dezelfde reden als bij spuitgieten, we nemen thermoplasten schuimen toch maar mee.

Voor de technologiekeuze nemen we mee:

PUR-schuimen	rotatiegieten	extrusie
thermoplasten schuimen	thermovormen	UP handlay up
warmpersen	pultrusie	UP druk/vakuüm-injectie

In een Harrisprofiel wordt met een vierpuntsschaal de waardering voor elk van de acht wensen voor elke technologie aangegeven (zie figuur 3.5). Aan elke technologie wordt nu aan de hand van de uitkomst van elke technologie een schaalcijfer tussen 1 en 10 gegeven. Op deze wijze kunnen we een voorkeur uitspreken voor een technologie. Voordat er iets definitief wordt beslist moet ook nog naar de materiaalkeuze worden gekeken en naar de bijbehorende principeoplossingen.



figuur 3.5 Technologiekeuze met behulp van Harrisprofielen

Er zijn slechts twee eisen ten aanzien van de technologie vermeld. Het selecteren van de technologie op vormkenmerken vereist een grote kennis van de technologie. Het inschatten van het verschil tussen wat theoretisch mogelijk is en wat praktisch haalbaar is vereist toch een behoorlijke hoeveelheid ervaring. Daar komt nog bij dat bepaalde kwalificaties sterk productgebonden zijn.

Materiaalkeuze

Het uitgangspunt voor de materiaalkeuze is het programma van eisen en wensen. Uit het programma van eisen en wensen vloeien de eisen en wensen voort voor de materiaalkeuze. De eisen die men stelt aan het materiaal zijn:

1. Het materiaal is verkrijgbaar in speciale kleuren of het blad moet goed lakbaar zijn in de gewenste kleuren.
2. Het blad mag geen stof of vuil aantrekken
3. Het oppervlak moet bestand zijn tegen desinfectans en reinigingsmiddelen.
4. Het materiaal moet gebruikt worden in het magnetisch veld van het apparaat.
5. Het materiaal moet zijn mechanische eigenschappen behouden bij een temperatuur van 70°C (tijdens transport)
6. Het materiaal moet vlamdovend zijn volgens norm UL 94.HB
7. Het oppervlak is bestand tegen stoten van een hard voorwerp.

Het tafelblad is een onderdeel uit een apparaat, de andere onderdelen maakt men uit andere materialen met andere technologieën. De kleur van de diverse onderdelen vertonen onderling afwijkingen. Om dit kleurverschil te voorkomen besluit men om alle onderdelen in dezelfde kleur te lakken. De eisen 1, 2 en 3 worden naar het laksysteem verplaatst, hier gaan we verder niet op in. De eis dat het materiaal goed lakbaar moet zijn betekent dat alle semi-kristallijne thermoplastische materialen afvallen; enkele typen polyamiden vallen ook op eis 4 af. Eis nummer 7 luidt nu dat bij stoten de lak er niet mag afspringen, maar ook dat de ondergrond weerstand biedt tegen blijvende beschadiging door stoten. De eis dat het materiaal zijn mechanische eigenschappen moet behouden tot 70°C is in feite een onzinnige eis, omdat bij een temperatuur van 70°C het apparaat niet gebruikt kan worden. De achtergrond van deze eis is dat niet precies aangegeven kan worden tot welke grenstemperatuur het apparaat of een onderdeel van het apparaat gebruikt gaat worden en dat bij transport een temperatuur van 70°C kan voorkomen. Het probleem wordt omzeild door te stellen dat alle onderdelen een maximum temperatuur, die voldoende hoog ligt, onder belasting kan weerstaan zonder blijvende vervorming of enige andere beschadiging.

De temperatuur van 70°C is onvoldoende discriminerend, alleen PVC valt af. Men kan toch een aantal materialen laten afvallen als men stelt dat hoe hoger de maximum gebruikstemperatuur van een materiaal is hoe hoger de prijs van het materiaal is.

Voor thermoplastische materialen kan men een grens trekken bij een maximum gebruikstemperatuur van ongeveer 130°C.

De meeste materialen voldoen aan de brandbaarheidseis UL 94 HB of kunnen zelfdovend gemaakt worden. Het enige materiaal dat niet voldoet aan de brandbaarheidsproef is PMMA.

We laten tot de definitieve materiaalkeuze toe:

PC	PC + glasvezel
ABS	PS
PPO	PUR schuim
UP + glasmat	UP + unidirectionele glasvezel
UP DMC (dough molding compound)	

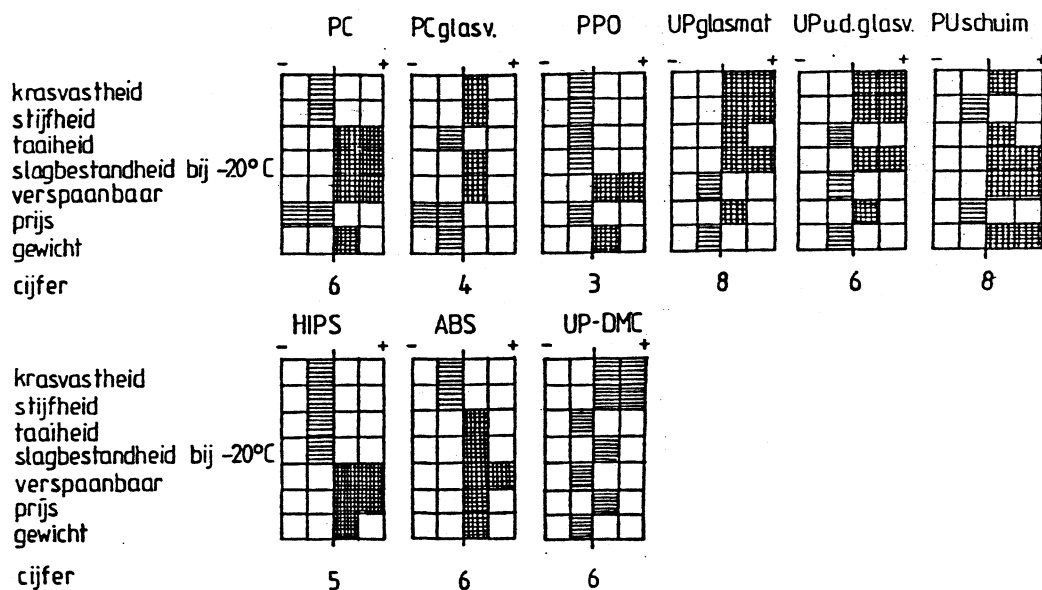
De materiaalwensen zijn:

- Het materiaal is goed te lijmen
- Het oppervlak is krasbestendig
- Het materiaal is stijf
- Het materiaal is taai
- Het materiaal is bij -20 °C nog bestand tegen stoten (transport)
- Het materiaal is goed verspaanbaar
- Lage prijs van het materiaal
- Laag soortelijk gewicht van het materiaal.

De wens dat het materiaal lijmbaar moet zijn kan achterwege blijven, omdat goed lijmbaar en goed lakbaar samengaan. Bij de eisen zijn alle niet of slecht lakbare materialen afgevalen.

De derde wens is ook niet geheel correct, de stijfheid is een combinatie van materiaal en vorm dus van de combinatie elasticiteitsmodulus en traagheidsmoment van de doorsnede. We kijken in dit geval alleen maar naar de elasticiteitsmodulus. Voor punt 8 geldt precies hetzelfde, de prijs is de volume prijs van het materiaal maal het volume, het volume is weer afhankelijk van de stijfheid. Omdat de elasticiteitsmodulus van een aantal materialen van dezelfde orde van grootte zijn, is het toch zinvol deze wens mee te nemen maar voorzichtigheid blijft geboden.

De waardering van de negen materialen wordt weergegeven in de Harrisprofielen van figuur 3.6. Ook hier wordt een schaalcijfer toegekend tussen 1 en 10. Dit schaalcijfer kan variëren door aan bepaalde wensen een groter gewicht toe te kennen.



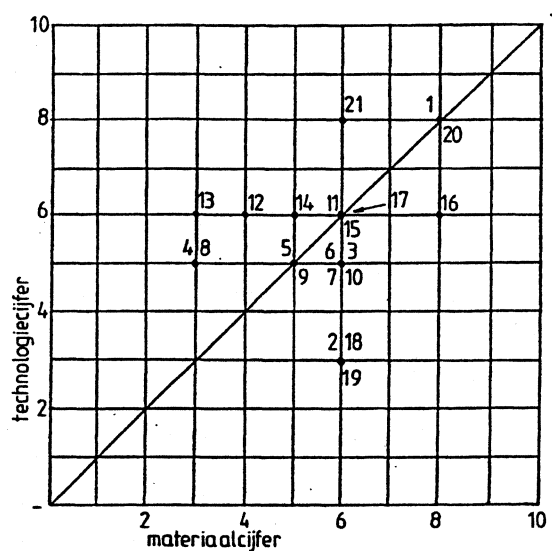
figuur 3.6 Materiaalkeuze met behulp van Harrisprofielen

We hebben bij de keuze negen technologieën en negen materialen meegenomen. Dit wil niet zeggen dat er 81 combinaties zijn te maken. Er zijn materialen die met een bepaalde technologie niet zijn te verwerken (Tabel 3-1).

In een keuzematrix is weergegeven welke combinaties mogelijk zijn of welke we toe willen laten en welke niet (figuur 3.7). De technologie en materiaalkeuze kan men eenvoudig doorzien met behulp van een zogenaamde Kesselring diagram. In figuur 3.8 wordt horizontaal het schaalcijfer van het materiaal uitgezet tegen het bijbehorende technologiecijfer in verticale richting. Naarmate de technologie-materiaal combinatie in diagonale richting stijgt voldoet deze beter aan de wensen. De combinaties 1, 16, 20 en 21 komen er duidelijk goed uit. Voordat een definitieve keuze gemaakt wordt moet men ook de eisen en wensen ten aanzien van de geometrie meenemen. Ook kan het soms wenselijk zijn het keuzeprocés nog eens opnieuw te doorlopen met aangepaste eisen en wensen voor de technologie, de geometrie en voor het materiaal.

PC	PCglasv.	PPO	UPglasmat	UP u.d.glasv.	PUschuim	HIPS	ABS	UP-DMC	
					1				PU-RIM
2									rotatiegieten
3		4				5	6		extrusie
7		8				9	10		th.pl. schuim
11	12	13				14	15		thermovormen
			16	17					UP-handlay-up
								18	wampersen
				19					pulltrusie
			20	21					UP vak./drukinjectie

figuur 3.7 Keuzematrix, waarin mogelijk en/of gewenste combinaties zijn opgenomen



figuur 3.8 Technologie- en materiaalkeuze toegelicht in een Kesselringdiagram

3.5 Literatuur

- 1 S. Tan, Verwerkingstechnieken voor kunststoffen, TU Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen
- 2 F. Irrgang, Globale economische vergelijking van kunststofverwerkingsprocessen (1982), Uitgave: Rijksnijverheidsdienst
- 3 Eekels, Nijhuis & Diepstraten, Productbeleid en Planning IO38, TU Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen
- 4 Eekels & Roozenburg, Ontwerpmethodologie IO24, TU Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen
- 5 A.G.H. Meyers, Kunststoffen bij Philips Medical Systems (Een studie naar de mogelijkheden voor ondersteuning bij het bepalen van de materiaal/technologiekeuze), TU Delft, Faculteit van het Industrieel Ontwerpen
- 6 Ebeling, Lupke, Schelter & Schwartz, Kunststofverwerking, Kluwer technische boeken BV, Deventer
- 7 P. de Ruwe, Vervaardigen 2 IDE 242, Dictaat TU Delft, Faculteit Industrieel Ontwerpen, augustus 1995

Hoofdstuk 4. Product geometrie en constructieregels

4.1 Inleiding

1 Een kunststof product moet op de eerste plaats voldoen aan de functie waarvoor het geconstrueerd is. Op de tweede plaats moet het zo geconstrueerd worden dat een optimale fabricage mogelijk is. Dat wil zeggen dat bij de vormgeving en de detaillering rekening gehouden moet worden met het materiaal en de vervaardigingstechnologie.

2 Elke vervaardigingstechnologie heeft zijn specifieke constructieve richtlijnen. Veelvuldig toegepaste technologieën voor het maken van kunststof producten zijn spuitgieten en persen, met name als het gaat om massafabricage. Een groot gedeelte van de richtlijnen voor spuitgieten en persen van kunststof onderdelen vindt men ook terug bij de richtlijnen voor metaalgieten en metaalspuitgieten.

In dit hoofdstuk zijn algemene constructieve regels en mogelijkheden samengevat die de ontwerper in staat stellen technologisch verantwoorde ontwerpen te maken die geschikt zijn om naar spuitgietbedrijven of perserijen te sturen. De specialisten van deze bedrijven zullen meestal nog een aantal wijzigingen vragen die geënt zijn op de mogelijkheden van dat bedrijf.

4.2 Algemene constructieregels

Bij het ontwerpen van spuitgiet- en persproducten moet aan een groot aantal punten worden gedacht. De belangrijkste van deze punten zijn hier alvast samengevat.

1. Zorg dat de matrijsdeling zo eenvoudig mogelijk wordt.
2. Bepaal de plaats van de aanspuiting en de plaatsen van de uitstoters.
3. Maak de wanddikte van het product overal gelijk.
4. Vermijd scherpe hoeken en kanten, maak afrondingen waar het mogelijk is.
5. Zorg voor voldoende lossingsschuinte en bespreek met het spuitgietbedrijf de matrijsuitvoering als vlakken evenwijdig met de openlooprichting van de matrijs getextureerd moeten worden.
6. Houd rekening met maattoleranties die bij spuitgieten en persen aangehouden kunnen worden.
7. Zorg er voor als het mogelijk is dat nauwkeurige maten in één matrijshelft liggen.
8. Maak gebruik van gebogen vlakken en ribben om de stijfheid van wanden te vergroten in plaats van de wand te verdikken.
9. Voorkom zwakke delen in de matrijs en zorg er voor dat de matrijs zo eenvoudig en goedkoop mogelijk gemaakt kan worden.
10. Tracht ondersnijdingen of anti-lossingen zoveel mogelijk te vermijden.

-
11. Naarmate de seriegrootte van het product toeneemt is het economischer om het aantal onderdelen te beperken.
 12. Maak voldoende gebruik van de mogelijkheden die de techniek en het materiaal biedt, denk aan:
 - het aanbrengen van teksten in de matrijs
 - het ingieten van vreemde delen
 - het verbinden van onderdelen met behulp van klik- en persverbindingen
 13. Bedenk dat de levertijd voor onderstaande onderdelen in genoemde volgorde afneemt:
 - grote spuitgietproducten in kunststof en metaal
 - buig en stampwerk in metaal
 - kleine spuitgietproducten in kunststof en metaal
 - mechanisch bewerkte onderdelen, veren
 - inkoopartikelen (bouten, moeren, pennen enz.)

4.3 Vormschepping, product en matrijs

Bij de massafabricage van kunststof producten krijgt het product de vorm mee van het gereedschap, het product is een afgietsel van de tegenvorm. In de mal of matrijs is de vorm aanwezig als tegenvorm ofwel de negatieve vorm. Bij het ontwerpen van een product is het van belang rekening te houden hoe de negatieve vorm er uit zal zien en hoe deze vervaardigd moet worden¹.

Voor de negatieve vorm geldt dat deze zo eenvoudig mogelijk te maken is. Dit is het geval als de conventionele gereedschapswerktuigen hier op aansluiten. Er kunnen problemen ontstaan, die men meestal oplost door de grondvorm zodanig te kiezen dat het negatief direct te fabriceren is of dat het is opgebouwd uit een samenstel van losse onderdelen.

Conventionele technieken

Tot de conventionele gereedschapswerktuigen worden gerekend:

Voor platte vlakken en kamers:

- freesbank
- vlakslijpbank

Voor cilinder- en kegelvormen:

- draaibank
- rondbank

Voor cilindrische gaten:

- boormachine
- co-boormachine
- co-slijpbank

¹ Voor matrijs constructie, zie college diktaat Vervaardigen 2 (ide242) hoofdstuk 25. Hierin zijn zink- en draadvonken uitgelegd alsmede verschillende vormomkeringsmethoden.

Voor willekeurige vormen en willekeurig gevormde gaten:

- kopieerbank
- steekbank

Vonk eroderen

Het vonk-eroderen is een nieuwere vorm van metaal bewerken die aangewend kan worden voor het maken van een matrijs. Er zijn momenteel twee verschillende bewerkingstechnieken die op hetzelfde principe berusten en wel het draadvonken en het zinkvonken. Bij beide geschiedt het wegnemen van kleine metaaldeeltjes door periodieke elektrische ontladingen.

Bij het draadvonken kunnen door middel van een draad willekeurige omtrekken en gaten uitgezaagd worden, ook in gehard staal. Bij draadvonken wordt de vonkoverslag tot stand gebracht in een diëlektricum tussen de draad en het werkstuk bij een lage spanning en een hoge stroomsterkte.

Het zinkvonken berust op hetzelfde principe als het draadvonken. Het verschil is dat bij het draad vonken een draad door het materiaal gaat, terwijl bij het zinkvonken de positieve vorm als een stempel in het materiaal gebrand wordt. Door elektrische ontladingen wordt metaal weggebrand uit het oppervlak van de matrijs. Met deze methode kunnen bijvoorbeeld rechthoekige blinde gaten worden geboord.

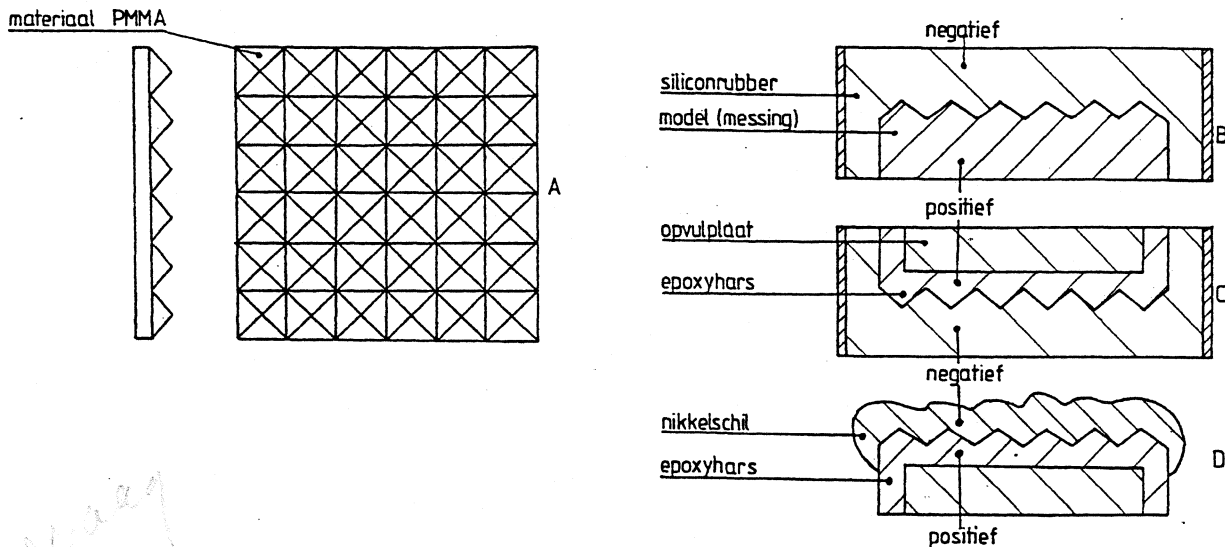
De vormomkeermethode

Bij het maken van de negatieve vorm komt het voor dat de vorm ontoegankelijk is voor de normale gereedschapsmachines en dat men kunstgrepen moet toepassen om de gewenste negatieve vorm te verkrijgen. Men zal er de voorkeur aan geven de positieve vorm te maken en via een vormomkeermethode de negatieve vorm te produceren. Een van de oudste vormomkeermethoden gebruikt men bij het ijzergieten. Met behulp van een positieve houten model wordt een negatieve vorm in vormzand gemaakt. De holte die op deze wijze ontstaat wordt met ijzer volgegoten. Het hiervoor besproken zinkvonken is de meest geavanceerde vormomkeermethode.

Er zijn nog meer vormomkeermethoden voor het maken van matrijzen, onder andere:

- het afgieten van een model met een kunststof
- het afgieten van een model met aluminium of met een tinlood - bismut legering of een koperlegering
- het spuiten van een vloeibare zinklegering op een model
- het hobben
- galvanoplastiek

Voorbeeld



figuur 4.1 Vormomkeermethode.

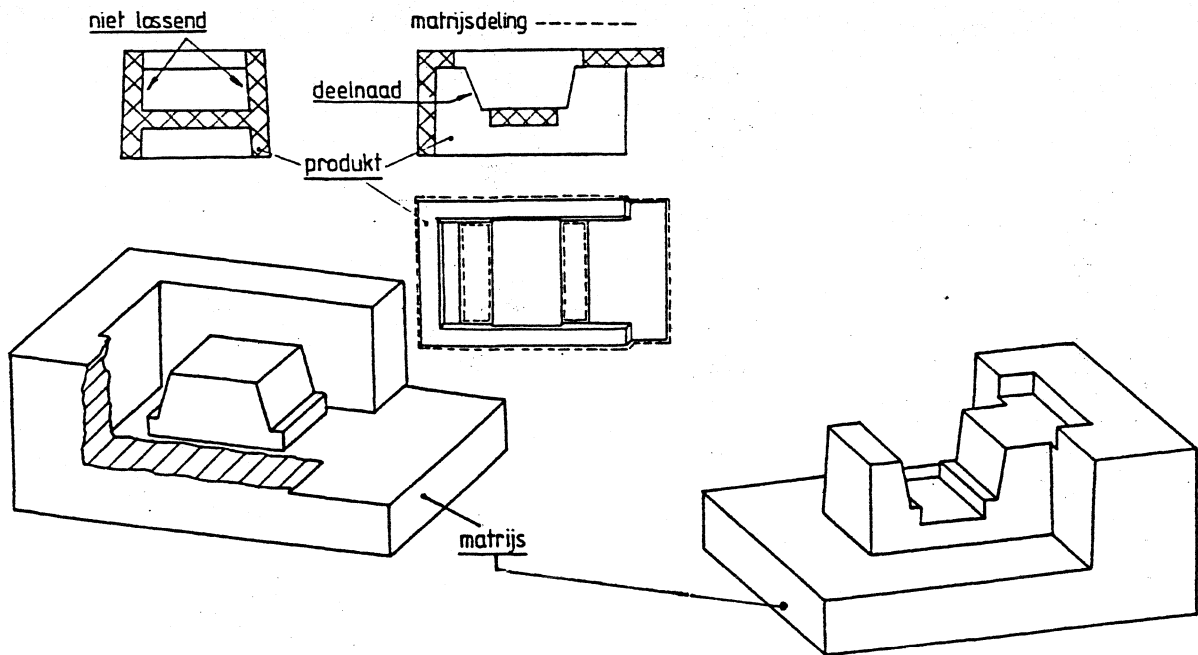
In figuur 4.1A is een deel van een verlichtingsarmatuur weergegeven, gemaakt van een doorzichtig PMMA. Dit product bestaat uit een reeks piramides op een vlakke plaat. De negatieve vorm is niet direct te maken, alleen een vormomkeermethode brengt de oplossing. Het positieve model is te maken met profielslijpen en daarna kan het model mechanisch worden gepolijst. Het model kan nu direct worden gebruikt voor het opgroeien van een nikkelschil in een galvanisch bad. Als meer dan één matrijs wordt gevraagd en om de kans op beschadigen van het model te voorkomen volgt men een omweg. Van het positieve model wordt met behulp van siliconenrubber meerdere negatieven gemaakt. Gegoten siliconenrubber geeft het oppervlak van het model zeer goed weer (figuur 4.1B). In de siliconenrubberen negatieven worden epoxypositieven gegoten (figuur 4.1C). Nadat langs chemische weg een dun metaallaagje op het model is aangebracht kan de nikkelschil opgegroeid worden in een galvanisch bad (figuur 4.1D). Deze schillen worden na mechanische bewerking of het aanbrengen van een dikke koperlaag en een nabewerking in een stalen matrijsraam gezet.

4.4 Matrijsdeling en deelnaad

Een product moet nadat het in de matrijs is gevormd zonder beschadiging uit de matrijs verwijderd kunnen worden. Ook de matrijs mag men bij deze operatie niet beschadigen. Er moet een scheidingsvlak in de matrijs zijn die de matrijs in twee of meer delen verdeelt om het product er uit te kunnen halen.

Een belangrijk punt om een goedkoop product te verkrijgen is te streven naar een vlakke matrijsdeling. Een vlakke matrijsdeling biedt de volgende voordelen:

- de matrijs is goedkoper
- de matrijs verkrijgt een langere levensduur
- het is eenvoudig meerdere holten toe te passen



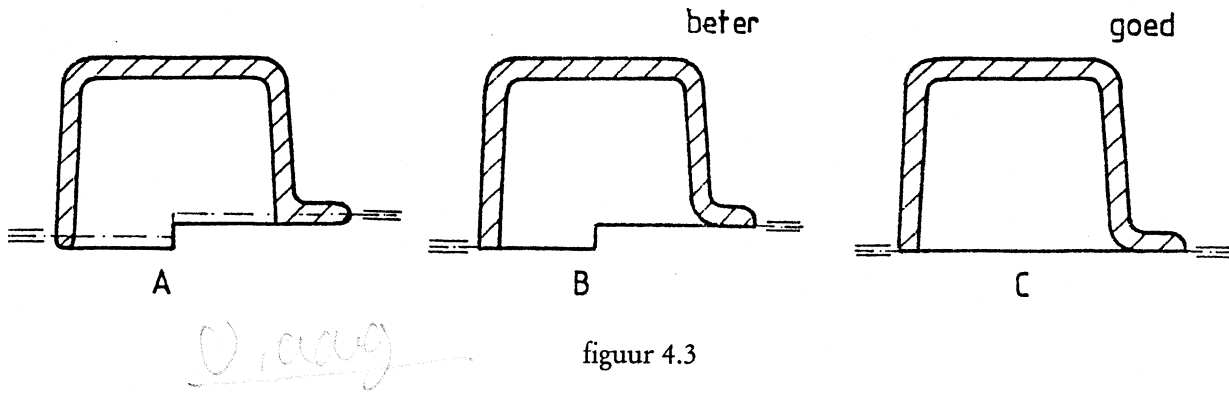
figuur 4.2 Product en matrijs, ligging van de deelnaad.

Bij sommige matrijzen is het deelvak samengesteld uit een aantal platte vlakken die elkaar snijden. Deze vlakken kunnen gefreesd maar ook geslepen worden. In het deelvak kan men meervoudig de productholten onderbrengen. De deling van een matrijs kan men eenvoudig aan de hand van een producttekening aangeven. Bekijken we de projectie van het product loodrecht op de richting van openlopen van matrijs dan ligt de deling van de matrijs langs de geprojecteerde omtrek van het product. Als het product een geheel door kunststof omsloten opening bezit zal de deling ook moeten lopen langs de geprojecteerde opening in het product. In het voorbeeld van figuur 4.2 is de deling van de matrijs aangegeven door de streepjeslijnen.

Men moet ook rekening houden met lossingsschuinten. Aan de binnenzijde van het doosje uit figuur 4.2 zal de wand, gevormd door het matrijsdeel dat naar boven gaat, anders moeten lopen dan de rest van de wand. Op de binnenzijde ontstaat niet alleen een deelnaad, maar ook een verspringen van de vlakken ten gevolge van de lossingsschuinten, zie figuur 4.2. De onder- en bovenmatrijs kunnen elk uit één stuk worden gemaakt met behulp van zinkvonken. Om sneller te kunnen werken zal in werkelijkheid de matrijs opgebouwd worden uit stukken die met draadvonken, slijpen en zinkvonken worden gemaakt. Meerdere gereedschapsmakers kunnen aan dezelfde matrijs werken, de zinkvonkmachine is minder lang bezet en bij beschadiging van de matrijs kan een klein onderdeel vervangen worden.

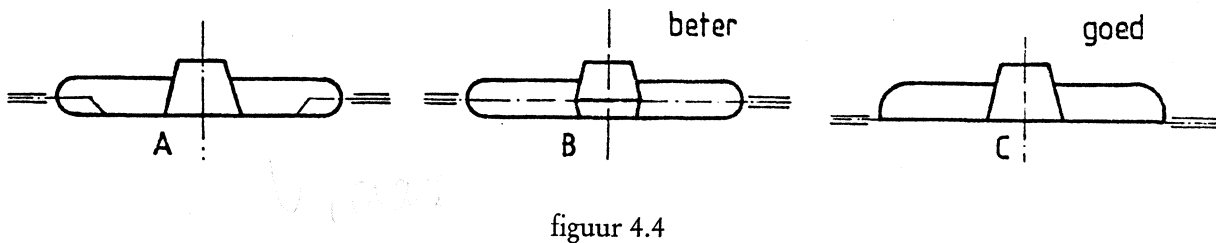
Bij producten met scherpe randen ontstaan als regel geen problemen met deelnaden over vlakken die deze vlakken kunnen ontsieren. Bij gekromde vlakken en platte vlakken die in elkaar overgaan via afrondingen kan dit wel problemen opleveren.

Voorbeelden



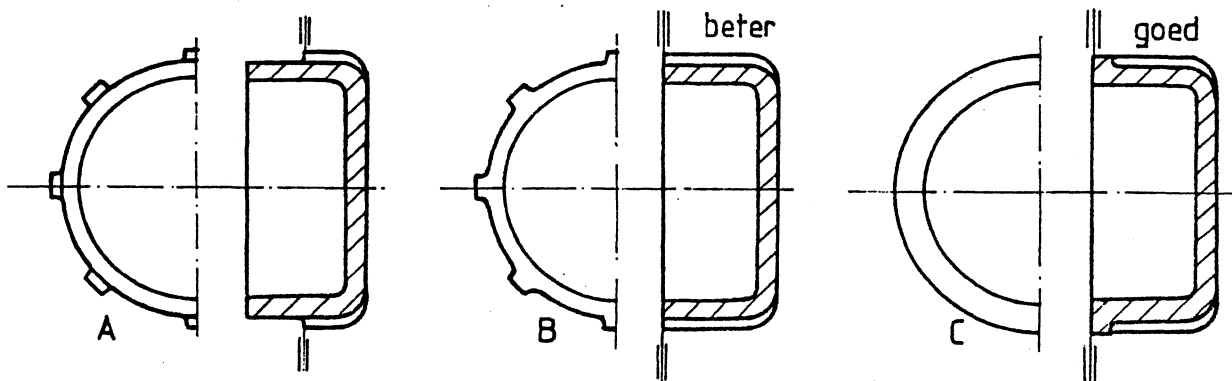
figuur 4.3

In figuur 4.3A loopt de deling over de zijwand van het product. In beide matrijsdelen moet een deel van de wand gemaakt worden. In B is de deling naar de rand verschoven, de sprong is nog steeds aanwezig. In C ligt de deling in een plat vlak en aan de onderzijde van het product.



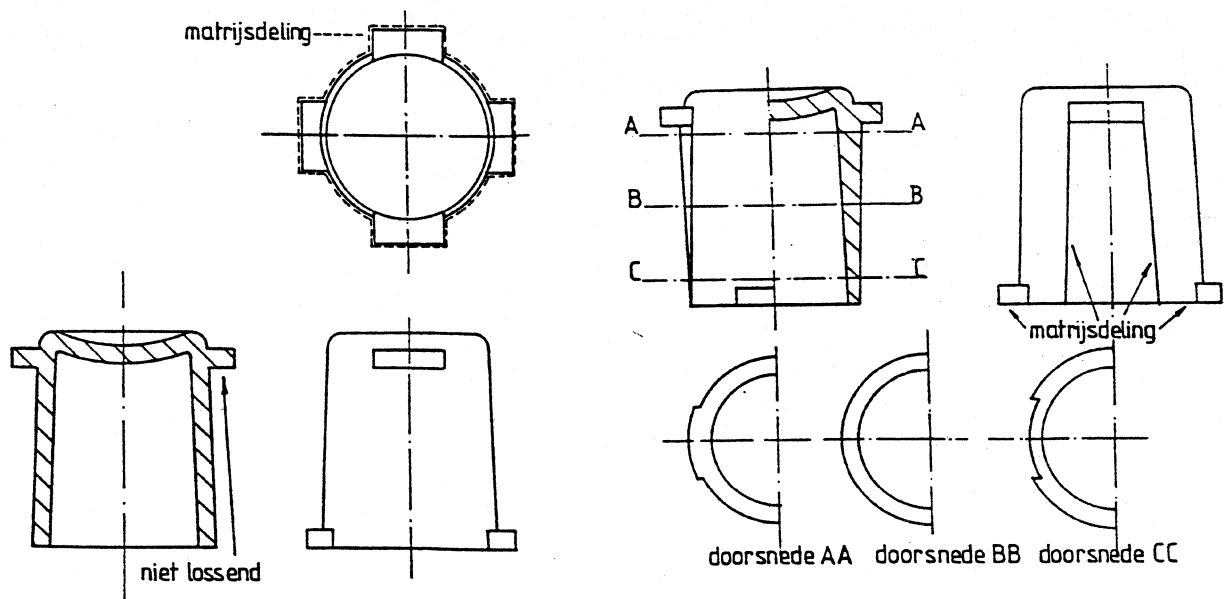
figuur 4.4

Het product van figuur 4.4 A geeft in de matrijs een versprongen deling. De deling van het product volgens B is vlak. Het product moet in beide matrijshelften aangebracht worden. In C ligt de deling van de matrijs aan één zijde.



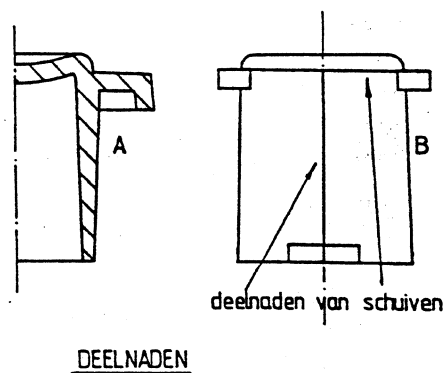
figuur 4.5

De matrijs van het product volgens figuur 4.5A heeft een vlakke deling, deze loopt echter over de omtrek van het product. In B en in C is de deelnaad naar de rand gelegd. Voor thermohardende materialen moet men de constructies volgens A en B vermijden. De optredende braam kan men slecht verwijderen. Voor deze groep materialen gebruiken we de constructie volgens C.



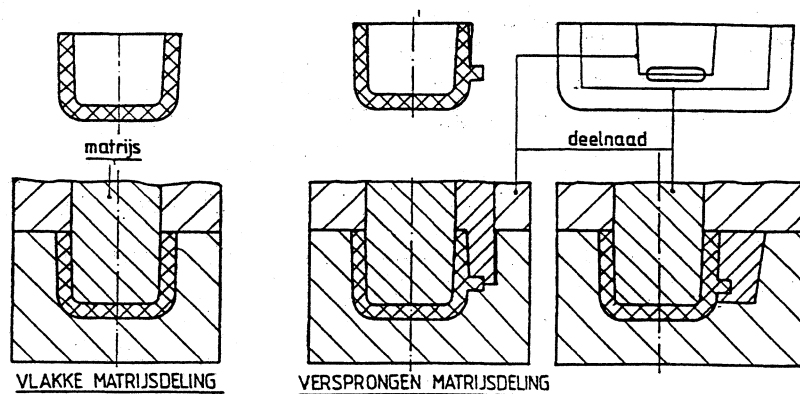
figuur 4.6 Matrijsdeling en verspringing van de wand over een product.

Bij de dop met lippen links in figuur 4.6 ligt de matrijsdeling langs de streepjeslijn. Over de kegelvormige wand zullen deelnaaden zichtbaar zijn. Om voor voldoende lossing te zorgen moet de wand onder de bovenste lippen naar de andere zijde lossend zijn. Er ontstaat nu een doorsnijding van twee kegelmantels die aan de onderzijde en aan de bovenzijde in doorsnede A-A en C-C een sprong in de wand veroorzaken.



figuur 4.7 Toepassen van schuiven om verspringing in de wand te voorkomen.

Als men in de matrijs schuiven aanbrengt zijn de sprongen op het oppervlak verdwenen, er komt een deelnaad over de lengte van de dop (figuur 4.7 B). De deelnaad kan niet over de top doorlopen omdat het vlak naar binnen doorgelopen is. Daarvoor in de plaats komt een deling langs de bovenste lippen te lopen (B). Als men de bovenste lippen uitvoert volgens A is deze oplossing niet mogelijk en is men gedwongen de oplossing volgens de figuur hierboven te kiezen.



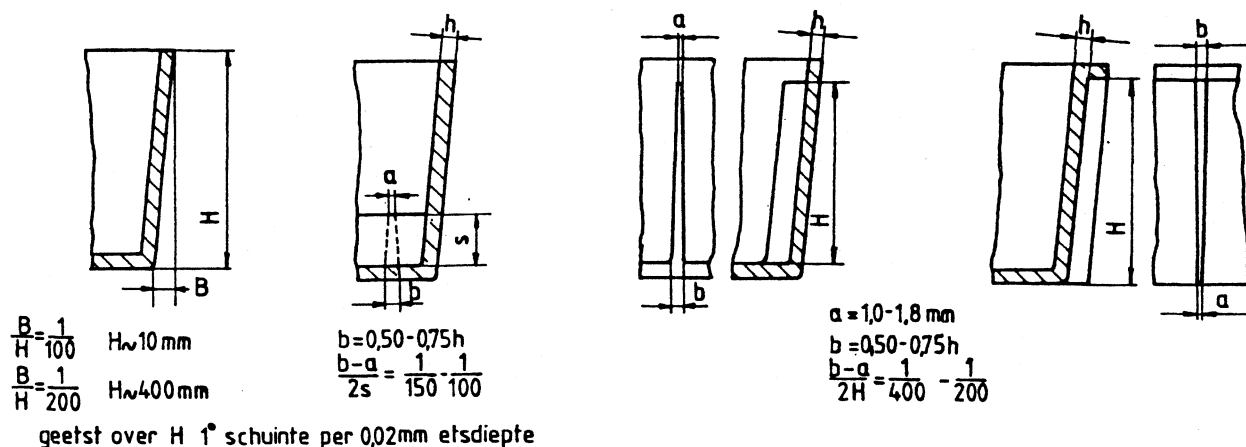
figuur 4.8

Hetzelfde probleem met deelnaden is nog eens weergegeven in figuur 4.8 aan een rechthoekig bakje met afgeronde ribben. De deling van de matrijs voor het bakje ligt langs de rand aan de open zijde. Het deelvlak is een platvlak en bij een eventuele beschadiging kunnen de vlakken van beide matrijshelften nageslepen worden. Nu komt er op de zijkant een lip (midden). De lossingsschuimte boven de lip moet de andere kant op lopen. De matrijs kan voorzien zijn van een nok die de lip vormt. Deze nok veroorzaakt een deelnaad over de wand en over de nok en er ontstaat een sprong in het zijvlak. De matrijs kan ook uitgerust worden met een schuif (rechts). De zijwand vertoont nu nog wel een deelnaad, maar ter plaatse van de deelnaad is nu geen sprong aanwezig. Als het bakje van scherpe ribben is voorzien en de matrijs bezit een schuif dan kan de deellijn op het oppervlak vermeden worden.

4.5 Lossingsschuimte

Het product gaat door de krimp vastzitten op de stempel van de matrijs. Om het product lossend te maken moet daarom altijd een lossingsschuimte worden toegepast. Hoe groter de lossingsschuimte is des te minder kracht is er nodig om het product uit te stoten. Men moet de lossingsschuimte zo groot mogelijk kiezen, zodat geen lossingsmiddelen nodig zijn. Een ander belangrijk punt is dat de stempel in de lossingsrichting heel goed gepolijst wordt.

Als men bij kastvormige delen de lossingsschuimte van de holte en de stempel gelijk neemt verkrijgt het product een gelijkmatige wanddikte.



figuur 4.9 De belangrijkste gegevens over de lossingsschuimte.

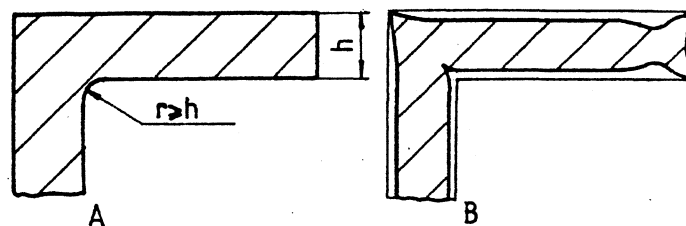
4.6 Wanddikten en wanddikteverschillen

Als de kunststof in een matrijs afkoelt treedt er een volumeverkleining op. De krimp is bij semi-kristallijne materialen groter dan bij amorf. De krimp is niet in alle richtingen gelijk, in de dikterichting is de krimp veel groter dan in beide andere richtingen. In deze laatste richtingen wordt de krimp verhinderd door het reeds koelere materiaal aan het oppervlak van het product en door de matrijs.

Bij wanddikteverschillen hebben de dikkere delen een langere koeltijd nodig dan dunne delen. De dikkere delen bepalen dus de cyclustijd. Als het dunne deel al afgekoeld is moet het dikke gedeelte nog verder koelen en krimpen. Er treden nu afkoelspanningen op en het product gaat vervormen. Voor thermoplasten komt daar nog een slechte kwaliteit van het oppervlak bij.

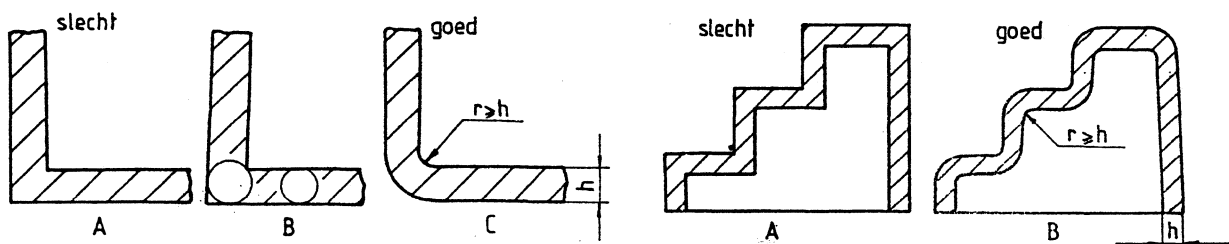
De maximale wanddikte voor thermohardende en thermoplastische onderdelen is 4 à 5 mm. Moet de dikte groter worden dan kan men schuimen toepassen.

Voorbeelden



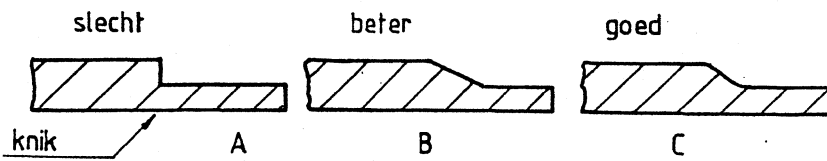
figuur 4.10 Krimp in een product.

In figuur 4.10 kan men zien hoe de krimp in een product verloopt. Bij kleine afrondingsstralen en bij een materiaal met een grote krimp kan de gehele afrondingsstraal verdwijnen als deze te klein is. Als er geen eisen gesteld worden aan het oppervlak maakt men $r = h$.



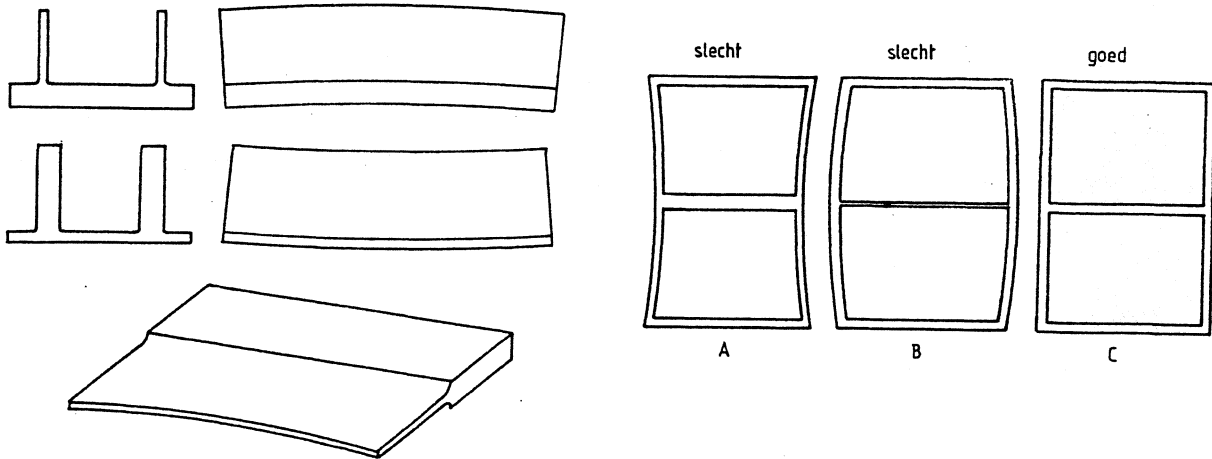
figuur 4.11 Afrondingen.

Scherpe hoeken geven een minder goede stroming in de matrijs dan afgeronde hoeken (figuur 4.11). Een scherpe hoek zal door de langere koeltijd nakrimpen en naar binnen trekken. De beste oplossing is een straal aan te brengen die groter of gelijk is dan de wanddikte h .



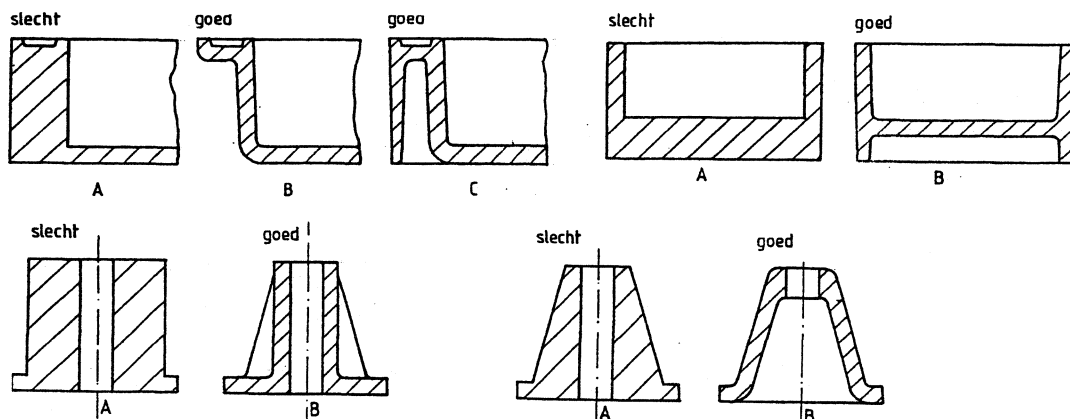
figuur 4.12 Wanddikteovergangen.

Scherpe wanddikteovergangen geven een duidelijke aftekening op het oppervlak (figuur 4.12 A). Een betere oplossing is als de wand geleidelijk van de ene naar de andere dikte overgaat (B). Het is nog beter de overgangen van een radius te voorzien (C).

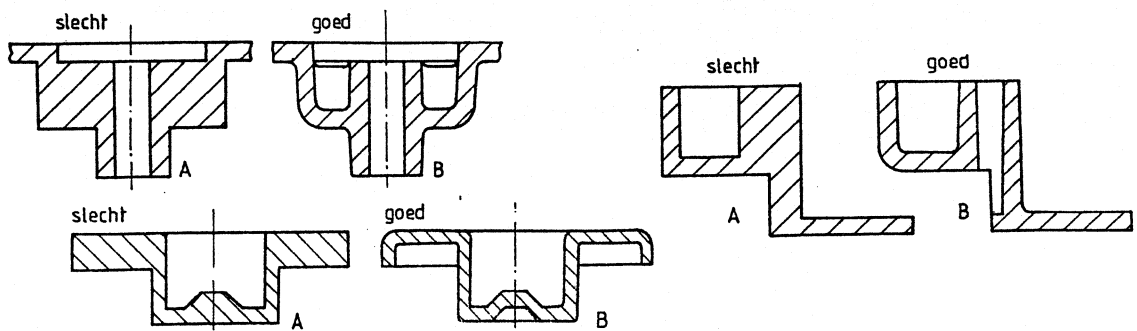


figuur 4.13 Wanddikteverschillen en krimp.

In de tekeningen van figuur 4.13 is aangegeven wat het gevolg is van wanddikteverschillen. Bij toepassingen van amorphe materialen, bijvoorbeeld een thermoharder zijn de vervormingen kleiner dan bij semi-kristallijne thermoplasten.

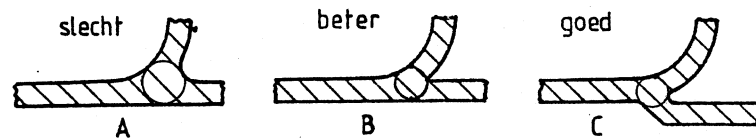


figuur 4.14 Gelijkmatige wanddiktes.



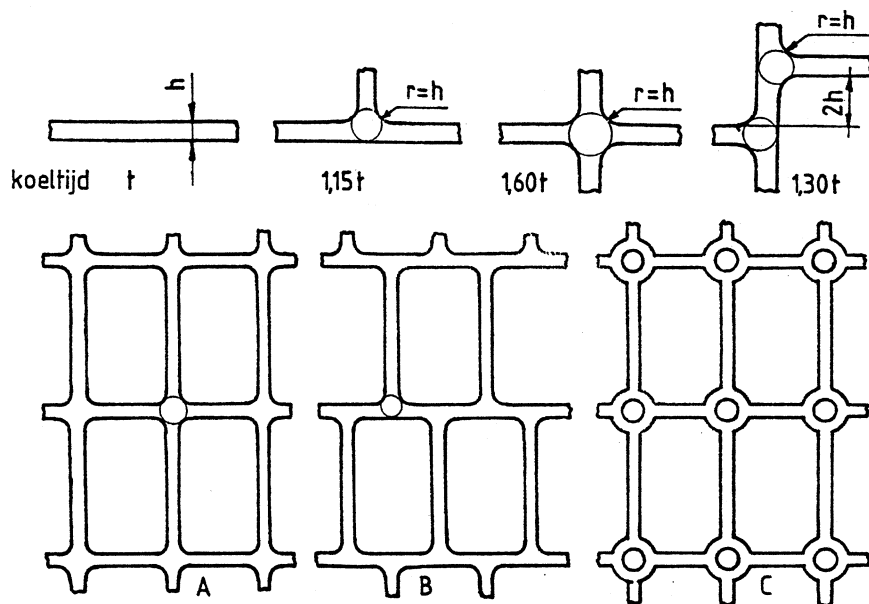
figuur 4.15 Gelijkmatige wanddiktes.

In figuur 4.14 en figuur 4.15 is aangegeven hoe slechte constructies verbeterd kunnen worden. De benodigde matrijzen worden wel gecompliceerd en kosten dus meer dan die van de slechte constructies. Voor wat grotere productieseries worden deze kosten ruimschoots terugverdiend door minder materiaalverbruik en een kortere cyclustijd.



figuur 4.16 Samenkomst van wanden.

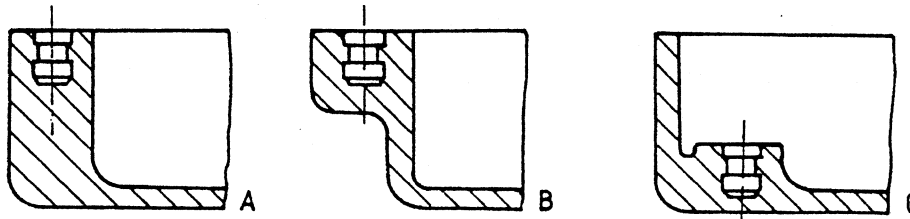
Bij een samenkomst van wanden ontstaat een duidelijk merkbare wandverdikking (figuur 4.16 A). Verminderen we de afrondingsstralen dan wordt de verdikking minder (B). C is een goede oplossing met behoud van de afrondingsstralen.



figuur 4.17 Samenkomst van ribben.

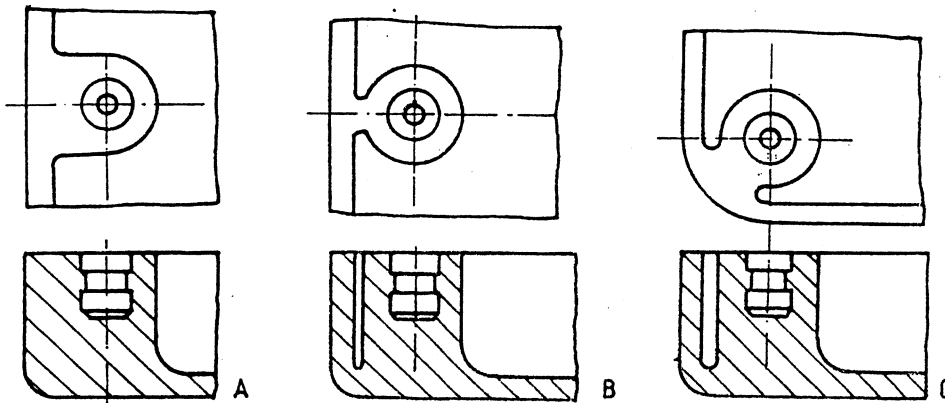
In bodems van kisten en kratten ontstaan op de kruisingen van de ribben wanddiktevergrotingen die de koeltijd verlengen (figuur 4.17A). Bij verschoven ribben

ontstaan T-kruisingen die een kortere cyclustijd hebben. De krachtdoorleiding is echter slechter (B). Door de kruising van ronde gaten te voorzien (C) wordt de koeltijd teruggebracht zonder dat veel afbreuk wordt gedaan aan de krachtdoorleiding.



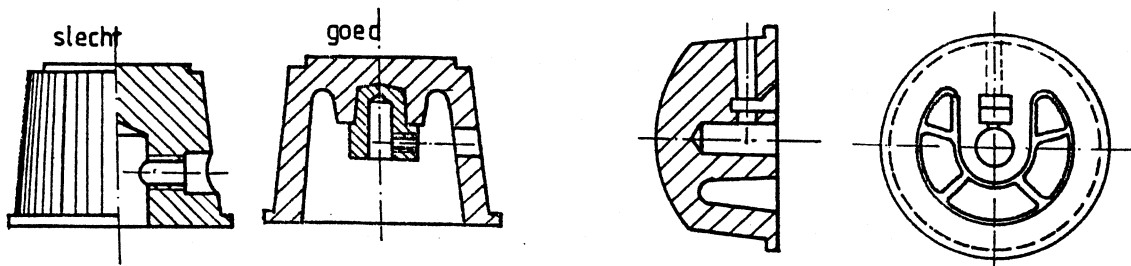
figuur 4.18 Gelijkmatische wanddikte in thermoharders.

Voor thermohardende materialen geldt ook dat de wanddikte gelijkmatig moet zijn. Bij afwijkingen zijn de gevolgen minder ernstig dan bij thermoplasten. De dikke wand van figuur 4.18 A kan op eenvoudige wijze verminderd worden. De constructies volgens B en C zijn veel beter.



figuur 4.19 Aanhechting van nokken aan wanden.

De aanhechting van nokken aan wanden mag niet dik zijn om verstoringen op het oppervlak te voorkomen (figuur 4.19). B is beter dan A. In een hoek zal een dikkere verbinding minder opvallen door de afronding (C). In deze drie voorbeelden kan de wanddikte onder de insert dunner worden.



figuur 4.20 Wanddikte.

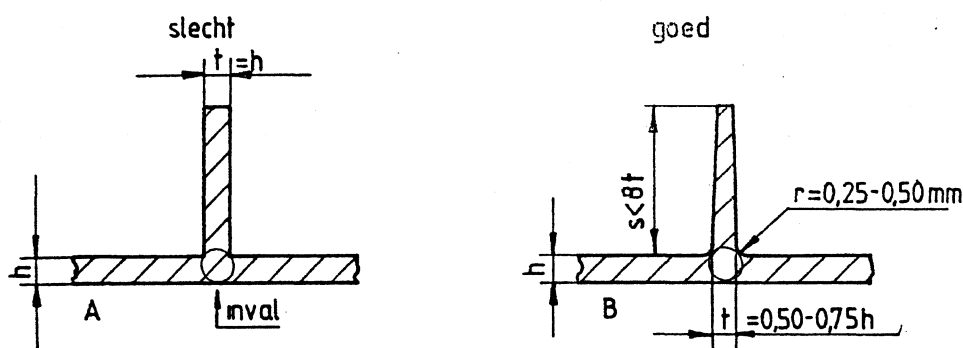
De linker knop in figuur 4.20 heeft een dikke wand en getapt schroefdraad. Een betere oplossing is de tweede knop. De wanden zijn veel dunner en de schroefdraad is in een insert opgenomen. Bij de rechter knop wordt de insert bij de montage op de as ingezet.

4.7 Inval

Inval ontstaat door verschil in krimp van dikke en dunne delen van een product. De krimp is het grootste in de richting loodrecht op de vlakken van het product. De krimp neemt toe als de wanddikte van het product toeneemt.

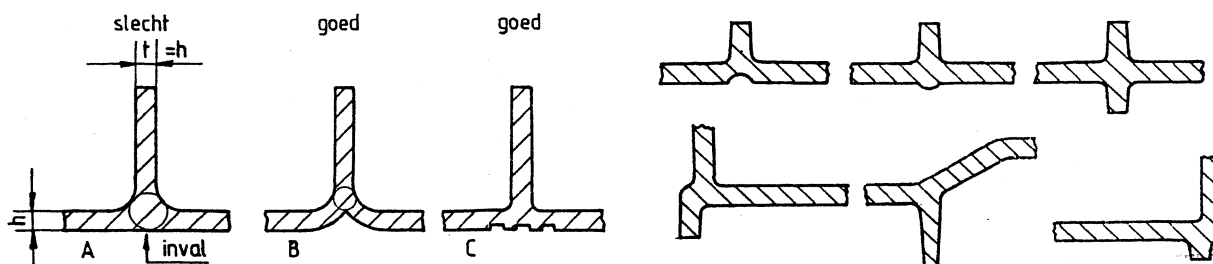
Bij een plaatselijke verdikking zal plaatselijk meer krimp optreden hetgeen aan het oppervlak zichtbaar wordt als inval. Dit verschijnsel is het meest bekend bij ruggen en nokken, ook treedt het op aan de randen van vlakken. Inval heeft alleen betrekking op thermoplasten, bij thermoharders en bij schuimen treedt geen inval op.

Voorbeelden



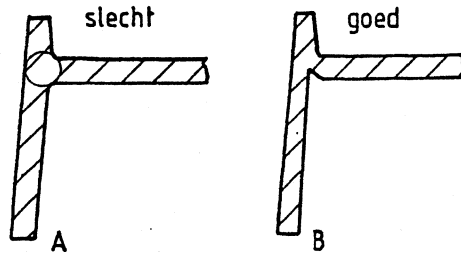
figuur 4.21 Inval bij ribben.

Bij gelijke wanddikte van rug en wand treedt inval op (figuur 4.21 A). De meest bekende methode om de inval te voorkomen is dat men de rug dunner maakt dan de wand waarop de rug staat (B). We introduceren wel een ongelijkmatige afkoeling van rib en wand waardoor vervorming ontstaat. De stijfheid van het constructiedeel is veel minder geworden dan in geval van gelijke dikte van rib en wand, omdat de hoogte van de rib kleiner moet zijn dan 8 maal de ribdikte.



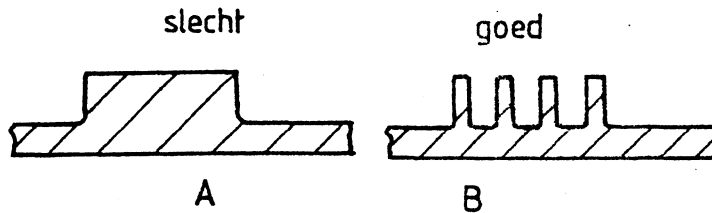
figuur 4.22 Camouflage van inval.

Bij gelijke wanddikte van rib en wand kan men de inval verdoezelen door de wand waarop de rib staat niet vlak te maken (figuur 4.22 B en C). Rechts zijn een nog een aantal voorbeelden weergegeven van het wegwerken van inval.



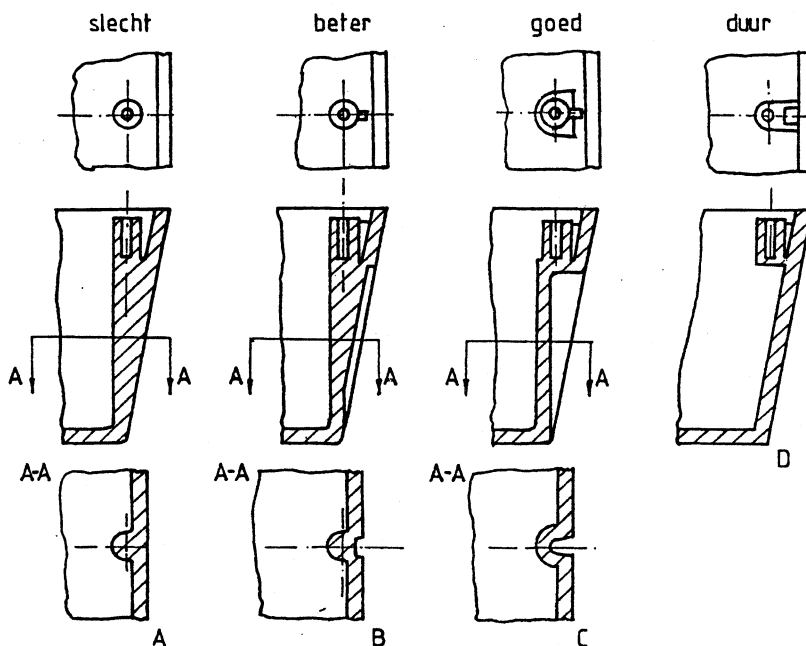
figuur 4.23 Samenkomst van wanden.

Bij een samenvloeiing van wanden met gelijke dikte ontstaat inval (figuur 4.23 A). Op eenvoudige wijze kan de verbinding tussen het dek en de zijwand verdund worden zonder dat de stijfheid van het dek veel minder wordt (B).



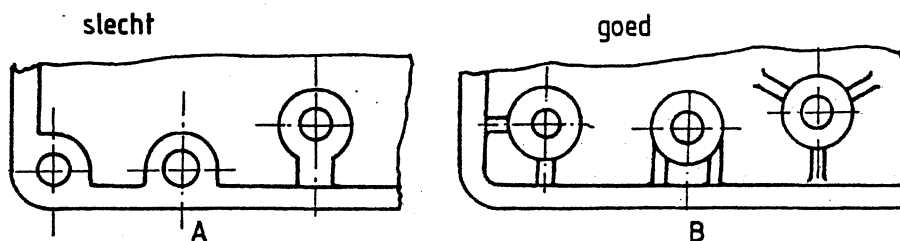
figuur 4.24 Plaatselijke verstijving.

Plaatselijke verstijvingen voor het overbrengen van krachten moeten in veel smalle delen uitgevoerd worden (figuur 4.24).



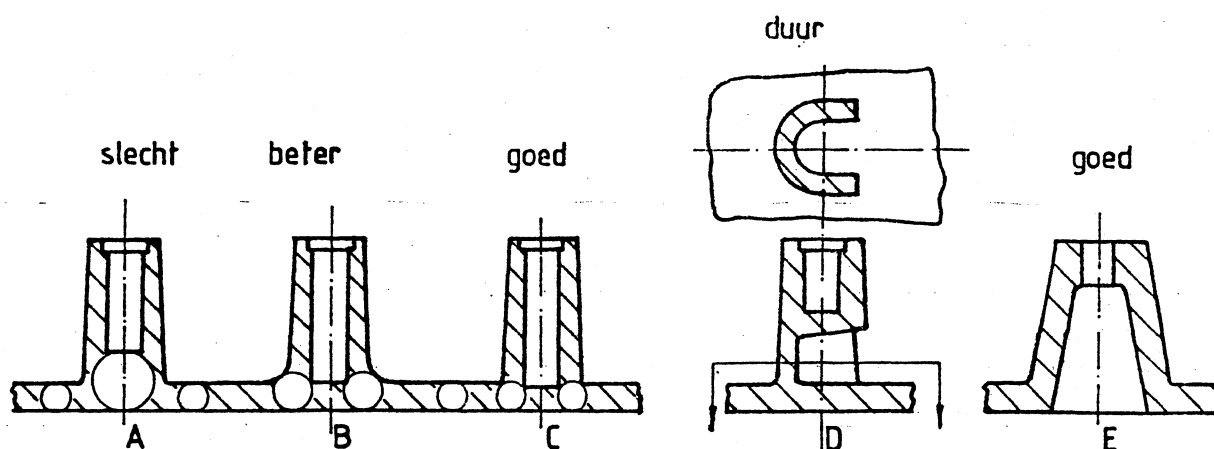
figuur 4.25 Aansluiting van nokken op zijwanden.

Nokken op zijwanden van kisten geven problemen met inval (figuur 4.25 A). Men kan de inval onzichtbaar maken (B) tot het voorkomen van inval met een bewegend deel in de stempel (D).



figuur 4.26 Aansluiting van nokken op zijwanden.

Bij zijwanden met weinig lossingsschuinite mogen de nokken niet in de wand opgenomen worden (figuur 4.26 A). De nokken moeten op de bodem staan en mogen met dunne schotten vast zitten aan de zijwand (B). Nokken op zichtbare vlakken zijn vaak een bron van ergernis.



figuur 4.27 Voorkomen van inval ter hoogte van een nok.

Om inval te voorkomen zal men moeten kiezen tussen de constructies van figuur 4.27 C en D. Deze laatste constructie is een zeer goede constructie voor dunwandige producten. Als een doorlopend gat in het vlak mag zitten geeft de oplossing van E zeer goede resultaten.

4.8 Vergroting van de stijfheid

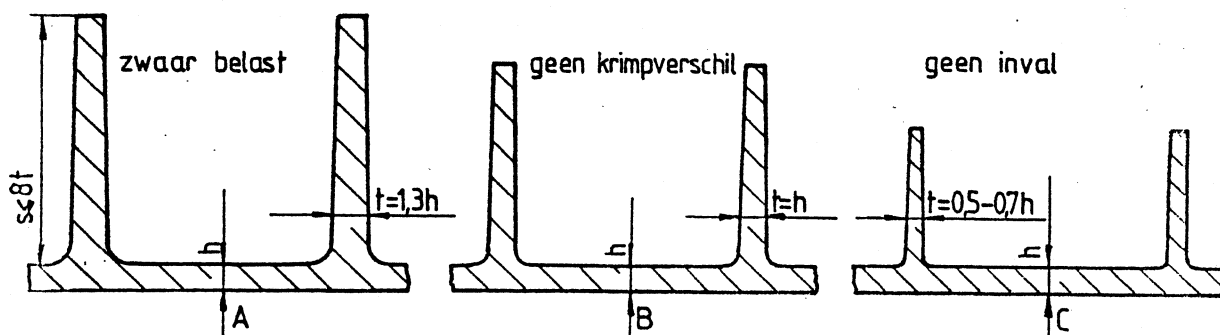
Kunststoffen bezitten een elasticiteitsmodulus die veel lager ligt dan die van metalen. Met een glasvezelvulling kan men de elasticiteitsmodulus verhogen, maar meestal gaat dit ten koste van de kwaliteit van het oppervlak.

De stijfheid van een product wordt niet alleen gevormd door de elasticiteitsmodulus maar ook door het traagheidsmoment. Men kan de stijfheid verhogen door vergroting van het traagheidsmoment. De meest bekende methode om de stijfheid te vergroten is het aanbrengen van ribben.

Voor grote platte vlakken kan men ook denken aan spaanderplaat. Bij een dikte van 12 mm is de stijfheid al groot en de prijs inclusief de afwerking is veel lager dan de prijs van een kunststof plaat. Niet platte vlakken moet men uit kunststof maken. Het goedkoopste wat men kan kiezen is een compacte kunststof met een wanddikte van maximaal 5 mm. Heeft men een dikkere wand nodig dan kan men schuim kiezen. Voor grote productieaantallen kunnen we een thermoplastenschuim nemen. Voor grote producten en kleine aantallen kunnen we denken aan polyurethaanschuim (PUR).

In hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op de bepaling en berekening van verstijvingen.

Voorbeelden



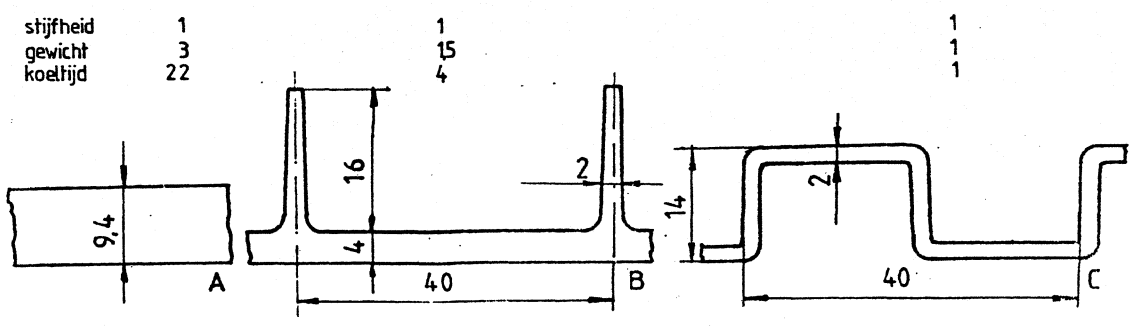
figuur 4.28 Vormgeving van ribben.

De meest toegepaste methode voor het vergroten van de stijfheid is het aanbrengen van ribben. Voor zwaar belaste constructies waarbij inval mag optreden neemt men de ribdikte groter dan de wand waarop de rib staat (figuur 4.28 A). Voor de meest voorkomende constructies waarbij inval toegestaan is kiest men de rib volgens B. Mag geen inval op de wand aanwezig zijn, kies dan voor de constructie van C. Als we thermoplastenschuim toepassen kunnen de eerste twee uitvoeringen ook zonder inval gespoten worden, de kwaliteit van het oppervlak is slechter door de typische schuimstructuur. Eist men voor de constructies van de figuren B en C dezelfde stijfheid dan blijkt dat met de rib van B het materiaalverbruik minder is en de cyclustijd bij de fabricage korter wordt dan voor de constructie volgens C.



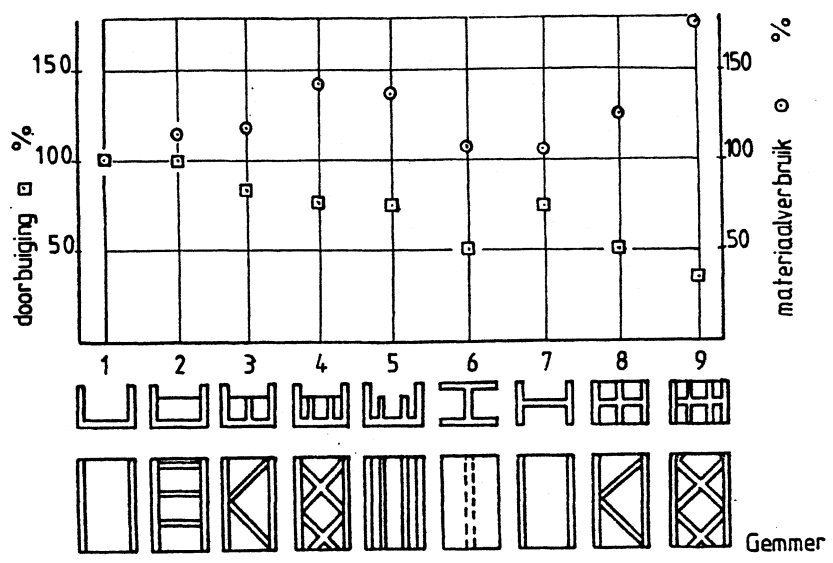
figuur 4.29 Alternatieve verstijvingsmogelijkheden.

Andere minder vaak toegepaste verstijvingmethoden zijn in figuur 4.29 weergegeven. Bij buiging van gebogen vlakken treedt in het neutrale buigingsvlak een membraanspanning op die de extra verstijving veroorzaakt.



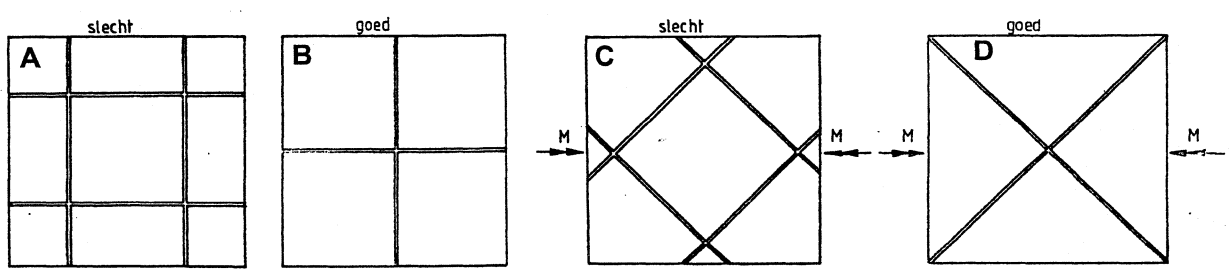
figuur 4.30 Vergelijking van verschillende constructies met dezelfde stijfheid.

In figuur 4.30 is een vergelijking gemaakt tussen een massieve plaat, een plaat met ribben en een vouwconstructie. Het traagheidsmoment per eenheid van breedte is voor de drie constructies ongeveer gelijk. Het verschil in gewicht en in koeltijd is duidelijk te zien.



figuur 4.31 Vergelijking van verstijvingen en materiaalverbruik.

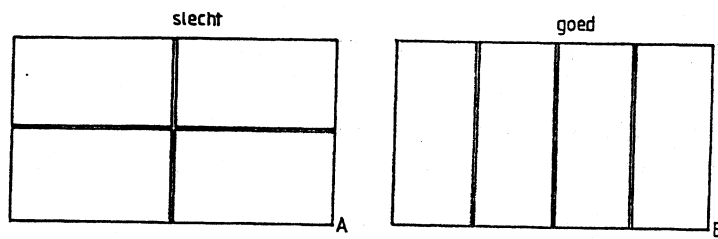
De doorbuiging en het materiaalverbruik is in figuur 4.31 weergegeven van een kunststof strip voorzien van verschillende ribpatronen.



figuur 4.32 Verribbingen voor buiging en torsie.

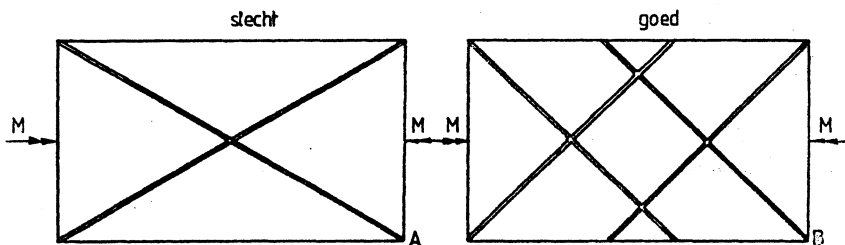
De vierkante platen A, B, C en D in figuur 4.32 zijn aan de randen ondersteund en worden loodrecht op hun vlak op buiging belast. De constructie B verdient de voorkeur boven de andere constructies. Zet een rib altijd op de plaats van de grootste doorbuiging en denk er aan

dat een korte rib stijver is dan een lange rib. Wordt de plaat op torsie belast dan verdient constructie D de voorkeur.

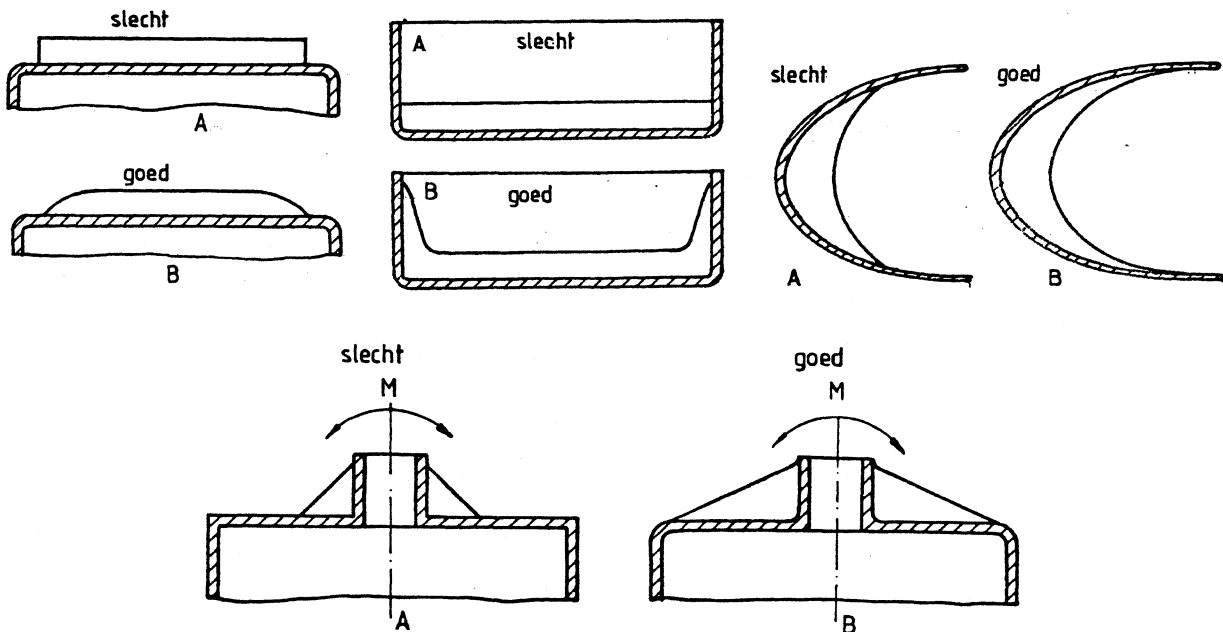


figuur 4.33 Verribbing op een rechthoekige plaat belast op buiging.

Bij rechthoekige platen die loodrecht op hun vlak op buiging worden belast (figuur 4.33) moet men bij de verdeling van de ribben uitgaan van de plaats waar de grootste doorbuiging optreedt, meestal is dit het midden van de plaat. De overige ribben kunnen gelijkmatig over het vlak verdeeld worden. Korte ribben zijn stijver dan lange, zodat plaat B de beste oplossing is. Voor een torsiebelasting is de oplossing van figuur 4.34 B beter dan die van A.

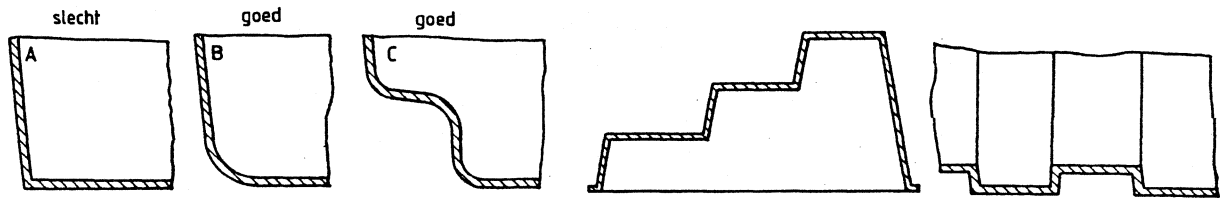


figuur 4.34 Verribbing op een rechthoekige plaat belast op torsie.



figuur 4.35 Eindigen van een rib.

Men mag ribben niet plotseling laten eindigen, er ontstaan bij de overgang spanningsconcentraties (figuur 4.35). Bij dynamisch belaste constructies kunnen scheuren ontstaan. Zorg er voor dat ribben niet stoppen in hoogbelaste zones.



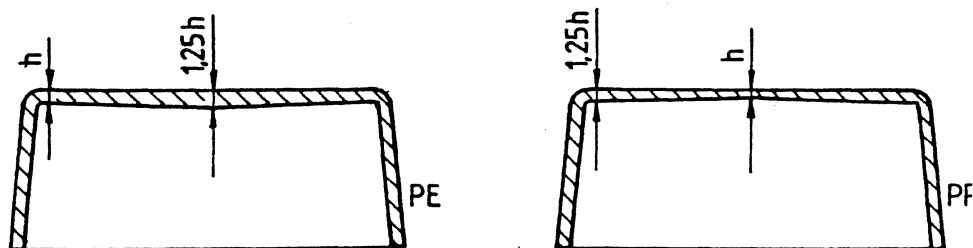
figuur 4.36 Verstijven van doosvormige producten.

Doosvormige producten kan men verstijven door grote afrondingsstralen toe te passen, of door de doos als vouw constructie uit te voeren (figuur 4.36).

4.9 Grote doosvormige producten

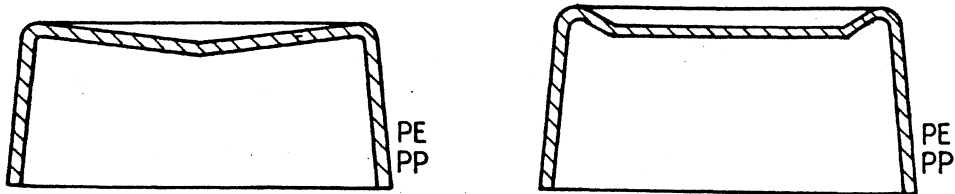
Grote doosvormige producten in PE en PP zijn bij de fabricage moeilijk in de juiste vorm te houden. De materialen bezitten een grote krimp en de krimp in de stromingsrichting is groter dan de krimp loodrecht op de stromingsrichting. Het resultaat is dat platte vlakken niet vlak blijven, ze trekken krom. Door constructieve aanpassingen aan het product kan men tot aanvaardbare oplossingen komen. Ook voor grote producten uit thermohardende materialen moet men maatregelen treffen om vervorming te voorkomen.

Voorbeelden



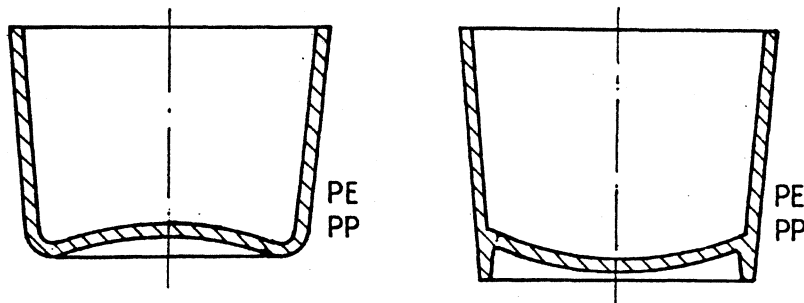
figuur 4.37 Wanddiktes in bodemconstructie in PE en PP.

Polyolefinen: Links in figuur 4.37 is een constructie weergegeven van een bak van PE die centraal in de bodem wordt aangespoten. De grotere dikte leidt tot een geringere oriëntatie en dus tot geringere vervorming. Voor een zelfde bak van PP kan de rechter constructie toegepast worden, ook deze bak heeft een centrale aansluiting in de bodem.



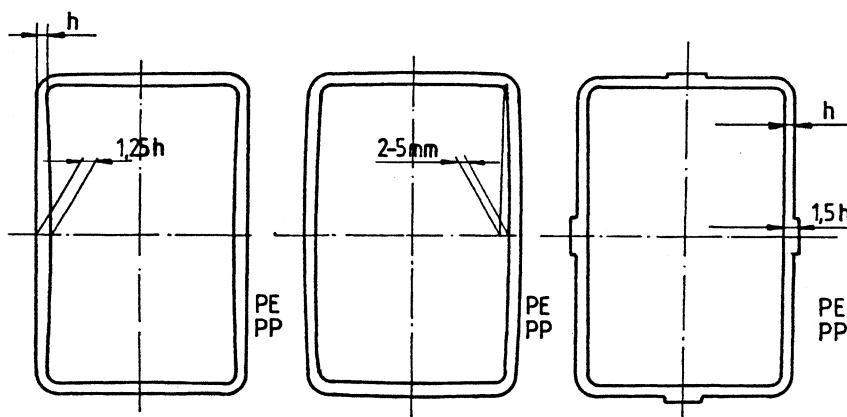
figuur 4.38 Gebogen bodemconstructie in PE en PP.

Men kan ook de bodem één of tweezijdig gebogen maken met gelijke wanddikte. Bij onregelmatige krimp kan de bodem gemakkelijker vervormen (figuur 4.38).



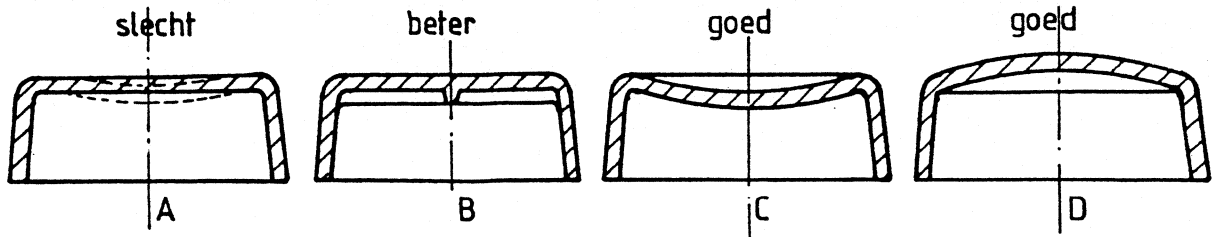
figuur 4.39 Bodemconstructie in PE en PP.

Voor grote ronde bakken in PE of PP die op de bodem neergezet worden kan men de constructie van figuur 4.39 toepassen.



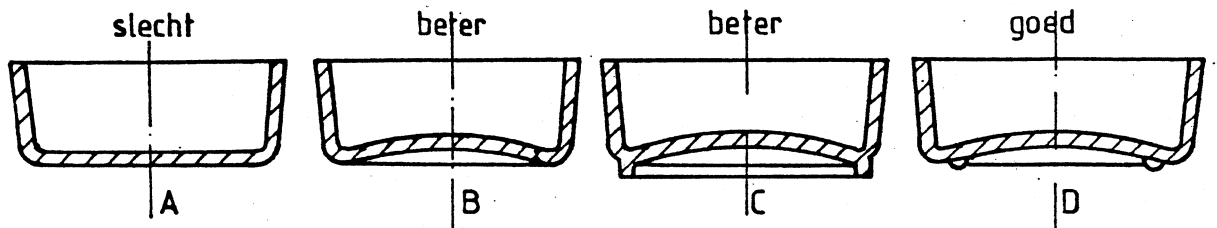
figuur 4.40 Zijwandconstructies van een bak.

Maakt men de zijwanden van een bak vlak, overal even dik en zonder verstijvingsribben dan ontstaan weer vervormingen van deze vlakken. Men verkrijgt goede resultaten door de wanden uit te voeren zoals in figuur 4.40.



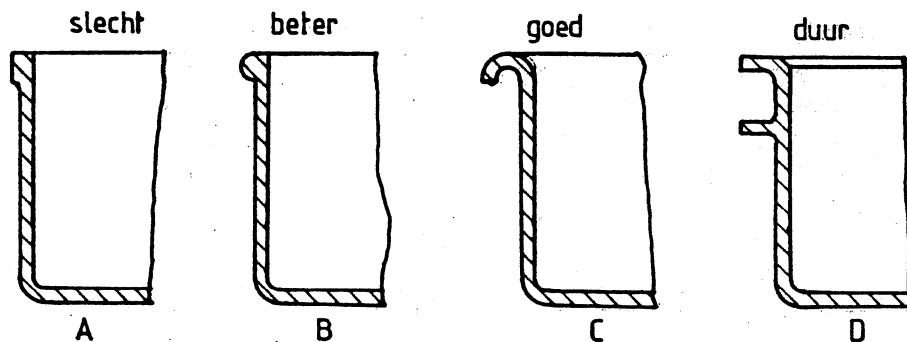
figuur 4.41 Thermoharders.

Thermohardende materialen vertonen minder oriëntatie dan de polyolefinen. Grote platte vlakken zonder verstijvingsribben zijn moeilijk vlak te houden. Het is beter de vlakken te welfen (figuur 4.41).



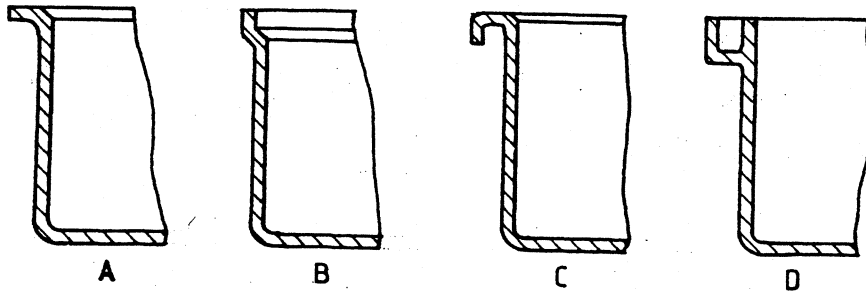
figuur 4.42 Ondersteuning van bakken op de grond.

Bakken die zonder wiebelen neergezet moeten kunnen worden kan men niet over het gehele vlak laten dragen op de vloer (figuur 4.42 A). De beste oplossing is om de bodem op drie punten te laten steunen (D).



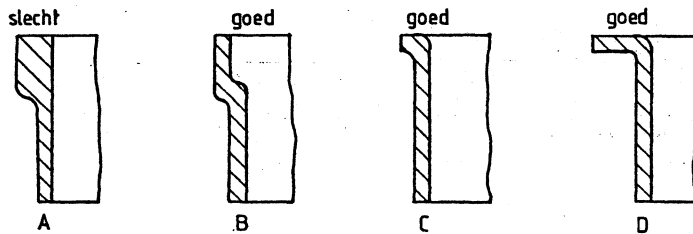
figuur 4.43 Verstijving van randen.

Als geen speciale maatregelen getroffen worden zijn de randen van een bak of krat slap. Wil men dit verbeteren dan moet de bak voorzien worden van een buigstijve rand (figuur 4.43). De beste oplossing is die constructie waarbij de rand dezelfde wanddikte heeft als de wanddikte van de rest van de bak. Een dikke rand geeft vervorming bij het afkoelen en deze veroorzaakt ook een langere koeltijd.

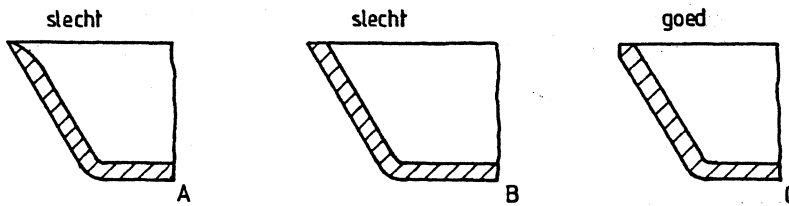


figuur 4.44 Verstijving van randen.

In figuur 4.44 zijn nog een aantal constructies weergegeven. In verband met oriëntatie geeft de om 180° gekrulde rand van C minder kans op scheurvorming.

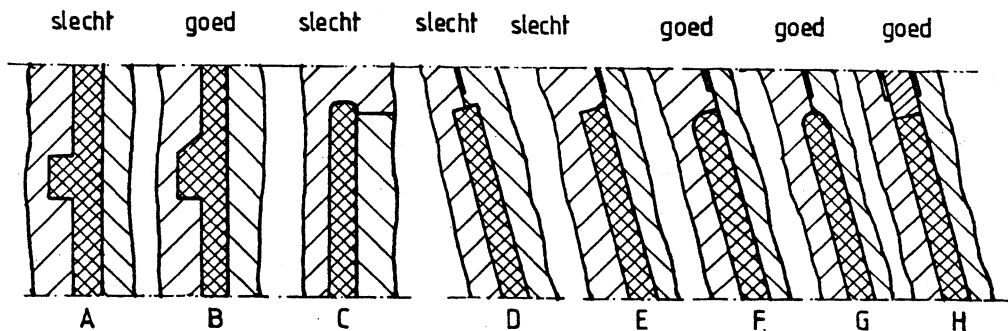


figuur 4.45 Randconstructies voor thermoharders.



figuur 4.46 Voorkomen van scherpe randen.

In thermohardende materialen mogen de randen niet scherp uitlopen om uitbrokkelen te voorkomen (figuur 4.46).



figuur 4.47 Randconstructies in PUR.

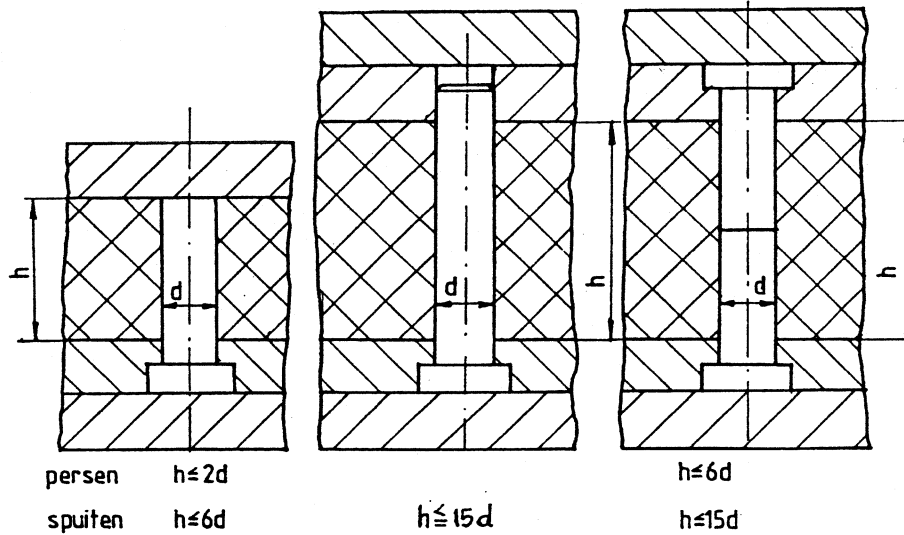
De randconstructies van PUR producten moet zodanig zijn dat geen luchtbellens in de rand achterblijven (figuur 4.47). De randen van PUR constructies moeten in de matrijs goed

ontlucht worden om luchtinsluitingen te vermijden. Verder moeten scherpe bochten vermeden worden, door de afrondingsstralen zo groot mogelijk te maken.

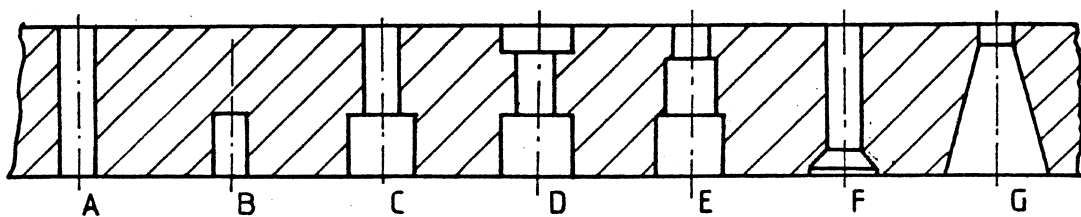
4.10 Gaten

Een gat in een product wordt gevormd door een pen in de matrijs. Aan de verhouding van de lengte tot de diameter zijn grenzen gesteld in verband met breuk van de matrijspennen.

Voorbeelden

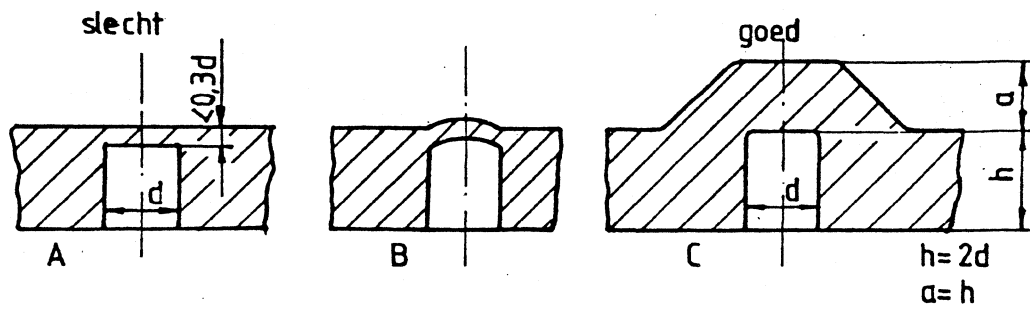


figuur 4.48 De lengte-diameter verhoudingen van matrijspennen.



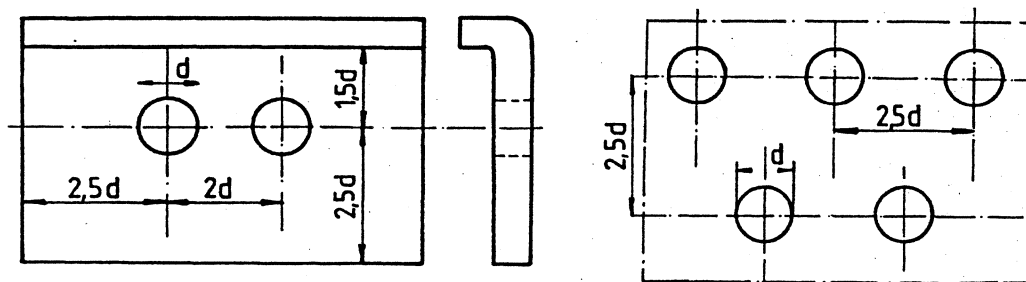
figuur 4.49

In figuur 4.49 zijn een aantal verschillende gaten te zien. Als gat A de maximale lengte/diameter verhouding bezit, is deze waarde voor de overige gaten gunstiger geworden. Dit betekent dat bij dezelfde wanddikte de diameter kleiner gekozen kan worden als men een getrap of een conisch toelopend gat kiest zonder dat de kans op breuk van de pen toeneemt.



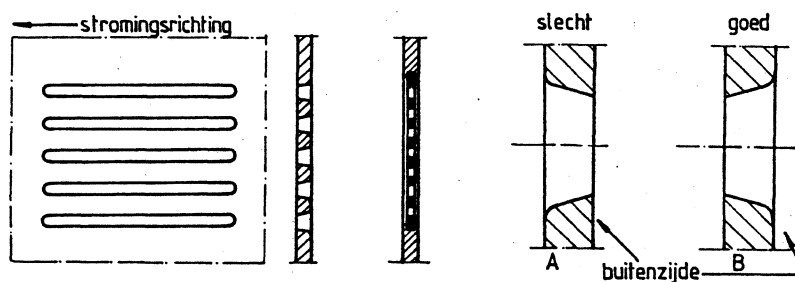
figuur 4.50 Blinde gaten.

Bij blinde gaten moet er tussen de bodem van het gat en de wand voldoende materiaal aanwezig zijn om uitknikken van dit deel te voorkomen (figuur 4.50 A en B). Als het gat niet volgens B uitgevoerd kan worden zal men constructie C kiezen.



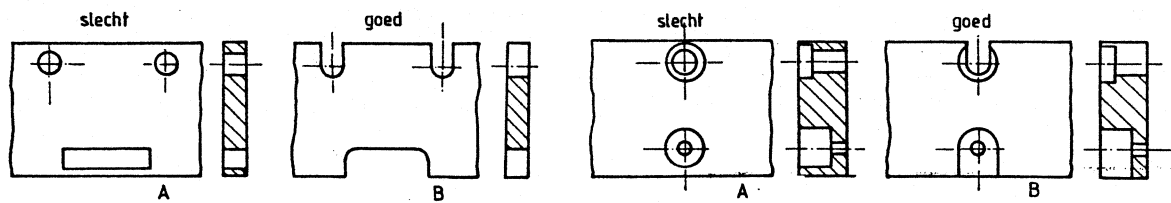
figuur 4.51 Afstand tussen gaten.

De afstand tussen gaten en de afstand van gaten tot de rand zijn in figuur 4.51 weergegeven. Voor PUR zijn deze waarden weergegeven in de rechter tekening. Deze gaten staan wat verder van elkaar omdat de grondstof onder lage druk tussen de matrijsspinnen moet stromen.



figuur 4.52 Sleufgaten in PUR.

Sleufgaten in PUR-producten moeten in de stromingsrichting liggen om luchtinsluitingen te voorkomen (figuur 4.52 links). Lukt dit niet dan kunnen we een thermoplastisch roostertje als insert mee inschuiven (midden). Bij gaten in PUR, waarvan de rand aan de buitenzijde er netjes moet uitzien, legt men de braamrand aan de binnenzijde van het product (rechts). De beschadigingen bij het afwerken zijn dan onzichtbaar.



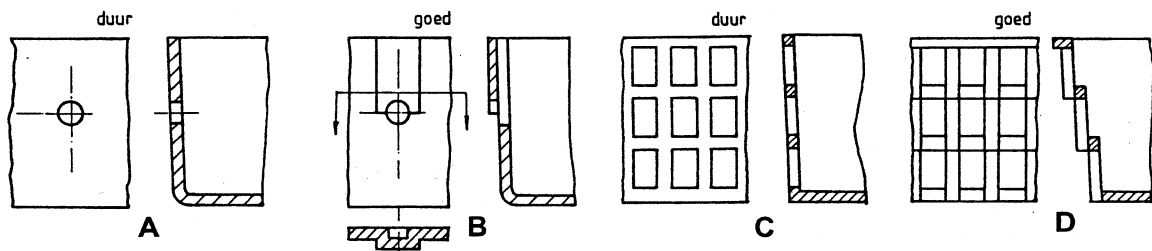
figuur 4.53 Gaten bij de rand.

Zetten we gaten te dicht bij de rand dan is de kans groot dat deze rand breekt of beschadigd wordt (figuur 4.53). Als de gaten niet wat verder van de rand gezet kunnen worden is het beter de dammetjes tussen gat en wand weg te laten.

4.11 Ondersnijdingen

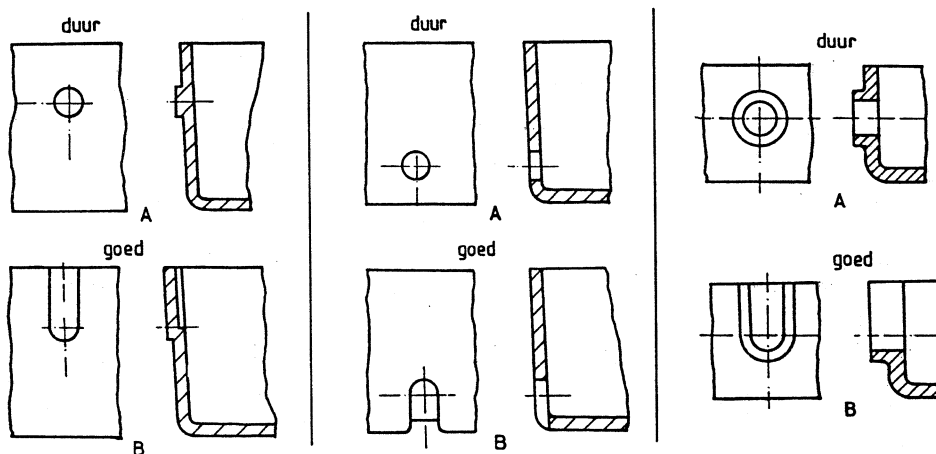
Ondersnijdingen of antilossingen zijn ongunstig in een product omdat we de matrijs van zijschuiven of zijlossers moeten voorzien. In een aantal gevallen kan men door wijziging van het product zijschuiven voorkomen.

Voorbeelden

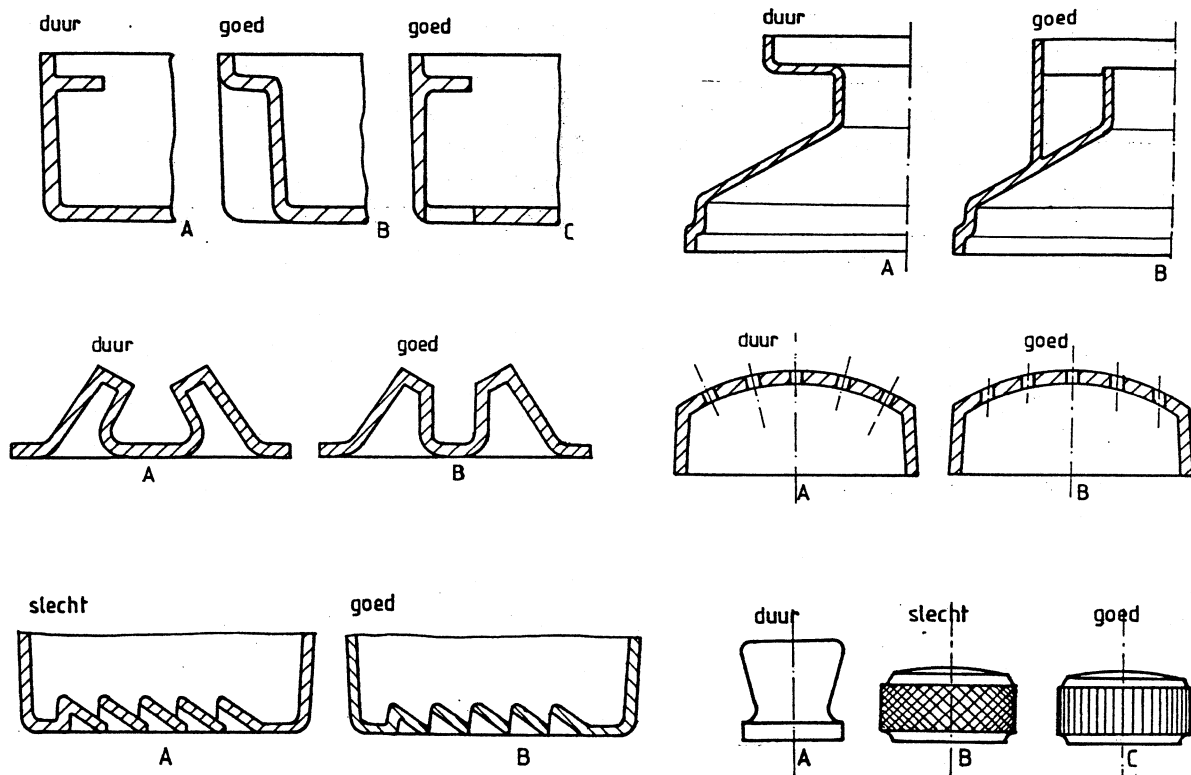


figuur 4.54 Gaten in een zijwand.

Gaten in een zijwand kan men bij voldoende lossingsschuinite vormen zonder zijschuiven (figuur 4.54).



figuur 4.55 We kunnen de gaten laten doorlopen naar de rand van het product; we kunnen hetzelfde doen met uitstekende delen op de zijwand.

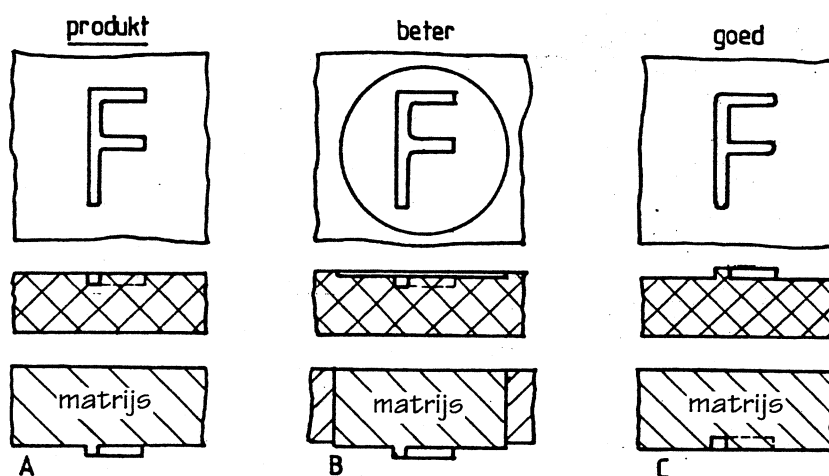


figuur 4.56 Men kan door veranderingen aan het product de zijschuiven vermijden.

4.12 Letters en cijfers

Letters en cijfers kunnen op kunststof producten gedrukt worden of men kan ze mee spuitgieten. De letters en cijfers moeten we in de matrijs graveren als we ze willen spuitgieten.

Voorbeeld



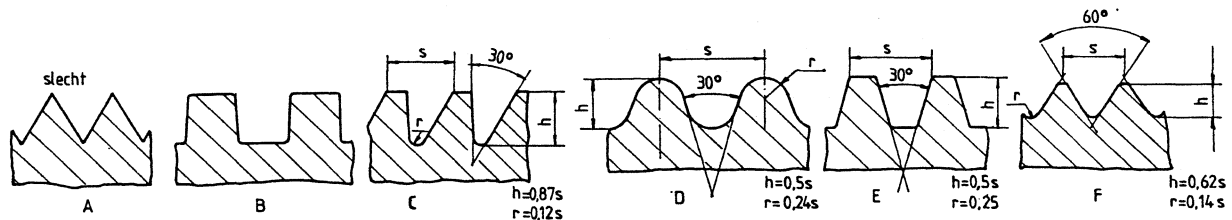
figuur 4.57 Cijfers en letters in een product.

Als men verdiept liggende letters vraagt moet men in de matrijs het gehele vlak rond de letters wegfrezen (figuur 4.57 A). Het oppervlak krijgt men niet meer zo strak als na slijpen en polijsten. Het is beter als de letters op een los inzetstuk staan. Men moet minder materiaal wegfrezen en de rest van het oppervlak van de matrijs kan perfect gepolijst worden (B). Het meest eenvoudige is de letters in de matrijs te graveren. De letters komen dan op het productvlak te liggen (C). Op eenvoudige wijze kunnen deze letters met folie bedrukt worden.

4.13 Schroefdraad

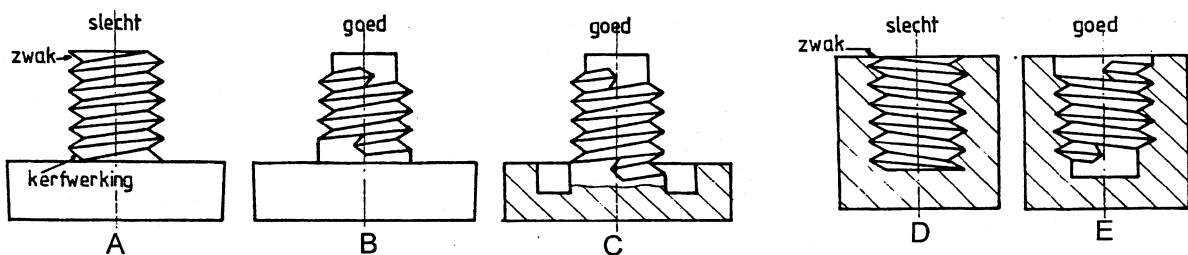
Schroefdraad wordt gebruikt voor het monteren van onderdelen of voor het nauwkeurig afstellen van een product in een apparaat ten opzichte van een ander onderdeel. In dit hoofdstuk wordt over schroefdraad gesproken die gespuitsgiet wordt tegelijk met de rest van het product.

Voorbeelden



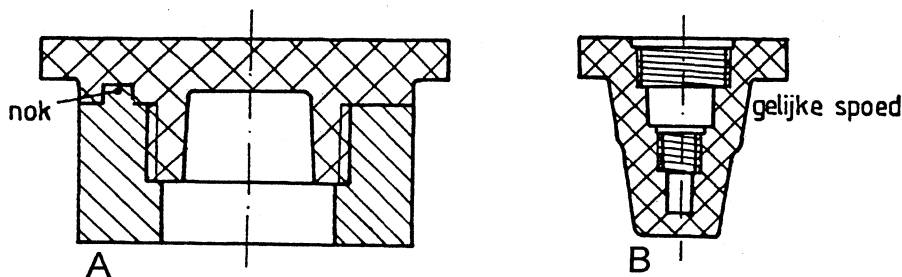
figuur 4.58 Verschillende soorten schroefdraad die in kunststoffen worden toegepast.

In figuur 4.58 zijn verschillende soorten schroefdraad getekend die in kunststoffen worden toegepast. De draad van A kan men beter niet toepassen; de draad heeft een scherpe top en een scherpe voet. De top vloeit bij het spuitgieten moeilijk vol en de voet veroorzaakt kerfwerking. De schroefdraad van B en die van E dienen voor het overbrengen van grote krachten in beide richtingen. De draad van E is gemakkelijker te maken dan de rechthoekige draad van B. Met de draad van C kan in één richting een grote kracht overgebracht worden, in de andere richting stelt men geen eisen. Deze draad past men toe in flessendoppen voor kunststof flessen. De draad van D past men toe in flessendoppen voor glazen flessen. De metrische schroefdraad van F past men toe voor het afstellen van technische onderdelen ten opzichte van elkaar waarbij hoge eisen aan de nauwkeurigheid worden gesteld.



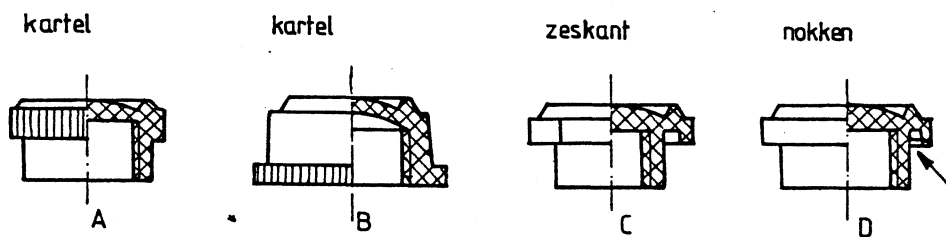
figuur 4.59 Schroefdraad en kerfwerking.

Bij het construeren van onderdelen met schroefdraad moet men op enkele punten bijzonder goed letten. De draad op het einde van de bout mag niet tot het einde doorlopen, thermoplastisch materiaal kan ombuigen en bij een thermoharder kunnen stukken uit de draad breken (figuur 4.59A). Aan de voet van de draad treedt kerfwerking op en bij hoogbelaste constructies leidt deze constructie tot scheuren. De matrijs is op genoemde plaats ook zwakker. Tijdens het harden van de matrijsmoeren kan de draad scheuren door de ongelijkmatige wanddikte van de moer. De constructie van B is beter dan die A. Het nadeel is dat bij de ingang van de moer waarin de bout wordt gedraaid, de eerste draadgangen weggehaald moeten worden. Men kan dit voorkomen door de bout van een kamer te voorzien zodat de schroefdraad op de bout wat verder door kan lopen (C). Voor kunststof moeren geldt ook dat we op moeten letten voor zwakke plaatsen in de kunststof en in de matrijs (D en E).



figuur 4.60 Onderdelen met schroefdraad.

Voor de productie van onderdelen met schroefdraad dienen enkele regels in acht genomen te worden. Men kan geen nokjes of gaatjes in de directe omgeving van de schroefdraad zetten. Het product kan niet uit de matrijs gedraaid worden (figuur 4.60 A) of men moet een extra bewegingsmechanisme inbouwen. Draad met verschillende diameters op één draadpen is alleen mogelijk als de spoed van beide schroefdraden gelijk is (B)



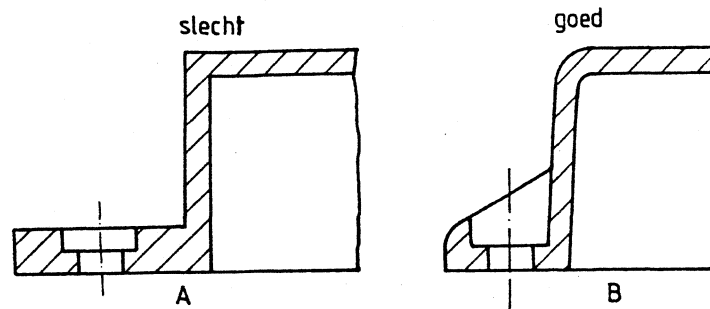
figuur 4.61 Schroefdoppen.

Schroefdoppen hebben aan de buitenzijde voorzieningen om ze vast te draaien op bijvoorbeeld flessen (figuur 4.61 A tot en met C). Hiervan wordt ook gebruik gemaakt bij het losdraaien van de doppen uit de matrijs. Is de dop aan de buitenzijde cilindrisch dan moeten we een voorziening aanbrengen voor het uitdraaien uit de matrijs. Meestal past men nokjes of gaatjes toe aan de onderzijde van de dop nabij een schroefdraad (D).

4.14 Zwakke delen in product en matrijs constructies

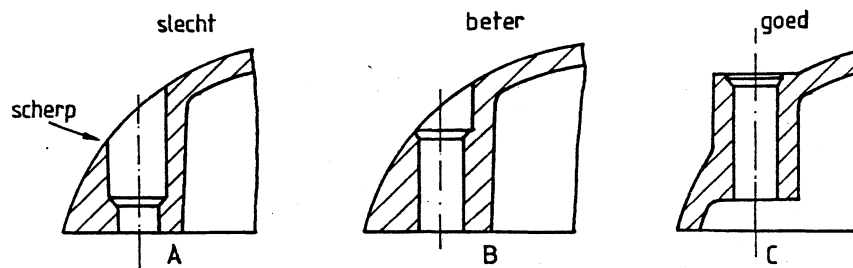
Zwakke punten in een product moeten we vermijden. We denken meestal aan scheuren, breuk of een te grote vervorming. Maar ook dun uitlopende wanden kunnen problemen geven door uitbrokkelen of niet vol vloeien van de matrijs ter plaatse van de verdunning. Een ander probleem is dat de constructie van een product in de matrijs zwakke delen veroorzaakt.

Voorbeelden



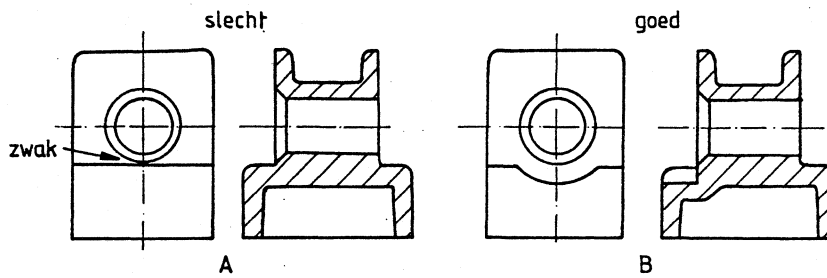
figuur 4.62 Zwakke en verbeterde constructie.

In figuur 4.62 A is een product getekend met scherpe overgangen en met een schroefgat dat ver van een wand staat zonder extra versterkingsribben. Het product is in B zodanig veranderd dat alle scherpe overgangen goed afgerond zijn; het schroefgat ligt dicht bij de wand. Het buigend moment op de lip van het schroefgat is kleiner en de krachtsoverbrenging naar de wand is verbeterd.



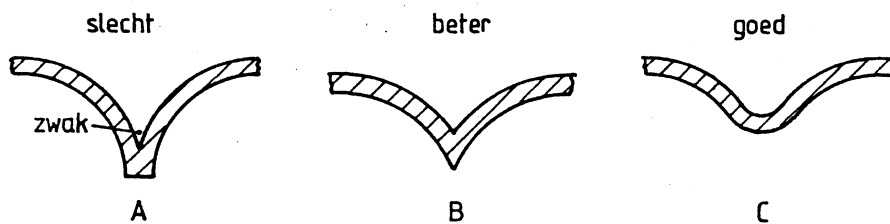
figuur 4.63 Zwakke en verbeterde constructie.

Het product volgens figuur 4.63 A bevat een dun uitlopende wand die slecht vol vloeit met kunststof. Bij brosse materialen is de kans op uitbrokkelen van de wand groot. De constructies van B en C zijn veel beter.



figuur 4.64 Zwakke plek in de matrijs bij te dunne overgang tussen pen en wand.

De product constructie van figuur 4.64 A veroorzaakt in de matrijs ter plaatse van de cilindrische pen een dunne wand die bij het harden van de matrijs al kan scheuren. Het product is nu zodanig gewijzigd dat in de matrijs het stalen onderdeel dikker kan worden (B).



figuur 4.65 Zwakke plekken door scherpe hoeken.

De matrijs voor het product van figuur 4.65 A heeft een scherp toelopende punt. In B is de constructie verbeterd. De matrijs voor het product van C bezit geen scherp uitlopende punt meer.

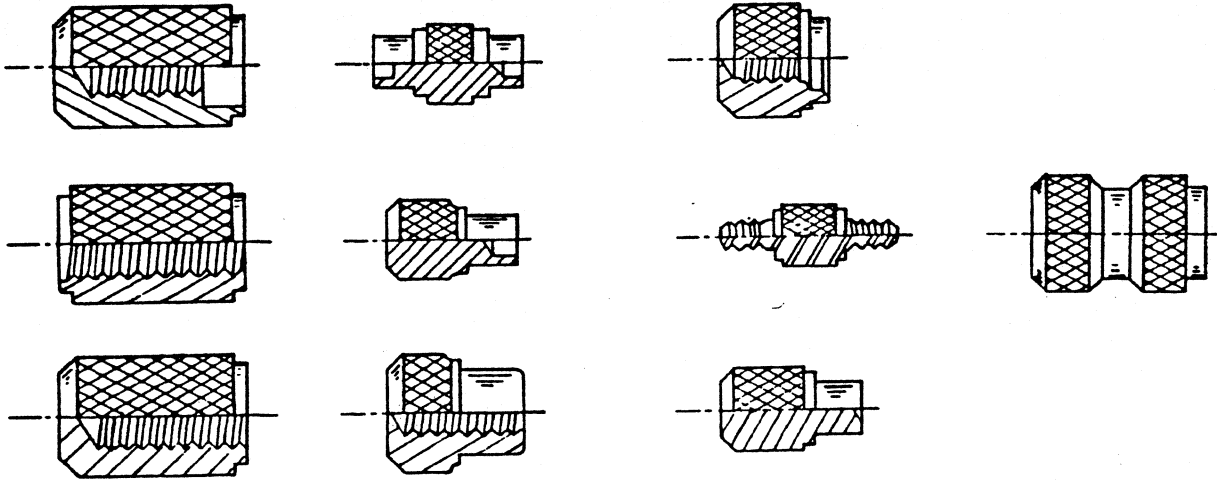
4.15 Inserts

Inserts worden toegepast voor het oplossen van diverse problemen bij het construeren met kunststoffen. Inserts zijn onderdelen die in de matrijs worden gezet en daarna geheel of gedeeltelijk omspoten worden met kunststof.

Inserts kan men toepassen voor:

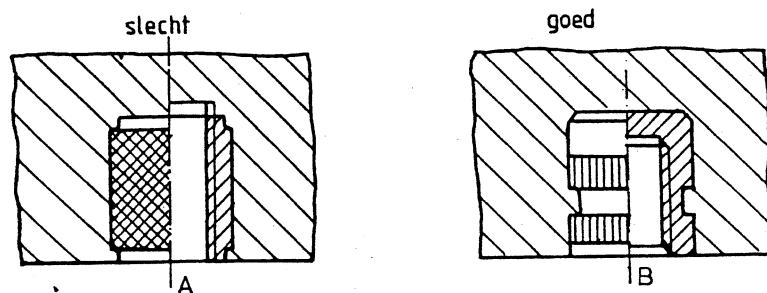
- veelvuldige montage en demontage van onderdelen met schroeven en moeren
- verminderen van slijtage
- opnemen en doorvoeren van puntlasten
- verkleinen van toleranties
- verkleinen van de thermische uitzetting
- montage

Voorbeelden



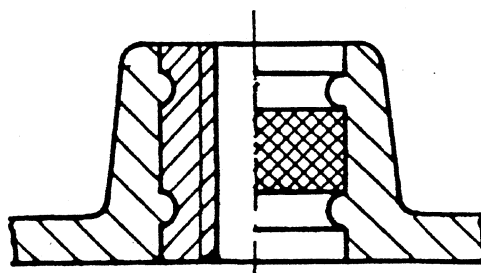
figuur 4.66 Inserts voor kunststoffen.

In figuur 4.66 zijn verschillende inserts getekend die in kunststoffen kunnen worden toegepast. Men moet zich steeds afvragen of het goedkoper is de inserts achteraf in het product te monteren in plaats van mee in te spuiten.



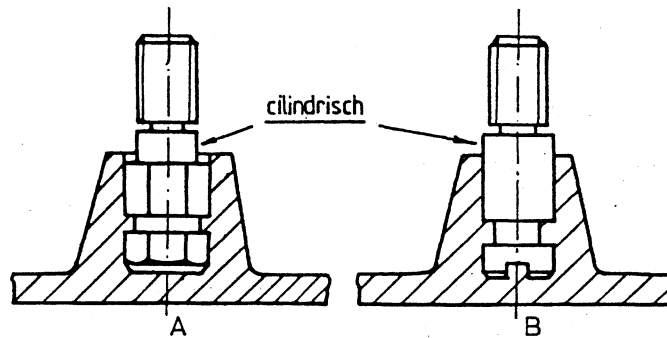
figuur 4.67 Open en gesloten insert.

Open inserts zijn goedkoper dan de aan één einde gesloten inserts. De moer van figuur 4.67 A moet men op een draadeinde draaien anders loopt de draad vol met kunststof. Deze draadeinden moet men automatisch in de matrijs of handmatig uit de insert draaien. De insert van B kunnen we op een passende stift schuiven. Om de insert tijdens de injectie van de kunststof rechtop te houden en niet te laten verschuiven moet de tolerantie op de binnendiameter van de draad van de insert kleiner zijn dan 0.05 mm.



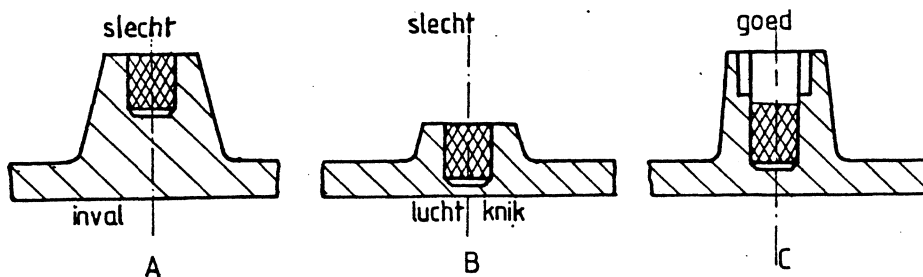
figuur 4.68 Open insert met gelijke hoogte als de wand.

Open inserts kunnen worden toegepast als de hoogte gelijk is aan de wanddikte van het product (figuur 4.68). De tolerantie op de lengte van de insert moet kleiner zijn dan 0.05 mm, anders spuit men grondstof over de insert in de draad of de insert stuikt op.



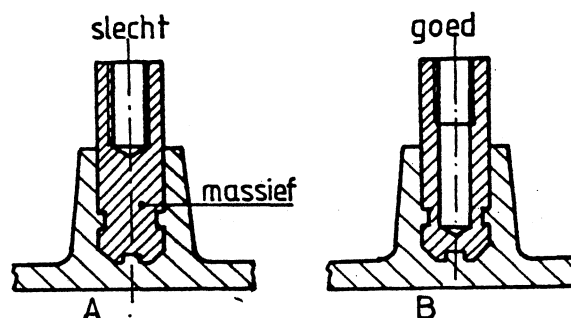
figuur 4.69 Inserts met uitwendige schroefdraad.

In figuur 4.69 zijn inserts getekend met uitwendige schroefdraad. Het zeskant van A dient om verdraaien in de kunststof tegen te gaan. Bij de insert van B gebeurt het tegengaan van het verdraaien door een zaagsnede op de kop. Zorg er voor dat het deel van de insert dat in de matrijs zit en dient voor de afdichting cilindrisch is. De matrijs kan dan weer iets eenvoudiger gemaakt worden.



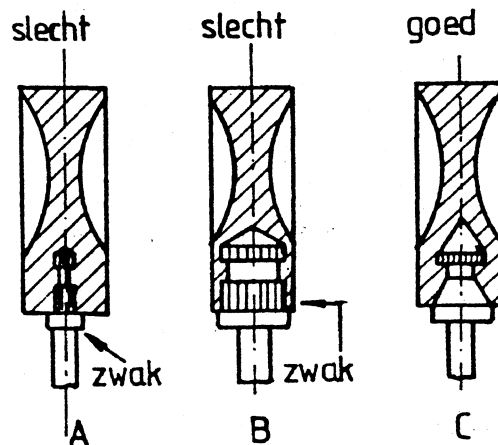
figuur 4.70 Afstand tussen insert en wand.

De afstand van een insert tot een zichtbaar oppervlak is van belang willen we geen aftekening krijgen op dat vlak. De insert van figuur 4.70 A is te ver van de wand ingespoten, er ontstaat onder de moer inval. De insert van B zit te dicht op de wand. Er ontstaan ter plaatse van de insert vloeilijnen en luchtinsluiting en het vakje onder de insert knikt uit. De oplossing van C is het beste.



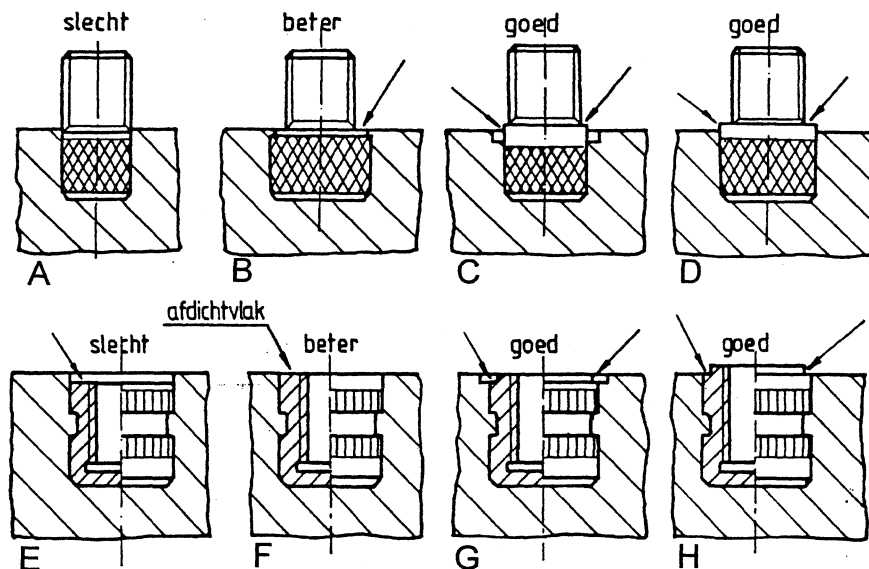
figuur 4.71 Massieve en holle insert.

Gebruik als het mogelijk is geen massieve inserts, deze blijven door het omhullende kunststof veel te lang warm. De insert van figuur 4.71 B is beter dan de insert van A.



figuur 4.72 Sterkte van insert en omringend materiaal.

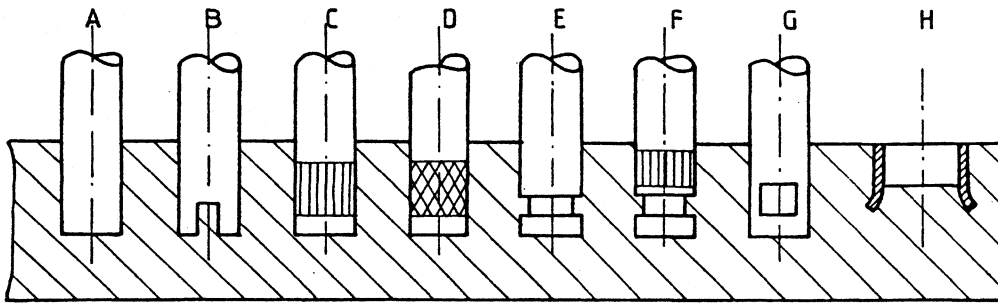
Inserts moeten sterk genoeg zijn om krachten over te brengen en er mag geen breuk optreden. (figuur 4.72 A). Er moet voldoende kunststof wand aanwezig zijn om scheuren te voorkomen. (B). De oplossing volgens C is goed.



figuur 4.73 Afdichten van inserts om vollopen te voorkomen.

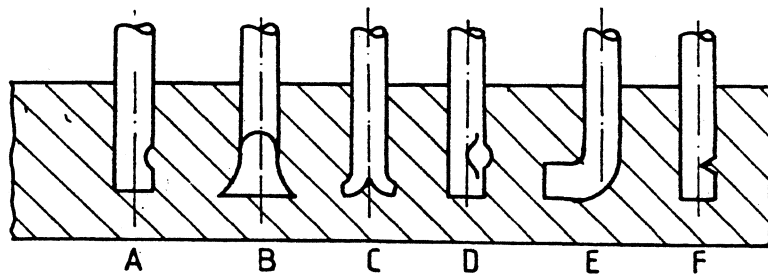
Inserts met schroefdraad moeten voldoende afgedicht worden om het binnendringen van grondstof in de draad te voorkomen. De insert van figuur 4.73 A is een slechte constructie, de kunststof kan direct in de draad vloeien. In E is wel een afdichting aanwezig, maar het materiaal stroomt in een richting evenwijdig aan de afdichting. De insert kan iets scheef gedrukt worden, waarna de draad vol loopt met kunststof. De constructies van de figuren B en F zijn al beter, de afdichting van de laatste constructie ligt in het matrijsvlak. De inserts

van C en D en van G en H zijn veel beter, deze hebben twee afdichtvlakken loodrecht op elkaar.



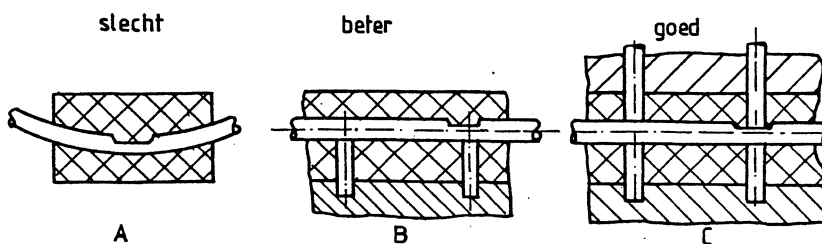
figuur 4.74 Verankering van inserts.

Inserts moeten verankerd zijn in de kunststof om krachten over te kunnen brengen. Zijn de krachten en de momenten klein dan kunnen we gladde inserts toepassen. De krachtsoverbrenging gebeurt door de krimpkracht en de wrijving tussen kunststof en insert (figuur 4.74 A). Afhankelijk van de grootte en de aard van de belasting kan men de aandacht vestigen op de uittrekkraft op het over te brengen torsiemoment. (B tot en met G). Een bus kan men verankeren zoals in H is aangegeven.



figuur 4.75 Draadvormige inserts.

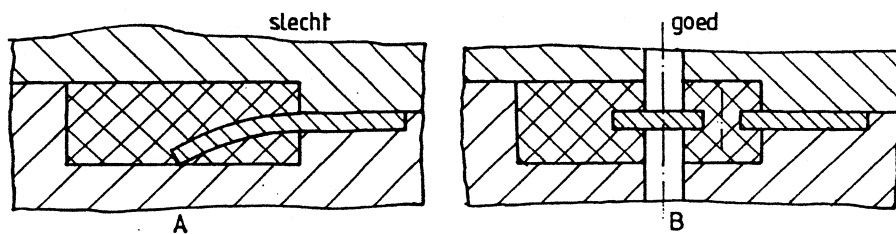
Draadvormige inserts kunnen volgens de constructies in figuur 4.75 verankerd worden in de kunststof. Dit soort inserts kan alleen toegepast worden met goed vloeiende kunststoffen en bij lage spuitdrukken.



figuur 4.76 Positie fixeren van draad-inserts.

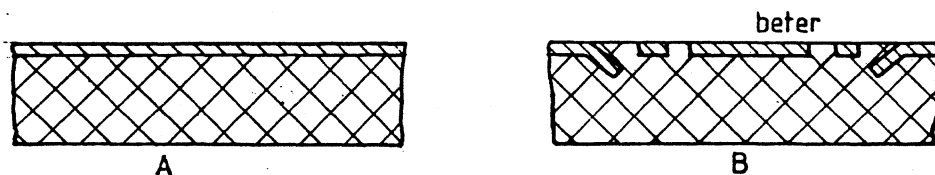
Bij slecht vloeiende materialen en bij hoge spuitdrukken buigen de draad-inserts om. Dunne inserts die in de langsrichting van een product liggen worden door de kunststof weggedrukt (figuur 4.76 A). Als we de insert eenzijdig ondersteunen met matrijsstiften kan een

verbetering optreden. De beste oplossing is dat we de insert klemmen tussen matrijspennen (C). In het product blijven gaatjes aanwezig waar de ondersteuningsstiften hebben gezeten. Ook deze inserts moeten van een verankering voorzien zijn om uittrekken uit de kunststof te voorkomen.



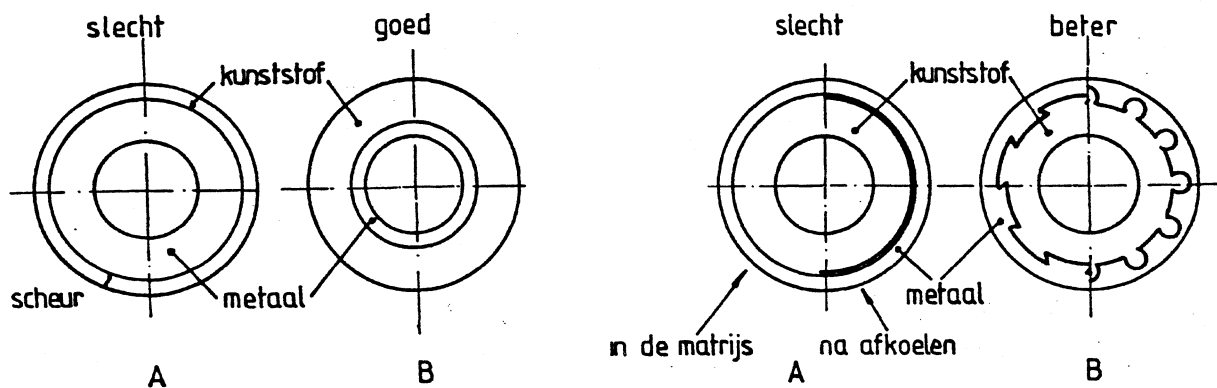
figuur 4.77 Verankeren van plaatvormige inserts.

Bij plaatvormige inserts gebeurt het verankeren het meest door gaatjes in de plaat te boren. Plaatvormige inserts moeten ook in de matrijs door stiften ondersteund worden (figuur 4.77 A en B).



figuur 4.78 Hechting van inserts op het oppervlak.

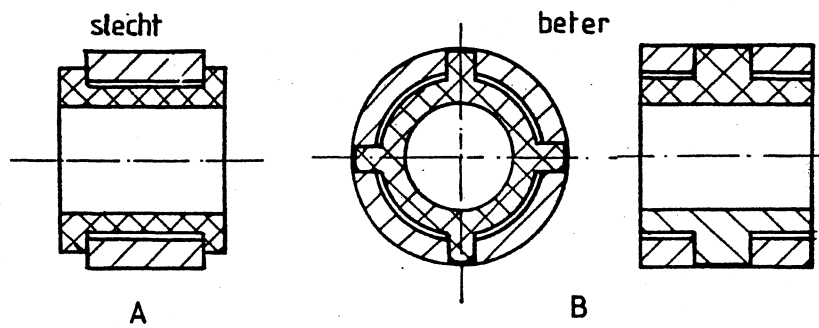
Komt de insert op het oppervlak te zitten dan moet men nagaan of de hechting voldoende is tussen insert en kunststof (figuur 4.78 A). Met dikke inserts kan men problemen krijgen met kromtrekken van het complete product. Als de insert heel dun is blijft deze door de krimp van de kunststof niet vlak. De insert moet nu van verankeringen voorzien worden (B).



figuur 4.79 Metalen bussen in of om kunststof.

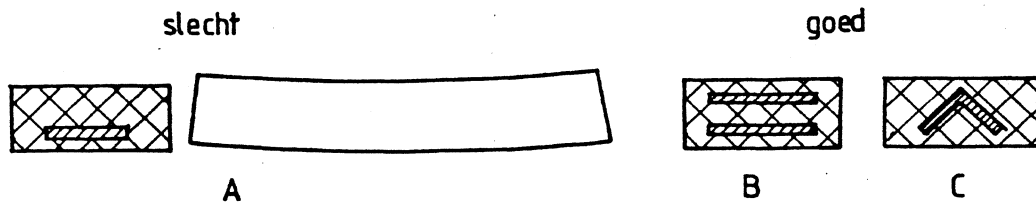
Zorg dat bij het omspuiten van metalen bussen voldoende kunststof aanwezig is om scheuren van de kunststof te voorkomen (figuur 4.79 links). De vloeinaadsterkte speelt een belangrijke rol bij de scheurvorming. Als we kunststof in een metalen bus spuiten krimpt de kunststof los

van de wand van de bus (rechts). Om dit te voorkomen maakt men verankeringen in de metalen bus. Het nadeel van deze constructie is dat de kunststof onder blijvende rek staat.



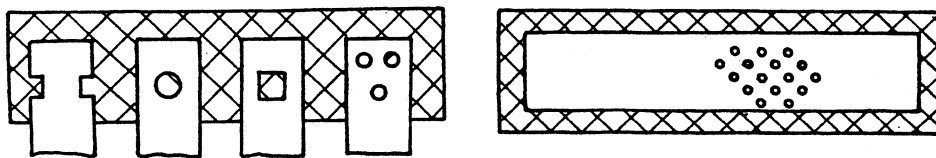
figuur 4.80 Verankering van kunststof onderdeel in een metalen bus.

Spuit men de kunststof in een metalen bus volgens figuur 4.80 A dan komt de cilinder los van de metalen bus, in de lengterichting krimpt de kunststof vast om de bus. De kunststof zal gaan vervormen. Een goede maar ook dure oplossing is weergegeven in de constructie van B.



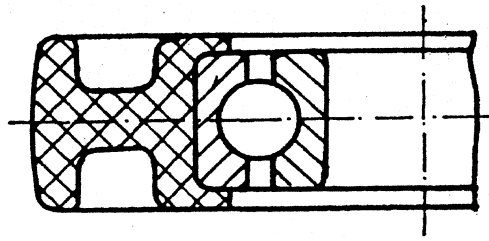
figuur 4.81 Lange inserts.

Lange inserts die in de lengterichting van het product aangebracht worden, kunnen niet willekeurig in de doorsnede gezet worden. Zit het zwaartepunt van de insert buiten het zwaartepunt van de kunststof doorsnede, dan zal door krimp van de kunststof het product volkomen kromtrekken (figuur 4.81 A). Het zwaartepunt van de kunststofdoorsnede en dat van de metaaldorsnede moeten samenvallen (B).



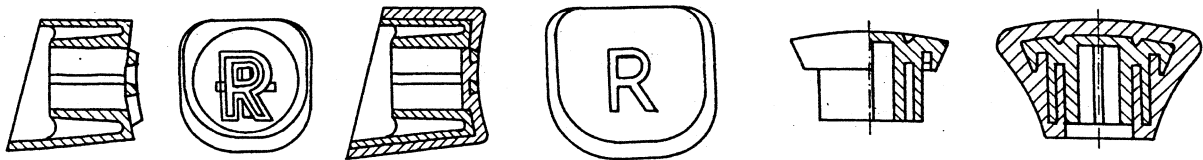
figuur 4.82 Plaatvormige inserts.

Plaatvormige inserts moeten goed verankerd worden in kunststof om uittrekken onder belasting te voorkomen (figuur 4.82).



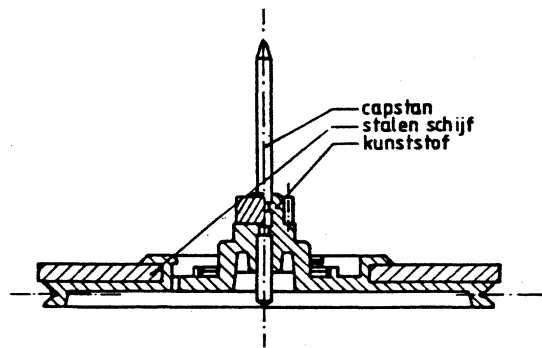
figuur 4.83 Kogellager als insert.

Kogellagers kunnen als insert gebruikt worden om zo doende dit onderdeel van een zachte band te voorzien (figuur 4.83).



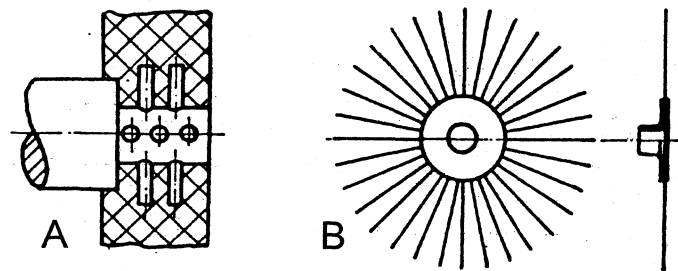
figuur 4.84 Kunststof insert in kunststof.

Het tweekleuren- of tweematerialenspuiten van toetsen en andere onderdelen is ook een vorm van inserttechniek (figuur 4.84). Een dergelijke techniek wordt ook toegepast bij de vervaardiging van autoachterlichten.



figuur 4.85 Vliegwiel.

Het vliegwiel in figuur 4.85 bestaat uit een metalen as, een metalen schijf en een kunststof naaf. De schijf en de as worden via de kunststof aan elkaar verbonden, waarbij tevens een tandwiel wordt gevormd.



figuur 4.86 Inserts in PUR.

In figuur 4.86 A wordt een as vastgeschuimd aan een onderdeel uit PUR. Om voldoende moment over te brengen wordt de as van uitstekende pennen voorzien. Inserts zoals moeren, bussen en lagers kan men voorzien van aangelast staaldraad met een diameter van 0.6 mm om een krachtsinleiding over een groter gebied te verkrijgen (B).

Voor het vergroten van de stijfheid van constructies uit PUR wordt veelvuldig gebruik gemaakt van inserts van hout of van metaal

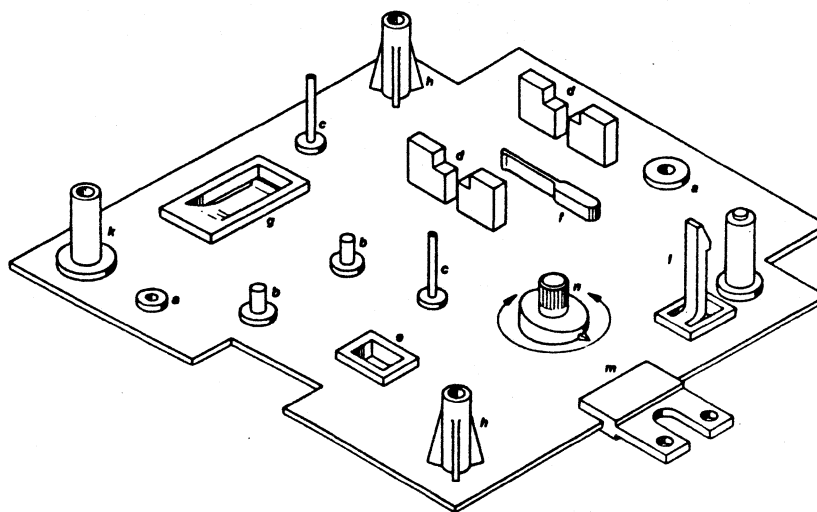
4.16 Outserttechniek

Outserttechniek is het spuitgieten van functie-elementen op een drager die meestal van staalplaat is gemaakt. Deze methode wordt uitgedragen door de firma Hoechst. De drager wordt in de matrijs bevestigd op 2 ronde pennen, de drager is voorzien van een cilindrisch gat en van een slobgat. De holten die de elementen vormen spuit men vol met kunststof alsmede de uitsparingen in de drager; de gebruikte kunststof is meestal POM.

De voordelen van deze methode zijn:

- verschillende functie-elementen worden tegelijk gespoten en bevestigd op de drager
- de tolerantie op de afstand tussen de elementen is afhankelijk van de betreffende matrijsmaat en niet van de kunststof
- bij temperatuurvariaties wordt de maatverandering tussen de functie-elementen bepaald door de staalplaat en is veel kleiner dan bij kunststof
- grotere stijfheid bij kleine inbouwhoogte

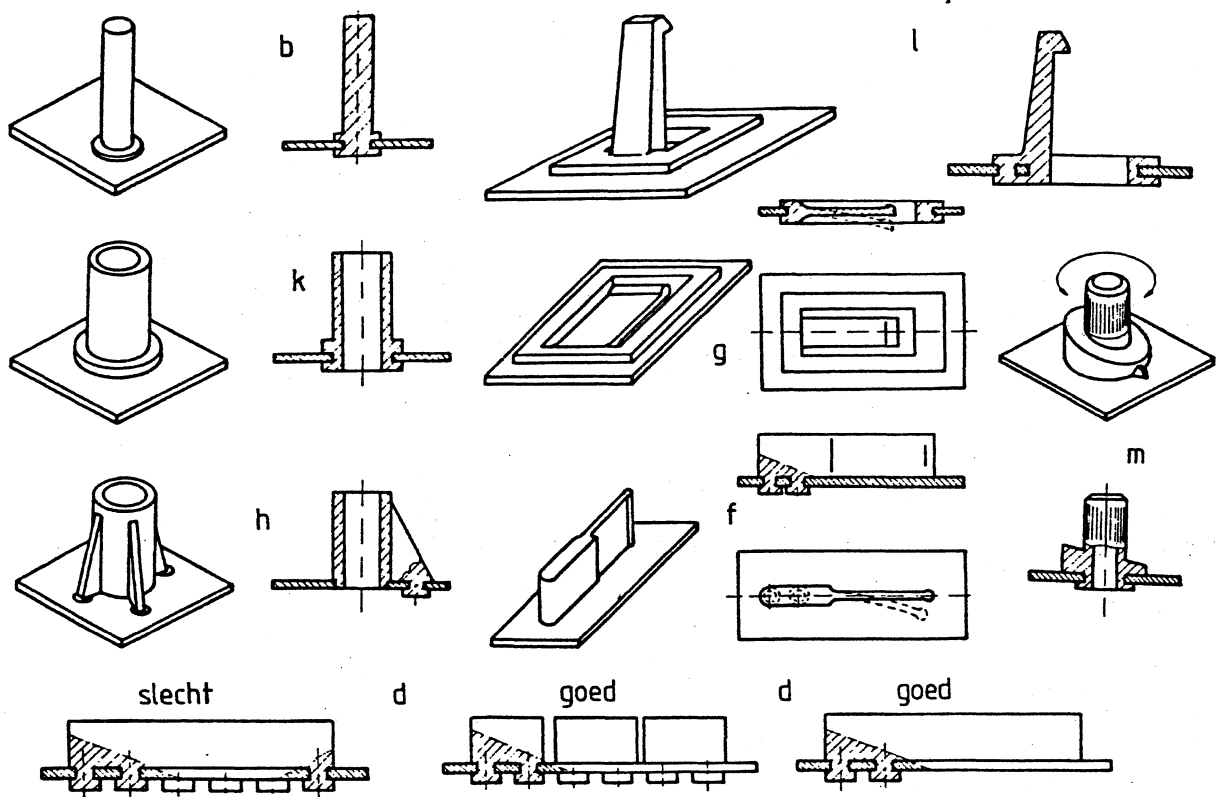
Voorbeelden



FUNKTIE-ELEMENTEN

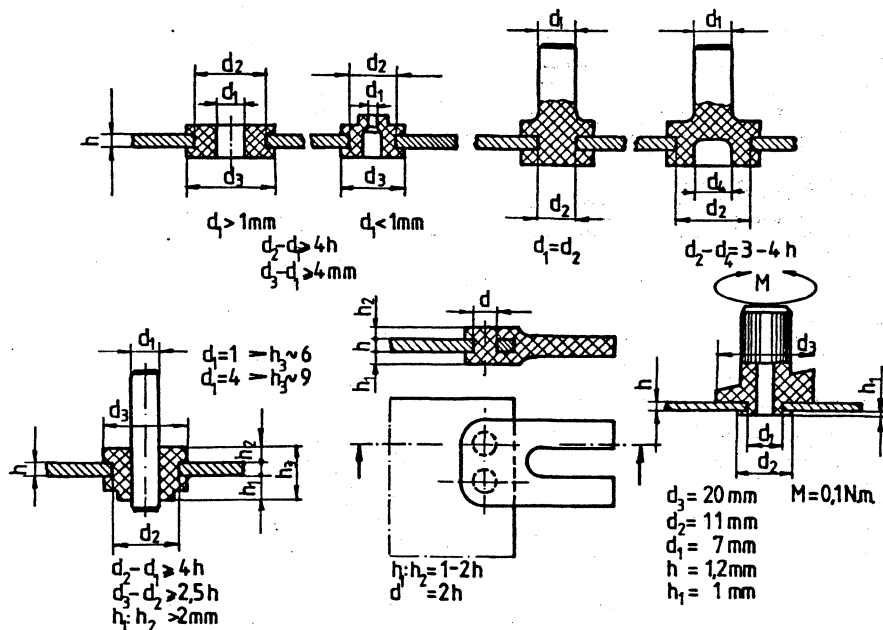
- a. Lagere
- b. Kunststof as
- c. Stalen as in kunststofring geperst
- d. Geleiding
- e. Geleiding
- f. Veer
- g. Veer
- h. Nok
- k. Nok met flens
- l. Klinkverbinding
- m. Functie-element buiten de drager
- n. Draaibaar functie-element

figuur 4.87 Een aantal functie-elementen op een metalen plaat.



figuur 4.88 Bevestiging van enkele functie-elementen.

In figuur 4.87 zijn een aantal functie-elementen weergegeven. In figuur 4.88 zijn hiervan de bevestigingsmethodes weergegeven. Lange elementen mogen niet over de volle lengte vastgezet worden, door de krimp van de kunststof kunnen de bevestigingspunten afbreken. Het element moet uit delen opgebouwd worden of men moet het met enkele bij elkaar gelegen bevestigingspunten vastzetten (D).



figuur 4.89 Afmetingen van functieelementen.

In figuur 4.89 zijn van enkele functie-elementen de afmetingen van de bevestigingspunten op de drager weergegeven. De tolerantie op de dikte h van de drager voor platen tot 1 mm is ± 0.03 mm en voor platen tot 1.5 mm dikte is de tolerantie ± 0.04 mm.

4.17 Scharnieren

Als men over scharnierconstructies bij kunststoffen spreekt, wordt meestal het filmscharnier bedoeld. Het filmscharnier verbindt twee kunststof delen aan elkaar via een zeer dunne wand. Bij de vormgeving moet men er op letten dat de stroming van het vloeibare materiaal in het scharnier zodanig is dat er een uitgesproken moleculaire oriëntatie ontstaat die de buigwielsterkte doet toenemen.

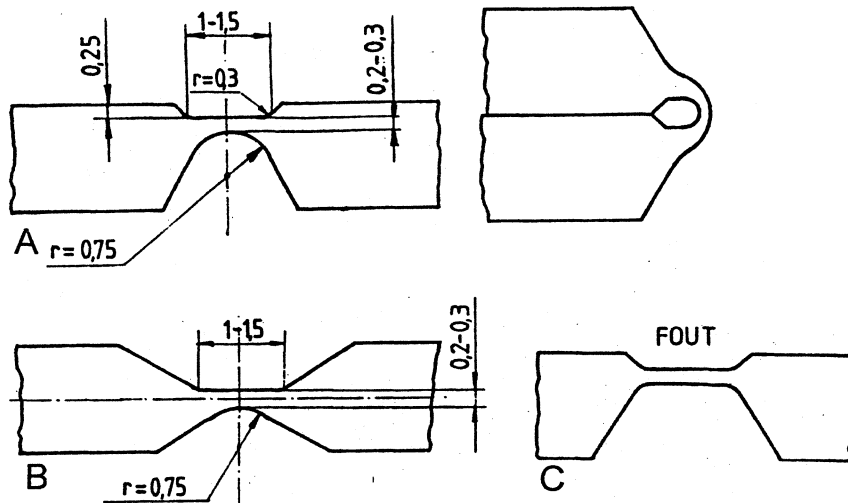
De oriëntatie van het materiaal in het scharnier neemt nog verder toe door het scharnier na het uitnemen van het product uit de matrijs enkele malen heen en weer te bewegen. Het scharnier kan in deze toestand in PP gespoten miljoenen wisselingen verdragen.

De filmscharnieren kunnen ook uitgevoerd worden in PA, POM en zelfs in amorfe materialen. Als het scharnier gemaakt is van een amorf materiaal, kan het maar eenmalig gebogen worden. Daarna treedt breuk van het scharnier op. Dit soort scharnieren wordt toegepast om ingewikkelde matrijsconstructies te vermijden of om montage eenvoudiger te maken. Er kunnen problemen optreden bij de fabricage van filmscharnieren omdat het tweede product gevuld moet worden door het scharnier.

Bij ongelijke wanddikte van het product kan inval optreden, die niet meer weg te werken is. Als men zou besluiten het product aan weerszijden van het scharnier aan te spuiten, moet men er rekening mee houden dat de vloeinaad over het scharnier loopt.

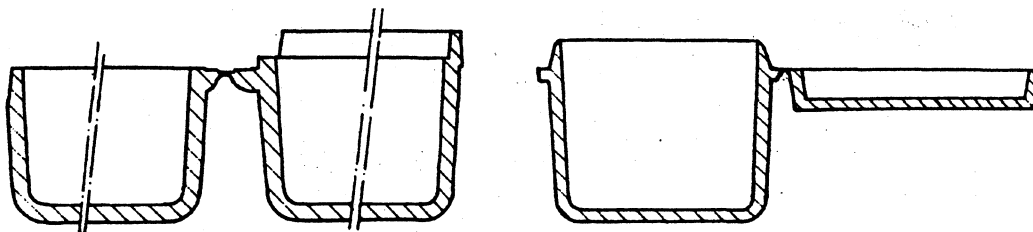
Het aantal bewegingswisselingen dat het scharnier in dat geval kan verdragen loopt sterk terug.

Voorbeelden



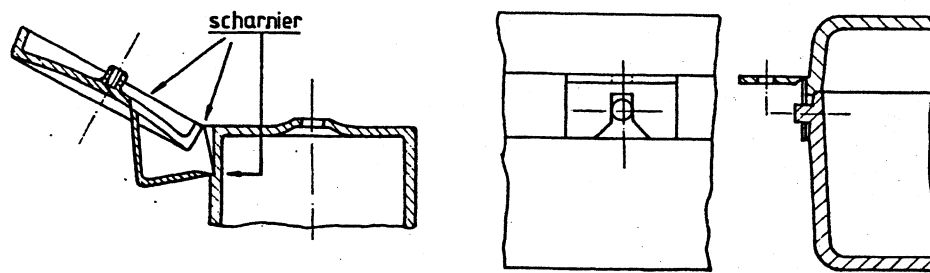
figuur 4.90 Bemating van een filmscharnier.

In figuur 4.90 A zijn de functionele maten van een filmscharnier in PP weergegeven. Dit filmscharnier wordt gebruikt voor bewegingen van 0° tot 180° . Als de beweging bijvoorbeeld loopt van -90° tot $+90^\circ$, plaatst men het scharnier in het midden van de plaat of de wand (B). Het filmscharnier is aan één zijde vlak en aan de andere zijde cilindrisch uitgevoerd om de scharnierbeweging gedefinieerd in het midden van de verdunning te laten plaatsvinden. Maakt men de beide zijden vlak, zoals in C is getekend, dan kan de scharnierwerking in elk punt van de verdunning plaatsvinden.



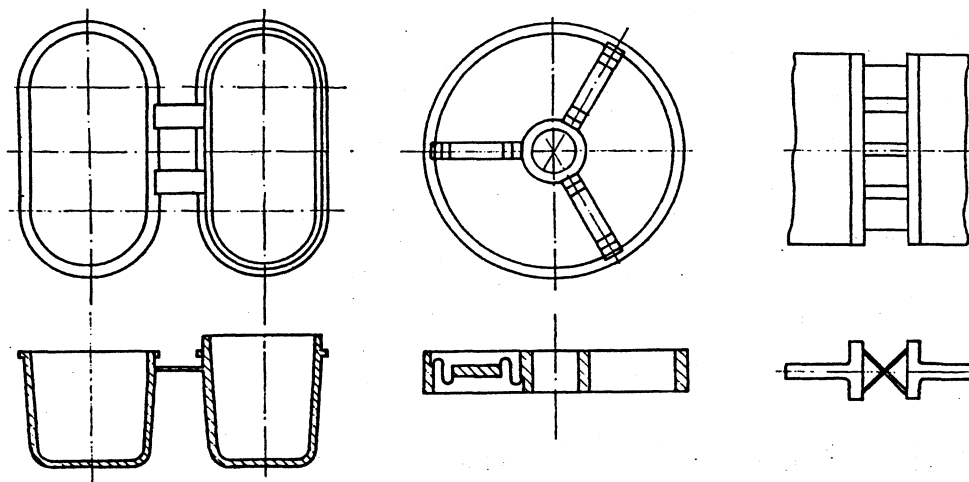
figuur 4.91 Doos-deksel verbinding met filmscharnier.

In figuur 4.91 zijn toepassingen van een doos-deksel constructie weergegeven. De afmetingen van de scharnieren zijn voor bewegingen van 0° tot 180° . Links is de toeloopt naar het scharnier vanuit de doos en het deksel lang uitgevoerd. Men doet dit bij een hoge doos en een hoog deksel om de matrijswand tussen doos en deksel zo dik mogelijk te maken. Is het deksel minder hoog dan kan men de matrijswand tussen de doos en het deksel dunner maken.



figuur 4.92 Verende tweestandenafsluiter en scharnierende sluiting.

Links in figuur 4.92 is een verende tweestandenafsluiter getekend. De constructie is voorzien van drie filmscharnieren en een verend element. In geopende en in gesloten toestand is de veer onbelast. In alle tussenliggende standen is geen evenwicht mogelijk, het deksel gaat verder open of het deksel sluit het gat af. Rechts dient het scharnierend element om een koffer af te sluiten. Door de lip met het gat naar beneden te drukken over de pen van het onderste deel wordt de koffer afgesloten.

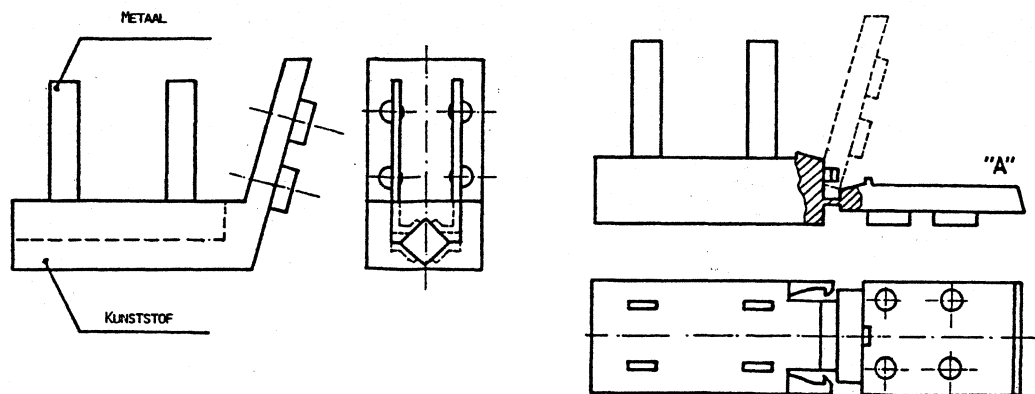


figuur 4.93 Scharnier, verende ophanging en kruisscharnier.

De constructie links in figuur 4.93 is voorzien van een lange dunne strip die dient als een soort scharnier. Bij het sluiten van het dekseltje op de doos vormt de strip een halve cirkel. De dikte van een dergelijk scharnier is maximaal 1 mm; de toegepaste materialen zijn PP, PE en PA.

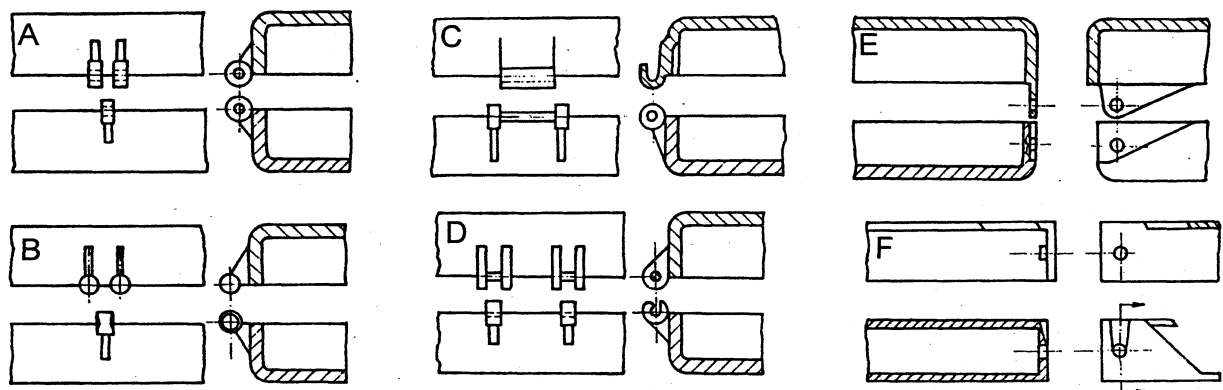
Midden is een verende ophanging getekend. De functionele eis is dat de binnencilinder met een klein blijvende kracht over ± 1 mm bewogen kan worden. Als aan beide zijden van de drie verbindingbalken een scharnier volgens fig. 15.1 was aangebracht, neemt de kracht zeer snel toe bij het groter worden van de uitwijking. De dikte van de film is 0.3 mm, het materiaal is een POM.

Rechts is een kruisveerlager of kruisveerscharnier weergegeven. Het scharnier heeft vier veren die symmetrisch ten opzichte van het midden zijn geplaatst. De toegepaste materialen zijn PP, POM en PA. De toegepaste dikte van de veerelementen is $0.2 \square 0.3$ mm, bij een veerlengte van 10 mm.



figuur 4.94

Rechts in figuur 4.94 is een geheel andere toepassing van een filmscharnier weergegeven. Om de metalen van het product links moet koperdraad gewikkeld worden en in het schuin oplopende deel plaatst men vier pennen. Er is weinig ruimte om de bewegingen met de wikkelarm uit te voeren. Ook het monteren van de pennen levert problemen op. Het product wordt nu uitgevoerd met een filmscharnier waardoor het in een plat vlak gespuitsgiet kan worden. Na de montagehandelingen wordt het geheel in de juiste stand gebogen en gefixeerd. Het toegepaste materiaal is een zelfdovend gemodificeerd PPO.



figuur 4.95 Diverse scharnierconstructies.

Voor amorfe materialen kan men de meer conventionele scharnierconstructie toepassen, als het scharnier meerdere malen moet kunnen bewegen. In figuur 4.95 zijn enkele mogelijke constructies weergegeven. In D is een scharnierconstructie met een klikverbinding uitgevoerd. In fig. C is ongeveer een zelfde scharnier getekend maar dan zonder klikverbinding. In F is de scharnierverbinding van een audiocassettedoosje getekend.

4.18 Literatuur

- 1 B.L. ten Horn, Vormschepping en Vormvermenigvuldiging in de Mechanische Industrie, Uitgave: G.W. den Boer Middelburg 1967.

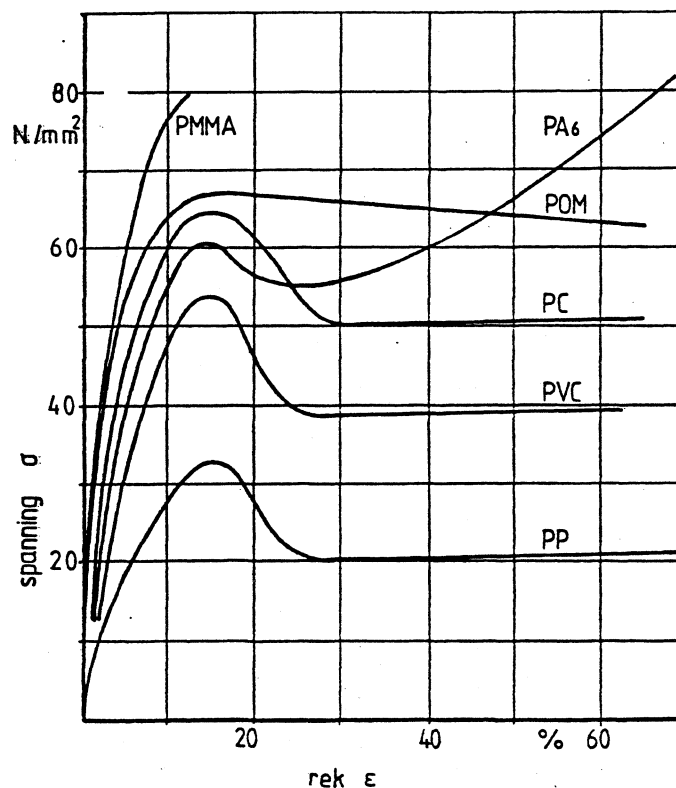
-
- 2 Ronald D. Beck
Plastic product design
Van Nostrand Reinhold Company
 - 3 Klepek George
Construieren mit PUR-Integral-Hartschaumstoff
Carl Hanser Verlag
 - 4 Hoechst
Outsert-Technik mit Hostaform
 - 5 V.D.I. 2001
Gestaltung von Pressteilen aus hartbaren Kunststoffen
 - 6 V.D.I. 2006
Gestaltung von Spritzgussteilen aus thermoplastischen Kunststoffen
 - 7 V.D.I. 2012
Gestalten von Werkstuecken aus GFK
 - 8 Walter E. Becker
Reaction Injection Molding
Van Nostrand Reinhold Company
 - 9 Edward Miller
Plastics products design handbook
Part A, Materials and Components
Part B, Processes and deslgn for processes
Marcel Dekker Inc
New York and Basel
 - 10 Koninklijke Vlaamse Ingenieursvereniging
Vormgevingstechnieken
Spuitgieten van metalen
 - 11 Geyer, Gemmer, Strelow
Qualitätsformteile aus thermoplastischen Kunststoffen
V.D.I. Verlag

Hoofdstuk 5. Sterkte- en stijfheidsaspecten van kunststoffen

5.1 Inleiding

Dit hoofdstuk introduceert de typische sterkte en stijfheidsaspecten van kunststoffen waar rekening mee gehouden moet worden bij het ontwerpen van een kunststof product. Typisch voor kunststoffen is dat hun gedrag afhankelijk is van de tijd en de temperatuur. Zo zal behalve de grootte van een belasting ook de duur van deze belasting van invloed zijn op de sterkte en de vervorming van een product.

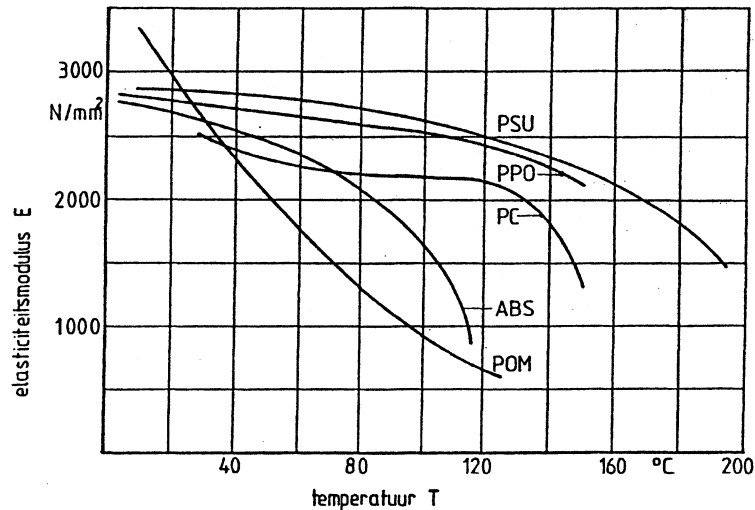
De sterkte- en stijfheidseigenschappen staan vermeld in de catalogi van de grondstofleveranciers. Ze zijn verkregen door middel van standaard proeven die in DIN en ASTM normen zijn vastgelegd. Deze genormeerde proeven zijn voornamelijk bedoeld als kwaliteitscontrole van de materialen en worden aan speciaal vervaardigde proefstaven uitgevoerd. De waarden die in de brochures staan vermeld zijn vaak aan de gunstige kant, omdat de materiaaloriëntatie in de gebruikte proefstaaf meestal gunstiger is dan die in een constructie. Daar wordt de materiaaloriëntatie beïnvloed door de stroming in de matrijs, de vloeinaden en het stolgedrag.



figuur 5.1 Spanning-rek krommen van een aantal kunststoffen bij 20°C (60 mm/min).

Kunststoffen verschillen sterk van metalen voor wat betreft hun sterkte en vervormingsgedrag. De elasticiteitsmodulus van staal is circa 70 maal die van een onversterkte kunststof, terwijl de toelaatbare spanningen ongeveer een factor 10 lager zijn dan die van metalen (figuur 5.1). Bovendien is het gedrag van kunststoffen onder normale omstandigheden afhankelijk van

- de grootte van de belasting
- de temperatuur (zie figuur 5.2)
- de belastingsduur



figuur 5.2 Invloed van de temperatuur op de elasticiteitsmodulus.

5.2 Visco-elastisch gedrag

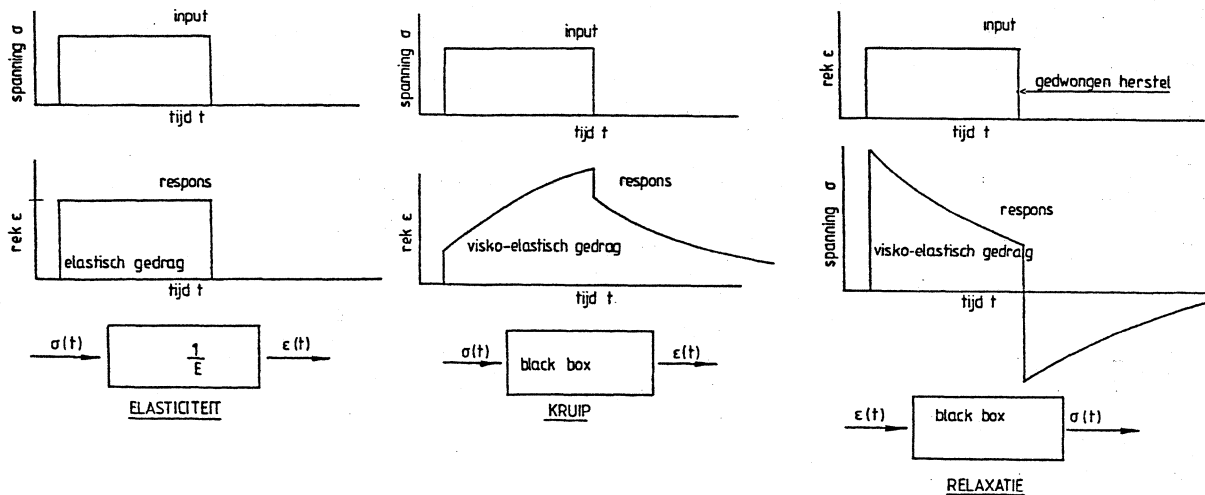
Als men een metaal belast beneden de vloeigrens treedt alleen elastische vervorming op. Bij het wegnemen van de belasting verdwijnt de vervorming onmiddellijk (figuur 5.3 links). Verhoogt men de belasting tot boven de vloeigrens dan zal bij wegnemen van de belasting een blijvende vervorming optreden die, hoelang men ook wacht, niet meer verdwijnt. Kunststoffen daarentegen zijn visco-elastische materialen. Onder visco-elastische materialen verstaat men materialen met een tijdsafhankelijke elasticiteit die berust op een vertraagde evenwichtstoestand van de moleculen.

In de visco-elastische theorie maakt men onderscheid tussen de spanning als oorzaak met de vervorming als tijdsafhankelijk gevolg en de vervorming als oorzaak met de spanning als tijdsafhankelijk gevolg. Het eerste verschijnsel noemen we kruip of retardatie het tweede verschijnsel is bekend als spanningsrelaxatie. In figuur 5.3 is schematisch aangegeven hoe bij verschillende belastingsgevallen, input genoemd, het visco-elastisch gedrag in de tijd verloopt, de zogenaamde respons. De in figuur 5.3 aangegeven verschijnselen zijn als volgt gedefinieerd:

Kruip

Het vervormen van een product in de tijd onder een constante spanningsbelasting. Dit proces van voortschrijdende vervorming kan doorgaan tot dat zich een quasi-evenwicht instelt, of tot breuk optreedt.

leerplaatje



figuur 5.3 Elastisch gedrag vs. visco-elastisch gedrag, waarbij kruip en relaxatie optreedt.

Spanningsrelaxatie

Het in de tijd afnemen van de spanningen in een product onder een constante rekbelasting. Dit houdt in dat de reactiekrachten evenredig kleiner worden en dat de veerkracht van een veer waarvan het uiteinde een constante verplaatsing krijgt in de tijd afneemt.

Herstel

Het na het wegnemen van de spannings- of rekbelasting in de tijd (gedeeltelijk) terugkeren naar de oorspronkelijke staat van het product.

Men kan het materiaal ook opvatten als een "black box". Bij kruip is de spanning $\sigma(t)$ de input en de rek $\epsilon(t)$ de respons ofwel output. Voor relaxatie is het juist andersom. De mechanische eigenschappen geven de relatie tussen de tijdsfuncties $\epsilon(t)$ en $\sigma(t)$ weer.

Bij metalen wordt de relatie tussen rek en spanning door twee getallen weergegeven, de elasticiteitsmodulus E en de dwarscontractiecoëfficiënt ν . Voor kunststoffen is dit niet mogelijk. Vaak wordt er wel een elasticiteitsmodulus opgegeven, maar dit is dan een benadering die geldt voor lage rekken bij een vastgestelde belastingsnelheid (korte duur).

5.3 Lineair visco-elastisch gedrag

Om constructies in kunststof toegankelijk te maken voor berekeningen voeren we de volgende veronderstellingen in.

- We nemen aan dat de materiaaleigenschappen - de relatie tussen spanning $\sigma(t)$ en vervorming $\epsilon(t)$ - in de tijd niet veranderen.
- Verder nemen we aan dat de materiaaleigenschappen - de relatie tussen $\sigma(t)$ en $\epsilon(t)$ - niet beïnvloed worden door het deformatieproces.

We spreken nu van lineair visco-elastisch gedrag. Voor ongevulde amorge maar ook voor ongevulde semi-kristallijne kunststoffen geldt een breed lineair visco-elastisch gebied, de grens ligt tussen een rek ε van 0,5 tot 1 %.

Voor een *lineair* visco-elastisch materiaal kunnen we de relatie tussen de spanning en de rek als volgt beschrijven:

Voor kruip geldt: $\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma$

$D(t)$ wordt hierin de kruipcompliantie genoemd. Bij een vaste aangebrachte spanning σ neemt de rek in de tijd toe, $\varepsilon(t)$. De relatie ertussen, de kruipcompliantie, is dus ook een functie van de tijd. Als de aangebrachte spanning twee maal zo groot is zal ook de rek op elk tijdstip tweemaal zo groot zijn. Dit is de essentie van *lineair* visco-elastisch gedrag.

Voor relaxatie geldt: $\sigma(t) = E(t) \cdot \varepsilon$

$E(t)$ wordt hierin de relaxatiemodulus genoemd, welke dus ook weer een functie is van de tijd. Bij een vaste opgelegde rek zal de spanning in de tijd afnemen en bij een tweemaal zo grote rek zal ook de spanning twee maal zo groot zijn.

Er geldt niet dat de kruipcompliantie gelijk is aan één gedeeld door de relaxatiemodulus! Er is echter wel een eenduidige relatie tussen de twee, d.w.z. als de één bekend is ligt de ander vast. Deze kan numeriek of met behulp van Laplace transformatie bepaald worden.

De vraag is nu wat er gebeurt als de opgelegde spanning (kruip) of de opgelegde rek (relaxatie) in de loop van de tijd verandert. In een elastisch materiaal - b.v. staal - ontstaat bij een verdubbeling van de spanning ook een verdubbeling van de rek. Bij een visco-elastisch materiaal speelt ook de tijd van de belasting een grote rol. Om nu het effect te beschrijven van een opgelegde spanning of rek die in de loop van de tijd verandert, mogen we in geval van *lineair* visco-elastisch gedrag gebruik maken van superpositie.

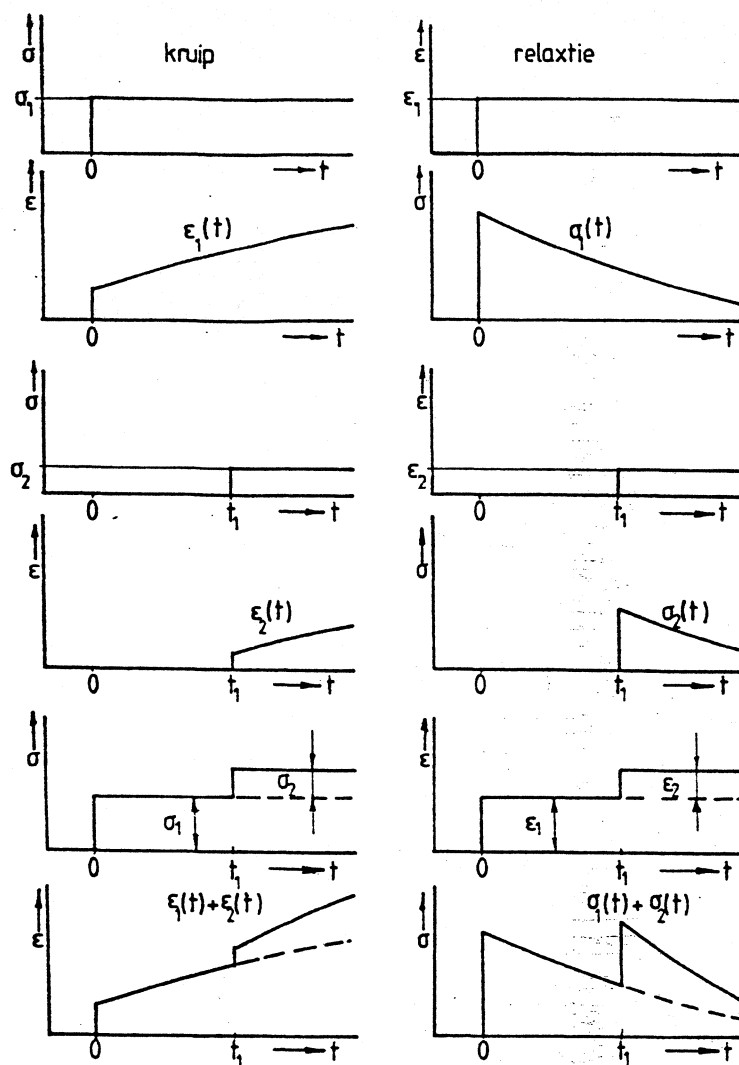
Superpositie

Het begrip superpositie wordt uitgelegd aan de hand van figuur 5.4. Als op een tijdstip $t=0$ een belasting σ_1 wordt aangebracht in een constructie zal de vervorming overeen komen met de kruip die bij de belasting hoort, deze vervorming is $\varepsilon_1(t)$. Op het tijdstip t_1 wordt op dezelfde onbelaste constructie een belasting σ_2 aangebracht, de vervorming is nu $\varepsilon_2(t)$. Op grond van het feit dat het deformatieproces de relatie $\sigma(t)$ - $\varepsilon(t)$ niet beïnvloedt, lineair visco-elastisch gedrag, vinden we:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) = \sigma_1 D(t) + \sigma_2 D(t - t_1) \quad (\text{figuur 5.4 links})$$

D is de kruipcompliantie, of ook wel de slapheid genoemd, welke een functie is van de tijd. De bovenstaande uitdrukking staat bekend als het superpositie beginsel van Boltzmann. Dit superpositiebeginsel heeft Boltzmann geformuleerd in 1874. Het bovenstaande geldt ook voor relaxatie (figuur 5.4 rechts).

Indien nu een willekeurig spanningsverloop in de tijd wordt aangebracht, kan dit verloop benaderd worden door een serie kleine spanningsstapjes in de tijd. In geval van lineaire visco-elasticiteit kan de rek dan worden verkregen door de respons van alle kleine stapjes bij elkaar op te tellen, dus te integreren.



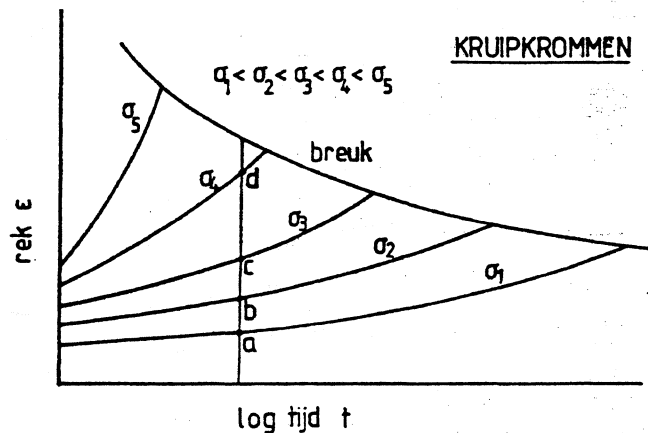
figuur 5.4 Superpositie beginsel van Boltzman.

De berekeningen in het lineaire visco-elastisch gebied kunnen ook worden uitgevoerd met behulp van Laplace en Fourier- transformaties. Na de transformatie kan de normale lineaire elasticiteitstheorie worden toegepast. Men vindt een definitieve oplossing van het probleem door terug te transformeren, men spreekt hier van het correspondentiebeginsel. Hier gaan we verder niet op in, voor de berekeningen van kunststof constructies gaan we hier uit van de zogenaamde kruipkrommen.

5.4 Kruipmetingen

Om het effect van kruip en relaxatie te kunnen voorspellen voor een product zijn meetgegevens nodig. Zowel kruip- als spanningsrelaxatie-metingen kunnen op trek of op buiging worden uitgevoerd. Erg belangrijk bij deze metingen is dat de temperatuur en de vochtigheid gedurende de hele meting constant wordt gehouden. Doordat de gegevens over perioden van meer dan een jaar nodig zijn vereist dit goed geconditioneerde kamers. Kunststofleveranciers en speciale instituten beschikken over deze faciliteiten. De beschikbare gegevens moeten vanwege de hoge kosten van deze metingen dan ook van deze instellingen betrokken worden. Het zelf uitvoeren van kruipproeven is daarom niet aan te raden voor het

verkrijgen van materiaolgegevens. Kruipproeven aan producten zijn soms noodzakelijk om moeilijke voorspellingen met de praktijkomstandigheden te controleren.



figuur 5.5 Kruipkrommen.

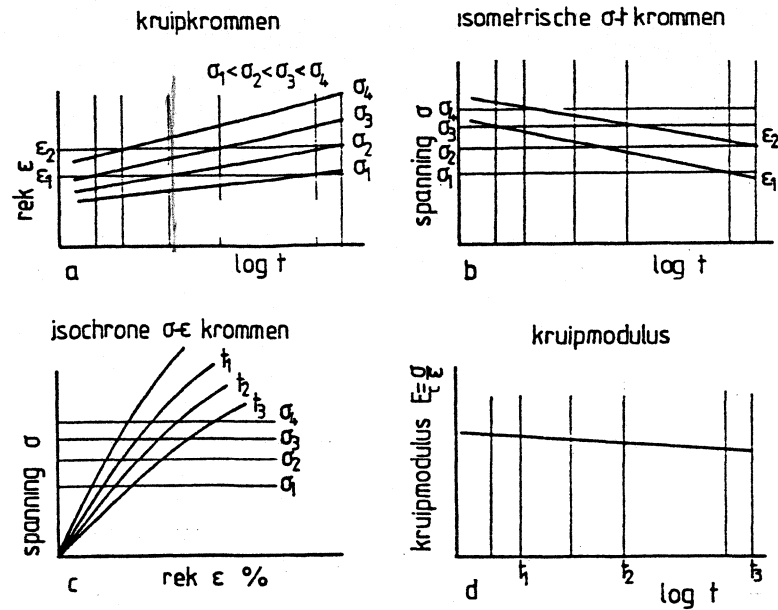
De resultaten van kruip- en spanningsrelaxatie-metingen worden grafisch gepresenteerd. De kruipkrommen worden meestal zoals in figuur 5.5 is aangegeven, weergegeven. De tijdschaal is logaritmisch terwijl de rek op een lineaire schaal wordt uitgezet. De spanning wordt als parameter in de grafische voorstelling weergegeven. Het uitzetten op bepaalde schalen heeft voordelen, zoals bijvoorbeeld de logaritmische tijdschaal, waardoor het gedrag van de kunststof na korteduur belasting beter kan worden weergegeven.

Bij het gebruik van kruipkrommen moet goed gelet worden op de volgende punten:

- trek-, druk of buigproef
- temperatuur
- vochtigheid
- medium waarin getest is
- wijze van vervaardigen van het proefstaafje.

Uit de grafiek met kruipkrommen zoals van figuur 5.5 zijn drie andere grafieken af te leiden. Dit is aangegeven in figuur 5.6. De drie grafieken die afgeleid worden uit a zijn:

- isometrische spannings-tijd-krommen die bij een bepaalde rek de spanning als functie van de tijd aangeeft (figuur 5.6b). De krommen worden gemaakt door horizontale doorsneden van de kruipkrommen in a.
- isochrone spannings-rek-krommen die voor een bepaalde tijd de spanning weergeeft als functie van de rek (figuur 5.6c). Dit is een kromme die niet rechtstreeks uit een trekproef wordt verkregen! Deze krommen worden opgebouwd uit metingen aan vele proefstaven. Deze krommen worden gemaakt door verticale doorsneden van a. Een kromme wordt isochroon genoemd, omdat het hier om een doorsnede gaat bij een bepaalde waarde van de tijd.
- kruipmodulus-tijd-kromme die de elasticiteitsmodulus weergeeft als functie van de tijd (figuur 5.6d). De kruipmodulus is de inverse van de eerder genoemde kruipcompliantie en is dus niet gelijk aan de relaxatiemodulus.



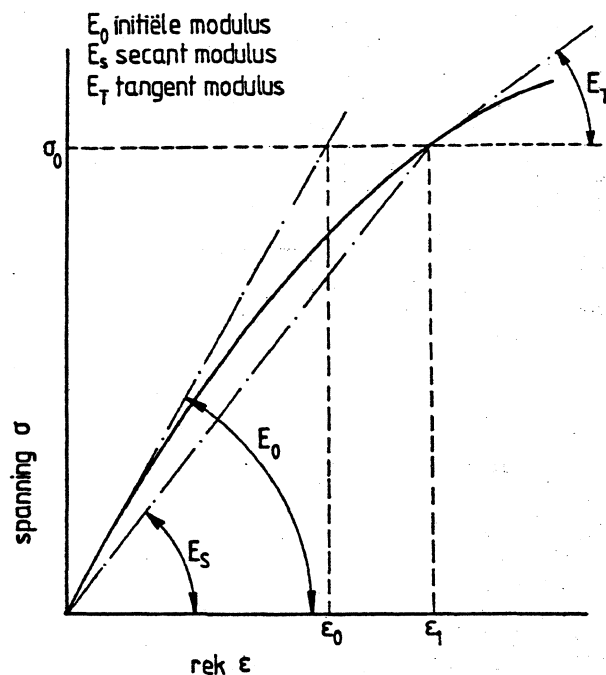
figuur 5.6 Kruipkrommen (a) en drie daaruit afgeleide krommen.

In de kruipkrommen van figuur 5.5 kan men ook het *linear* visco-elastisch gebied aangeven, de grenzen kan men schatten. Voor het linear gebied geldt

$$a : b : c = \sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$$

Of anders geschreven: $\varepsilon(t) = D(t) \cdot \sigma$

Voor hogere spanningen, bijvoorbeeld punt *d* op de kromme voor σ_4 van figuur 5.5, geldt de evenredigheid niet meer. Men spreekt dan van *niet-lineaire* visco-elasticiteit.



figuur 5.7 Moduli in de isochrone spanning-rek kromme.

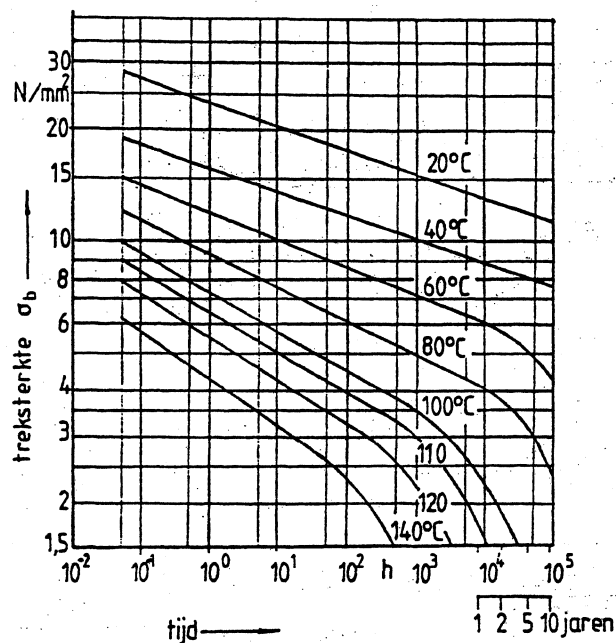
Ook in de isochrone spannings-tek-kromme kan het lineair visco-elastisch gebied aangegeven worden. Dit wordt begrensd door het rechte deel (figuur 5.7) waarvoor geldt:

$$E_t = E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

E_0 noemt men ook wel de initiële modulus. Bij semi-kristallijne materialen begint al heel snel de afwijking van de rechte lijn. Om iets meer armslag te krijgen bij het berekenen of beter gezegd bij het schatten, voeren we de secantmodulus in. De secantmodulus is feitelijk hetzelfde als de eerder genoemde kruipmodulus. We stellen voor dat we een schatting mogen uitvoeren met de lineaire theorie met een elasticiteitsmodulus E die ligt tussen E_0 en E_s , waarbij als restrictie geldt $E_s/E_0 > 0,85$

Voorbeeld

Het bepalen van de sterkte van kunststofbuizen gebeurt met behulp van barstproeven. De buis wordt belast met een bepaalde inwendige druk, men noteert de tijd waarbij de buis scheurt. De resultaten worden weergegeven zoals de breuklijn in figuur 5.5 met dit verschil dat op de verticale as de breukspanning in plaats van de rek is uitgezet en dat alleen de breuklijn wordt getekend (figuur 5.8).



figuur 5.8 Treksterkte van PP uit buisproeven.

Op de verticale as is de omtrekspanning uitgezet waarbij breuk optreedt:

$$\sigma_b = p \cdot \frac{d}{2 \cdot s}$$

- p = inwendige druk in de buis
- d = gemiddelde diameter van de buis

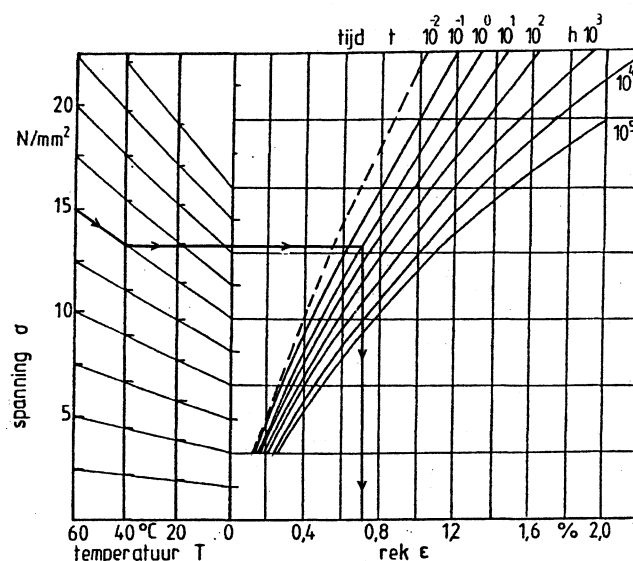
s = wanddikte van de buis

Bij een éénassige belasting zoals in figuur 5.5 verloopt de breuklijn continu naar beneden, bij de tweessige belasting van de buis gebeurt dit niet. Na een zekere tijd neemt de treksterkte ineens veel sneller af.

Het verschil in verloop geeft een verschil in breukmechanisme weer. In het linker deel treedt een vervormingsbreuk op, d.w.z. breuk treedt op na plastische vervorming, en in het rechter deel is de breuk bros. Deze wijze van presenteren van resultaten past men toe voor de materialen PE, PP en PVC die in de procesindustrie en apparatenbouw veel worden toegepast.

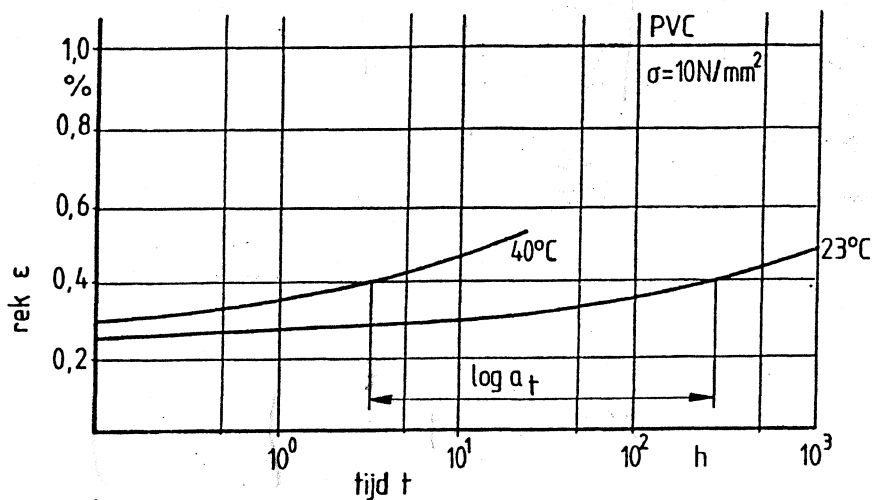
5.5 De invloed van de temperatuur

De temperatuur heeft een grote invloed op kruip en op de spanningsrelaxatie. Het is daarom noodzakelijk bij het ontwerpen van constructies waarin de temperatuur hoger is dan de kamertemperatuur de juiste kruipkromme te nemen. Bij de isochrone spannings-rek-krommen wordt vaak een stelsel krommen gegeven met een aantal van de temperatuur afhankelijke spanningsassen (figuur 5.9). Als voorbeeld is aangegeven hoe de rek gevonden wordt bij een belasting van 15 N/mm^2 bij 40°C na een tijdsduur van 1 seconde.



figuur 5.9 Isochrone spannings-rek krommen van PMMA.

Eenzelfde mogelijkheid biedt de temperatuurs-tijd-equivalentie. Dit principe wordt wel gebruikt om kruip voor lange belastingstijden te schatten door korter durende proeven uit te voeren bij hogere temperatuur. Kruipkrommen worden horizontaal verschoven tot een zogenaamde "mastercurve". In figuur 5.10 is dit aangegeven voor PVC waarvoor de kruipkrommen bij 23°C en bij 40°C zijn getekend. De kromme voor 40°C kan over een afstand $\log A_t$ naar rechts verschoven worden om samen te vallen met de kromme voor 23°C .



figuur 5.10 Temperatuur-tijd equivalentie.

De zogenaamde verschuivingsfactor kan in een bepaald temperatuurtraject worden uitgedrukt in de zogenaamde “Arrhenius-vergelijking” en deze luidt:

$$10 \log A_t = K_t \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)$$

waarin:

- T = absolute temperatuur
- T_R = referentietemperatuur meestal 296 K (23°C)
- K_t = constante
- A_t = verschuivingsfactor

Bij 40°C is $\log A_t \approx -1,9$ ($A_t \approx 0,01$) ten opzichte van de waarde bij 23°C. Uit deze gegevens volgt dat $K_t = 1,09 \cdot 10^4$

Door nu $T = 0^\circ\text{C}$ in te vullen volgt dat $\log A_t \approx 3,10$ ($A_t \approx 1200$). Dit wil zeggen dat bij een belasting van bijvoorbeeld $\sigma = 10 \text{ N/mm}^2$ bij 0°C een zelfde rek pas optreedt bij een tijd die ruim 3 decaden verder ligt als bij 23°C het geval zou zijn. Dit is hier ongeveer een factor 1200 langer. De temperatuur-tijd equivalentie wil zeggen dat een verlaging van de temperatuur overeenkomt met een verlenging van de tijd en andersom.

Deze formule heeft slechts een beperkte geldigheid, men past daarom ook wel een vuistregel toe om de kruip te kunnen schatten bij een bepaalde temperatuur als voor deze temperatuur geen krommen ter beschikking staan. Deze benaderingsformule luidt:

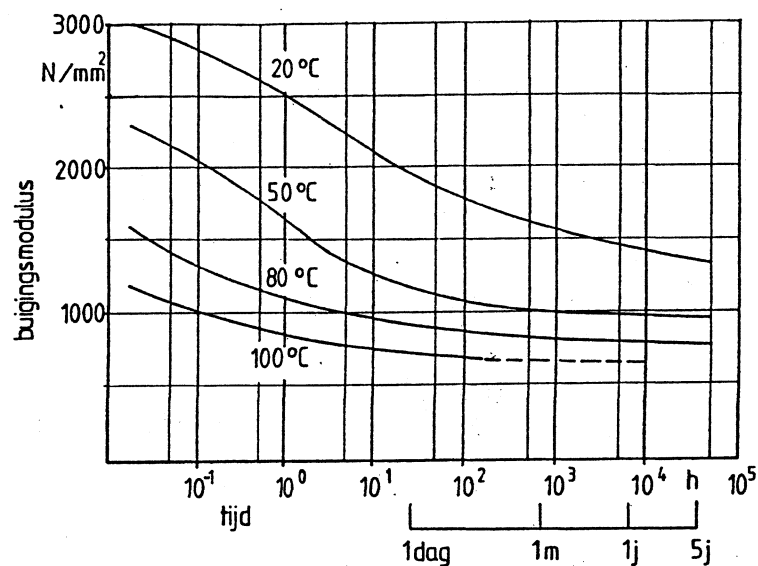
$$t(T_{ref}) = t_w \cdot C^{\frac{T_w - T_{ref}}{10}}$$

In deze formule is:

- $t(T_{ref})$ = een referentietijd bij een temp T_{ref} die hetzelfde effect heeft op de kruip als t_w bij een temperatuur T_w .

- t_w = de tijd gedurende welke de werktemperatuur heerst
 T_w = werktemperatuur in °C
 T_{ref} = referentietemperatuur
 C = constante, deze ligt tussen 4 en 15. Bij benadering is $C = 10$

De grootte van C kan bepaald worden als twee kruipmodulus- tijdskrommen bij twee verschillende temperaturen bekend zijn, het mogen ook twee rek-tijd-krommen zijn bij twee verschillende temperaturen en bij dezelfde spanning. In figuur 5.11 zijn kruipmoduli (in buiging) weergegeven van POM bij verschillende temperaturen en een maximale spanning van 10 N/mm². Men kan C bepalen bij een modulus van 1500 N/mm² tussen 80°C en 20°C, maar ook bij een modulus van 1000 N/mm² tussen 100°C en 50°C.



figuur 5.11 Kruipmodulus in buiging van POM.

Voor de eerste waarden geldt:

$$2,3 \cdot 10^3 = 2,8 \cdot 10^{-2} \cdot C \cdot 10^{\frac{80-20}{10}} \rightarrow C = 6,6$$

en voor de tweede:

$$10^3 = 10^{-1} \cdot C \cdot 10^{\frac{100-50}{10}} \rightarrow C = 6,3$$

Er is een verschil tussen de waarden voor C . Met de laatste waarde gaan we de kruip bij 50°C transformeren tot een kruip bij 20°C:

$$t(T_{ref}) = t_w \cdot C^{\frac{T_w - T_{ref}}{10}}$$

$t(T_{ref})$ is de tijd bij 20°C.

Kies voor $t_w = 2$ uur. Dit is bij een modulus van 1500 N/mm².

$$t(20^\circ) = 2 \cdot 10^0 \cdot 6,3^{\frac{50-20}{10}} = 500 \text{ uren}$$

In werkelijkheid moet er 2000 uren uitkomen. In de grafiek van figuur 5.11 is dit verschil op logaritmische schaal toch betrekkelijk gering.

Als een constructie belast wordt op verschillende temperaturen gedurende verschillende tijden kunnen de temperaturen met de bijbehorende tijden omgerekend worden tot één temperatuur met de daarbij behorende tijd. De benaderingsformule kan men herleiden tot:

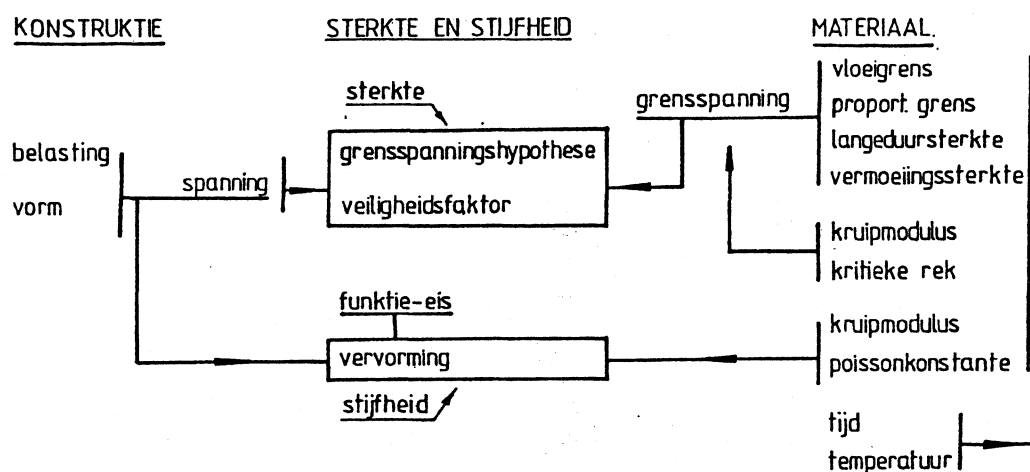
$$t(T_{ref}) = \sum_{w=1}^i t_w \cdot C^{\frac{T_w - T_{ref}}{10}}$$

5.6 Belasting, spanning en rek

5.6.1 Statische belasting

De sterkte en stijfheidsberekeningen voor kunststof constructies gebeuren in principe op dezelfde wijze als de berekeningen voor metalen constructies. De spanningen in het product en de vervormingen van het product mogen bepaalde toegelaten waarden niet overschrijden. De berekening van een constructie omvat de volgende elementen (figuur 5.12).

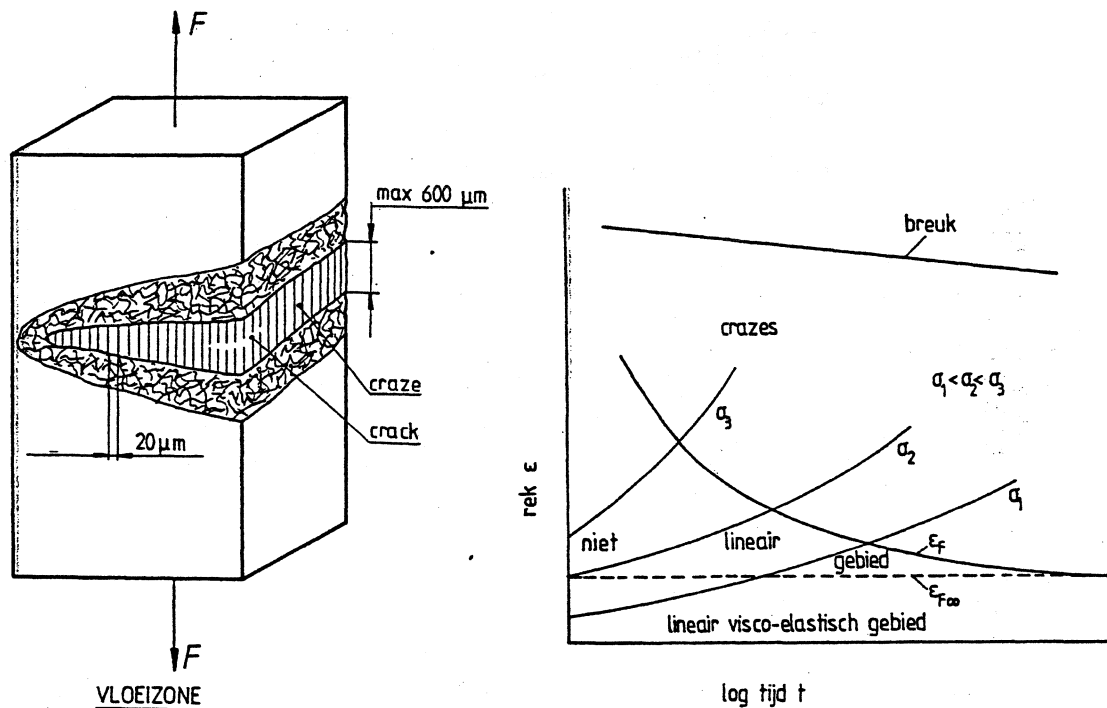
- Berekening van de spanningen in de constructie; de belasting en de vorm van de constructie moeten bekend zijn.
- Bepaal welke spanning in het constructiemateriaal is toegelaten. Deze toelaatbare spanning is afhankelijk van het materiaal, van de verwerkingstechniek en van de gebruiksomstandigheden.
- Vergelijk de spanningen in de constructie met de toelaatbare spanning onder gebruikmaking van een veiligheidsfactor en van een grensspannings-hypothese.



figuur 5.12 Schematische weergave van de sterkte en stijfheidsberekening van kunststofconstructies.

Aan een constructie kan de eis toegevoegd worden dat de vervorming in verband met de functie een bepaalde waarde niet mag overschrijden. Aan de voorgaande berekening worden dan de volgende elementen toegevoegd:

- Bepaal met de belasting, met de vorm van de constructie en met de elastische constanten van het materiaal de optredende vervorming. Vergelijk deze waarde met de toegelaten waarde.
- Als aan de gestelde eisen niet wordt voldaan zal de belasting of de vorm of het materiaal worden aangepast.



figuur 5.13 (links) Weergave van crazevorming en het vervolgens ontstaan van een scheur binnen de craze. (rechts) Kruipkrommen waarin het moment van het ontstaan van crazes is aangegeven.

Uit kruipproeven is gebleken dat lang voordat breuk in een kunststof constructie optreedt, in de kunststof beschadigingen ontstaan. De Engelse literatuur spreekt over “crazes”, de Duitse literatuur spreekt over “Fliesszonen”. Een craze is niet een scheur in het materiaal maar een gebied waarin het materiaal in verdunde vorm, in zogenaamde fibrillen, aanwezig is. Een craze gaat over in een scheur als de verdunde materie breekt (figuur 5.13 links). Crazevorming is het begin van een blijvende beschadiging van het materiaal, dit verschijnsel is onomkeerbaar. In een verzameling kruipkrommen is een grenslijn aan te geven waarboven crazes optreden (figuur 5.13 rechts). Deze grenslijn wordt aangeduid met ε_F . De grenslijn ε_F blijkt tot een horizontale asymptoot te naderen. Er is dus een rek op te geven waar beneden de crazes niet optreden. Deze rek $\varepsilon_{F\infty}$ wordt de “kritieke rek” genoemd. De kritieke rek is onafhankelijk van:

- de temperatuur, mits geen fase overgang wordt gepasseerd
- de snelheid waarmee de belasting wordt aangebracht
- cyclisch wisselende belasting
- aanwezige media, mits deze de kunststof niet aantasten

De kritieke rek mag als een soort materiaalconstante worden opgevat. In tabel 5-1 is voor een aantal materialen de kritieke rek weergegeven.

tabel 5-1 Kritieke rek $\epsilon_{F\infty}$

amorphe thermoplasten	0,8%
deel kristallijne thermoplasten behalve PE en POM	2,0%
gevulde thermoplasten	0,5%
gevulde thermoharders	0,4%
vezelgevulde thermoharders	0,5%
POM	3,5%
PE	3,0%

Als de ontwerpeisen en de bedrijfscondities bekend zijn kunnen we met de kruipkrommen of met de afgeleiden daarvan de te verwachten rek bepalen. Deze waarde wordt vergeleken met de kritieke rek $\epsilon_{F\infty}$ van het materiaal. Is de belastingstoestand meerassig dan mag de grootste hoofdrek de kritieke rek $\epsilon_{F\infty}$ niet overschrijden. Bij korteduur belasting mag een rek hoger dan $\epsilon_{F\infty}$ worden toegelaten. Bij amorfe materialen valt de kritieke rek samen met de grens van het lineair visco-elastisch gebied. Men mag aannemen dat zolang deze grenslijn niet wordt overschreden een ruimschoots voldoende veiligheid tegen breuk aanwezig is. *o.k.*

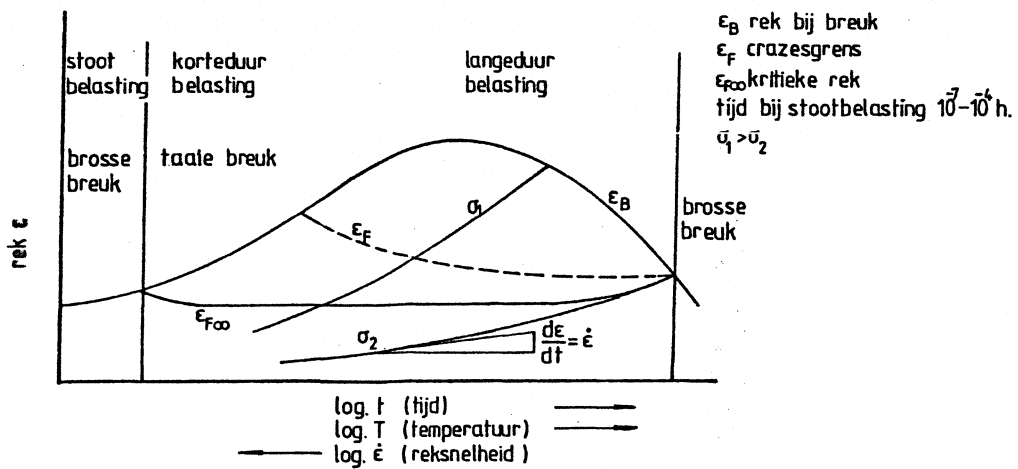
Semi-kristallijne materialen bezitten een kritieke rek $\epsilon_{F\infty} > 2\%$. Deze grens ligt duidelijk buiten het lineair visco-elastisch gebied. Voor semi-kristallijne materialen ligt de grens van het lineair visco-elastische gebied bij 0,5% - 0,8% rek.

Voordat breuk optreedt kan het materiaal dus nog meer rek opnemen. Het ongebruikt laten van deze reserve is de prijs die we moeten betalen om met eenvoudige middelen sterkte en stijfheidsberekeningen te kunnen uitvoeren. Men moet dit niet al te ernstig opvatten, omdat de meeste constructies onbruikbaar worden als de rek boven 1% uitstijgt.

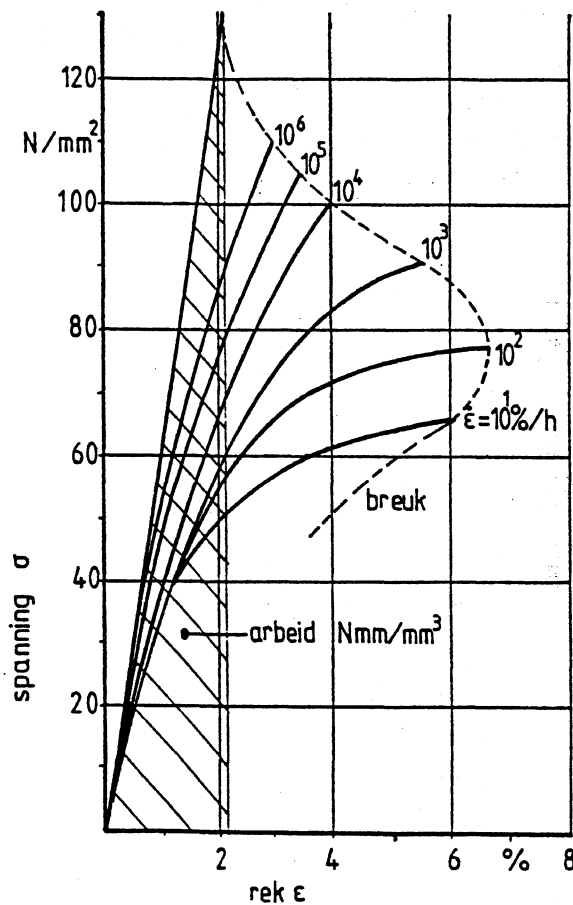
Constructies die op trek of op druk worden belast kunnen eenvoudig met behulp van kruipkrommen berekend worden. Het niet lineair gedrag speelt een belangrijke rol bij buiging. Terwijl bij zuivere trek of druk in een doorsnede overal dezelfde spanning en rek heersen, vertonen de spanning en de rek bij buiging een verloop. Wanneer het materiaal zich niet lineair gedraagt moeten we in de uiterste vezel met een lagere elasticiteitsmodulus E_s (secantmodulus) rekenen dan bij de neutrale lijn.

5.6.2 Stootbelasting

Producten of onderdelen uit kunststof worden ook aan schok of stootbelastingen blootgesteld. De meeste thermoplasten bezitten een relatief grote taaigheid, de vervorming bij breuk is als regel zeer groot. Onder bepaalde omstandigheden kunnen taaie materialen echter bros breken. Dit wil zeggen dat de rek bij breuk zeer gering is. Dit verschijnsel kan optreden bij lage temperaturen of bij een zeer grote reksnelheid (figuur 5.14). Bij brosse breuk is de opgenomen arbeid in het materiaal gering. Bij hogere temperaturen en bij lagere reksnelheden is de opname van de vervormingsarbeid groter (figuur 5.15).



figuur 5.14 Invloed van tijd, temperatuur en reksnelheid op het gedrag van homogene thermoplasten.

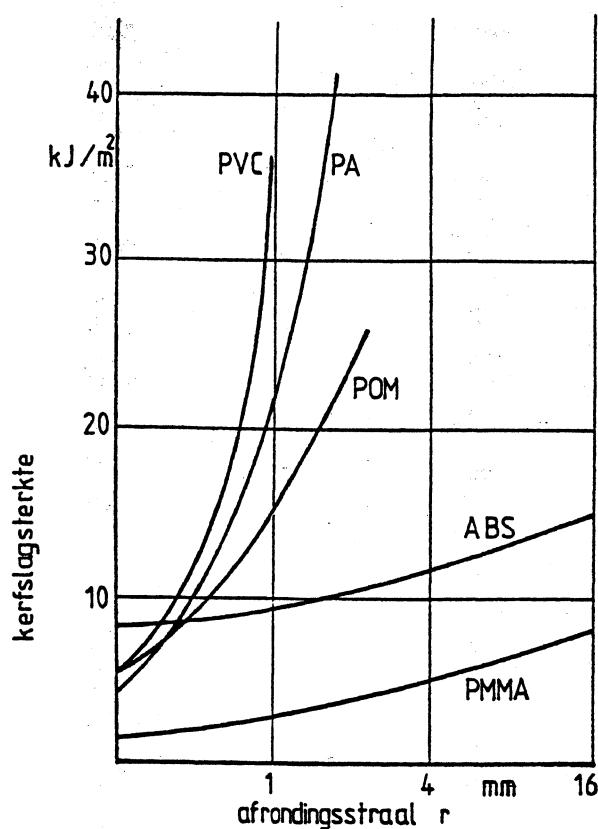


figuur 5.15 Spannings-rekgedrag van PMMA bij verschillende reksnelheden.

Er is nog geen bruikbare berekeningsmethode voor stootbelasting ter beschikking. Men bepaalt tot nu toe de materiaaleigenschappen in de vorm van de slagsterkte of van de kerfslagsterkte uit genormaliseerde proeven. De slagsterkte en de kerfslagsterkte worden bepaald volgens de Charpy-proef volgens norm ISO/R179 of volgens de Izod-proef volgens norm ISO/RIBO. Deze proeven worden ook beschreven in de Amerikaanse norm

ASTM-D256. Volgens Charpy wordt de gebruikte slagenergie gedeeld door het oppervlak van de doorsnede. Bij Izod wordt de energie gedeeld door de breedte van de proefstaaf.

Bij de kerfslagproef worden lagere waarden voor de energie gevonden dan bij de slagproef aan ongekerfde proefstukken. Bij de kerfslagproef kan het materiaal ook bij hogere temperatuur bros breken, doordat rond de kerf een meerassige spanningstoestand heerst met een hoge piekspanning. De slagproef en de kerfslagproef geven alleen vergelijkingswaarden weer die niet direct overdraagbaar zijn naar constructies. In ref. 2 zijn de waarden van diverse materialen weergegeven als functie van de temperatuur.



figuur 5.16 De invloed van de afrondingsstraal op de kerfslagsterkte.

In een constructie spelen naast de genoemde materiaal eigenschappen ook nog de vorm van de constructie, de verwerking van het materiaal en de omgeving een belangrijke rol. Als een apparaat of een onderdeel stoot of slagbelastingen moet kunnen weerstaan dient de vorm zodanig te zijn dat bij een bepaalde snelheid van de stoot de reksnelheid in het product zo klein mogelijk is. Een slappe constructie zonder dikte overgangen en zonder scherpe hoeken zal de voorkeur hebben. Afrondingsstralen hebben een grote invloed op de slagsterkte (figuur 5.16). Bedenk hierbij dat bij onderdelen die gespuits zijn, de afrondingen in de matrix in een extra bewerking moet worden aangebracht. Bij het testen van de eerste monsters moet men hierop extra letten.

Kerven, afrondingsstralen en sprongsgewijze dikteveranderingen veroorzaken spanningsconcentraties. De maximale spanning en dus ook de rek vertoont een vaste verhouding K_t tot de spanning die daar zonder kerf zou zijn opgetreden:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

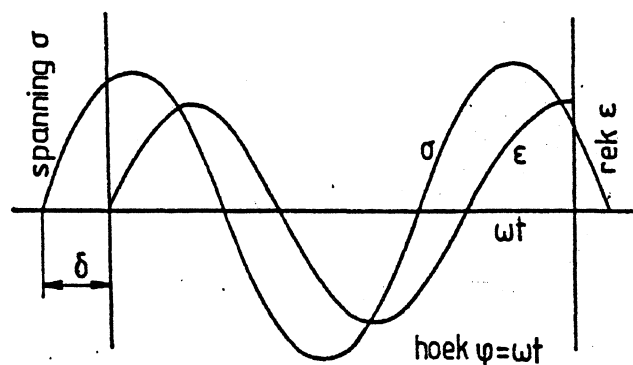
De spanningsconcentratiefactor K_t is gebaseerd op de lineaire theorie, vandaar het subscript t van theoretisch. In de Duitstalige literatuur gebruikt men vaak het symbool α_k . De spanningsconcentratiefactor K_t is afhankelijk van de diepte en van de straal van de kerf. Naarmate de afrondingsstraal kleiner is zal de spanningstoename sneller verlopen, de reksnelheid in het materiaal neemt toe. De effectieve reksnelheid is ook een factor K_t , groter dan wanneer geen kerf aanwezig is. In hoofdstuk 6 wordt verder ingegaan op spanningsconcentraties.

Bij de verwerking van DMC (dough moulding compound) - een polyesterpremix met lange glasvezels - blijkt de slagsterkte van gespuitsgiete producten op ongeveer 25% te liggen van de slagsterkte van geperste producten. De oorzaak van dit verschijnsel is de afbraak van de glasvezels bij het spuitgieten.

Aantasting door weersinvloeden zoals temperatuur, UV- straling en zuurstof hebben direct invloed op de slagsterkte. De veroudering treedt het eerste op aan de buitenzijde van het product, dus op de meest kritieke plaats van het product. Het is dus voor buitentoepassingen van groot belang een kunststof te kiezen die goed verouderingsbestendig is.

Omdat de berekening van een constructie op slag of stootbelasting niet mogelijk is, wordt veel waarde gehecht aan de praktische beproeving van prototypen en van steekproefproducten uit de lopende productie. Testmethoden voor elektronische apparatuur, waaronder valproeven, zijn beschreven in IEC 68-2. Testapparatuur voor slag- en stootproeven zijn beschreven in DIN 53443.

5.6.3 Dynamische belasting



figuur 5.17 Het verband tussen spanning en rek bij een dynamische belasting.

Gedwongen trilling

Wanneer een kunststof dynamisch wordt belast zullen ten gevolge van het visco-elastisch gedrag de optredende spanning σ en de rek ϵ niet met elkaar in fase zijn. Voor een kunststof, die een sinusvormige vervorming krijgt opgedrongen is het verloop van de rek en de spanning als volgt:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_a \cdot \sin \omega t \\ \sigma &= \sigma_a \cdot \sin(\omega t + \delta)\end{aligned}\quad (1)$$

waarin:

- ε_a = rekamplitude
- σ_a = spanningsamplitude
- ω = cirkelfrequentie ($2\pi \cdot f$)
- δ = faseverschuivingshoek

In figuur 5.17 is dit verband aangegeven. Voor een ideaal elastisch materiaal is $\delta = 0$ en voor een ideaal viskeus materiaal is $\delta = \pi/2$

De spanning loopt in dit geval dus voor op de rek en de spanning is te ontbinden in twee componenten:

- in fase met de rek (amplitude $\sigma_a \cos \delta$)
- 90° uit fase met de rek (amplitude $\sigma_a \sin \delta$)

Na het uitschrijven van de spanning kan hiervoor worden genoteerd:

$$\sigma = \varepsilon_a \cdot E' \sin \omega t + \varepsilon_a \cdot E'' \cos \omega t$$

waarin:
$$E' = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cos \delta \quad \text{en} \quad E'' = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \sin \delta \quad \left(\tan \delta = \frac{E''}{E'} \right) \quad (2)$$

Ga dit na door b.v. de waarde $\delta = 0$ in te vullen voor een elastisch materiaal.

Deze uitdrukking wordt vaak in de complexe vorm geschreven en deze is dan:

$$\begin{aligned}\varepsilon^* &= \varepsilon_a \cdot e^{i\omega t} \\ \sigma^* &= \sigma_a \cdot e^{i(\omega t + \delta)}\end{aligned}$$

Delen we de spanning door de rek om de elasticiteitsmodulus te bepalen dan krijgen we:

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^* = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_a} \cdot (\cos \delta + i \cdot \sin \delta) \quad \text{of} \quad E^* = E' + i \cdot E''$$

Deze elasticiteitsmodulus wordt de complexe modulus genoemd. Het imaginaire deel hiervan is bij dynamische belastingen van belang, omdat de grootte ervan de energiedissipatie bepaalt en dit deel wordt dan ook wel de verliesmodulus genoemd.

Energiedissipatie

De verhouding tussen het imaginaire deel en het reële deel van de complexe elasticiteitsmodulus is een veel gebruikte maat voor het verlies bij dynamische belastingen, deze verhouding is:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'}$$

De arbeid per eenheid van volume bedraagt met gebruikmaking van (1):

$$W = \int_a^b \sigma \cdot d\varepsilon \qquad W = \int_a^b \sigma_a \cdot \sin(\omega t + \delta) \cdot \varepsilon_a \cdot \omega \cdot \cos \omega t \cdot dt$$

De oplossing van deze integraal tussen de grenzen a en b luidt:

$$W = \left[\frac{1}{2} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \cos \delta \cdot \sin^2 \omega t \right]_a^b + \left[\frac{1}{2} \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \sin \delta \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \sin 2\omega t + \omega t \right) \right]_a^b$$

$$W = W' + W''$$

W' is de elastische arbeid, bij veelvoudigen van π/ω wordt deze waarde 0.

W'' is het verlies van mechanische arbeid, deze hoeveelheid wordt omgezet in warmte. Bij één omwenteling bedraagt de verliesarbeid:

$$W'' = \pi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \sin \delta$$

Het energieverlies kan met formule (2) ook als volgt geschreven worden:

$$W'' = \frac{\pi \cdot \sigma_a^2}{E'} \cdot \sin \delta \cdot \cos \delta = W'' = \frac{\pi \cdot \sigma_a^2}{E''} \cdot \sin^2 \delta$$

$$\text{of} \quad W'' = \pi \cdot \varepsilon_a^2 \cdot E' \cdot \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \pi \cdot \varepsilon_a^2 \cdot E' \cdot \tan \delta \Rightarrow W'' = \pi \cdot \varepsilon_a^2 \cdot E''$$

Bij een verlieshoek δ kleiner dan ongeveer 15° mag men schrijven:

$$\sin \delta \approx \tan \delta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'}$$

Stijging van temperatuur

Het is van belang te weten dat de energiedissipatie bij kunststoffen aanzienlijk groter is dan bij metalen. Het materiaal in een dynamisch belaste constructie zal daardoor ook merkbaar in temperatuur kunnen stijgen. Het gedissipeerde vermogen per volume-eenheid is:

$$Q = \pi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \tan \delta \cdot f \cdot V \qquad (3)$$

waarin f de frequentie is van de dynamische belasting en V het volume van het product.

De warmte ontwikkeling is dus lineair afhankelijk van de frequentie f en ook van de $\tan \delta$, die stijgt bij oplopende temperatuur.

De warmte wordt door convectie via het oppervlak van het kunststof product afgevoerd. De energieafvoer bedraagt:

$$Q_{afv} = \alpha \cdot A(T - T_0) \quad (4)$$

Hierin is

α = warmteoverdrachts-coëfficiënt (W/mm² °C)

A = oppervlak van het product (mm²)

T = producttemperatuur (°C)

T_0 = omgevingstemperatuur (°C)

Bij evenwicht kunnen we formules (3) en (4) aan elkaar gelijk stellen:

$$Q = Q_{afv} \Rightarrow T - T_0 = \frac{\pi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \tan \delta \cdot f \cdot V}{\alpha \cdot A}$$

Met: $\frac{V}{A} \approx \frac{1}{2} S$

waarin S de wanddikte van het product is, wordt het temperatuurverschil:

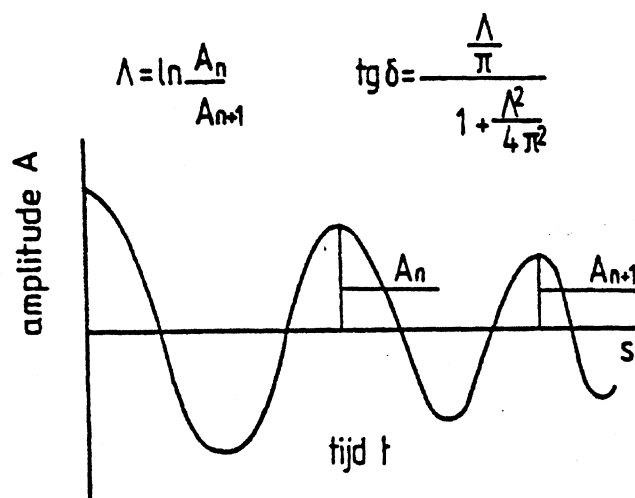
$$T - T_0 = \frac{\pi \cdot \sigma_a \cdot \varepsilon_a \cdot \tan \delta \cdot f \cdot S}{2 \cdot \alpha}$$

De warmteoverdrachts-coëfficiënt α bedraagt ongeveer 15 ± 2 Watt/m² °C.

Torsie slingerproef

De glijdingsmodulus en de demping van kunststoffen worden bepaald met de torsieslingerproef volgens DIN 53445. Het testen van kunststoffen is eenvoudig bij verschillende temperaturen en eigenfrequenties uit te voeren.

Een gevolg van de dissipatie van energie is dat de ingeklemde staaf waarvan het uiteinde vrij kan bewegen na aanstoting een gedempte slingering uitvoert. Dit uitdempen van de slingering is geïllustreerd in figuur 5.18.



figuur 5.18 Demping als gevolg van dissipatie van energie.

Dit uitdempen van de slingingering wordt uitgedrukt in het zogenaamde logaritmisch decrement Λ en dit is:

$$\Lambda = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$$

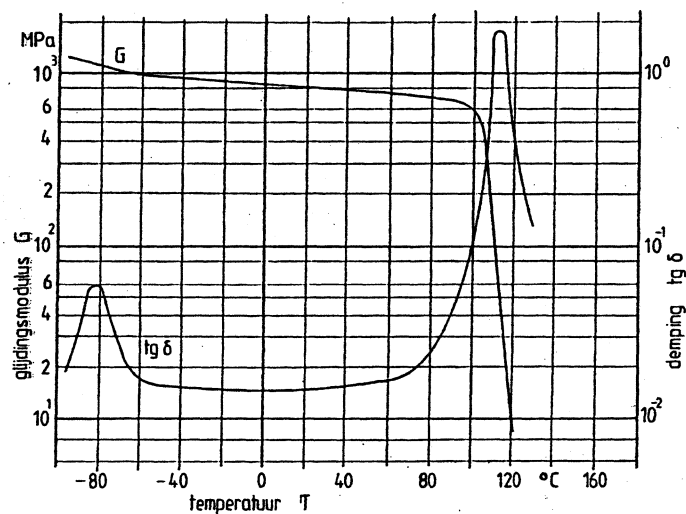
Het verband tussen het logaritmisch decrement en de verlieshoek δ is

$$\tan \delta = \frac{\frac{\Lambda}{\pi}}{1 + \frac{\Lambda^2}{4\pi^2}}$$

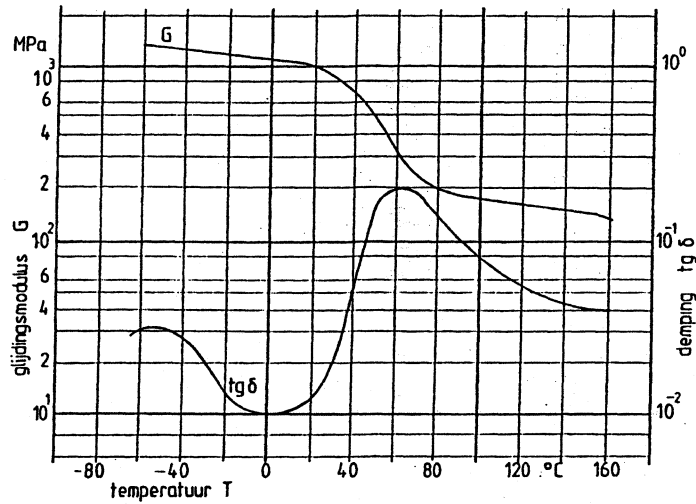
Het logaritmisch decrement is direct te berekenen uit de bepaling van de glijdingsmodulus met behulp van een torsieslingerapparaat. De complexe glijdingsmodulus is:

$$G^* = G' + iG''$$

De complexe glijdingsmodulus wordt vaak in brochures als functie van de temperatuur gegeven, omdat deze relatief eenvoudig is te bepalen. In figuur 5.19 is dit voor ABS-soort en in figuur 5.20 voor een Nylon-soort weergegeven.



figuur 5.19 Glijdingsmodulus en demping van een ABS.



figuur 5.20 Glijdingsmodulus en demping van een PA.

Een piek in het verloop van $\tan\delta$ duidt op een faseovergang, waarbij vooral de piek bij de zogenaamde glasovergangstemperatuur van belang is. Boven deze temperatuur komen de moleculen in een dusdanige toestand dat de voorgaande fysische en/of mechanische voorgeschiedenis te niet kan worden gedaan. Het materiaal bevindt zich dan in de rubbertoestand.

In de onderstaande tabel is van enkele kunststoffen de verliesfactor $\tan\delta$ weergegeven bij 20°C en bij 60°C.

tabel 5-2 Mechanische verliesfactor $\tan\delta$

	20°C	60°C
LDPE	0,170	0,060
PP	0,070	0,070
PS	0,013	0,028
ABS	0,015	0,028
PVC	0,018	0,025
PTFE	0,075	0,060
PMMA	0,080	0,100
POM	0,014	0,015
PC	0,008	0,010
UP	0,020	0,400
EP	0,020	0,020
PF (type 31)	0,016	0,022
MF (type 151)	0,016	0,022
staal	0,00002 tot 0,001	
koper	0,001 tot 0,002	

5.6.4 Vermoeiing

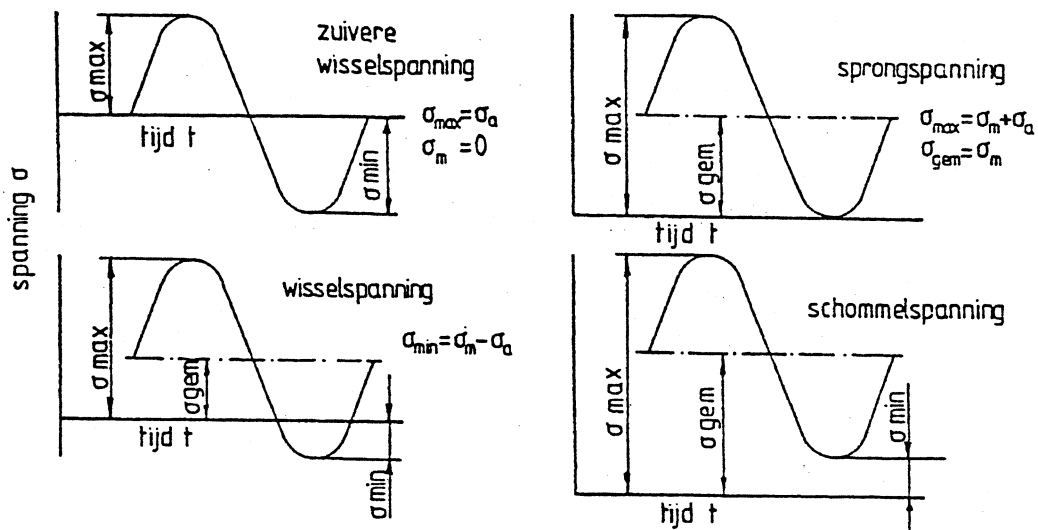
Bij een in de tijd variërende belasting kan een product falen door breuk ten gevolge van het faalmechanisme vermoeiing. De waarde van de spannings- of rekamplitude waarbij in geval van vermoeiing breuk optreedt is altijd lager dan de waarde in het geval van een niet dynamische belasting.

Over de fysische aspecten van wat er op moleculaire schaal zich afspeelt is minder bekend dan bij metalen. Door cyclische vervormingen op het niveau van moleculen kunnen ketens zich

plaatselijk strekken en kunnen er crazes ontstaan. Deze crazes zullen door de veranderende belasting in de tijd tot microscheuren kunnen uitgroeien en deze microscheuren weer tot macroscheuren zodat tenslotte falen door een te grote scheur optreedt.

In dit hoofdstuk worden alleen zogenaamde constante amplitude belastingen behandeld, vooral omdat het vermoeiingsgedrag bij random belastingen erg moeilijk te voorspellen is. De belasting is volledig gekarakteriseerd door de gemiddelde rek of spanning en de amplitude ervan.

In figuur 5.21 is de benaming voor verschillende belastingsvormen volgens DIN 50 100 weergegeven.

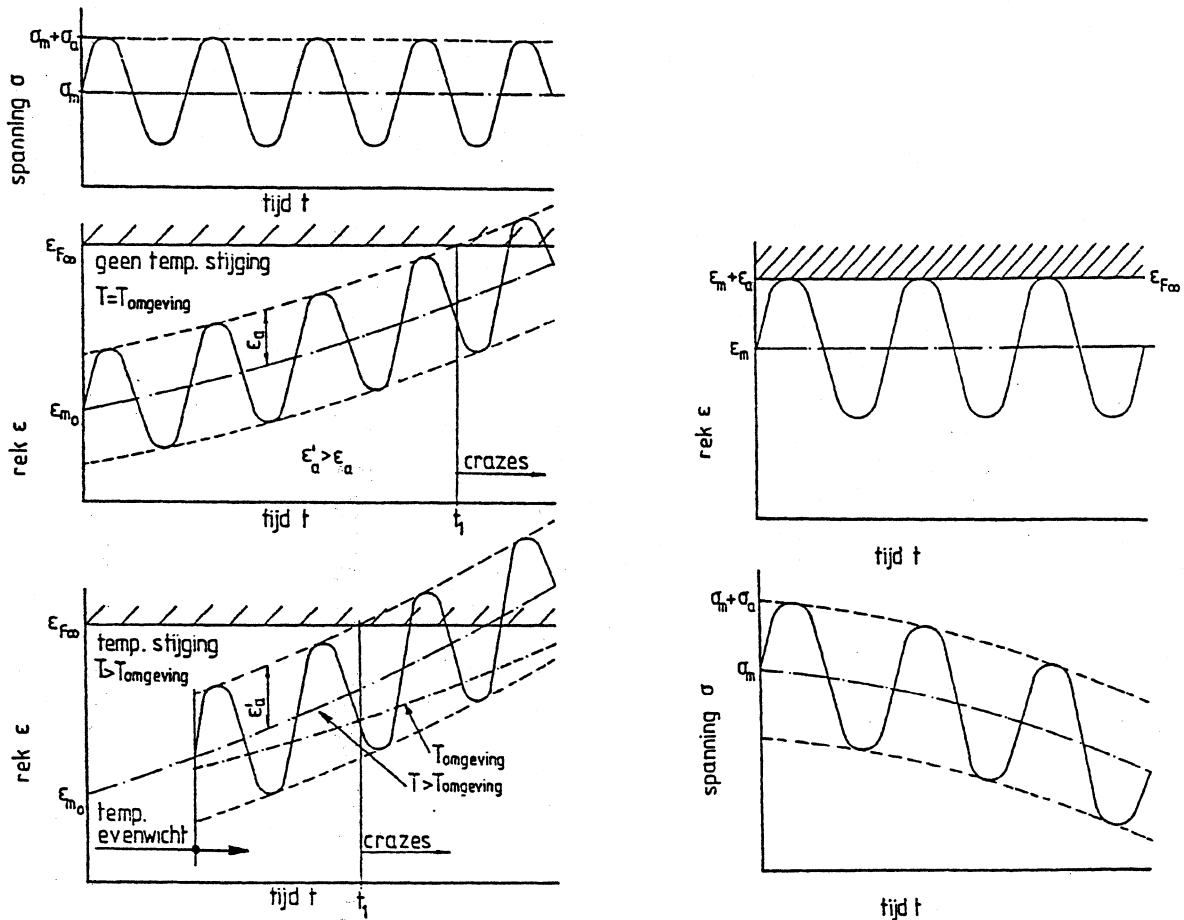


figuur 5.21 Nomenclatuur voor wisselde belasting.

De belasting kan behalve sinusvormig ook blokvormig zijn, dit komt meer overeen met stootbelastingen, die in de praktijk voorkomen bij het botsen van voorwerpen. Vooral de waarde van de gemiddelde spanning of rek is bij kunststoffen van belang, omdat daardoor kruip of spanningsrelaxatie optreedt.

Er moet onderscheid gemaakt worden tussen twee soorten belastingsgevallen en wel die op:

- kracht
- verplaatsing



figuur 5.22 (links) Kruip bij dynamische belasting. (rechts) Verloop van de spanning bij constante dynamische rekbelasting.

Bij een belasting op kracht, waarvan de gemiddelde waarde ongelijk aan nul is, zal kruip optreden en het verloop van spanning en rek zijn dan zoals links in figuur 5.22 is aangegeven. In figuur 5.22 is rechts hetzelfde gegeven voor een verplaatsingsgestuurde belasting. De in paragraaf 5.6.1 besproken kritieke rek $\epsilon_{F\infty}$ kan ook bij dynamische belaste constructies als ontwerpcriterium gelden.

$$\epsilon_m + \epsilon_a = \epsilon_{toel} \leq \epsilon_{F\infty}$$

Uitgaande van de spanningen kunnen we met gebruikmaking van (2) schrijven:

$$\frac{\sigma_m}{E_c} + \frac{\sigma_a}{E'} \cdot \cos \delta \leq \epsilon_{F\infty}$$

E_c = de kruipmodulus

Voor kleine waarden van δ ($\delta < 15^\circ$) geldt:

$$\cos \delta \approx 1 \quad \Rightarrow \quad E' \approx \frac{\sigma_a}{\epsilon_a} = E_0$$

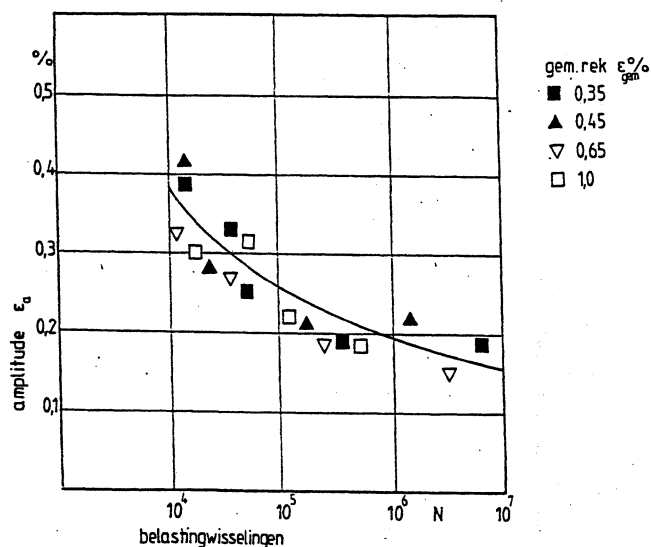
E_0 = de elasticiteitsmodulus bij het begin van de kruipproef

Dus:
$$\frac{\sigma_m}{E_c} + \frac{\sigma_a}{E_0} \leq \varepsilon_{F\infty}$$

De waarden E_c en E_0 moeten genomen worden bij de evenwichtstemperatuur. Semi-kristallijne thermoplasten die bij kamertemperatuur een relatief grote demping $\tan\delta$ hebben (bij een relatief lage elasticiteitsmodulus ten opzichte van de meeste amorfe thermoplasten) vertonen dan ook een grotere temperatuurstijging. Producten met een dunne wand, producten die op buiging worden belast en producten uit amorfe materialen of uit glasvezelgevulde materialen vertonen een geringere temperatuurstijging. Het is noodzakelijk dat de berekening voor de temperatuurverhoging wordt uitgevoerd. Bij een temperatuurstijging van meer dan 10°C moet de berekening nogmaals maar dan met aangepaste waarden voor $\tan\delta$ en E' uitgevoerd worden, omdat $\tan\delta$ en E' sterk van de temperatuur afhankelijk zijn. Bij een trek of druk belasting op een product met een dikke wand zal de temperatuur in de kern hoger zijn dan op het oppervlak.

De dynamische belastbaarheid van producten is ook te bepalen door het uitvoeren van vermoeiingsproeven. Bij deze proeven wordt een belastingsamplitude ingesteld en dan wordt het aantal belastingswisselingen tot breuk bepaald. Door op een aantal belastingsniveaus proeven uit te voeren kan het verband tussen het aantal belastingswisselingen en de belastingsamplitude worden bepaald. De verkregen kromme wordt in Nederland en in Duitsland de zgn. Wöhlerkromme genoemd, terwijl deze in de Angelsaksische literatuur als S/N kromme wordt aangeduid. De belasting wordt meestal op een lineaire schaal uitgezet en het aantal wisselingen tot breuk op een logaritmische schaal (zie b.v. figuur 5.23).

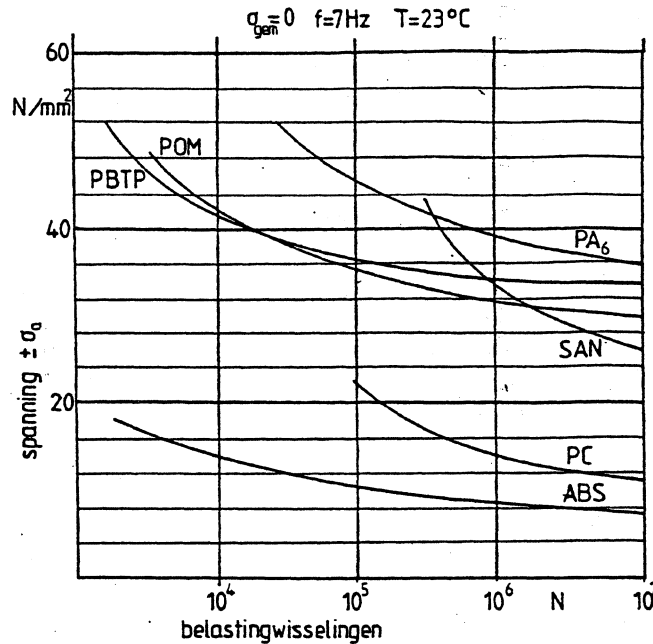
Uit vele vermoeiingsproeven blijkt dat de grenslijn voor breuk een dalende tendens blijft vertonen. Dit staat in tegenstelling tot vermoeiingsproeven bij staalsoorten waarbij bij 10^6 cycli de kromme niet verder daalt, zodat men voor staal van een vermoeiingsgrens kan spreken.



figuur 5.23 Wöhlerkromme van een ABS belast op trek-druk.

In figuur 5.23 is een Wöhlerkromme van een ABS/Ronfalin die op trek-druk belast is, weergegeven.

De beproevingsfrequentie is van grote invloed op de beproevingsresultaten. Vooral bij het bepalen van de vermoeiingssterkte is het aantal uit te voeren belastingswisselingen erg hoog ($> 10^6$). Er wordt daarom bij een zo hoog mogelijke frequentie beproefd, maar ten gevolge van warmteontwikkelingen in de proefstaaf kan de frequentie slechts beperkt worden opgevoerd.

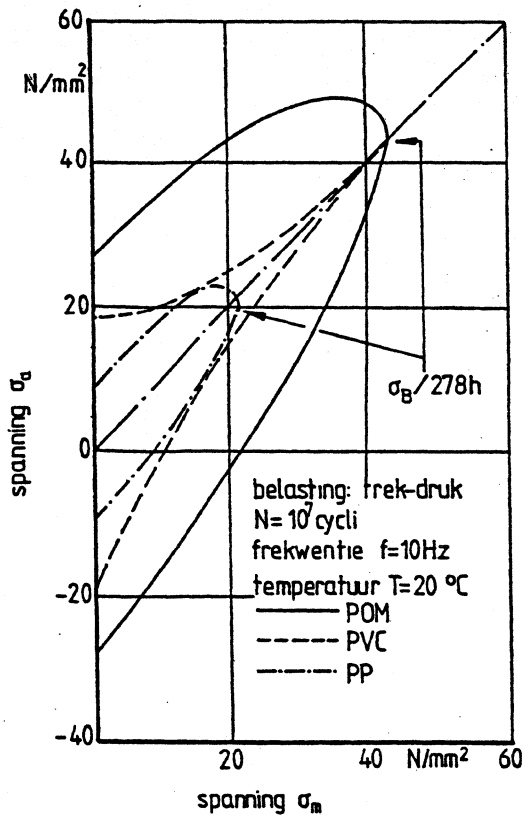


figuur 5.24 Wöhlerkrommen voor buiging.

De resultaten van fig. 5.29 zijn verkregen uit buigproeven bij een constant gehouden temperatuur van 23°C de aangelegde frequentie was 7 Hz.

De vermoeiingssterkte kan ook weergegeven worden in een Smith-diagram. (figuur 5.25) Op de horizontale as is de gemiddelde spanning σ_m weergegeven en op de verticale as de minimale en de maximale spanning. De grafiek representeert de resultaten van proeven waarvoor geldt dat breuk na 10^7 belastingscycli optreedt.

Naarmate de gemiddelde spanning toeneemt neemt de spanningsamplitude af, de amplitude zet men uit aan weerszijde van de lijn onder 45 graden. De spanning aan het einde van de lijn onder 45 graden geeft een langeduur gedrag weer dat behoort bij de tijd van 10^7 cycli (POM) ofwel in dit geval (amplitude=0) bij een kruipbelasting van 278 uren. Opvallend in de grafiek van figuur 5.25 is dat bij semi-kristallijne materialen (hier bij POM en PP) in de omgeving van de maximale gemiddelde spanning nog een betrekkelijk grote wisselspanning toegelaten kan worden, bij alle amorfe materialen (hier bij PVC) is dit veel minder.



figuur 5.25 Smith-diagram voor vermoeiingssterkte.

5.7 Dimensioneren

Een constructie moet men zo dimensioneren dat de berekende spanning in een gevaarlijk geachte doorsnede kleiner of gelijk is aan een toelaatbaar geachte spanning, of dat een berekende rek in enige doorsnede kleiner of gelijk is aan een toelaatbaar geachte rek.

Het dimensioneren kan op twee verschillende manieren plaatsvinden

- dimensioneren op basis van een faalspanning
- dimensioneren op basis van een faalrek.

De berekeningen kunnen uitgevoerd worden met de bekende formules uit de sterkteleer.

5.7.1 Dimensioneren op basis van een faalspanning

De toelaatbare spanning wordt bepaald uit de faalspanning σ_f door deze waarde te delen door een veiligheidscoëfficiënt V .

In formulevorm is de toelaatbare spanning, $\bar{\sigma}$:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_f}{V}$$

De berekende spanning σ mag op enige plaats in het product ten hoogste gelijk zijn aan de toelaatbare spanning.

$$\sigma \leq \bar{\sigma}$$

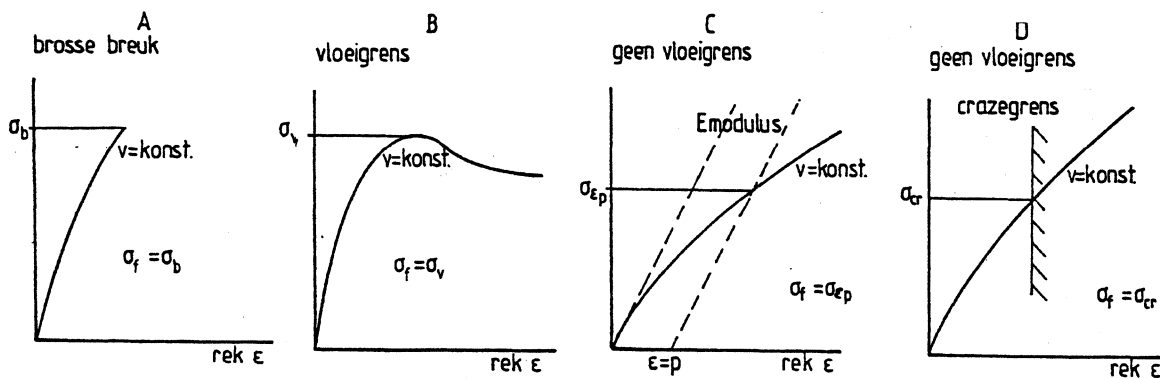
Dit criterium geldt voor een éénassige spanningstoestand. In veel gevallen heerst er in het materiaal echter een meerassige spanningstoestand, met de hoofdspanningen $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$. Als afschuifvloeien het kritieke faalmechanisme is, dan mag het verschil tussen de grootste en de kleinste hoofdspanning niet groter zijn dan de toelaatbare spanning:

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq \bar{\sigma}$$

Dit wordt vooral gehanteerd voor taaie materialen, zoals PE, PA etc. Als crazing het kritieke faalmechanisme is, zoals voor b.v. PS en PMMA, kunnen we stellen dat de grootste hoofdspanning de niet groter mag zijn dan de toelaatbare spanning:

$$\sigma_1 \leq \bar{\sigma}$$

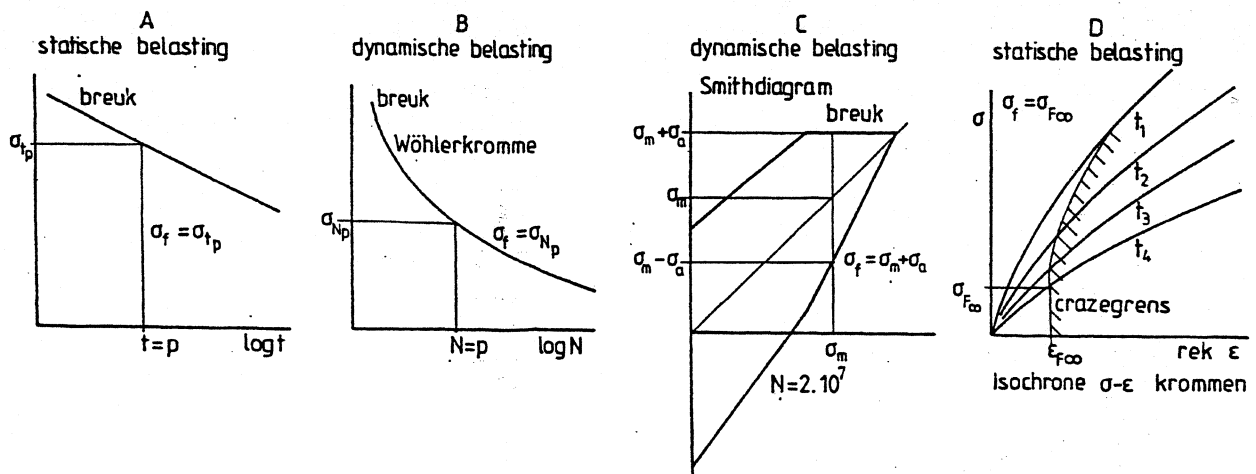
Voor een korteduur belasting, zoals die voorkomt bij het sluiten van een klikverbinding, kan men de faalspanning aan de trekproef ontleen (figuur 5.1).



figuur 5.26 Faalspanning bij korteduur belasting.

Bij materialen met een duidelijke brosse breuk of met een vloeigrens is de faalspanning eenvoudig aan te geven (figuur 5.26 A en B). Het is moeilijker de faalspanning vast te leggen bij materialen met een minder duidelijk breukpunt dus bij materialen met een hoge rek bij breuk. Dit verschijnsel treedt op bij een aantal thermoplastische materialen en specifiek bij hogere temperaturen.

De berekening kan hier verlopen via de rek van het materiaal. Volgens figuur 5.26C kiest men een blijvende viskeuze rek p als grenswaarde bijvoorbeeld $p = 0,5\%$ rek. Uit de trekkromme kan men dan de faalspanning bepalen. Het is ook mogelijk de grens waarbij crazes optreden als faalgrens te beschouwen, ook nu kan op eenvoudige manier de faalspanning gevonden worden. De berekeningen volgens de figuur 5.26C en D zijn eigenlijk berekeningen gebaseerd op een faalrek.



figuur 5.27 Faalspanning bij langeduur belasting.

Langeduur Belasting

De faalspanning bij langdurige statische belasting kan uit kruipproeven bepaald worden (figuur 5.27 A, figuur 5.5) Ook de gegevens uit barstproeven met buizen behoren tot deze groep (figuur 5.8).

Bij dynamische belasting kan men de faalspanning vinden uit Wöhlerkrommen of uit diagrammen van Smith (figuur 5.23 - figuur 5.25).

Voor het bepalen van de juiste faalspanning mag men de sterke temperatuurafhankelijkheid van kunststoffen niet vergeten en zeker niet de temperatuurverhoging ten gevolge van de inwendige demping van het materiaal.

De veiligheidscoëfficiënt is nodig om verschillende onzekerheden in rekening te brengen. Deze onzekerheden kunnen zich voordoen bij de bepaling van de grootte van de belasting, vereenvoudigingen van de geometrie van het product, het niet juist inschatten van de spanningsverdeling, de invloed van het fabricageproces op het mechanisch gedrag van het materiaal. De keuze van de grootte van de veiligheidscoëfficiënt is een verantwoordelijkheid van de ontwerper. Hij moet de vereenvoudigingen en de niet kwantificeerbare verwerkingsinvloeden schatten.

De grootte van de veiligheidscoëfficiënt kan ook vastgesteld en voorgeschreven worden door diverse instanties geautoriseerd door de overheid of door de overheid zelf. Het gaat hier om dragende constructies waarbij als breuk optreedt, schade aan personen of zaken kan ontstaan.

Voor de keuze van de veiligheidscoëfficiënt gelden de richtlijnen in tabel 5-3.

tabel 5-3 Veiligheidscoëfficiënt naar type belasting.

Faalgedrag	Statische Belasting	Intermitterende Belasting	Wisselende Belasting
Breuk	2-3	3-4	1,5-2
Vervorming	1,2	1,2	1,2
Instabiliteit (knik)	3	3	3

Voor leidingen en vaten in de procesindustrie gelden veiligheidscoëfficiënten volgens norm VM 15 (Nederland) en DVS 2205 (Duitsland).

Men maakt onderscheid naar kans op gevaar voor personen en zaken

- Gevarenklasse I
Rustende belasting bij kamertemperatuur, bij schade geen gevaar voor personen of zaken
- Gevarenklasse II
Rustende belasting bij wisselende omstandigheden (temperatuur, valhoogte)
Bij schade geen gevaar voor personen of zaken.
- Gevarenklasse III
Wisselende belasting bij ruwe bedrijfsomstandigheden. Bij schade gevaar voor personen of zaken mogelijk.

tabel 5-4 Veiligheidscoëfficiënten naar gevarenklasse

Klasse	PVC	PE	PP	Korte duur	Lange duur
I	2,5	1,3-1,5	1,5-1,7	4	3
II	3,4	1,5-1,8	1,8-2,0	5	3,5
III	5,0	2,0-2,2	2,2-3,0	7	5

Andere onzekerheden, die veroorzaakt worden door het ontbreken van voldoende materiaalgegevens onder bijzondere omstandigheden, worden niet in de veiligheidscoëfficiënt onder gebracht. Deze zaken worden als specifieke coëfficiënten toegevoegd aan de faalspanning.

Voor leidingen en vaten in de procesindustrie wordt de formule voor de toelaatbare spanning

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_f}{V} \cdot \frac{f_c \cdot f_l}{f_k}$$

Hierin is

- $\bar{\sigma}$ = toelaatbare spanning
- σ_f = faalspanning
- V = veiligheidscoëfficiënt
- f_c = factor die de resistentie tegen chemicaliën aangeeft
- f_l = las of lijmfactor
- f_k = spanningsconcentratiefactor (ook wel K_t)

De factor f_c geeft aan met welke spanning een buis of vat belast mag worden om een gelijke levensduur te bereiken alsof het vat of leiding met water gevuld was. Deze gegevens zijn te vinden in VM 15 en in DVS 2205.

Voor die constructies waarvoor de ontwerper de vrijheid heeft om de specifieke coëfficiënten te kiezen luidt de algemene formule

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_f}{V} \cdot \prod_{i=1}^n f_i$$

Als bij een bepaalde temperatuur tussen 20° en 100°C de mechanische eigenschappen van een kunststof niet voorhanden zijn kan men uitgaan van de eigenschappen bij 20°C met een correctiefactor f_1

$$f_1 = 1 - K(T - 20)$$

tabel 5-5 K-waarden voor temperatuurcorrectie

PA66	$K = 0,0112$
PA6	0,0125
PBTP	0,0095
PA en PBTP met glasvezels	0,0071
POM	0,0082
ABS	0,0117

Deze waarden zijn met behulp van lineaire interpolatie van de breuksterkte of van de vloeigrens tussen 0°C en 100°C verkregen. Het is beter de breukspanning en de andere grootheden te betrekken bij de voorgeschreven temperatuur. Ontbreken gegevens die de invloed van de tijd aangeven dan voert men bijvoorbeeld de factor f_2 in

f_2	= 0,7	bij een belasting van enkele uren
	= 0,6	bij een belasting van enkele weken
	= 0,55	bij een belasting van enkele maanden
	= 0,5	bij een belasting van enkele jaren.

Voor een dynamische belasting kan men bij het ontbreken van de diagrammen van Wöhler of van Smith een factor f_3 kiezen

$$f_3 \approx 0,25 - 0,30$$

Op dezelfde wijze kan men verder gaan met het kiezen van de coëfficiënt f_i

5.7.2 Dimensioneren op basis van een faalrek

Voor de korteduur belasting voor materialen waarbij crazing of grote rekken optreden (figuur 5.26 C en D) is in de vorige paragraaf aangegeven hoe de faalspanning kan worden bepaald. In feite hebben we hier te doen met dimensioneren op basis van rek.

Bij lange duur belasting neemt men de rek waarbij crazes of vloeizones ontstaan aan als de faalrek. Het ontstaan van crazes kan met de grootte van de rek op dat moment in verband gebracht worden, deze grensrek duidt men aan met ε_F . Bij langeduur van de belasting benadert deze tijdsafhankelijke ε_F de grenswaarde $\varepsilon_{F\infty}$. Deze grenswaarde is onafhankelijk van de tijd en van de temperatuur. De rekenwijze berust nu op de grensrek waarbij juist crazes optreden. Met behulp van deze kritieke rek bepaalt men uit de isochrone spanning-rek-kromme de bijbehorende spanning (figuur 5.27). In tabel 5-1 op blz. 5-14 zijn de kritieke rekken van verschillende materialen weergegeven.

Voor leidingen en vaten in de chemische industrie wordt de toelaatbare rek bepaald met de formule:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{F\infty}}{V_r} \cdot f_r$$

waarin

- $\bar{\varepsilon}$ = toelaatbare rek
 $\varepsilon_{F_{\infty}}$ = kritieke rek
 V_r = veiligheidscoëfficiënt
 f_r = factor die de resistentie tegen chemicaliën weergeeft

tabel 5-6 De veiligheidscoëfficiënten volgens VM IS en volgens DVS 2205.

Gevaren klasse	PVC	PE (VM 15) PP	PP DVS (2205)
I	1,0	1-2	1,5-1,7
II	1,0 - 1,1	2-3	1,8 - 2,0
III	1,3	3-4	2,2 - 2,3

Als de spanningstoestand éénassig is wordt op grond van de belasting de spanning σ in een gevaarlijke doorsnede berekend. Met de factoren f_l en f_k wordt hieruit de effectieve spanning σ_{eff} berekend.

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma \cdot f_k}{f_l}$$

- f_k is de spanningsconcentratiefactor (ook wel K_t)
 f_l is de las en lijmfactor

In de isochrone spanning-rek kromme wordt de bijbehorende rek afgelezen

$$\varepsilon \leq \bar{\varepsilon}$$

In het geval van een meerassige spanningstoestand met $\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3$ geldt voor een lineair elastisch materiaal de wet van Hooke. Voor de grootste hoofdrek geldt dan:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)}{E}$$

Als we te maken hebben met een visco-elastisch materiaal, dan ligt de elasticiteitsmodulus niet vast en kunnen we de wet van Hooke niet direct toepassen. Om nu de grootste rek te bepalen worden eerst van elk van de berekende hoofdspanningen (eventueel vermenigvuldigd met f_k en gedeeld door f_l) met behulp van de isochronen de bijbehorende rekken ε_{σ_1} , ε_{σ_2} en ε_{σ_3} bepaald. Voor elke spanning geldt immers een andere secantmodulus, E_{s1} , E_{s2} en E_{s3} . De grootste rek in de richting van de grootste hoofdspanning bepalen we nu met:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_{s1}} - \nu \left(\frac{\sigma_2}{E_{s2}} + \frac{\sigma_3}{E_{s3}} \right) \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_{\sigma_1} - \nu(\varepsilon_{\sigma_2} + \varepsilon_{\sigma_3})$$

Het rekriterium is: $\varepsilon_1 \leq \bar{\varepsilon}$

ν = de constante van Poison ($\pm 0,35$)

Voor die gevallen waar de ontwerper vrij is de veiligheidscoëfficiënt te kiezen wordt voor deze coëfficiënt de waarde $V=1$ genomen. Bij de berekening op kritieke rek is na het bereiken van deze grens nog voldoende reserve aanwezig om de belasting te weerstaan.

Als de temperatuur en de lange belastingsduur gegevens van het materiaal ontbreken kan met de kritieke rek een schatting worden gemaakt van het werkelijke gedrag van de constructie. Bij een bepaalde kritieke rek kunnen we, om de toe te laten spanning te bereiken, uitgaan van de elasticiteitsmodulus E_0 bepaald volgens DIN of ASTM norm, dus E_0 wordt bepaald uit de trekproef bij een temperatuur van 20°C.

Voor het langeduur gedrag nemen we een factor γ om de kruipmodulus te schatten op basis van de korte duur elasticiteitsmodulus:

$$E_c = \gamma \cdot E_0$$

Voor thermoplasten geldt:

γ (100h)	= 0,60
γ (1000h)	= 0,50
γ (10.000h)	= 0,40
γ (100.000h)	= 0,35

Voor thermoharders geldt:

γ (1000h)	= 0,78
γ (10.000h)	= 0,65
γ (100.000h)	= 0,55

Op dezelfde wijze kunnen we factoren δ aangeven, waarmee op temperatuur wordt gecorrigeerd.

$$E_c = \delta \cdot E_0$$

Uit proeven blijkt dat δ bij elke 20°C stijging een factor 0,7 daalt voor thermoplastische materialen. Bij toepassen van deze factoren mag men de maximum toegelaten temperatuur van een kunststof niet overschrijden.

Voor thermoplastische materialen geldt:

δ 40°/20°C	= 0,7
δ 60°/20°C	= (0,7) ² = 0,5
δ 80°/20°C	= (0,7) ³ = 0,35
δ 100°/20°C	= (0,7) ⁴ = 0,25 (enzovoorts)

Voor thermohardende materialen geldt:

δ 40°/20°C	= 0,85
δ 60°/20°C	= (0,85) ² = 0,70
δ 80°/20°C	= (0,85) ³ = 0,60 enzovoorts

De kruipmodulus E_c van een materiaal bij een bepaalde belastingsduur en bij een bepaalde temperatuur wordt met deze benadering:

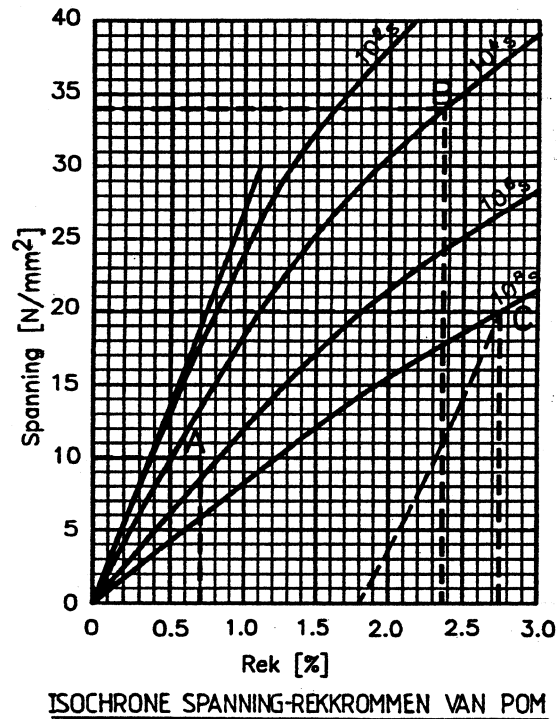
$$E_c = \gamma_{(t)} \cdot \delta_{(T/20)} \cdot E_0$$

en de toelaatbare spanning is:

$$\bar{\sigma} = E_c \cdot \varepsilon_{F\infty}$$

5.8 Voorbeeldopgaven

Voorbeeld 1. Lange duur belasting



figuur 5.28 Isochrone spanning-rek krommen van POM.

Een constructie van POM wordt op trek belast bij een constante temperatuur van 20°C. De volgende combinaties van spanning en tijd worden beschouwd:

- gedurende 140 uur een spanning $\sigma = 10$ MPa
- gedurende 2,8 uur een spanning $\sigma = 34$ MPa
- gedurende 27.500 uur een spanning $\sigma = 20$ MPa

Gevraagd:

Bepaal de rek in de constructie voor elk van deze belastingsperiodes.

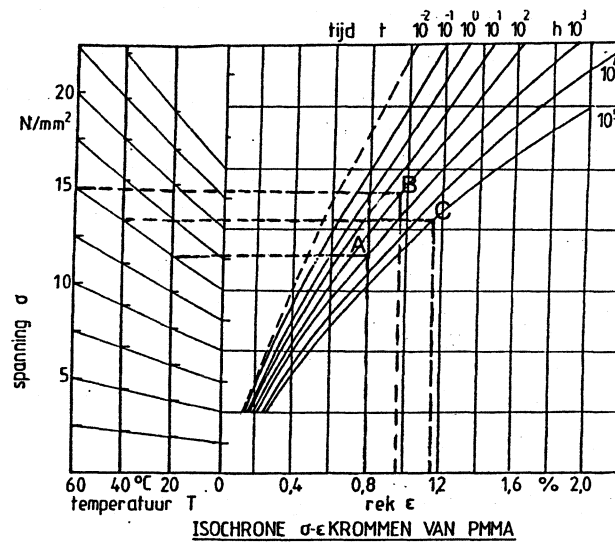
Oplossing:

In het isochrone spannings-rek diagram van figuur 5.28 lezen wij af.

- op de verticale as zoeken wij de spanning $\sigma = 10$ MPa.
De periode van 140 uur = $5,04 \cdot 10^5$ s. De rek voor deze combinatie is: $\varepsilon = 0,7\%$
- hetzelfde voor een spanning van 34 MPa en een tijd van 2,8 uur = 10^4 s.
De rek voor deze combinatie is: $\varepsilon = 2,35 \%$

- c. hetzelfde voor een spanning van 20 MPa en een tijd van 27.500 uur = $0,99 \cdot 10^8$ s.
De rek voor deze combinatie is: $\varepsilon = 2,75 \%$

Voorbeeld 2. Lange duur belasting en temperatuur



figuur 5.29 Isochrone spanning-rek krommen van PMMA

De trekspanning in een constructie van PMMA bedraagt 15 MPa. De volgende combinaties van temperatuur en tijd worden beschouwd:

- een periode van 1000 uur en een temperatuur $T = 20^\circ\text{C}$
- een periode van 100 uur en een temperatuur $T = 60^\circ\text{C}$
- een periode van 100.000 uur en een temperatuur $T = 40^\circ\text{C}$

Gevraagd:

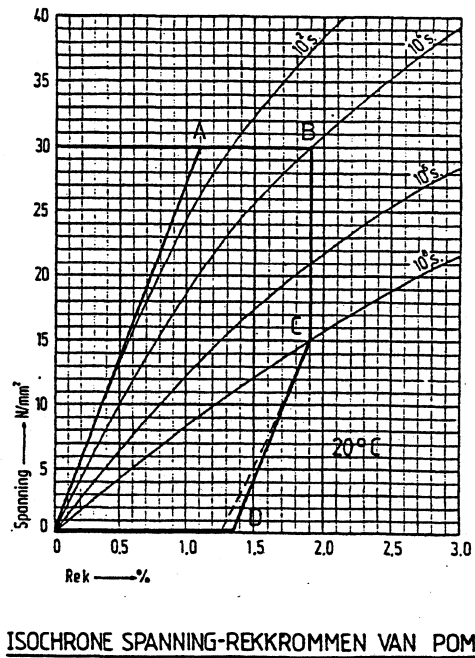
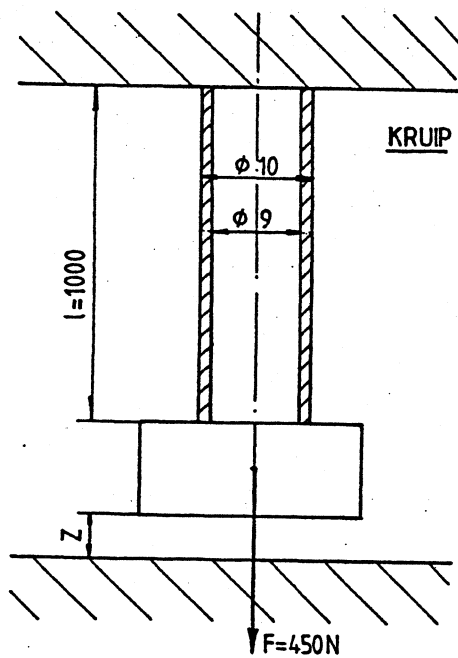
Bepaal de rek in de constructie voor elk van de drie combinaties.

Oplossing

In het isochrone spannings-rek diagram van figuur 5.29 lezen wij af:

- Voor de temperatuursperiode van 1000 uur 20°C geldt $\varepsilon = 0,8\%$
- Voor de temperatuursperiode van 100 uur 60°C geldt $\varepsilon = 0,96\%$
- Voor de temperatuursperiode van 100.000 uur 40°C geldt $\varepsilon = 1,15\%$

Voorbeeld 3. Kruip en relaxatie



figuur 5.30 Buis belast met gewicht.

Een buis van een POM copolymeer wordt belast met een gewicht van 450 N (figuur 5.30). Na 10^4 s raakt het gewicht de bodem.

Bereken:

- de afstand Z die zich kennelijk tussen gewicht en bodem bevond
- de kracht waarmee het gewicht op de bodem drukt na 10^8 s

Oplossing:

Het oppervlak van de doorsnede van de buis is: $A = \pi/4 * (10^2 - 9^2) = 14,92 \text{ mm}^2$

De spanning is: $\sigma = F/A = 450/14,92 = 30,15 \text{ MPa}$

In de grafiek van figuur 5.30 leest men de rek af bij de spanning van 30,15 MPa. Er geldt: $\varepsilon = 1,9 \%$. De verlenging van de buis is:

$$Z = \Delta l = \varepsilon l = (1,9/100) * 1000 = 19 \text{ mm}$$

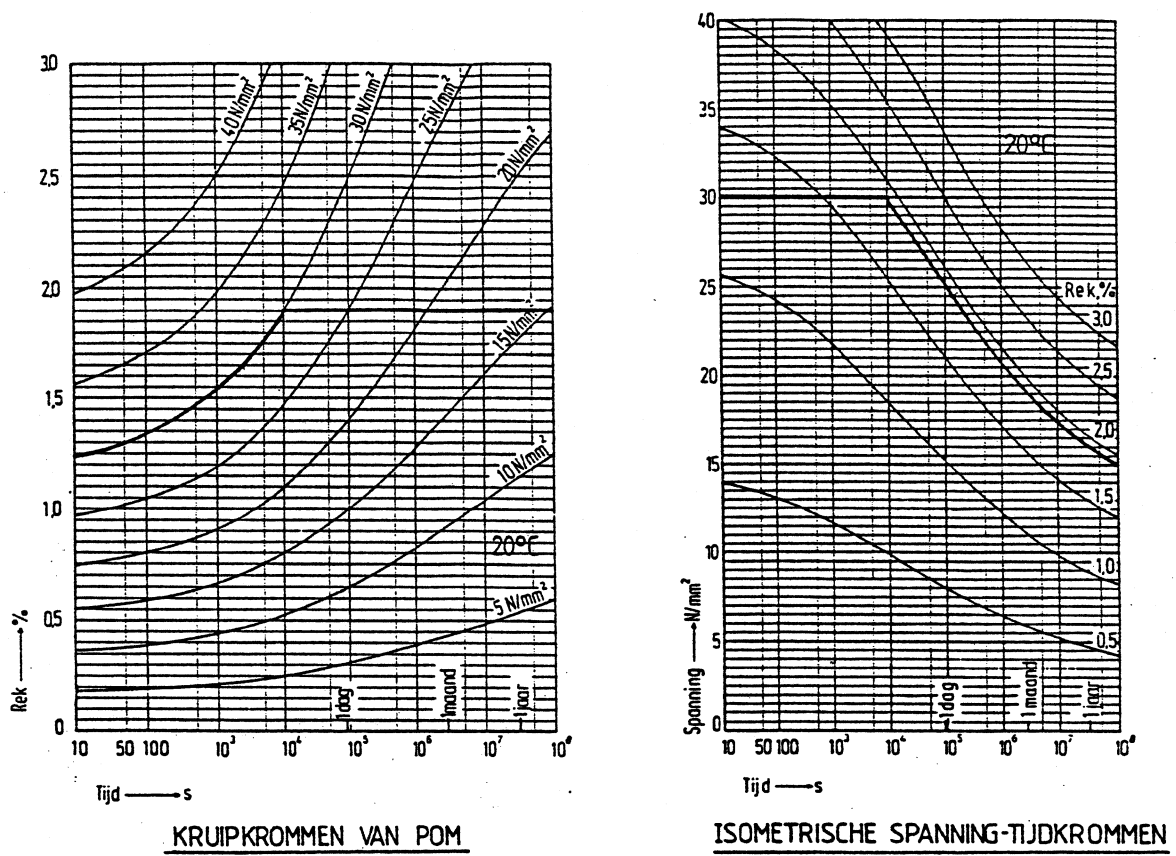
Als het gewicht de bodem raakt stopt de zakking en daarmee de kruip en begint de periode van relaxatie. Als praktische benaderingen kunnen we voor de bepaling van de spanningsverandering gebruik maken van de kruipgegevens. Verder blijkt uit de logaritmische tijdas, dat het verschil in relaxatie over 10^8 s en over $0,9994 \cdot 10^8$ s verwaarloosbaar is, zodat we het effect van de wijze van aanbrengen van de rek kunnen verwaarlozen.

De spanning in de buis na 10^8 sec. is: $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$

De spanning levert een kracht op van: $F_{\text{buis}} = \sigma \cdot A = 15 \cdot 14,92 = 225 \text{ N}$

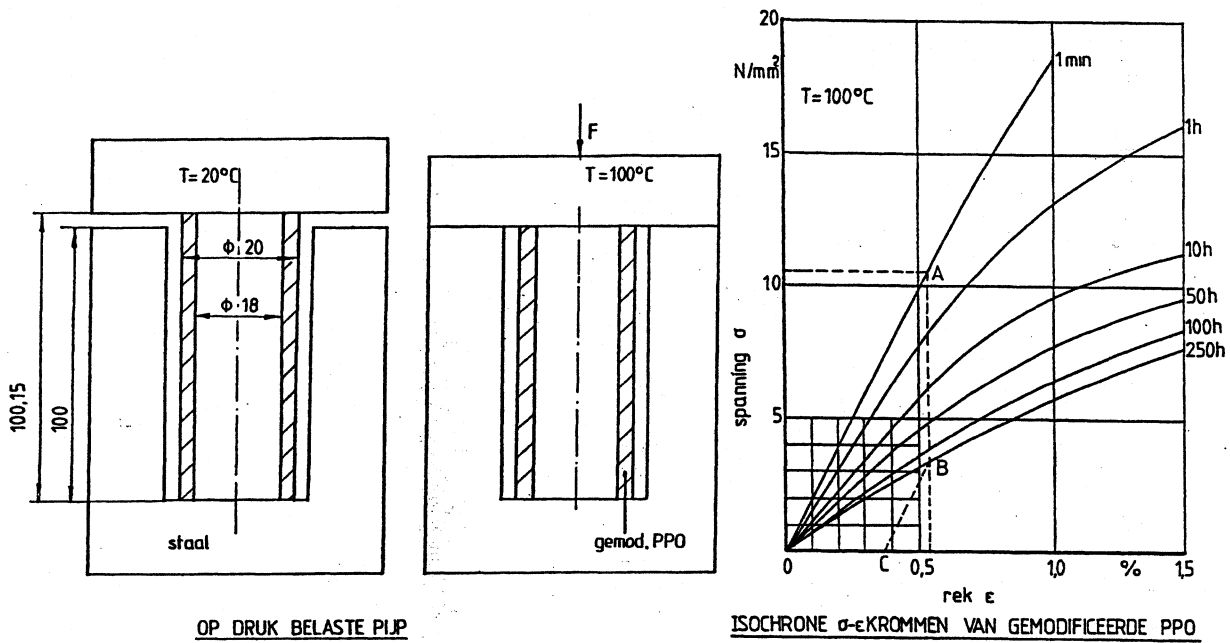
De kracht op de bodem is dus 225 N

De belasting van deze constructie is weergegeven in het kruipdiagram en in de isometrische spanning-tijd diagram (figuur 5.31).



figuur 5.31 Kruipgegevens van POM.

Voorbeeld 4. Spanningsrelaxatie



figuur 5.32 Op druk belaste pijp en isochrone spanning-rek krommen van gemodificeerd PPO.

Gegevens

Een pijp van een gemodificeerde PPO is bij 20°C 0,15 mm langer dan het stalen juk waarin de pijp geplaatst wordt (figuur 5.32). In zeer korte tijd verwarmt men het geheel tot 100°C en men zet een kracht F op het juk, zodat de onderdelen staal op staal aanliggen.

De lineaire uitzettingscoëfficiënt van staal is: $\alpha_s = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Die van de kunststof is: $\alpha_k = 60 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Bereken

- de spanning en de rek in de kunststof pijp direct na het sluiten van het juk.
- de spanning en de rek in de pijp na 250 uren belasting
- na afkoelen tot 20°C en ontlasten het maatverschil tussen juk en kunststofpijp

Oplossing

De lengte van de kunststof pijp in onbelaste toestand bij 100°C is:

$$l_k = l_{0k}(l + \alpha_k \cdot \Delta T) = 100,15 (1 + 60 \cdot 10^{-6} \cdot 80) = 100,631 \text{ mm}$$

De lengte van het stalen juk bij 100°C is

$$l_s = l_{0s}(l + \alpha_s \cdot \Delta T) = 100 (1 + 12 \cdot 10^{-6} \cdot 80) = 100,096 \text{ mm}$$

De rek of de stuik in de kunststof pijp is:

$$\varepsilon_k = \frac{100,631 - 100,096}{100,096} = 0,53\%$$

De spanning is volgens de grafiek van figuur 5.32 punt A bij een tijd van 1 min. $\sigma \approx 10,5$ N/mm².

Na 250 uren is de rek nog steeds 0,53 %, de spanning is gezakt tot $\sigma \approx 3,3$ N/mm² (punt B).

Direct na het ontlasten is de rek 0,375 % (punt C). De lengte van de bus in onbelaste toestand bij 100°C is:

$$l_{ontlast} = (1 - \varepsilon)l_k = (1 - 0,00375) \cdot 100,631 = 100,254 \text{ mm}$$

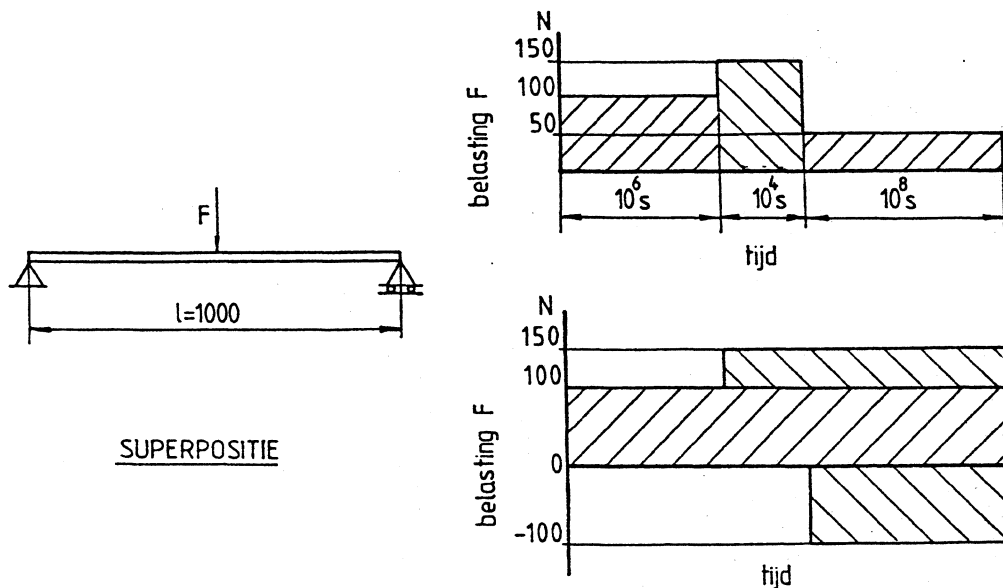
Na zeer snel afkoelen wordt de lengte van de buis:

$$l_{ontlast-20^\circ\text{C}} = \frac{l_{ontlast-100^\circ\text{C}}}{(1 + \alpha_k \Delta T)} = 99,8 \text{ mm}$$

Deze lengte zal door het visco-elastisch gedrag nog iets toe nemen, de lengtetoe name neemt met de tijd af. Dit wil zeggen dat na het afkoelen er een positieve speling is ontstaan, de kunststofpijp valt dus na afkoelen uit het juk.

Producten die uit metaal en kunststof bestaan met het kunststof geperst in het metaal waarbij de kunststof een grotere uitzettingscoëfficiënt heeft dan het metaal zullen bij temperatuurswisselingen uit elkaar vallen.

Voorbeeld 5. Superpositie



figuur 5.33 Superpositie

Een buis met een uitwendige diameter $D = 35$ mm en met een inwendige diameter $d = 28$ mm is aan beide einden opgelegd en in het midden belast met een kracht F . Het materiaal van

de buis is POM copolymeer. De belasting F op de buis verandert gedurende de tijd volgens het schema van figuur 5.33.

Bereken:

- de doorbuiging van de buis aan het einde van elke belastingperiode

Oplossing:

Het traagheidsmoment van de doorsnede bedraagt: $I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = 43.500 \text{ mm}^4$

Het weerstandsmoment is: $W = \frac{I}{\frac{1}{2}D} = 2.485 \text{ mm}^3$

De buigspanning in de doorsnede bij F bedraagt: $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{2}F \cdot \frac{1}{2}l}{W}$

Voor $F = 50 \text{ N}$ $\sigma = 5 \text{ N/mm}^2$

Voor $F = 100 \text{ N}$ $\sigma = 10 \text{ N/mm}^2$

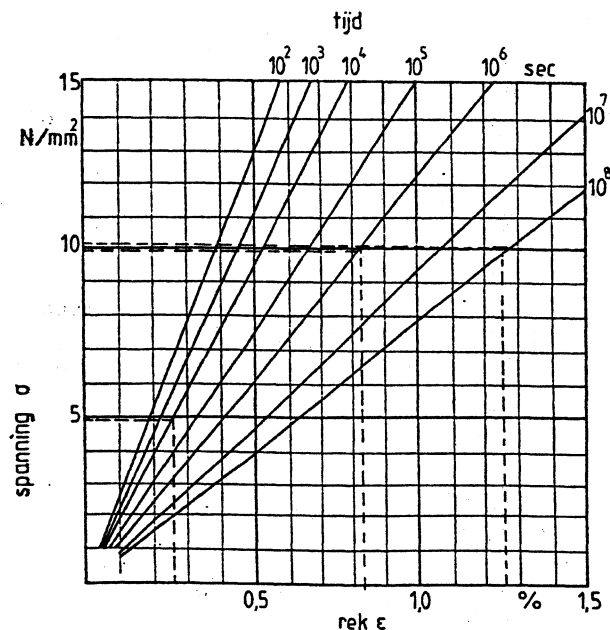
Voor $F = 150 \text{ N}$ $\sigma = 15 \text{ N/mm}^2$

De belasting wordt verdeeld zoals in figuur 5.33 is aangegeven, nu kan het superpositie beginsel van Boltzmann worden toegepast.

Aan het einde van de eerste belastingsperiode (bij $t = 10^6 \text{ sec}$ en $\sigma = 10 \text{ N/mm}^2$) is de rek:

$$\varepsilon = 0,82 \%$$

(figuur 5.34).



ISOCHRONE SPANNING-REKKROMMEN VAN EEN POM

figuur 5.34 Isochrone spanning-rek krommen van een POM.

Met $E_c = 10/0,0082 = 1220 \text{ N/mm}^2$ wordt de doorbuiging:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 39,3 \text{ mm}$$

Aan het einde van de tweede belastingsperiode, $t = 10^4 + 10^6 \approx 10^6 \text{ sec}$, is de rek ten gevolge van $F = 100 \text{ N}$ gelijk aan 0,82 % en de rek ten gevolge van $F = 150 - 100 = 50 \text{ N}$ bedraagt bij $10^4 \text{ sec} \pm 0,25\%$ (figuur 5.34). De totale rek aan het einde van de periode $10^6 + 10^4 \approx 10^6 \text{ sec}$ bedraagt $0,82 + 0,25 = 1,07\%$ bij een spanning van 15 N/mm^2 .

De kruipmodulus E_c voor de belasting van 50 N is:

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{5}{0,0025} = 2000 \text{ N/mm}^2$$

De extra doorbuiging is:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 12,0 \text{ mm}$$

De totale doorbuiging aan het einde van de tweede belastingsperiode is:

$$f = 39,3 + 12,0 = 51,3 \text{ mm}$$

Aan het einde van de derde belastingsperiode is de rek ten gevolge van $F = 100 \text{ N}$, bij $t = 10^6 + 10^4 + 10^8 \approx 10^8 \text{ sec}$, gelijk aan: $\varepsilon = 1,25\%$.

De duur van de belasting $F = 150 - 100 \text{ N}$ is $t = 10^4 + 10^8 \approx 10^8 \text{ sec}$, de bijbehorende rek is 0,62%.

Voor de negatieve belasting van $F = -100 \text{ N}$ geldt ook de tijdsduur van 10^8 sec , de rek bedraagt -1,25 %.

De totale rek aan het einde van de belastingsperiode bedraagt:

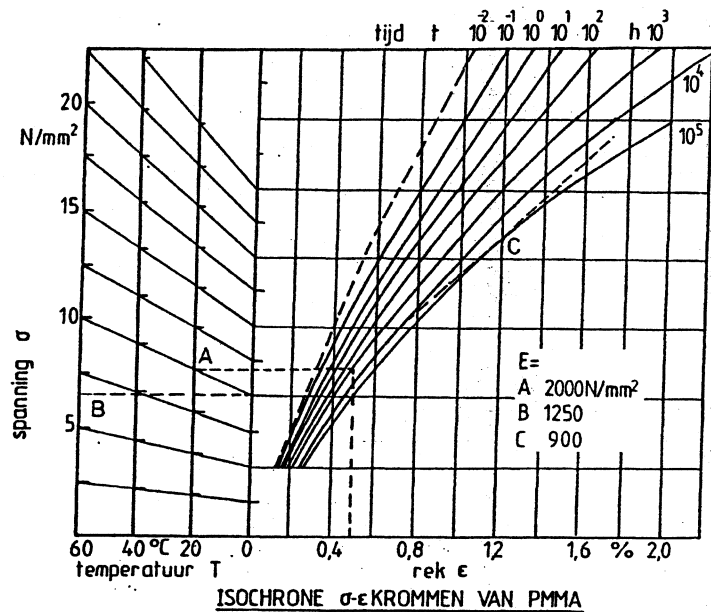
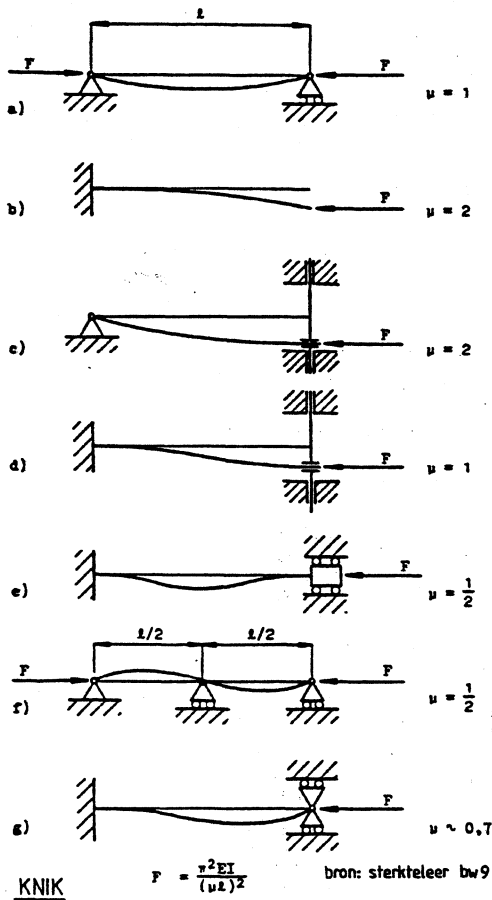
$\varepsilon = 1,25 + 0,62 - 1,25 = 0,62\%$ bij een spanning van $\sigma = 5 \text{ N/mm}^2$ (figuur 5.34).

De geschiedenis tot aan de tijd $t = 10^6 + 10^4 \text{ sec}$ is dus duidelijk van geen belang.

De kruipmodulus: $E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{5}{0,0062} \approx 800 \text{ N/mm}^2$

De doorbuiging bedraagt: $f = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = 29,9 \text{ mm}$

Voorbeeld 6. Knik



figuur 5.35 Knikbelasting en Isochrone spanning-rek krommen van PMMA.

Gegeven

Een buis met een diameter D en met een wanddikte van $t = 2,5$ mm wordt centraal op druk belast door een kracht F van 50 N. De lengte van de buis is 1400 mm, de einden van de buis zijn scharnierend verbonden aan andere constructie-elementen. Het materiaal van de buis is een PMMA.

Bereken:

- de diameter D van de buis bij 20°C en een belastingsduur van 1000 uren, de veiligheidscoëfficiënt V tegen knik is 3.
- de veiligheidsfactor bij een temperatuur van 60°C en een belastingsduur van 100.000 uren.

Oplissing:

a. De knikbelasting is:

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{\mu^2 \cdot l^2}$$

De factor μ voor scharnierende einden (figuur 5.35 links): $\mu=1$

Het traagheidsmoment is:
$$I = \frac{l^2 \cdot V \cdot F_k}{\pi^2 E}$$

Met $E \approx 2000 \text{ N/mm}^2$ (figuur 5.35 rechts) volgt: $I = 14895 \text{ mm}^4$

Verder geldt:
$$I = \frac{\pi}{64} [D^4 - d^4] = \frac{\pi}{64} [D^4 - (D - 2 \cdot t)^4]$$

Na enkele malen proberen wordt de buis diameter $D = 28 \text{ mm}$ en $I = 16.435 \text{ mm}^4$

b. De kruipmodulus na 100.000 uren belasting en bij een temperatuur van 60° is 1250 N/mm^2

De kniklast wordt dan: $F_k = 103 \text{ N}$

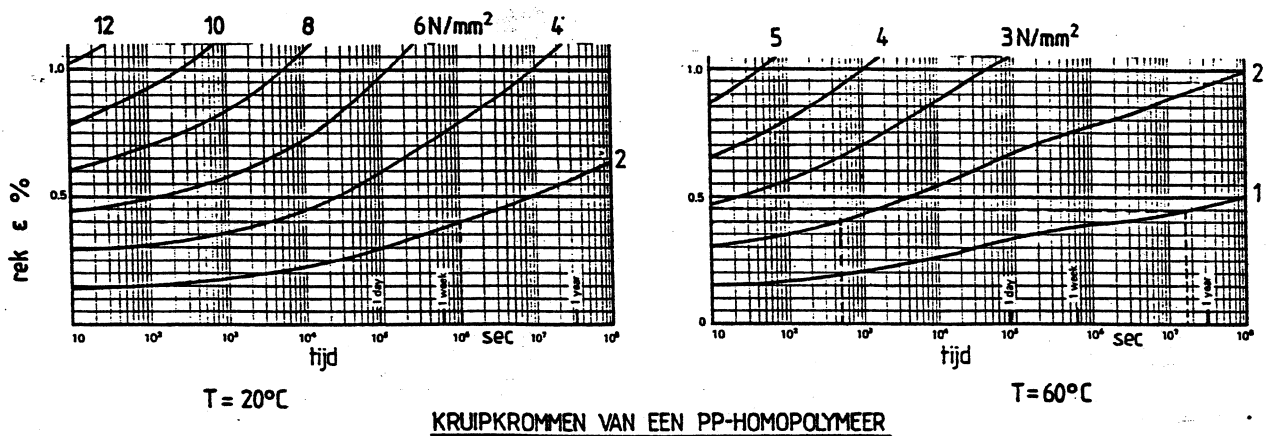
Voor de veiligheidsfactor geldt: $V = \frac{103}{50} \approx 2$

De drukspanning in de buis is: $\sigma = \frac{F}{A} = 0,25 \text{ N/mm}^2$

De rek in de buis: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 0,02 \%$

Bij veel grotere rekken is het noodzakelijk de tangent modulus te nemen, bijvoorbeeld bij punt C is $E_t = 900 \text{ N/mm}^2$.

Voorbeeld 7. Tijd-temperatuur equivalentie



figuur 5.36 Kruipkrommen van een PP homopolymer.

Gegevens

Aan de onderzijde van een vertikaal opgehangen buis hangt een gewicht van 60 N.

- Lengte van de buis: $l = 1$ m
- Materiaal: PP homopolymeer
- Buitendiameter: 20 mm
- inwendige diameter: 18 mm.

De buis wordt belast gedurende

10^8 sec ($\pm 3,2$ jaar)	bij 20°C
10^7 sec (± 16 weken)	bij 40°C
10^7 sec (± 16 weken)	bij 60°C
10^6 sec (± 2 weken)	bij 70°C .

Er staan kruipkrommen bij 20°C en bij 60°C ter beschikking (figuur 5.36).

Bereken

De verlenging van de buis aan het einde van de totale belastingstijd.

Oplossing

Met behulp van de formule voor de temperatuur-tijd-equivalentie worden de tijden omgerekend op een referentietemperatuur van $T_r = 60^\circ\text{C}$.

$$\log A_t = K_t \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right]$$

Bij een spanning $\sigma = 2$ N/mm² en bij een rek $\varepsilon = 0,4\%$ vonden we bij $T = 20^\circ\text{C}$ een tijd van $t = 10^6$ sec. en bij $T = 60^\circ\text{C}$ (fig. 5.51) een tijd van $t = 500$ sec.

De waarde voor de verschuivingsfactor is dus: $A_t = \frac{t_{20^\circ\text{C}}}{t_{60^\circ\text{C}}} = \frac{10^6}{500} = 2 \cdot 10^3 = 2000$ sec

Hiermee berekenen we voor de constante: $K_t = 8050$

Men kan nu de tijden omrekenen naar de equivalente tijd bij 60°C .

Voor 10^8 sec bij 20°C geldt:

$$A_t = 2 \cdot 10^3 \text{ sec} \Rightarrow t_{eq-60} = \frac{t}{A_t} = \frac{10^8}{2 \cdot 10^3} = 50.000 \text{ sec}$$

Voor de verschillende tijden geldt:

10^8 sec bij 20°C	$A_t = 2000$	$\equiv 5 \cdot 10^4$ sec bij 60°C
10^7 sec bij 40°C	$A_t = 35$	$\equiv 2,86 \cdot 10^5$ sec bij 60°C
10^7 sec bij 60°C	$A_t = 1$	$= 10^7$ sec bij 60°C
10^6 sec bij 70°C .	$A_t = 0,20$	$\equiv 5 \cdot 10^6$ sec bij 60°C

De totale vervangingstijd bij 60°C is dus: $5 \cdot 10^4 + 2,86 \cdot 10^5 + 10^7 + 5 \cdot 10^6 = 1,5 \cdot 10^7$ sec.

De tijden bij 20°C en bij 40°C zijn te verwaarlozen ten opzichte van de tijden bij 60°C en 70°C .

De spanning in de buis is: $\sigma = \frac{F}{A} = 1 \text{ N/mm}^2$

De rek bij een tijd van $1,5 \cdot 10^7$ sec. is: $\varepsilon = 0,45\%$

De verlenging van de buis is dus: $\Delta l = l \cdot \varepsilon = 4,5 \text{ mm}$

In deze lengte verandering is de verlenging ten gevolge van de temperatuurverhoging niet meegenomen.

Voorbeeld 8. Tijd-temperatuur equivalentie

Gegevens:

Zie het vorige voorbeeld.

Bereken opnieuw de verlenging van de buis, maar nu met behulp van de formule:

$$t(T_{ref}) = \sum_{w=1}^i t_w C \frac{T_w - T_{ref}}{10}$$

Oplossing

Men moet eerst de waarde C bepalen met behulp van figuur 5.36.

De referentie temperatuur is weer: $T_{ref} = 60^\circ\text{C}$

Kies de referentietijd: $t(T_{ref}) = 500 \text{ sec}$

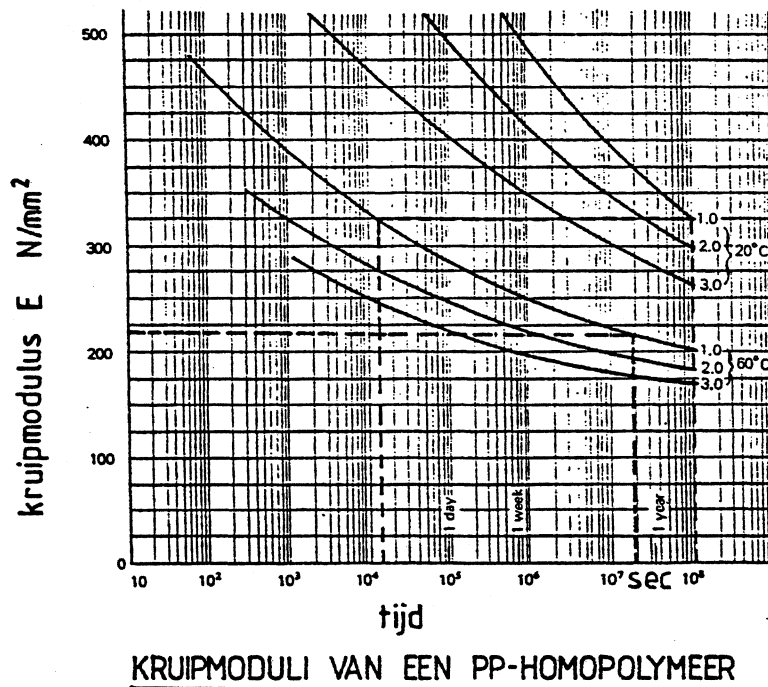
De werkelijke tijd bij 20°C is hierbij: $t_w = 10^6 \text{ sec}$

Hieruit volgt voor bij invulling van de formule voor de constante: $C = 6,7$

Elk van de referentietijden kan met behulp van de formule bepaald worden. De totale referentietijd volgt weer door optelling van de vier afzonderlijke referentietijden:

$$t(T_{ref}) = 5 \cdot 10^4 + 2,2 \cdot 10^5 + 10^7 + 6,7 \cdot 10^6 = 1,67 \cdot 10^7 \text{ sec}$$

Het verschil in tijd met het voorgaande voorbeeld is nauwelijks af te lezen. De verlenging is ook hier circa 4,5 mm.



figuur 5.37 Kruiptmoduli van een PP homopolymeer.

We gaan nu uit van figuur 5.37.

De referentie temperatuur is weer: $T_{ref} = 60^{\circ}\text{C}$

Kies de referentietijd: $t(T_{ref}) = 1,2 \cdot 10^4 \text{ sec}$

De werkelijke tijd bij 20°C is hierbij: $t_w = 10^8 \text{ sec}$

Hieruit volgt bij invulling van de formule voor de constante: $C = 9,55$

De totale referentietijd volgt weer door optelling van de vier afzonderlijke referentietijden:

$$t(T_{ref}) = 1,95 \cdot 10^7 \text{ sec}$$

Bij deze waarde en bij 60°C en een rek ε van 1% is de kruiptmodulus: $E_c = 215 \text{ N/mm}^2$

De verlenging van de buis is nu:

$$\Delta l = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} = 4,65 \text{ mm}$$

Voorbeeld 9. Dynamische belasting

Gegevens:

Een platte staaf van PMMA met een constante dikte $s = 8 \text{ mm}$ wordt belast met een sinusvormige spanning van $\sigma_a = 10 \text{ N/mm}^2$. De frequentie van de belasting is 10 Hz .

Bij 20°C is de mechanische verliesfactor $\tan \delta = 0,080$.

De elasticiteitsmodulus $E = 3000 \text{ N/mm}^2$.

Bij 60°C zijn deze waarden $\tan \delta = 0,100$ en $E = 2200 \text{ N/mm}^2$.

De warmteoverdrachtscoëfficiënt $\alpha = 15 \text{ W/m}^2\text{°C}$

Gevraagd:

Schat de evenwichtstemperatuur van de staaf.

Oplossing:

De temperatuurstijging is:

$$\Delta T = \frac{\pi \cdot \sigma_a^2 \cdot \tan \delta \cdot f \cdot s}{E \cdot 2\alpha} \approx 22^\circ\text{C}$$

De temperatuur:

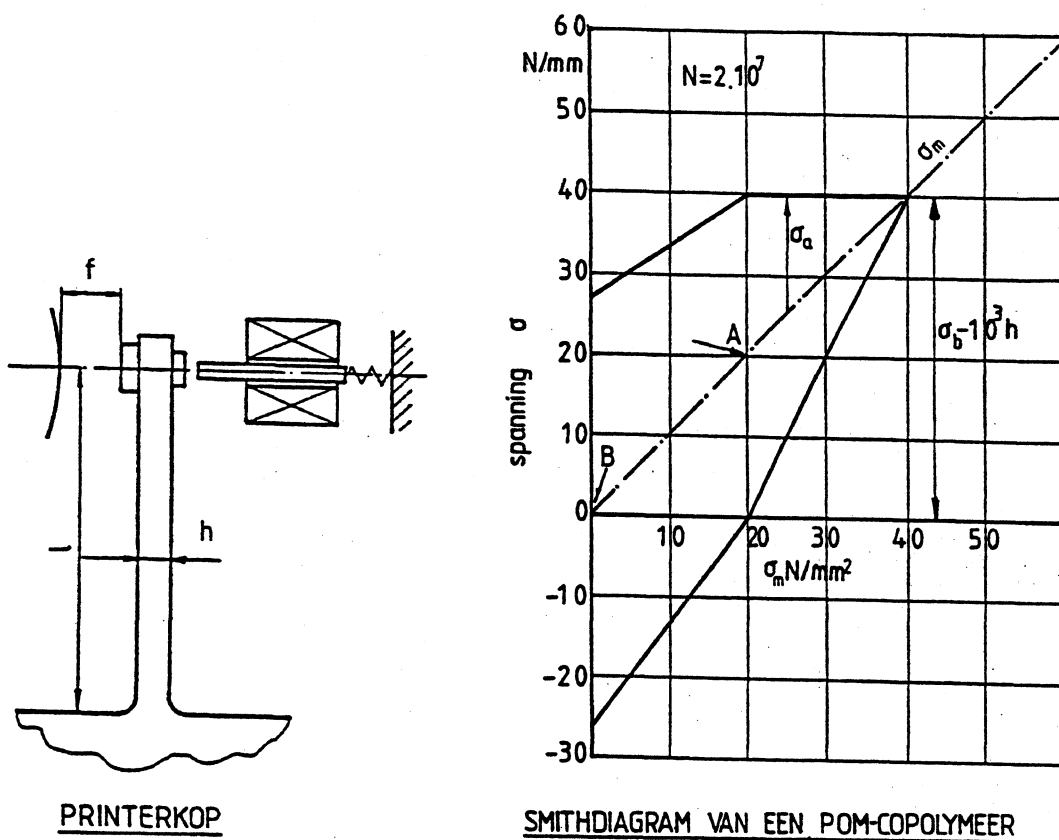
$$T = 20 + \Delta T \approx 42^\circ\text{C}$$

Bij een temperatuur van 42°C is de E-modulus lager en $\tan \delta$ hoger dan bij 20°C . Neem nu deze waarden bij 60°C . Hieruit volgt:

$$\Delta T \approx 38^\circ\text{C} \quad \text{en} \quad T = 20 + \Delta T \approx 58^\circ\text{C}$$

De uiteindelijke temperatuur T zal iets lager zijn dan 58°C , omdat nu E iets groter wordt en $\tan \delta$ iets kleiner dan waarmee is gerekend.

Voorbeeld 10. Vermoeiing



figuur 5.38 Printerkop en Smith-diagram van een POM copolymeer.

Gegevens

Een printer is uitgerust met verende elementen van POM die elk een letterteken bevatten en die door middel van een mechanisme tegen het papier wordt gedrukt (figuur 5.38).

De levensduur van de printer is $2 \cdot 10^7$ wisselingen, dit komt overeen met 1000 uren. De verdere gegevens zijn:

- $I = 30$ mm
- $b = 4$ mm
- $h = 3$ mm
- $f = 4$ mm
- $E = 2500$ N/mm

Er wordt van uitgegaan dat de elasticiteitsmodulus gedurende de levensduur niet verandert.

Bereken

- de veiligheidscoëfficiënt bij een belasting van $2 \cdot 10^7$ wisselingen
- de dikte b bij een veiligheidscoëfficiënt $V = 2$

Oplissing

De doorbuiging:
$$f = \frac{Fl^3}{3EI}$$

De spanning bij de voet: $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l \cdot b}{2 \cdot I}$ of $\sigma = \frac{3}{2} \frac{b}{l \cdot b^2} \cdot f \cdot E = 50 \text{ N/mm}^2$

Uit figuur 5.38 bij punt A blijkt dat de maximum spanning 40 N/mm^2 mag zijn, er treedt voortijdig breuk op.

Bij een veiligheidsfactor van 2 is de toelaatbare spanning:

$$\sigma_{toel} = \frac{\sigma_b}{V} = \frac{40}{2} = 20 \text{ N/mm}^2$$

en voor de dikte geldt:
$$h = \frac{2}{3} \cdot \frac{l^2 \cdot \sigma_{toel}}{f \cdot E} = 1,2 \text{ mm}$$

5.9 Literatuur

- 1 Werkstoffkunde der Kunststoffe
Georg Menges
Hanser Verlag München 1985
- 2 Kunststoff-Kennwerte für Konstrukteure
Karl Oberbach
Hanser Verlag München 1980
- 3 Konstruieren mit Kunststoffen
Rainer Taprogge
VDI Verlag GmbH Düsseldorf T21
- 4 Kunststoff-Konstruktionen
Menges Taprogge
VDI Verlag GmbH Düsseldorf T38
- 5 Konstruieren in thermoplastische Kunststoffen 1 en 2
VM15 en VM75
Educaboek Culemborg
- 6 Steife Blech und Kunststoff-Konstruktionen
Oehler und Weber
Springer Verlag Berlin 1972
- 7 Stress Analysis of polymers
JG Williams
Longman Groep Ltd 1973

-
- 8 Visco-elasticity
Wilhelm Flügge
Blaisdell Publishing Company 1967
 - 9 Ontwerpen in vezelversterkte kunststoffen
AHJ Nijhof
College- W72G TU Delft
 - 10 An introduction to composite materials
Derek Hull
Cambridge University Press 1982
 - 11 Mechanics of composite materials
Robert M. Jones
Mc Graw-Hill Book Company New York 1975
 - 12 Mechanical Behavior of high polymers
Turner Alfrey
Interscience Publishers Ine New York 1984
 - 13 Formules for stress and Strain
Roark and Young
Mc Graw-Hill International Book Company
 - 14 Merkblatt DVS 2205
Berechnen von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten
Deutscher Verband far Schweisstechnik e.v.
 - 15 Ontwerpen op bedrijfszekerheid van Kunststoff produkten
J.L. Spoormaker
Diktaat IO 86 TU Delft Jan 1988
 - 16 A.L. Lifshay
Ribbed Plastic Parts
Machine Design May 30, 1974

Hoofdstuk 6. Constructieve aspecten

6.1 Inleiding

Bij het construeren in kunststoffen moet met de specifieke eigenschappen van kunststof rekening worden gehouden. De ontwerper moet daarom vooral letten op

- de lage elasticiteitsmodulus
- de geringe sterkte
- de kerfgevoeligheid
- de brosheid bij slag- en stootbelastingen
- de sterke invloed van de temperatuur op de eigenschappen

In verband met de bovenvermelde aspecten worden constructies vaak verstijfd d.m.v. ribben, zodat bij een redelijk materiaalgebruik nog aan de stijfheids- en sterkte-eisen kan worden voldaan.

Een van de meest voorkomende faalorzaken van producten uit kunststof is een te hoge plaatselijke rek t.g.v. scherpe overgangen. Dit is te voorkomen door goede afrondingen ter plaatse van overgangen. Helaas worden op tekeningen vaak al te kleine afrondingen aangegeven. In matrijzen komen herhaaldelijk minimale afrondingen voor ondanks goede aanduidingen op de constructietekening. De reden hiervoor is dat bij het bewerken van matrijzen het maken van scherpe overgangen veel sneller en goedkoper is dan afgeronde overgangen. Proefproducten zullen daarom op de scherppte van de overgangen gecontroleerd moeten worden.

Bij verende elementen moet er bovendien nog rekening mee worden gehouden dat deze elementen bijna altijd een verplaatsing voorgeschreven krijgen. Dit betekent dat er erg hoge rekken bij stijve veren kunnen optreden. De hoogte van op buiging belaste elementen is dus erg belangrijk, een dunne veer faalt minder snel dan een dikke veer.

Specifiek voor het construeren in kunststoffen is de toepassing van klikverbindingen. Deze verbindingen leveren grote voordelen op in de montage en de demontage van constructiedelen. De berekeningwijze van de klikverbindingen wordt hier behandeld en er worden constructieaanwijzingen gegeven.

Veel meer dan bij het construeren in metalen, moet er bij kunststoffen rekening worden gehouden met de verwerking. Heel belangrijk is bijvoorbeeld dat vloeinaden op hoog belaste plaatsen vermeden moeten worden.

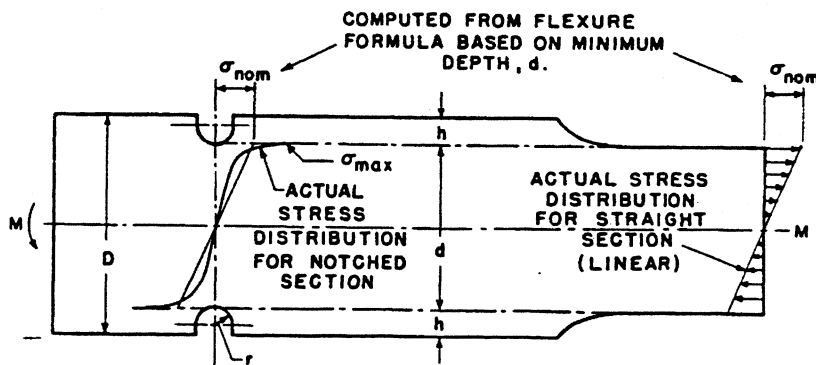
6.2 Spanningsconcentraties

Bij overgangen in materiaaldikten, gaten en kerven treden plaatselijk hoge rekken en spanningen op. Vooral niet goed afgeronde overgangen geven daardoor aanleiding tot breuk. Spanningsconcentraties vormen één van de meest voorkomende oorzaken van falen van producten uit kunststof.

De spanningsconcentratiefactor K_t is een maat voor de stijging van de spanning of rek t.o.v. de naaste omgeving, uitgaande van lineair materiaalgedrag. Deze factor is gedefinieerd als de verhouding tussen de maximale spanning σ_{max} en de nominale spanning σ_{nom}

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1)$$

De maximale spanning kan voor een bepaalde geometrie worden gemeten door gebruik te maken van foto-elasticiteit. Het is tegenwoordig steeds eenvoudiger om m.b.v. de Eindige Elementen Methode de maximale spanning te berekenen.



figuur 6.1 Spanningsconcentratie in een op buiging belaste staaf met kerf.

De nominale spanning is meestal gebaseerd op de netto- ofwel kleinste doorsnede en wordt verkregen met een eenvoudige berekening. In figuur 6.1 is de spanningsverdeling in een op buiging belaste staaf met een kerf getekend. De nominale spanning is voor dit geval van zuivere buiging eenvoudig te berekenen met:

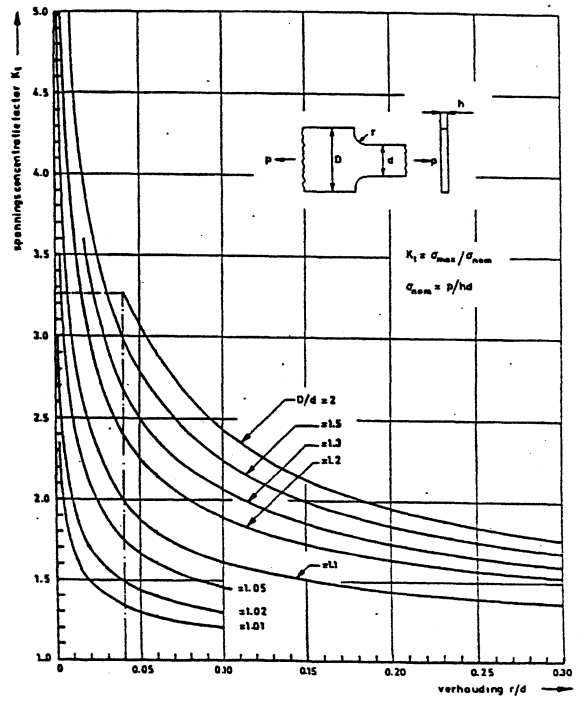
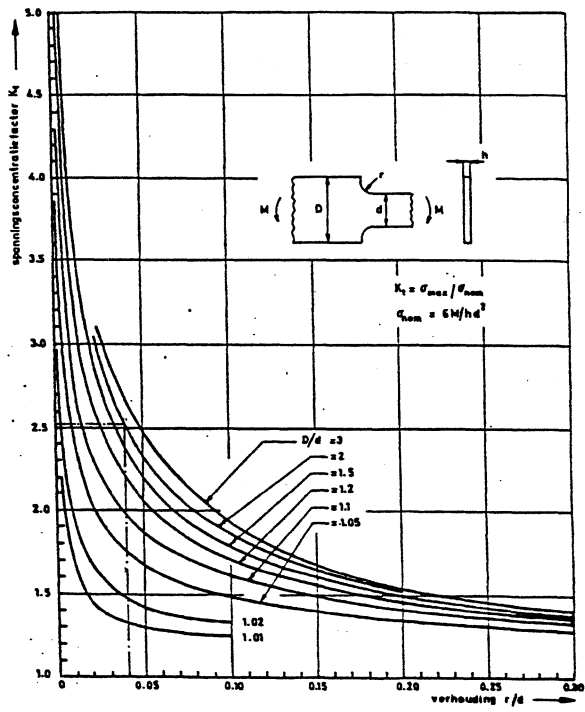
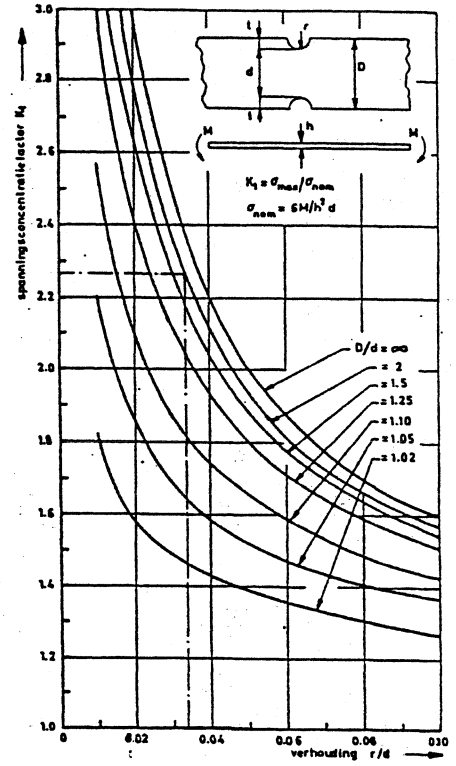
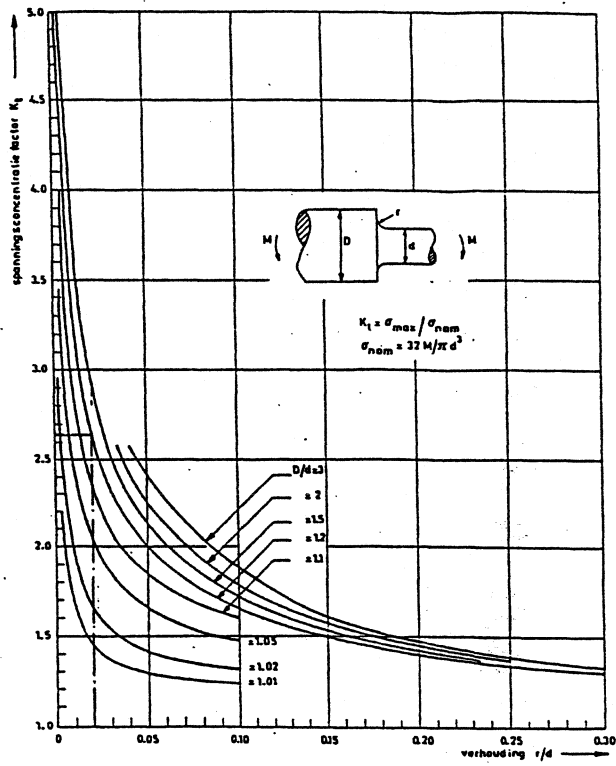
$$\sigma_{nom} = \frac{M}{W_b} \quad (2)$$

waarin M het buigend moment en W_b het weerstandsmoment tegen buiging zijn.

Bij de tip van de kerf treedt lokaal een spanningsconcentratie op. De waarde van de spanningsconcentratiefactor is voor de meest voorkomende gevallen te bepalen door gebruik te maken van tabellen en grafieken. Het boek van Peterson "Stress Concentration Factors" bevat een uitgebreide verzameling van in de praktijk voorkomende gevallen.

De grafieken gelden voor een bepaald geval en zijn dimensieloos gemaakt. In figuur 6.2 zijn een aantal voorbeelden gegeven, waarbij de spanningsconcentratiefactor is weergegeven als functie van de kerfdiepte en van de afrondingsstraal. Het gebruik van deze grafieken is mogelijk door twee dimensieloze getallen te berekenen en wel:

- de verhouding tussen de grootste en de kleinste afmeting bij een materiaalovergang (D/d)
- de verhouding tussen de afrondingsstraal en de kleinste afmeting (r/d)

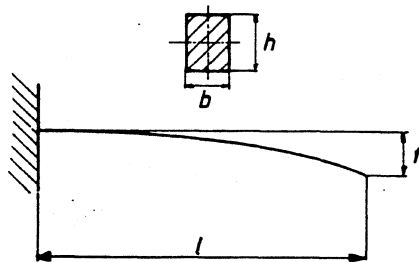


figuur 6.2 Bepaling van de spanningsconcentratiefactor.

6.3 Verende elementen

Verreweg de meeste verende elementen uit kunststof ondergaan een verplaatsing aan het uiteinde. De hoogst optredende nominale rek is m.b.v. de "vergeet-mij-nietjes" te bepalen. Voor een ingeklemde balk van constante dikte zoals in figuur 6.3 is getekend, is deze rek (zie ook paragraaf 6.5.3):

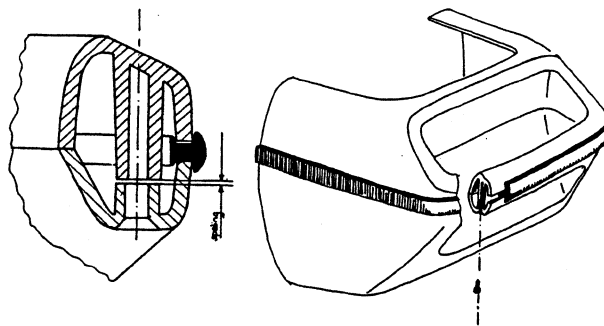
$$\varepsilon = \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{l^2} \cdot f \quad (3)$$



figuur 6.3 Ingekleemde balk met voorgeschreven verplaatsing aan het uiteinde.

Uraag
Er moet rekening mee worden gehouden dat bij de inklemming er een spanningsconcentratie optreedt. De spanningsconcentratiefactor is bij niet al te kleine afrondingsstralen al gauw een factor 1,5 maar kan bij scherpe overgangen oplopen tot een factor 5.

Uraag
Een mogelijkheid om efficiënter gebruik te maken van het materiaal in een verend element is het toepassen van taps verlopende balken. Bij een verhouding van de hoogten bij de inklemming en het uiteinde van 2 kan een aanmerkelijke reductie in de hoogste rek worden verkregen. Bij klikverbindingen worden vaak taps toelopende klikvingers toegepast (zie ook paragraaf 6.5).



figuur 6.4 Schroefverbinding met afsteuning op een verende lip.

Bij schroefverbindingen worden soms hoge rekken in het materiaal veroorzaakt door het overbruggen van toleranties. De afsteuning op een verende lip kan een hoge belasting voor het materiaal betekenen bij een schroefverbinding. In figuur 6.4 is dit voor een constructie in een stofzuiger getekend.

De optredende rekken zijn hier hoger naarmate de lip dikker en korter is, terwijl er ook een hoge spanningsconcentratie bij de inklemming van de lip optreedt.

Deze constructie is te verbeteren door toepassing van:

- een langere lip
- een dunnere lip
- een taps toelopende lip
- een grotere afrondingsstraal

6.4 Verstijven van constructies

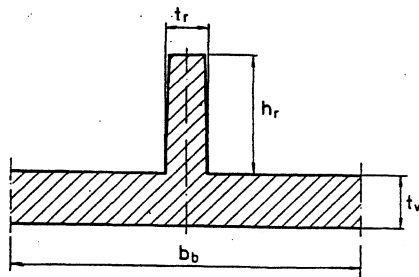
6.4.1 Stijfheidsaspecten van verribben

De elasticiteitsmodulus van kunststoffen is een factor 25 tot 70 lager dan die van staal. Constructies uit kunststof zijn daardoor aanzienlijk slapper dan die uit metaal, indien geen maatregelen worden getroffen.

Sterker nog dan bij constructies uit metaal zal er bij de toepassing van kunststof in een product gebruik moeten worden gemaakt van profielen en ribben. Er moet wel worden benadrukt dat deze verstijvingsmogelijkheden vooral effectief zijn bij buigbelastingen. Bij axiale belastingen helpt alleen een vergroting van het oppervlak en bij torsie vooral een gesloten vorm, maar ook kruisverribbingen.

De verhoging van de buigstijfheid door het aanbrengen van ribben of een profiel kan berekend worden door het traagheidsmoment van de doorsnede te bepalen. Het traagheidsmoment is recht evenredig met de buigstijfheid. *→ vraag*

Voor het eenvoudig bepalen van de stijfheid en sterkte van verribde platen kunnen ook diagrammen (van Lipshey) gebruikt worden. Over de achtergrond van de berekeningen is meer te vinden in literatuur 1 en 2. Voor het gebruik van deze diagrammen wordt de plaat verdeeld gedacht in een aantal T-profielen zoals in figuur 6.5 is aangegeven.



Lipshey

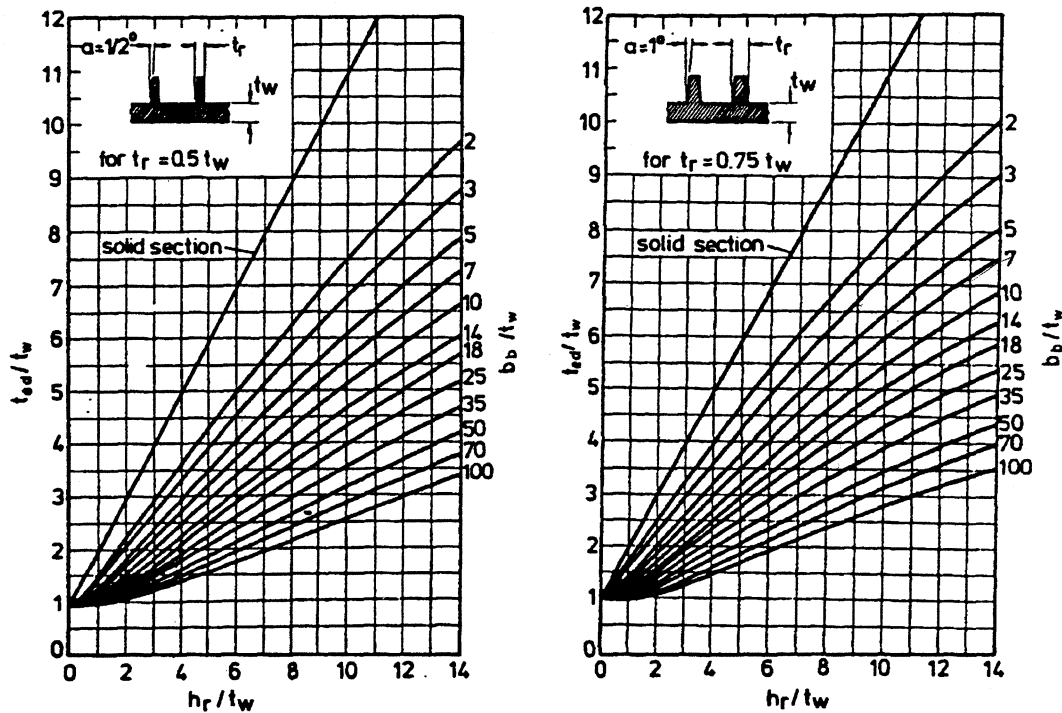
figuur 6.5 Deel van een verstijfde plaat met ribben.

De afmetingen zijn als volgt aangeduid:

- t_r = ribdikte
- h_r = ribhoogte
- t_w = plaatdikte
- b_b = basisbreedte (plaatbreedte / aantal ribben)

Er wordt hier op gewezen dat voor de dikte de aanduiding t is gebruikt, terwijl de hoogte met h is aangegeven.

Voor deze profielen is het mogelijk de verhoging van de stijfheid en de belastbaarheid te berekenen. In de hier gegeven diagrammen is dit gegeven voor ribben, die 0,5 en 0,75 maal de plaatdikte zijn. Dikkere ribben zijn vaak effectiever, maar geven teveel inval bij de overgang van rib naar plaat.



figuur 6.6 Diagrammen ter bepaling van de verstijving van verribde platen voor doorbuiging.

Bij het gebruik van de in figuur 6.6 getoonde diagrammen is het mogelijk de verstijving van ribben t.o.v. de plaat zonder ribben te bepalen. Er moet bij het gebruik van deze diagrammen worden bedacht dat er naar de plaatdikte t_w is genormeerd. De procedure daarbij is als volgt:

- bepaal de verhouding ribdikte/plaatdikte (t_r/t_w) om te bepalen welk diagram gebruikt mag worden.
- bereken de verhouding tussen de basisbreedte en de plaatdikte (b_b/t_w) om de juiste schuin oplopende lijn te kunnen kiezen
- bereken de verhouding tussen de ribhoogte en de plaatdikte (h_r/t_w) om de positie op de horizontale as te bepalen

Wanneer deze dimensieloze getallen bekend zijn is het mogelijk de verhouding tussen een plaat met een equivalente dikte t_{ed} en de plaatdikte op de verticale as te vinden. De equivalente dikte is de dikte van een plaat zonder ribben, die dezelfde stijfheid heeft als een plaat met ribben. Omdat de stijfheid evenredig is met de derde macht van de dikte; geeft dus een verribde plaat, die 8 maal zo stijf is als de onverribde plaat, een equivalente dikte van 2 maal de plaatdikte.

Voorbeeld

Stel dat een plaat de volgende afmetingen heeft:

-
- plaatbreedte = 500 mm
 - plaatdikte $t_w = 10$ mm

De plaat wordt verstijfd met 10 ribben van de onderstaande afmetingen

- ribdikte $t_r = 5$ mm
- ribhoogte $h_r = 40$ mm

De verhouding $t_r/t_w = 0,5$ zodat het linkerdiagram moet worden gebruikt.

De verhouding $b_b/t_w = 50/10 = 5$ waardoor de schuin oplopende lijn bekend is.

De verhouding $h_r/t_w = 40/10 = 4$ wat de startpositie op de horizontale as geeft.

Door een verticale lijn vanuit het startpunt op de horizontale as te trekken kan het snijpunt met de schuin oplopende lijn worden bepaald. Vanuit dit snijpunt wordt een horizontale lijn naar de verticale as getrokken. Op de verticale as wordt nu de verhouding t_{ed}/t_w gevonden, die voor dit geval 3 is.

De stijfheid is evenredig met de derde macht van de dikte, dus de verribde plaat is dus $3^3 = 27$ maal stijver dan de onverribde plaat.

6.4.2 Sterkteaspecten van verribben

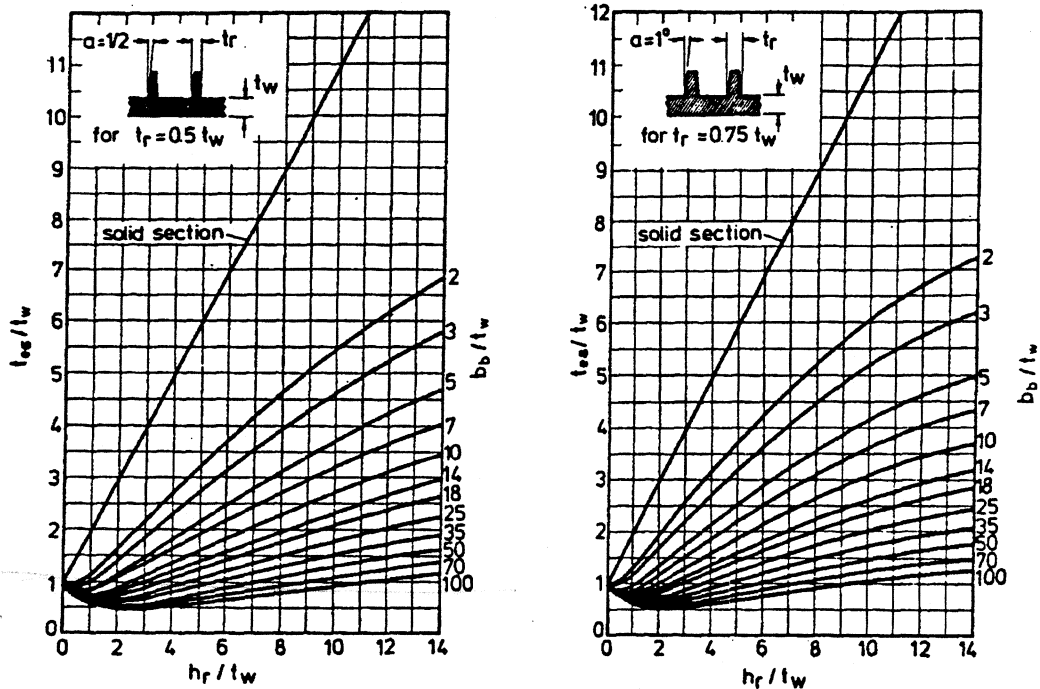
Platen, die verstijfd zijn door ribben, kunnen in belastbaarheid verminderen bij een bepaalde ribconfiguratie. Dit treedt vooral op bij toepassing van:

- lage ribben
- weinig ribben
- dunne ribben

De toename van de uiterste vezelafstand is dan sterker dan de toename van het traagheidsmoment van de verribde plaat.

De berekening van de vermindering of eventuele verhoging van de maximale rek kan ook geschieden m.b.v. door Lipshey opgestelde diagrammen. In figuur 6.7 zijn diagrammen voor verschillende ribdikten gegeven.

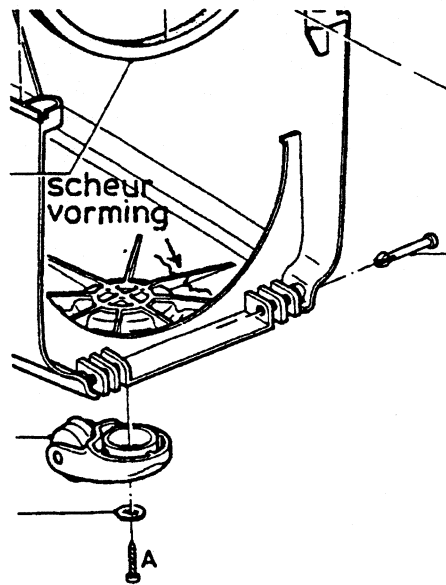
uit verp...



figuur 6.7 Diagrammen ter bepaling van de maximale spanning in verribde platen in doorbuiging.

Het gebruik van deze diagrammen is gelijk aan die voor het bepalen van de verstijving. Voor een verribde plaat wordt eerst de plaatbreedte gedeeld door het aantal ribben en daarna worden de andere afmetingen genormeerd op de plaatdikte t_w . Op de verticale as staat nu de verhouding t_{es}/t_w i.p.v. t_{ed}/t_w . De equivalente dikte t_{es} staat voor een denkbeeldige volle plaat, waarin dezelfde maximale rek optreedt als in de verribde plaat. De optredende rek is echter omgekeerd evenredig met het kwadraat van de plaatdikte. Dit betekent dat - indien de verhouding t_{es}/t_w 0,5 is - de maximale rek in de verribde plaat 4 maal de waarde van die in de onverribde plaat is. In figuur 6.7 is te zien dat dit optreedt voor verribde platen waarvan de ribhoogte ongeveer 2 maal de plaatdikte is en er relatief erg weinig ribben zijn geplaatst. Bij schuin oplopende ribben kan zich deze situatie van een verstijfde constructie die verzwakt is voordoen. In figuur 6.8 is dit voor een neuswiel constructie van een stofzuiger aangegeven.

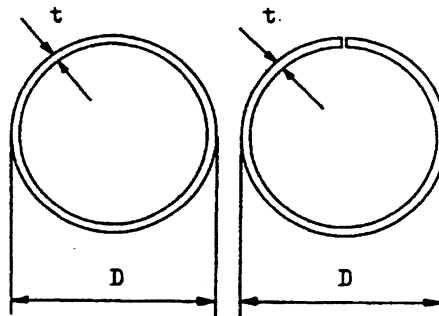
Verder moet er bij ribben op gelet worden dat deze stabiel zijn onder drukbelasting. Ribben die hoger dan 5 maal de ribdikte zijn zullen in drukbelasting uitknikken waardoor het verstijvend effect verminderd wordt.



figuur 6.8 Verribde plaat met zwakke punten.

6.4.3 Verhoging van de torsiestijfheid

De torsiestijfheid van een constructie kan het beste door een gesloten profiel en minder door verribbing verhoogd worden. Dit wordt aan de hand van een eenvoudig voorbeeld toegelicht.



figuur 6.9 Gesloten en open buisprofiel.

In figuur 6.9 zijn twee profielen, die op torsie zijn belast getoond. Het linker profiel is een gesloten buis, terwijl de rechter een zaagsnede bevat.

De torsiestijfheid S van het gesloten profiel is:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot D^3 \cdot t \cdot G \quad (4)$$

De torsiestijfheid S van het profiel met zaagsnede is:

$$S = \frac{\pi}{3} \cdot D \cdot t^3 \cdot G \quad (5)$$

Voor een buis met diameter $D=10$ mm en wanddikte $t=1$ mm betekent dit dat het gesloten profiel 75 maal stijver is dan het open profiel.

Het is niet altijd mogelijk om een gesloten profiel toe te passen. De torsiestijfheid van een open U-profiel kan dan wel verhoogd worden door diagonale verribbing. Bij een op torsie belast U-profiel met diagonale ribben, worden de ribben feitelijk op buiging belast.

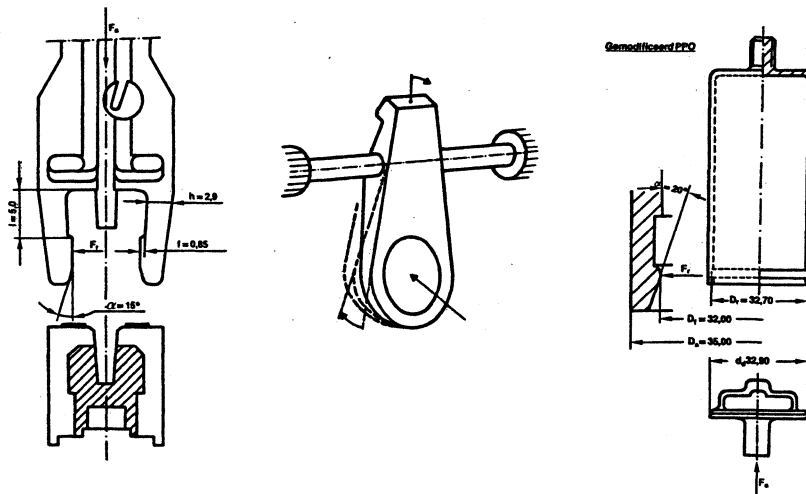
6.5 Klikverbindingen

Kunststof onderdelen kunnen op verschillende manieren aan elkaar of aan niet-kunststof onderdelen verbonden worden. Het toepassen van klikverbindingen is een van deze mogelijkheden.

De klikverbinding is een verbinding waarbij men gebruik maakt van de elasticiteit van thermoplastische materialen. De verbinding tussen de onderdelen wordt verkregen door het uitbuigen en laten terugveren van haken die aan één of beide delen meegespoten worden. Omdat geen extra verbindingselementen nodig zijn en verder, afhankelijk van de vorm van de producten en de seriegrootte, een gemechaniseerde montage mogelijk is, kan men op een goedkope wijze constructiedelen samenvoegen.

Klikverbindingen deelt men meestal in drie groepen (figuur 6.10) in:

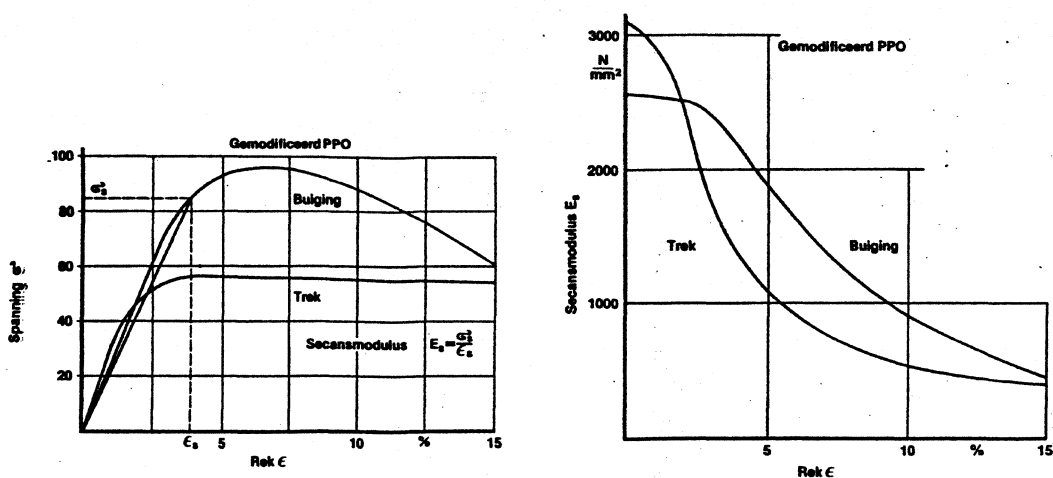
- De verbinding bestaat uit een of meer verende haken die op buiging worden belast.
- De verbinding bezit een as die op torsie wordt belast.
- De verbinding bestaat uit een gesloten ring die radiaal en gelijkmatig wordt belast.



figuur 6.10 Klikverbindingen. Vlnr: klikvinger, torsie- en cilindrische klikverbinding.

6.5.1 Toelaatbare vervorming

Bij het berekenen van klikverbindingen zijn de elasticiteitsmodulus E en de grootte van de vervorming, ofwel de rek, van groot belang. Maattoleranties zijn daarom ook zeer belangrijk, met name voor cilindrische klikverbindingen. De sluittijd of montagetijd van een klikverbinding is zeer kort, dat wil zeggen dat men bij de montage geen rekening hoeft te houden met de kruip van het materiaal.



figuur 6.11 Verband tussen spanning en rek en de secansmodulus van gemodificeerd PPO.

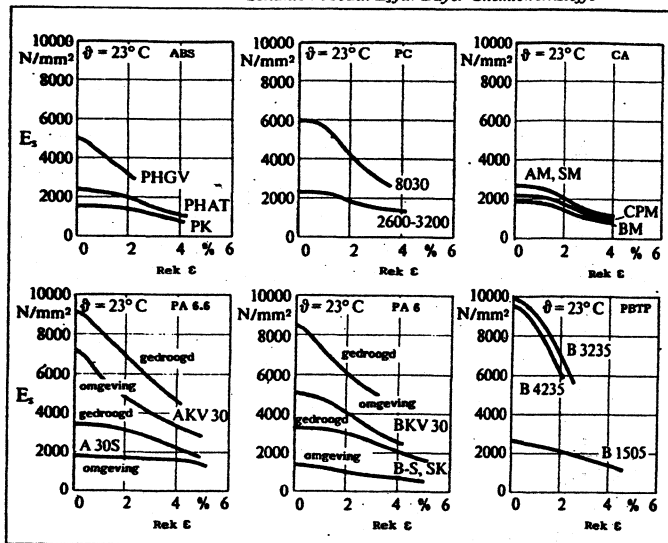
Als de constructie van de verbinding zo is uitgevoerd, dat na het sluiten de verbinding onder een bepaalde spanning blijft staan, zal men rekening moeten houden met de relaxatie van het materiaal. De vervorming van een klikverbinding tijdens het sluiten is groot. Meestal zo groot, dat het materiaal de wet van Hooke niet meer volgt, waardoor de formules voor spanningen en vervormingen hun geldigheid verliezen. Ondanks dit feit doen we toch alsof het verband tussen de spanning en de rek lineair is. Het is duidelijk dat de krachten die men op deze wijze berekent niet meer kunnen zijn dan schattingen. In figuur 6.11 is van een thermoplastisch materiaal, in dit geval een gemodificeerd PPO, het verband weergegeven tussen de spanning σ en de rek ϵ .

Dit verband is over een zeer klein traject lineair. Er is ook een groot verschil waarneembaar tussen spanning uit de buig- en uit de trekproef. Naarmate de rek groter wordt neemt het aandeel kruip, dus blijvende vervorming, toe. De elasticiteitsmodulus E van een materiaal wordt bepaald bij de rek $\epsilon=0$. Om in het niet-lineaire gebied te kunnen rekenen, wordt gebruik gemaakt van de secantmodulus E_s . Naarmate de vloeit van het materiaal toeneemt zal de secantmodulus E_s afnemen.

Rechts in figuur 6.11 is de secantmodulus E_s uitgezet als functie van de rek ϵ . Tot ongeveer een rek $\epsilon=1,5\%$ blijft E_s bij buiging constant. Bij trek is het lineaire gebied nog kleiner, bij meer dan $0,5\%$ rek zit men duidelijk buiten het lineaire gebied. In figuur 6.12 zijn deze gegevens verzameld voor een aantal verschillende materialen.

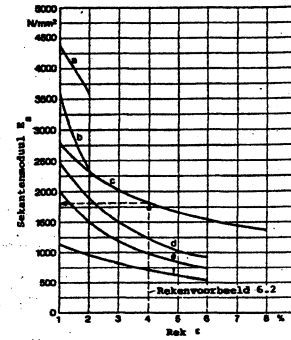
De toelaatbare rek bij het meermalig sluiten van een klikverbinding ligt bij kunststoffen met een uitgesproken vloeigedrag op ongeveer 70% van de rek bij de vloeigrens. Bij kunststoffen zonder duidelijk vloeigedrag neemt men als toelaatbare rek de helft van de rek bij breuk. In uitzonderlijke gevallen kan men de toelaatbare rek nog hoger nemen.

Sekanten-Modul E_s für Bayer-Chemiewerkstoffe



Sekantenmodul E_s als functie van de rek.

- a. PP + 30% glasvulling.
- b. PP + talk + 20% glasvulling.
- c. POM.
- d. PP + 20% glasvulling.
- e. PP + 20% korte glasvezels.
- f. PP + 20% glasvulling chemisch gebonden.



figuur 6.12 Secantmoduli voor een aantal verschillende materialen.

Toelaatbare rek ϵ	
Deelkristallijne thermoplasten	
PE	8%
PP	6%
PA kond.	6%
PA trocken	4%
POM	6%
PBTP	5%
Amorfe thermoplasten	
PC	4%
ABS/SB	2,5%
CAB	2,5%
PVC	2%
PS	1,8%
Glasvezelgevulde thermoplasten	
30% GF-PA kond.	2%
30% GF-PA trocken.	1,5%
30% GF-PC	1,8%
30% GF-PBTP	1,5%
30% GF-ABS	1,2%

Bij meermalig sluiten van de klikverbinding 60% van boven vermelde waarden nemen.

figuur 6.13 Toelaatbare rek voor het toepassen in klikverbindingen.

6.5.2 Sluitkracht van een klikverbinding

Bij het sluiten van een klikverbinding is een bepaalde kracht F_a in de richting van de sluitbeweging nodig. Voor het uitbuigen van de balk of het oprekken van een buis is een kracht F_r nodig. Het verband tussen beide krachten is:

$$F_a = \eta \cdot F_r \quad (\text{figuur 6.14}) \quad (6)$$

De omzetzfactor η is afhankelijk van de sluihoek α en de wrijvingscoëfficiënt μ . De wrijvingscoëfficiënt is de verhouding tussen de wrijvingskracht W en de normaalkracht N :

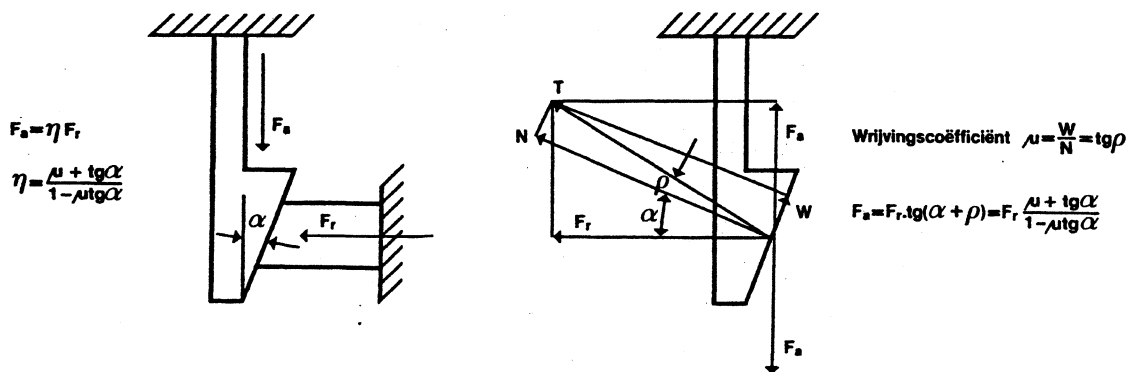
$$\mu = \frac{W}{N} = \tan \rho$$

Door μ te schrijven als $\tan \rho$ kan de relatie tussen F_a en F_r eenvoudig meetkundig bepaald worden (figuur 6.14). Uit het verticaal en het horizontaal evenwicht van beide delen van de klikverbinding volgt:

$$F_a = F_r \cdot \eta = F_r \cdot \tan(\alpha + \rho) = F_r \cdot \frac{\tan \rho + \tan \alpha}{1 - \tan \rho \cdot \tan \alpha} = F_r \cdot \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \alpha} \quad (7)$$

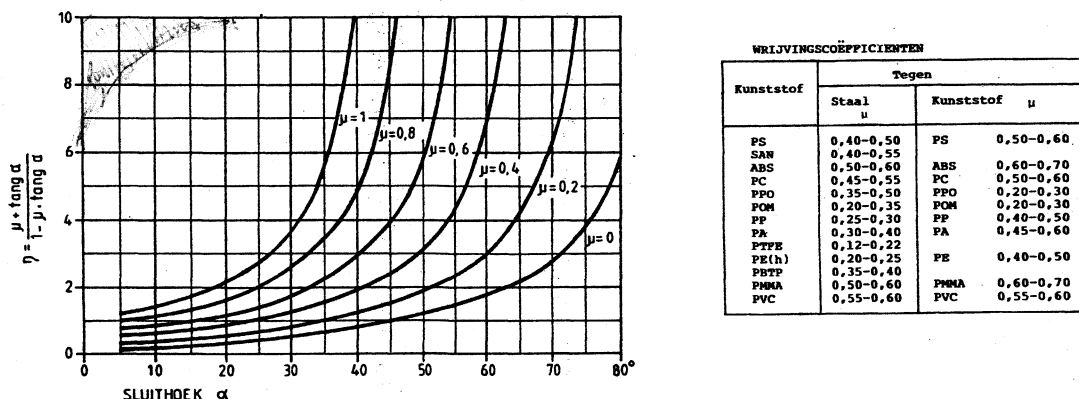
Dit kan ook afgeleid worden door de som van alle horizontale componenten en de som van alle verticale componenten gelijk te stellen aan nul.

Vaak wordt voor het uittrekken ook een schuine hoek toegepast. In figuur 6.16 is deze aangegeven als β . De uittrekkraft wordt dan bepaald door de indrukhoek α in formule (7) door de uittrekhoek β te vervangen.



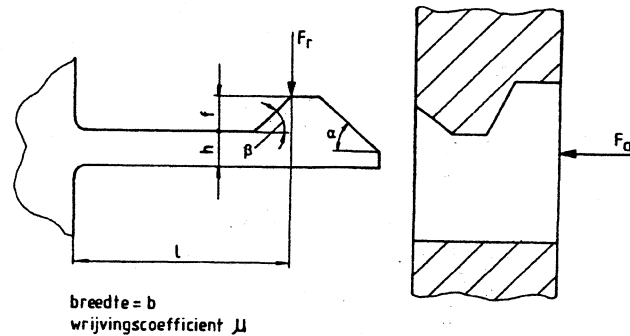
figuur 6.14 Krachtenevenwicht bij het sluiten van een klikverbinding.

In figuur 6.15 is η uitgezet als functie van de sluihoek α met de wrijvingscoëfficiënt μ als parameter. De wrijvingcoëfficiënt heeft bij grotere waarden een belangrijke invloed op de sluitkracht. Bij een wrijvingscoëfficiënt $\mu=0,6$ moet de sluihoek α al kleiner zijn dan 60° wil men de constructie niet vernielen bij het sluiten. In figuur 6.15 is de wrijvingscoëfficiënt van verschillende materiaalparen weergegeven.



figuur 6.15 Omzetfactor η bij het sluiten van een klikverbinding en wrijvingscoëfficiënten μ voor een aantal materialen..

6.5.3 Berekening van een klikvinger



figuur 6.16 Klikvinger.

Voor het sluiten van de verbinding buigt de haak door over de afstand f . De daarbij behorende kracht is F_r . Het verband tussen de kracht F_r en de doorbuiging f is:

$$f = \frac{F_r \cdot l^3}{3 \cdot E_s \cdot I} \quad (8)$$

- f = doorbuiging
- F_r = kracht op de haak
- l = lengte van de haak
- E_s = secansmodulus (N/mm²)

De spanning in de uiterste vezel bij de inklemming is voor een rechthoekige doorsnede:

$$\sigma = \frac{F_r \cdot l \cdot h}{2 \cdot I} \quad (9)$$

- σ = spanning (N/mm²)
- h = dikte van de haak (mm)

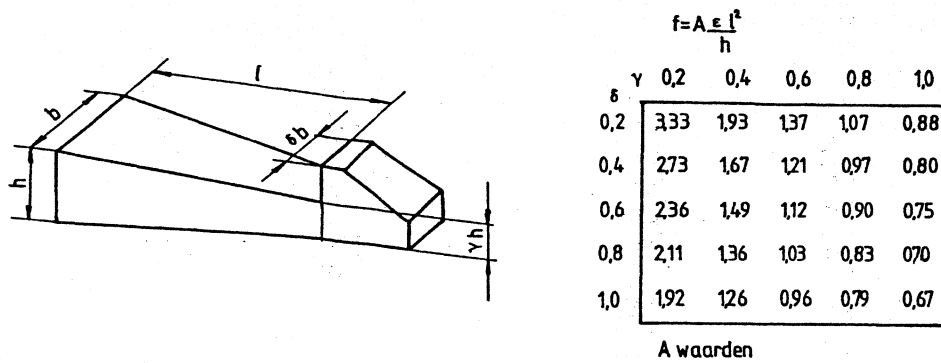
Samen met $\sigma = \varepsilon \cdot E$ gaan de formules (8) en (9) over in:

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot l^2}{h} \quad (10)$$

De lengte l van de klikhaak heeft de grootste invloed op de grootte van de materiaalbelasting. De kracht F_a die nodig is voor het sluiten van de klikverbinding is:

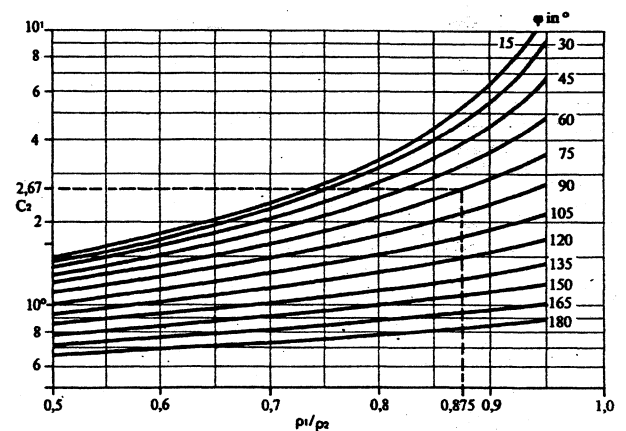
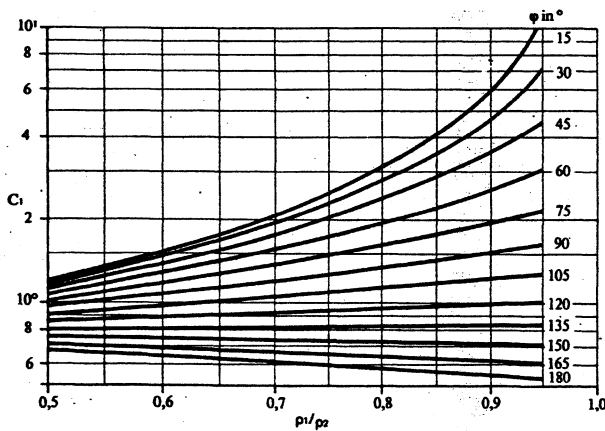
$$F_a = F_r \cdot \eta = \frac{3 \cdot f \cdot E_s \cdot I}{l^3} \cdot \eta \quad (11)$$

De maximum rek in een prismatische klikhaak treedt op bij de inklemming, overal elders is de rek lager. Het is nuttig de doorsnede van de klikhaak naar de inklemming toe taps te laten toenemen. Het materiaal wordt dan meer gelijkmatig belast. Bij een gelijke rek bij de inklemming is de doorbuiging f groter geworden dan in formule (10) is aangegeven. De coëfficiënten van formule (10) voor niet prismatische klikvingers zijn in figuur 6.17 weergegeven.



figuur 6.17 Coëfficiënten A voor niet-prismatische klikvingers.

Querschnittsform		A	B	C	D
		Rechteck	Trapez	Kreisbogensegm.	belieb. Querschn.
Ansführung	1				
	2	$f = 0,67 \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{h}$	$f = \frac{a+b^1}{2a+b} \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{h}$	$f = C_2^1 \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{\rho_2}$	$f = \frac{1}{3} \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{e_3}$
	3	$f = 1,09 \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{h}$	$f = 1,64 \frac{a+b^1}{2a+b} \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{h}$	$f = 1,64 \cdot C_2^1 \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{\rho_2}$	$f = 0,55 \cdot \frac{\epsilon \cdot l^2}{e_3}$
(zulässige) Auslenkung	1	Querschnitt über Länge konstant			
	2	Alle Maße in y-Richtung, z.B. h oder $\Delta\rho$, nehmen auf die Hälfte ab			
Auslenk- Kraft	3	Alle Maße in z-Richtung, z.B. b und a, nehmen auf ein Viertel ab			
	1, 2, 3	$Q = \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{E_s \epsilon}{l}$	$Q = \frac{h^2}{12} \frac{a^2 + 4ab^1 + b^2}{2a+b} \cdot \frac{E_s \epsilon}{l}$	$Q = W^1 \cdot \frac{E_s \epsilon}{l}$	$Q = W^1 \cdot \frac{E_s \epsilon}{l}$



- (1) Voor de trapeze (B) gelden de formules voor het geval dat de kritische spanning (trek) in het smalle vlak b ligt. Ligt de kritieke spanning in vlak a, dan moeten a en b in de formules omgewisseld worden.
- (2) Voor het cirkelsegment (C) moet voor de constante C de waarde C_1 uit de linker grafiek genomen indien de holle kant onder trekspanning staat. Staat de bolle kant onder trekspanning, dan moet C_2 uit de rechter grafiek genomen worden.

figuur 6.18 Waarden voor klikvingers met verschillende doorsneden (Bayer).

Voorbeeld

Neem voor de waarden uit figuur 6.16:

- Lengte van de klikhaak: $l = 30$ mm
- Hoogte van de kliknok $f = 1$ mm
- Breedte $b = 4$ mm
- Materiaal PBTP, maximale rek $\varepsilon = 5\%$, $E_s = 2500$ N/mm²
- Wrijvingscoëfficiënt $\mu = 0.35$
- Sluithoek $\alpha = 30^\circ$

Gevraagd:

- de maximale waarde voor de hoogte h van de klikhaak
- de sluitkracht F_a
- de waarde van de uittrekhoek β waarbij de klikverbinding niet meer losgetrokken kan worden zonder te beschadigen

a. Uit formule (10) volgt:

$$f = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{\max} \cdot l^2}{b} \Rightarrow h = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{\max} \cdot l^2}{f} = \frac{2}{3} \cdot 0,05 \cdot \frac{30^2}{1} = 30 \text{ mm}$$

Uit deze berekening volgt dat de hoogte h gelijk is aan de lengte l van de klikarm; dit is natuurlijk onzin. We kunnen de hoogte h tot redelijke afmetingen terugbrengen door de maximale optredende rek te verlagen. Deze hoeft natuurlijk niet de maximale toegestane waarde te hebben. Bij invulling van een acceptabele waarde voor de hoogte $h = 3$ mm vinden we $\varepsilon = 0,5\%$.

b. De sluitkracht van de verbinding volgt uit vergelijking (11) bij een breedte b van 4 mm.

$$\eta = \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \alpha} = \frac{0,35 + \tan \alpha}{1 - 0,35 \cdot \tan \alpha} = 1,16 \quad ? \quad \leftarrow$$

\uparrow
 η

$$F_a = \frac{3f \cdot E_s \cdot I \cdot \eta}{l^3} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 2500 \cdot \frac{1}{12} \cdot 4 \cdot 3^3 \cdot 1,16}{30^3} = 3,0 \text{ N}$$

In de praktijk vertoont de gemeten sluitkracht een grote afwijking van de berekende kracht. Enkele oorzaken zijn:

- grote afwijking van de lineaire elasticiteitstheorie
- de inklemming is niet perfect
- bij het sluiten van de verbinding verandert α
- op het moment van sluiten vervormen de glijvlakken

De sluitkracht bij klikvingers is meestal klein. Bij mechanische montage rekent men met voldoende overmaat, zodat het sluiten van de verbinding nooit een probleem is. Het belangrijkste punt bij de berekening is het bepalen van de maximale rek die optreedt in een doorsnede.

(c) De waarde van de uittrekhoek β (figuur 6.16) waarbij de klikverbinding niet meer losgetrokken kan worden zonder te beschadigen wordt bepaald door het geval waarbij η naar oneindig gaat:

$$\eta = \frac{\mu + \tan \beta}{1 - \mu \cdot \tan \beta} \rightarrow \infty \Rightarrow \mu \cdot \tan \beta = 1$$

$$\tan \beta = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0,35} = 2,85 \Rightarrow \beta = 70^\circ$$

Voorbeeld

Neem voor de waarden van de klikvinger uit figuur 6.17:

- Lengte van de klikhaak: $l = 3 \text{ mm}$
- Hoogte van de snaprand: $f = 0.6 \text{ mm}$
- Materiaal PBTP
- Toelaatbare rek: $\varepsilon = 5 \%$

Gevraagd:

Hoogte h van de klikhaak bij de inklemming voor:

- $\gamma = 1$ en $\delta = 0,6$
- $\gamma = 0,6$ en $\delta = 1$

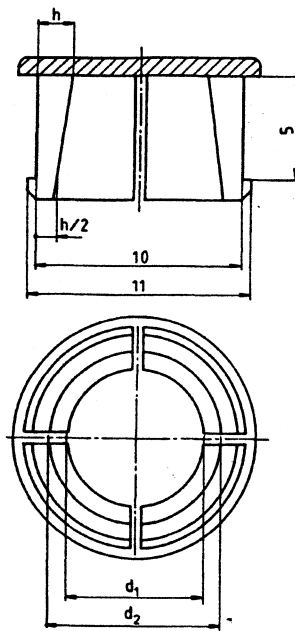
Oplossing

$$h = A \cdot \frac{\varepsilon \cdot l^2}{f}$$

a. $h = 0,75 \cdot 0,05 \cdot \frac{3^2}{0,6} = 0,56 \text{ mm}$

b. $h = 0,96 \cdot 0,05 \cdot \frac{3^2}{0,6} = 0,72 \text{ mm}$

Voorbeeld



figuur 6.19 Afsluitdop met klikvingers.

Neem voor de klikverbinding uit figuur 6.19:

- Materiaal PBTP.
- Toelaatbare rek 5%.

Gevraagd:

- de diameters d_1 en d_2 .

figuur 6.18 volgt:

$$C = \frac{f \cdot \rho_2}{1,64 \cdot \varepsilon \cdot l^2} = \frac{0,5 \cdot 5}{1,64 \cdot 0,05 \cdot 5^2} = 1,22$$

De trekspanning zit aan de buitenzijde van de klikverbinding, we nemen dus $C = C_2$.

$$C_2 = 1,22$$

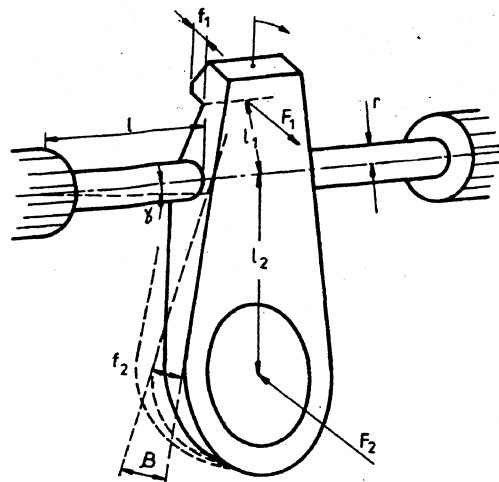
met $\varphi = 90^\circ$ vinden we:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = 0,57 \quad \Rightarrow \quad \rho_1 = 2,85 \text{ mm}$$

De diameters:

$$d_1 = 2 \cdot \rho_1 = 5,7 \text{ mm} \quad \text{en} \quad d_2 = 7,85 \text{ mm}$$

6.5.4 Berekening van een torsie klikverbinding



figuur 6.20 Torsie klikverbinding.

Voor het sluiten van de klikverbinding (zie figuur 6.20) is een verplaatsing f_1 nodig. De daarbij behorende kracht is F_1 . De kracht wordt geleverd door een wringend moment M_w in elk van beide staven aan weerszijden van de klikhaak. Er geldt dus:

$$2 \cdot M_w = F_1 \cdot l_1 \quad (12)$$

De factor 2 wordt hier gebruikt, omdat zich aan weerszijden een torsiestaf bevindt.

De verplaatsing f_1 is gerelateerd aan de hoekverdraaiing β van de klikhaak:

$$f_1 = l_1 \cdot \tan \beta$$

De hoekverdraaiing β hangt samen met de torsie van de staven en hiervoor kan worden geschreven:

$$\beta = \omega \cdot l = \frac{M_w \cdot l}{S_t} \quad \text{met:} \quad \omega = \frac{M_w}{S_t} \quad (13)$$

Hierin zijn:

- β = hoekverdraaiing over de totale lengte l
- ω = specifieke torsiehoek = hoekverdraaiing per eenheid van lengte
- l = lengte van de torsiestaf
- M_w = Wringend moment in één staf
- S_t = torsiestijfheid

In de torsiestaven zullen schuifspanningen optreden. Voor de maximale schuifspanning geldt:

$$\tau_{\max} = \frac{M_w}{W_w} \quad (14)$$

τ_{max} = maximale optredende schuifspanning
 W_w = weerstandsmoment tegen wringing

Op dezelfde wijze als bij klikverbindingen met buiging kunnen we nu met (13) en (14) de relatie bepalen tussen de hoek β en de schuifspanning τ

$$\frac{\beta}{\tau} = \frac{l \cdot W_w}{S_t} \quad (15)$$

Uitdrukkingen voor het weerstandsmoment tegen wringing W_w en de torsiestijfheid S_t zijn te vinden in de literatuur, bv. het polytechnisch zakboekje.

Voor cilindrische staven geldt:

$$W_w = \frac{I_p}{r} \quad S_t = G \cdot I_p \quad \text{en} \quad I_p = \frac{\pi \cdot r^4}{2} \quad (16)$$

Hierin zijn:

G = glijdingsmodulus
 I_p = polaire traagheidsmoment
 r = straal van de torsiestaf

In geval van cilindrische staven kan nu met (15) en (16) voor de hoekverdraaiing worden geschreven:

$$\beta = \frac{W_w \cdot \tau \cdot l}{I_p \cdot G} = \frac{\tau \cdot l}{r \cdot G} \quad \text{met:} \quad \frac{I_p}{W_w} = r \quad (17)$$

Voor andere dan cirkelvormige doorsneden is de relatie minder eenvoudig, hiervoor wordt verwezen naar lit. 10. Voor een rechthoekige doorsnede met korte zijde a en lange zijde b kunnen voor τ_{max} en S_t de volgende algemene uitdrukkingen gebruikt worden:

$$\tau_{max} = \frac{M_w}{c_1 \cdot a^2 \cdot b} \quad \text{en} \quad S_t = G \cdot c_2 \cdot a^3 \cdot b$$

a/b	c ₁	c ₂
1	0,208	0,141
2	0,246	0,229
3	0,267	0,263
6	0,299	0,299
10	0,313	0,313
∞	0,333	0,333

Om verder te kunnen dimensioneren zetten we schuifspanningen om in hoofdspansingen en hoekverdraaiingen in rekken. In een elastisch materiaal schrijven we voor de relatie tussen de schuifspanning τ en de hoekverdraaiing γ en de relatie tussen elasticiteitsmodulus en glijdingsmodulus:

$$\tau = \gamma \cdot G \quad \text{en} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (18)$$

Uit figuur 6.20 valt te herleiden dat gelden moet:

$$\gamma_{\max} = \omega \cdot r \quad (19)$$

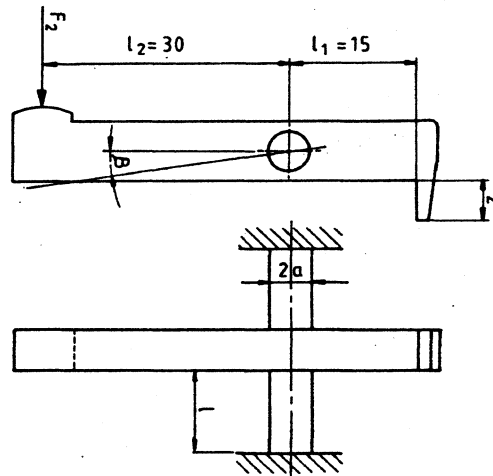
Voor de toelaatbare afschuiving bij kunststoffen beveelt Hoechst (ref. 3) aan:

$$\gamma_{\max} = (1 + \nu) \cdot \varepsilon_{\max} \quad (20)$$

In geval van zuivere torsie geldt overigens:

$$\sigma_{\max} = \tau_{\max} \quad \text{en} \quad \gamma_{\max} = 2 \cdot \varepsilon_{\max} \quad (21)$$

Voorbeeld



figuur 6.21 Torsie klikverbinding.

Neem voor de torsie klikverbinding volgens figuur 6.21 de volgende waarden:

- materiaal PBTP.
- toelaatbare rek $\varepsilon = 5\%$.
- secansmodulus $E_s = 1000 \text{ N/mm}^2$
- Snaphoogte $f = 2 \text{ mm}$.

Gevraagd:

- lengte l
- diameter $2a$
- kracht F_2 voor openen en sluiten

Oplossing

De hoek β :
$$\tan \beta = \frac{2}{15} \Rightarrow \beta = 0,134$$

Volgens formules (17)-(20):
$$\beta = \frac{\tau_{\max} \cdot l}{G \cdot a} = \frac{\gamma_{\max} \cdot l}{a} = \frac{(1+\nu) \cdot \varepsilon_{\max} \cdot l}{a}$$

Hieruit volgt voor de lengte:
$$l = \frac{\beta \cdot a}{(1+\nu) \cdot \varepsilon_{\max}} = \frac{0,134 \cdot a}{1,35 \cdot 0,05} \approx 2 \cdot a$$

Volgens (12) en (13) geldt:
$$\beta = \frac{M_w \cdot l}{S_t} = \frac{F_2 \cdot l_2 \cdot l}{2 \cdot S_t}$$

Met (16) en (18) volgt hieruit voor de kracht:

$$F_2 = \frac{2 \cdot \beta \cdot S_t}{l_2 \cdot l} = \frac{2 \cdot \beta \cdot G \cdot I_p}{l_2 \cdot l} = \frac{2 \cdot \beta}{l_2 \cdot l} \cdot \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi \cdot a^4}{2}$$

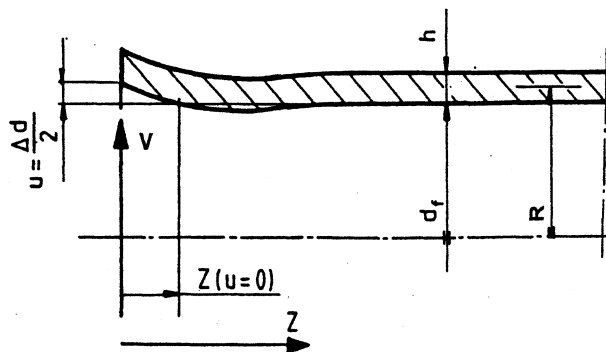
Invullen levert:
$$F_2 = 2,6 \cdot a^3 \text{ N}$$

voor $a = 1 \text{ mm}$ wordt $F_2 = 2,6 \text{ N}$

voor $a = 1,5 \text{ mm}$ wordt $F_2 = 8,8 \text{ N}$

6.5.5 Berekening van een cilindrische klikverbinding

De berekening van cilindrische klikverbindingen berust op de theorie van de buigstijve cilinderschalen met rotatiesymmetrische belasting (figuur 6.22). De cilinderwand wordt belast op buigende momenten en op krachten in het vlak. Sprongen in de dikte, die bij een klikverbinding in het algemeen aanwezig zullen zijn, worden verwaarloosd. Hierdoor heeft de berekening een benaderend karakter. We gaan er verder van uit dat we te maken hebben met dunwandige klikverbindingen, dat wil zeggen, dat de straal groter is dan tien keer de wanddikte.



figuur 6.22 Buigstijve cilinderschaal met rotatiesymmetrische belasting.

Voor een dergelijke cilinderschaal zijn de krachten, vervormingen en spanningen heel goed analytisch te berekenen. De differentiaalvergelijking die dit mechanicaprobleem beschrijft is dezelfde als die voor balken die op een verend bed zijn opgelegd. Het is niet nodig om zelf voor iedere soort klikverbinding deze differentiaalvergelijking op te lossen, want in handboeken, bijv. Roark's Formulas for Stress & Strain (10), zijn voor diverse situaties de oplossingen in formulevorm vermeld. De volgende twee parameters moeten daarbij wel begrepen worden:

$$D = \frac{E \cdot b^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad \text{en} \quad \lambda = \left(\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot b^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (22)$$

Hierin is:

- D = de plaatstijfheid, de tegenhanger voor de buigstijfheid $E.I$ van een balk.
- $1/\lambda$ = de karakteristieke lengte. Deze waarde is karakteristiek voor de uitdemping van de verstoring.
- E = elasticiteitsmodulus
- ν = dwarscontractiecoëfficiënt ($\pm 0,35$ voor kunststoffen)
- R = straal van de cilinder
- b = wanddikte

In tabel 27 van Roark (10) gaat het bij de eerste zeven belastingsgevallen om relatief korte cilinders, waarvoor geldt: $\lambda.l < 6$, waarbij l de cilinderlengte is. Daarna gaat het om relatief lange cilinders, waarbij de randvoorwaarden aan het vrije uiteinde geen invloed hebben op het klikgedrag zelf. De formules worden dan iets eenvoudiger.

Beschouwen we bijvoorbeeld een cilindrische klikverbinding die vereenvoudigd wordt als een cilinder, aan het uiteinde belast door een verdeelde belasting V over de omtrek (kracht per eenheid van lengte), dan geldt volgens Roark, tabel 29, belastingsgeval 8 (we gebruiken symbolen, die ons meer gewoon zijn):

De radiale uitwijking u (figuur 6.22) op een afstand z vanaf de rand is:

$$u = \frac{V}{2 \cdot D \cdot \lambda^3} \cdot e^{-\lambda z} \cdot \cos \lambda z \quad (23)$$

Aan de rand ($z = 0$) wordt de gehele rechterterm gelijk aan 1 en valt dan dus weg. Merk verder op dat de verplaatsing nul is, voor $z = \pi/2\lambda$.

De tangentiële spanning σ in omtreksrichting is maximaal aan het uiteinde van de cilinder en deze is:

$$\sigma = \frac{2 \cdot V \cdot \lambda \cdot R}{b} \quad (24)$$

De tangentiële spanning op enige afstand van het uiteinde is kleiner. Om dan de totale spanning te bepalen moet ook rekening gehouden worden met het buigend moment in de lengterichting.

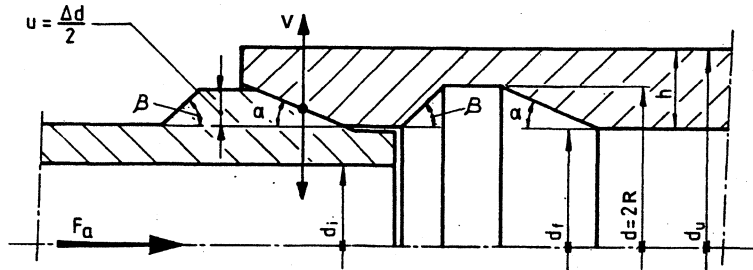
Het buigend moment M in de lengterichting van de cilinder als functie van de afstand z is:

$$M = \frac{V}{\lambda} \cdot e^{-\lambda z} \cdot \sin \lambda z \quad (25)$$

Het buigend moment is aan het uiteinde ($z = 0$) gelijk aan 0.

De tangentiële rek ε in omtreksrichting is maximaal aan het uiteinde van de cilinder. Deze rek is eenvoudig te bepalen met de radiale uitwijking u bij $z = 0$:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R} = \frac{u}{R} \quad (26)$$



figuur 6.23 Cilindrische klikverbinding.

Bij klikverbindingen gaan we meestal uit van een voorgeschreven verplaatsing en is de kracht onbekend (zie figuur 6.23). Formule (23) kan dan omgeschreven worden om de verdeelde belasting over de omtrek te bepalen. Aan het uiteinde ($z = 0$) geldt dan:

$$V = u \cdot 2 \cdot D \cdot \lambda^3 \quad (27)$$

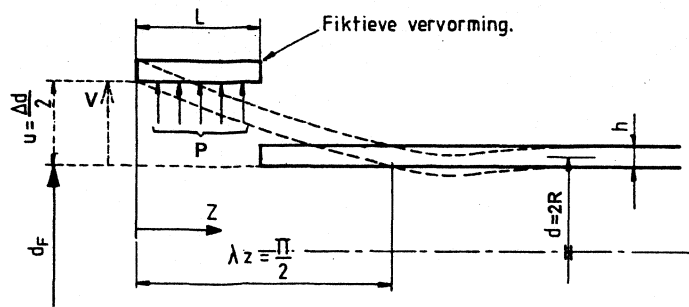
Met de verdeelde belasting V kunnen we nu de indrukkraft F_a bepalen (zie par. 6.5.2):

$$F_a = V \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \eta \quad \text{met} \quad \eta = \frac{\mu + \tan \alpha}{1 - \mu \cdot \tan \alpha}$$

Met invulling van D en λ in formule (27) (met $\nu=0,35$) krijgen we voor de indrukkraft:

$$F_a \approx 2,65 \cdot u \cdot E \cdot R \cdot \left(\frac{t}{R}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \eta \quad (28)$$

Hierboven zijn we uitgegaan van een relatief lange cilinder met een dunne wand. Voor andere gevallen moeten andere formules worden toegepast. Hiervoor wordt verwezen naar Roark (10).



figuur 6.24 Persverbinding.

Voor dikwandige buizen kunnen we met een goede benadering ook een formule afleiden. We gaan dan uit van de formule voor een persverbinding, waarbij een inwendige druk P (kracht per eenheid van oppervlakte) heerst over een lengte l . Bij een klikverbinding is de werkelijke lengte l feitelijk heel kort, maar om de formule voor persverbindingen hier te kunnen gebruiken moeten we een fictieve lengte voor l vinden.

Voor een persverbinding (figuur 6.24) geldt:

$$F_a = P \cdot d_F \cdot \pi \cdot l \cdot \eta \quad (29)$$

- P = inwendige druk
- d_F = inwendige diameter ($= 2 \cdot R - t$)
- l = lengte waarover de druk werkt

De lengte l waarover de druk P werkt moeten we bepalen, om de formule voor persverbindingen te kunnen gebruiken. Deze kunnen we schatten met behulp van formule (28) voor de kracht F_a en met behulp van de ketelformule voor P .

De ketelformule luidt:

$$P = 2 \cdot \frac{u}{R} \cdot E \cdot \frac{b}{d_F} \quad (30)$$

We stellen nu formule (28) gelijk aan formule (29) en elimineren met formule (30) de inwendige druk P . Hieruit volgt voor l :

$$l = 0,2 \cdot d_F \cdot \left(\frac{b}{R} \right)^{1/2} \quad (31)$$

Voor dikwandige buizen (figuur 6.23) geldt:

$$P = \frac{2 \cdot u}{d_F} \cdot \frac{E}{(t^2 + 1)(t^2 - 1) \pm \nu} \quad (32)$$

waarin: $t = \frac{d_u}{d_F}$ en $+\nu$ geldt voor een inwendige belasting (binnenste deel is stijf)

en: $t = \frac{d_F}{d_i}$ en $-\nu$ geldt voor een uitwendige belasting (buitenste deel is stijf)

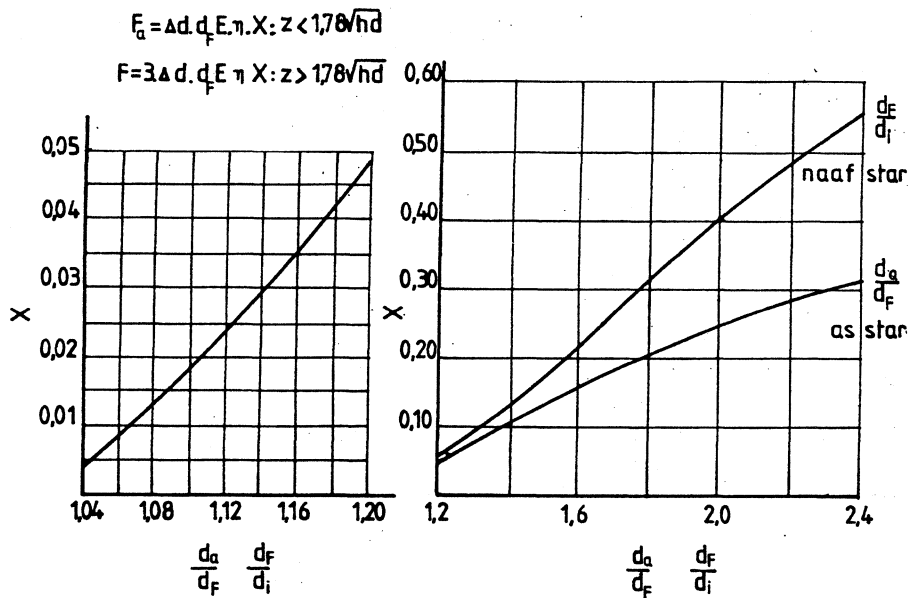
Uit de formules (29), (31) en (32) kan bij benadering afgeleid worden dat geldt:

$$F_a = 1,76 \cdot u \cdot d_F \cdot \frac{\sqrt{(t-1)/(t+1)}}{(t^2+1)/(t^2-1) \pm \nu} \cdot E \cdot \eta \quad (33)$$

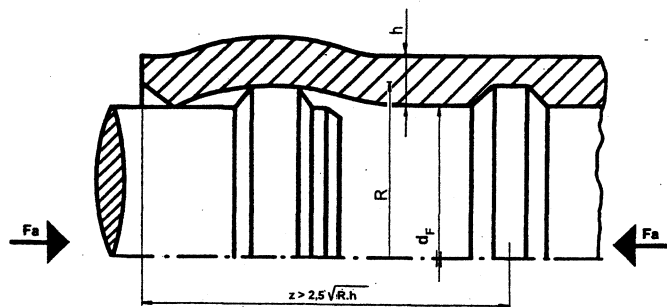
Om veel rekenwerk te vermijden kunnen we een geometriefactor X invoeren. De formules (28) en (33) worden dan omgezet in:

$$F_a = 2 \cdot u \cdot d_F \cdot E \cdot \eta \cdot X \quad (34)$$

De factor X kan men aflezen in figuur 6.25, de linker grafiek is voor formule (28) (dunwandige buizen) en de rechter grafiek is voor formule (33) (dikwandige buizen).



figuur 6.25 De factor X in formule (34). Links voor dunwandige buizen en rechts voor dikwandige buizen.



figuur 6.26 Cilindrische klikverbinding met een klikgroef op enige afstand van de rand.

We vinden dat als $z > 2,5 \cdot \sqrt{R \cdot h}$ de invloed van de uitbuiging van de rand niet meer merkbaar is. Als de groef of de ril van de klikverbinding verder van de rand ligt (figuur 6.26) voldoen we niet meer aan de randvoorwaarden van de differentiaal vergelijking. Theoretisch

kan men afleiden dat de kracht om deze klikverbinding te sluiten 4 maal zo groot is als uit de formules (28) en (33) te voorschijn komt. In de praktijk blijkt een factor 3 een betere benadering te zijn.

Verder zijn we er in het bovenstaande vanuit gegaan dat bij het in elkaar drukken van twee cilinders er één van de twee zeer stijf is en dat de ander vervormt. Als beide kunnen vervormen nemen ze allebei een deel van de vervorming op en zullen de krachten kleiner zijn, dan wanneer maar één van beide kan vervormen. Hier wordt verder op ingegaan bij persverbindingen in de volgende paragraaf.

De in deze paragraaf berekende uitdrukkingen voor de indrukkraft gelden als het indrukken perfect in axiale richting plaatsvindt. Met name bij grote diameters, zoals bij een melkbeker met deksel of een verfemmer, gebeurt het indrukken vaak scheef. Vergelijk dit met het verwisselen van een fietsband. De optredende krachten worden dan aanzienlijk lager.

Voorbeeld

Gegeven:

- een cilindrische klikverbinding
- uitwendige diameter $d_a = 33$ mm
- inwendige diameter $d_F = 30$ mm
- diameterverschil tussen as en buitenbuis $\Delta d = 0,3$ mm ($= 2.u$)
- materiaal buis is POM
- materiaal van de as is staal
- wrijvingscoëfficiënt $\mu = 0,25$
- sluthoek $\alpha = 15^\circ$
- demontagehoek $\beta = 45^\circ$

Gevraagd

- a) De kracht F_a om de verbinding te sluiten
- b) De kracht F_a om de verbinding te openen

Oplossing

De rek:
$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_F} = \frac{0,3}{30} = 0,01 = 1\%$$

Uit figuur 6.12 volgt: $E_s = 2800$ N/mm²

Uit figuur 6.15 vinden we: $\alpha = 15^\circ \rightarrow \eta \approx 0,5$ en voor $\beta = 45^\circ \rightarrow \eta \approx 1,7$

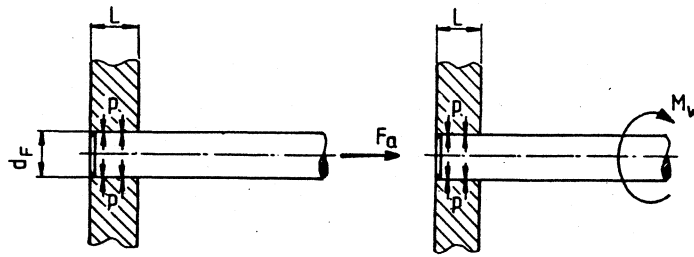
En uit figuur 6.25 vinden we voor $\frac{d_a}{d_F} = \frac{33}{30} = 1,1$ een X-waarde van 0,018

Met formule (34) kunnen we nu de indruk- en uittrekkraft bepalen:

Voor sluiten:
$$F_a = 0,3 \cdot 30 \cdot 2800 \cdot 0,5 \cdot 0,018 = 227$$
 N

Voor openen:
$$F_a = 0,3 \cdot 30 \cdot 2800 \cdot 1,7 \cdot 0,018 = 771$$
 N

6.6 Persverbindingen



figuur 6.27 Persverbinding.

Voor een persverbinding geldt, analoog aan formule (6), voor de verbindings- ofwel uittrekkkracht:

$$F_a = P \cdot \pi \cdot d_F \cdot L \cdot \eta$$

Voor $\alpha = 0$ gaat deze formule over in:

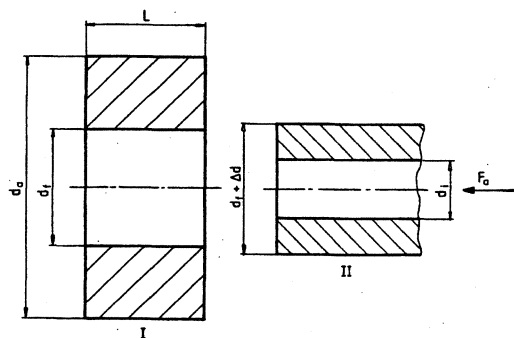
$$F_a = P \cdot \pi \cdot d_F \cdot L \cdot \mu \quad (\text{figuur 6.27})$$

waarin:

- F_a = verbindingskracht en uittrekkkracht (N).
- P = vlaktedruk tussen as en naaf (N/mm^2)
- d_F = contact diameter (mm)
- L = lengte van de as of van de naaf (mm)
- μ = wrijvingscoëfficiënt

Het over te brengen koppel bedraagt:

$$M_w = \frac{1}{2} \cdot d_F \cdot F_a = P \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d_F^2 \cdot L \cdot \mu \quad (\text{figuur 6.27})$$



figuur 6.28 Verschil in diameters.

Als 2 delen met een overmaat Δd in elkaar geperst worden zal de gatdiameter groter worden en de pendiameter kleiner tot ze in elkaar kunnen schuiven (figuur 6.28).

Voor dikwandige buizen geldt formule (32). Voor deel I geldt:

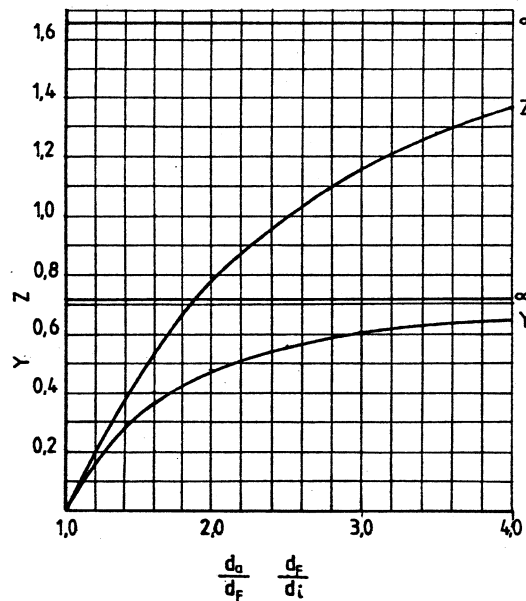
$$P = \frac{\Delta d_1}{d_F} \cdot \frac{E_1}{(t_1^2 + 1)/(t_1^2 - 1) + \nu_1} \quad \text{met } t_1 = \frac{d_a}{d_F} \quad (35)$$

en voor deel II geldt

$$P = \frac{\Delta d_2}{d_F} \cdot \frac{E_2}{(t_2^2 + 1)/(t_2^2 - 1) - \nu_2} \quad \text{met } t_2 = \frac{d_F}{d_i} \quad (36)$$

We maken gebruik van twee geometriefactoren, welke zijn weergegeven in figuur 6.29:

$$Y = \frac{1}{(t_1^2 + 1)/(t_1^2 - 1) + \nu} \quad Z = \frac{1}{(t_2^2 + 1)/(t_2^2 - 1) - \nu}$$



figuur 6.29 Factoren Y en Z in formules (37) en (38).

Verder moet gelden:

$$\Delta d_1 + \Delta d_2 = \Delta d$$

Nu kan worden afgeleid:

$$P = \frac{\Delta d}{d_F} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Y \cdot E_1} + \frac{1}{Z \cdot E_2}} \quad (37)$$

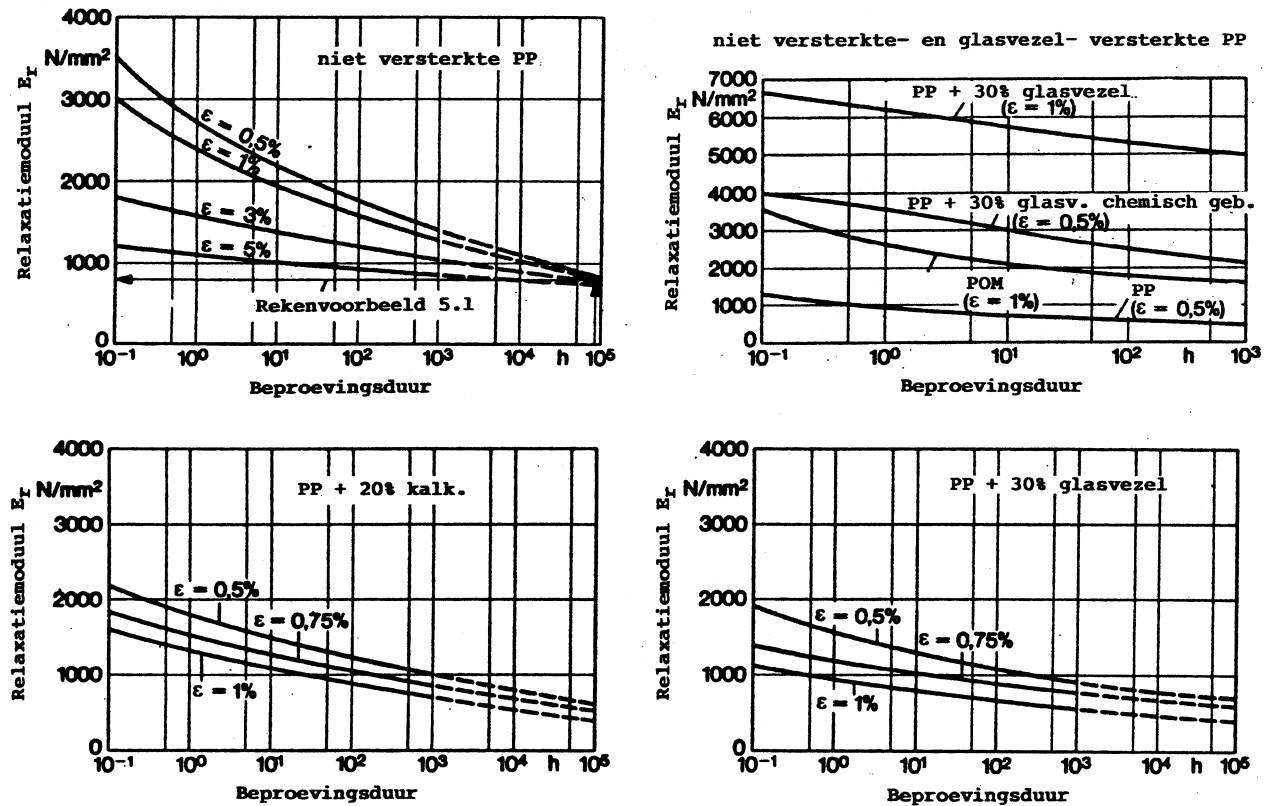
en

$$F_a = \frac{\pi \cdot \Delta d \cdot L \cdot \mu}{\frac{1}{Y \cdot E_1} + \frac{1}{Z \cdot E_2}} \quad (38)$$

Voor de elasticiteitsmoduli E_1 en E_2 moet men de relaxatiemodulus invullen. Zijn deze waarden niet aanwezig dan mag ook de kruipmodulus gebruikt worden. De relaxatiemoduli

van enkele materialen zijn in figuur 6.30 weergegeven. De overmaat Δd is van grote invloed op de krachtsoverbrenging. De grootte van Δd wordt begrensd door de toegelaten rek. De toegelaten rek van enkele materialen is in figuur 6.31 weergegeven.

Let op dat de Δd een verschilmaat is tussen twee diameters en dat de tolerantie op deze diameters dus van grote invloed is op de persverbinding.

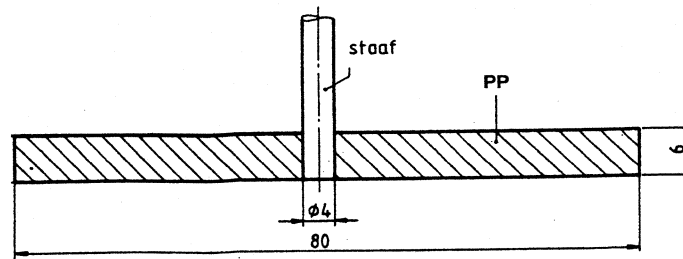


figuur 6.30 Relaxatiemoduli van enkele materialen op basis van PP.

Toegelaten rek $\epsilon = \frac{\Delta d}{d_f} 100\%$			
Gatdiameter	$d_f < 5$	5-30	$> 30\text{mm}$
POM	5	3	0,5-1,0
POM met krijt			
POM. PTFE.			
PP			
PP + 20% glasvezel			
PP + 20% talk	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 0,5
PE + 30% glasvezel			
POM + 25% glasvezel			
PP + 30% glasvezel	≤ 2,0	≤ 2,0	≤ 1,0

figuur 6.31 Toelaatbare rek voor persverbindingen.

Voorbeeld



figuur 6.32 Stalen as in een schijf ongevulde PP.

Gegeven:

Een stalen as wordt in een schijf van ongevulde PP geperst (figuur 6.32).

Gevraagd:

- de overmaat Δd
- de perskracht bij montage.
- de uittrekkkracht na 10 jaar.
- het over te brengen moment na 10 jaar.
- een schatting van de spreiding van het moment.

Oplossing

- Voor de overmaat Δd wordt uitgegaan van de maximale toegelaten rek. Uit figuur 6.31 volgt:

$$\varepsilon_F = \frac{\Delta d}{d_F} \leq 0,05 = 5\% \quad \Rightarrow \quad \Delta d = 0,05 \cdot 4 = 0,2 \text{ mm}$$

- We mogen stellen dat de E-modulus van staal - E_2 - zeer groot is ten opzichte van de E_1 van PP. Stel $E_2 = \infty$ en $E_1 = E$. Formule (38) gaat dan over in:

$$F_a = \pi \cdot \varepsilon \cdot d_F \cdot L \cdot \mu \cdot Y \cdot E$$

met: $\varepsilon = 5\%$ $Y = 0,71$ $\mu = 0,5$ $E = 1200 \text{ N/mm}^2$

vinden we: $F_a = \pi \cdot 0,05 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 0,5 \cdot 0,71 \cdot 1200 = 1600 \text{ N}$

- De uittrekkkracht na 10 jaar:

$$E \approx 800 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \quad F_a = 1070 \text{ N}$$

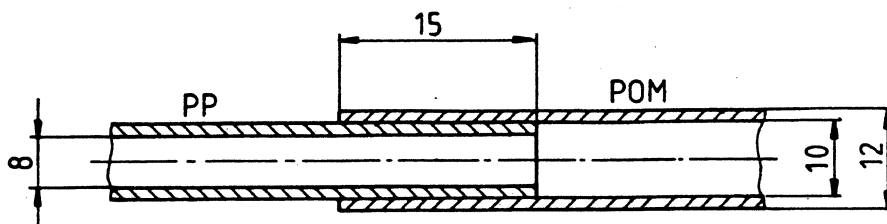
- Het over te brengen moment M_w na 10 jaar:

$$M_w = p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot d_F^2 \cdot L \cdot \mu = \frac{1}{2} \cdot d_F \cdot F_a$$

$$M_w = \frac{1070}{2} \cdot 4 = 2140 \text{ Nmm}$$

- e. De wrijvingscoëfficiënt is een factor die aan spreiding onderhevig is. Deze waarde kan vooraf aan oppervlakken met diverse ruwheden gemeten worden. De verwerking van PP zal een bepaalde spreiding in de maten veroorzaken. Bij een verwerkingsspreiding van 0,6 % heeft de maat d_F in het kunststof product een spreiding van 0,025 mm. Hierin is de matrijstolerantie bij meervoudige matrijzen niet meegerekend. De spreiding is een achtste van de nominale overmaat Δd . Dus ook in de krachtsoverbrenging zit een spreiding van circa 12 %.

Voorbeeld



figuur 6.33 Persverbinding van twee buizen uit verschillende materialen.

Gegeven:

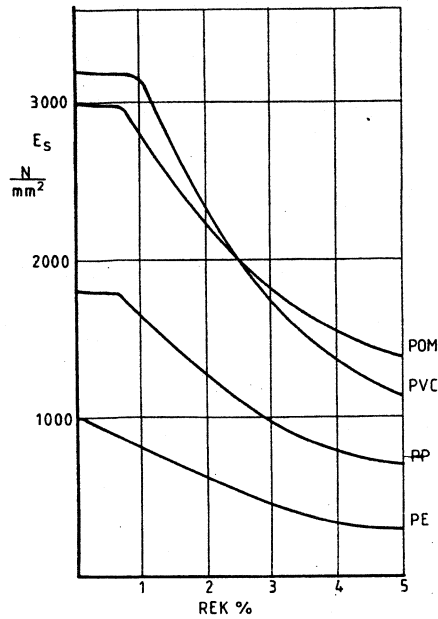
- Twee buizen die door middel van een perspassing aan elkaar verbonden moeten worden (figuur 6.33)
- De buitenbuis is van POM $d_a = 12 \text{ mm}$, $d_F = 10 \text{ mm}$.
- De binnenbuis is van PP $d_F = 10 \text{ mm}$, $d_i = 8 \text{ mm}$.
- Het verschil in diameter $\Delta d = 0,4 \text{ mm}$.
- De wrijvingscoëfficiënt $\mu = 0,5$
- De lengte $L = 15 \text{ mm}$.

Gevraagd:

- Een schatting van de grootte van de sluitkracht.
- Een schatting van de rek ε in beide delen.

Oplossing

Uit de relaxatie- of krimpgegevens kunnen we weinig halen omdat de rek bij het verbinden onbekend is. Men moet terugvallen op de secantmodulus-rekdiagrammen volgens figuur 6.12. In figuur 6.34 zijn deze waarden op een wat grotere schaal uitgezet. Met behulp van de formules (35) en (36) bepalen we met Δd_1 en Δd_2 in stappen de waarden van de in- of uitwendige vlaktedruk.



figuur 6.34 Secantmoduli van een aantal kunststoffen.

Voor de buitencilinder is:

$$t_1 = \frac{d_a}{d_F} = \frac{12}{10} = 1,2 \quad \text{en} \quad Y = 0,16$$

Voor de binnencilinder is:

$$t_2 = \frac{d_F}{d_i} \frac{10}{8} = 1,25 \quad \text{en} \quad Z = 0,22$$

buitencilinder (POM):

Δd	$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_F} \cdot 100\%$	E_s (N/mm ²)	p (N/mm ²)
0.1	1	2800	4.48
0.2	2	2250	7.20
0.3	3	1750	8.40
0.4	4	1350	8.64

binnencilinder (PP):

Δd	$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d_F} \cdot 100\%$	E_s (N/mm ²)	p (N/mm ²)
0.1	1	1650	3.63
0.2	2	1300	5.72
0.3	3	1000	6.60
0.4	4	800	7.04

In figuur 6.35 zijn de waarden Δd en p uitgezet voor POM en voor PP. Dit snijpunt geeft de uiteindelijke vlaktedruk aan met de bijbehorende vervorming Δd .

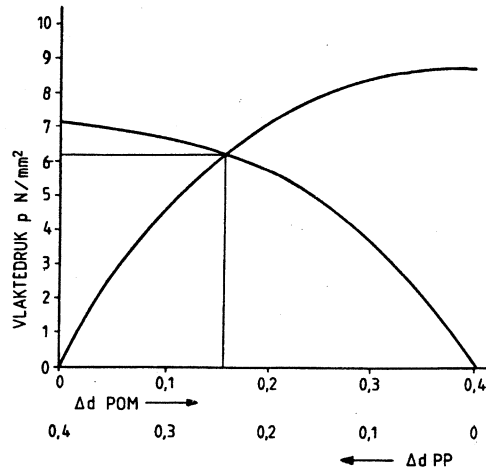
De vlaktedruk $p = 6,2 \text{ N/mm}^2$

Δd voor POM = 0,16 mm; $\varepsilon = 1,6\%$

Δd voor PP = 0,24 mm; $\varepsilon = 2,4\%$

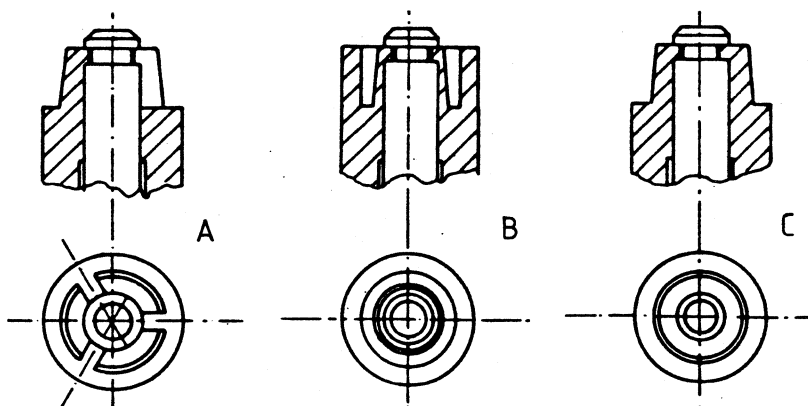
De sluitkracht wordt nu:

$$F_a = \pi \cdot p \cdot d_F \cdot L \cdot \mu = \pi \cdot 6,2 \cdot 10 \cdot 15 \cdot 0,5 = 1460 \text{ N}$$



figuur 6.35 De waarden Δd en p uitgezet voor POM en voor PP.

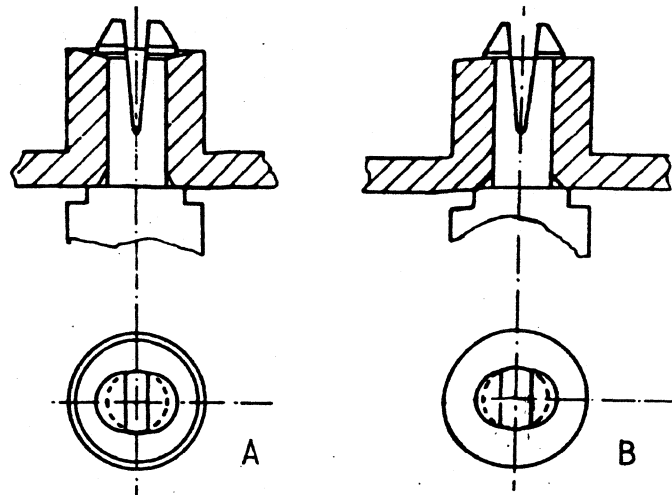
6.7 Toepassingen van klik- en persverbindingen



figuur 6.36 Borging op een as in axiale richting.

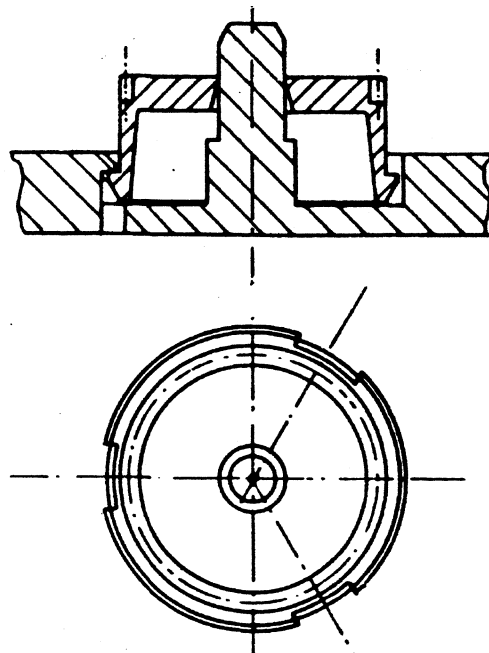
Bij montage van tandwielen, snaarwielen en rollen in axiale richting zullen deze onderdelen in axiale richting geborgd moeten worden (figuur 6.36). In A lopen drie verende klikhaken in een groef van de as. Deze haken veren bij montage in radiale richting uit elkaar. Dit soort klikverbindingen is geschikt voor materialen met een hoge E-modulus, de sluitkracht blijft

laag. Past men een gesloten ring toe dan moet de dikte van de wand dunner worden (B). Kunststoffen met een lage E-modulus, bijvoorbeeld een thermoplastische polyurethaan die voor geluidsarme tandwielen worden toegepast, moeten als een gesloten klikring uitgevoerd worden. De wanddikte wordt dikker uitgevoerd vanwege de lage E-modulus (C).



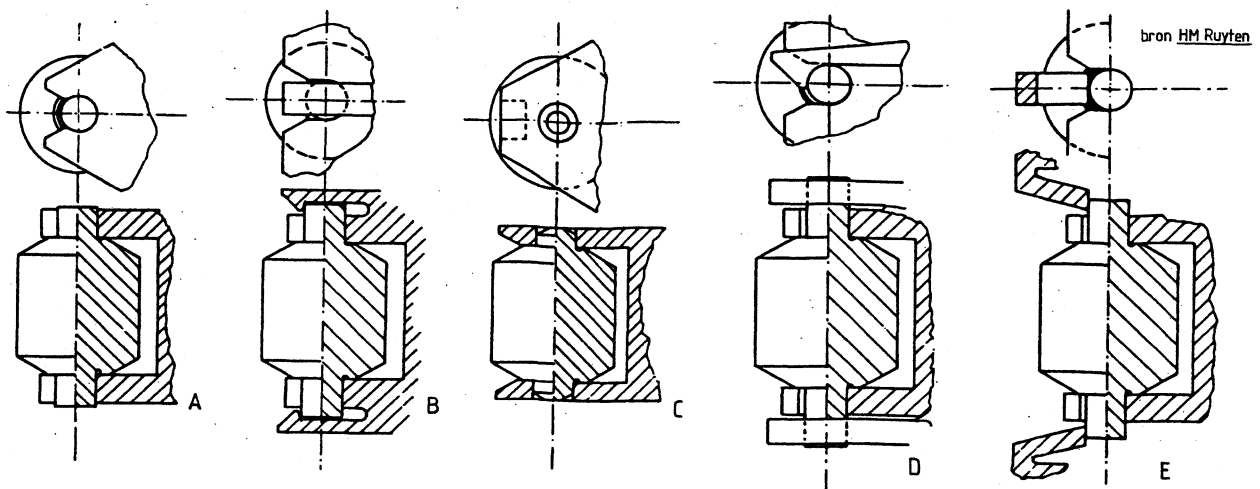
figuur 6.37 Verende as.

In figuur 6.37 is de as verend uitgevoerd, in de demontage richting mogen geen al te grote krachten optreden. De constructie van B is een verbeterde uitvoering, de toelaatbare belasting in de demontage richting is hoger dan die van A. De matrijs krijgt schuiven en over de as loopt een deelnaad.



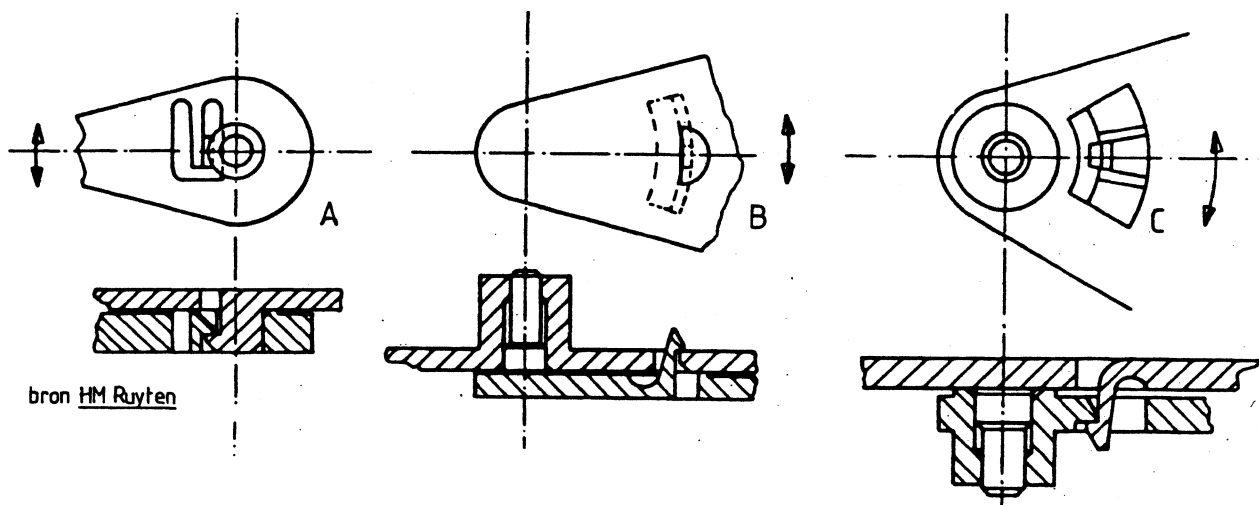
figuur 6.38 Positionering door een as en door klikvingers.

In de constructie van figuur 6.38 wordt het tandwiel op zijn plaats gehouden door drie verende klikhaken en door de as.



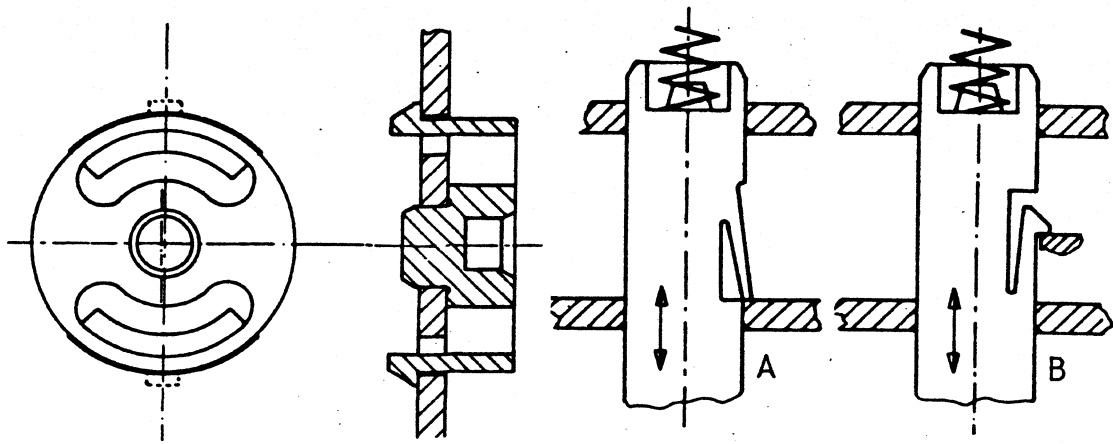
figuur 6.39 Bevestiging van draaiende onderdelen d.m.v. klikverbindingen.

De constructies van figuur 6.39 A en B zijn zonder matrijsschuiven te spuiten. De radiale belasting mag ten opzichte van de lagerschalen niet te veel variëren. Als de krachten van richting kunnen veranderen kan men de constructie van de figuur 6.39 C, D of E toepassen. Voor de constructie van figuur 6.39 C zijn matrijsschuiven nodig.



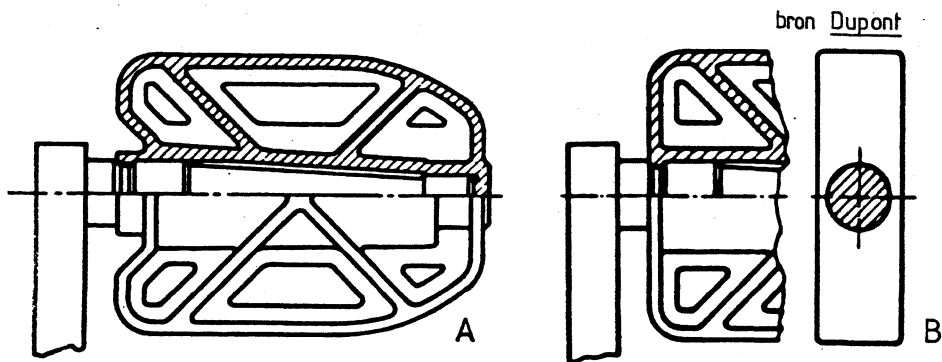
figuur 6.40 Bevestiging van hefboomen d.m.v. klikverbindingen.

Hefboomen kunnen op dezelfde wijze gemonteerd worden als draaiende onderdelen. Er zijn goedkopere eenvoudige en compactere constructies mogelijk. De klikverbinding van figuur 6.40 A kost geen extra ruimte, deze constructie is geschikt voor vlakke hefboomen. De constructies van figuur 6.40 B en C hebben meer ruimte nodig.



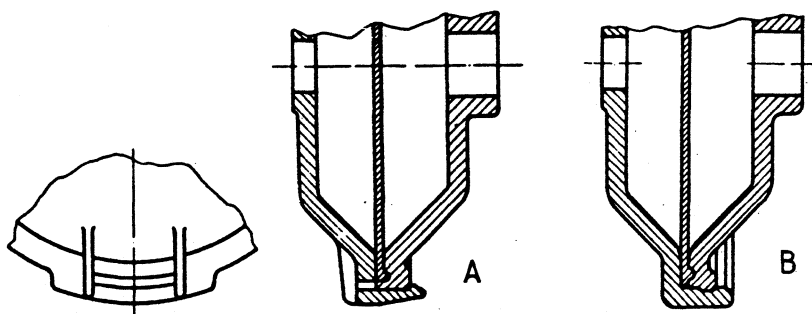
figuur 6.41 Lagering (links) en rechtgeleiding (rechts).

In figuur 6.41 is links aangegeven hoe een kunststof onderdeel gelagerd kan worden in een vlakke stalen plaat. Bij een montage richting van een rechtgeleiding in de richting van de beweging kan een meegevormde slagbegrenzer worden toegepast (figuur 6.41 rechts). Bij montage moet de slagbegrenzer voldoende kunnen inveren.



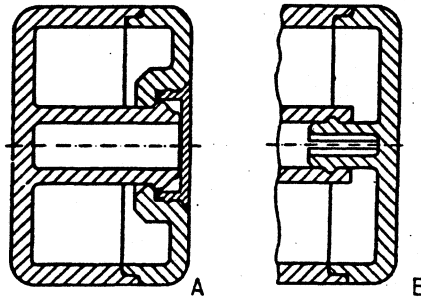
figuur 6.42 Klikverbinding van een fietstrapper.

In figuur 6.42 is een klikconstructie van de trapper van een fiets getekend. Het sluiten van de klikverbinding van A vergt minder kracht dan nodig is voor het sluiten van de verbinding van B. De stijfheid van deze laatste constructie is veel groter.



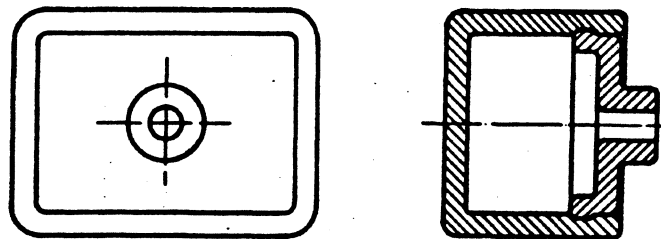
figuur 6.43 Klikverbinding met ingeklemd membraan. Links met enkele klikvingers, rechts met een doorlopende klikverbinding.

Een constructie bestaat uit twee huishelften met een membraan. De klikverbinding met klikhaken volgens figuur 6.43 A vergt minder kracht dan de klikverbinding met doorlopende groef (B). De kracht voor de demontage is bij deze laatste constructie (B) veel groter.



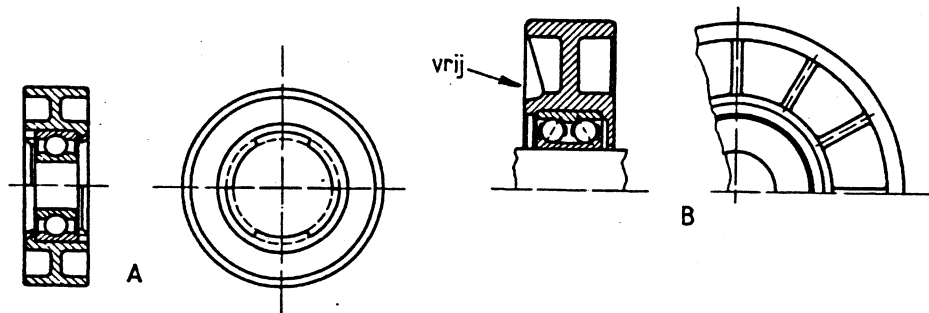
figuur 6.44 Klikverbinding, links cilindrisch en rechts met enkele klikvingers.

De constructie van figuur 6.44 laat hetzelfde beeld zien als die van figuur 6.43. Om de sluitkracht te verkleinen kunnen de klikhaken van B toegepast worden.



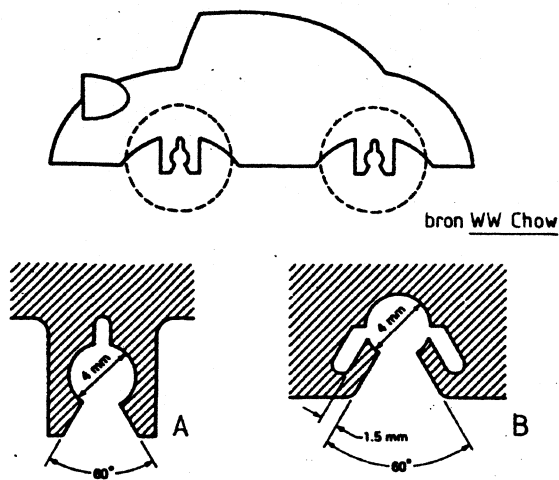
figuur 6.45 Klikverbinding met rechthoekige omtrek.

Klikverbindingen in rechthoekige producten vergen een grote sluitkracht, de hoeken zijn erg stijf. Deze stijfheid kan bij het uitstoten uit de matrices al problemen geven (figuur 6.45).



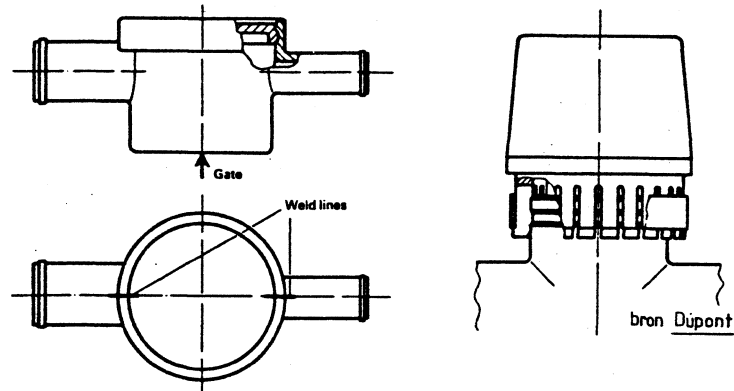
figuur 6.46 Ingekleemde kogellager.

De sluitkracht van een band om een kogellager is verminderd door op regelmatige afstand de klikrand te onderbreken (figuur 6.46 A). Bij het inpersen kan het gat iets vervormen waardoor de sluitkracht kleiner wordt. In de constructie van B zijn aan één zijde van het wiel de verstijvingsribben bij de naaf naar binnen gelegd waardoor de stijfheid van de naaf kleiner wordt. De sluitkracht is daardoor bij deze constructie verminderd.



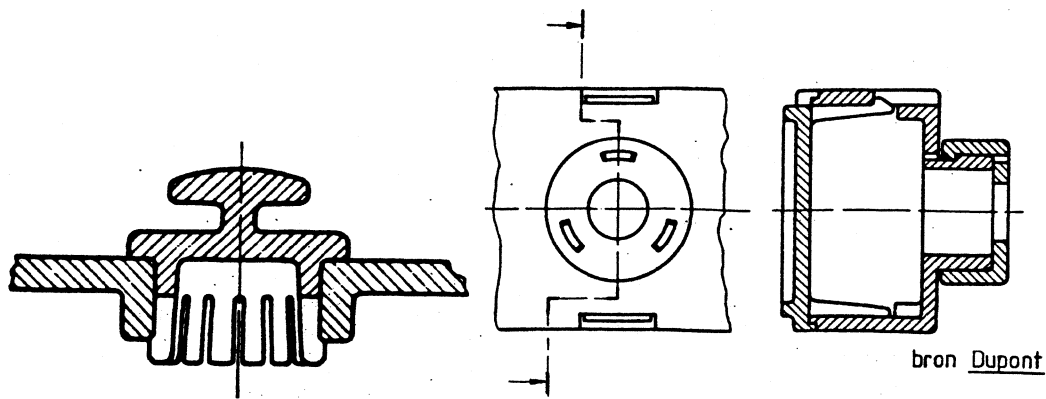
figuur 6.47 Klikverbinding voor een astap

In figuur 6.47 is een klikverbinding voor een astap weergegeven. De constructie van B is minder stijf dan die van A.



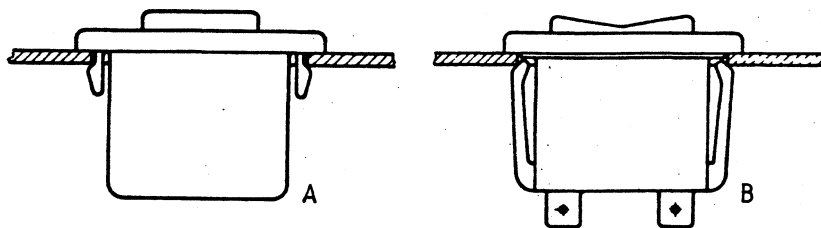
figuur 6.48 Vloeinaden bij cilindrische klikverbindingen.

Bij cilindrische klikverbindingen moeten we er aan denken dat in de hoogbelaste klikrand vloeinaden kunnen voorkomen. In een beperkt aantal gevallen kunnen we daar iets aan doen door de aanspuiting te verleggen; soms is er niets aan te doen (figuur 6.48 links). Het product moet nu onder optimale condities gespoten worden om de vloeinaadsterkte maximaal te maken. Als de eisen aan het product het toelaten kan men beter klikhaken dan klikranden toepassen in verband met het monteren en demonteren van de klikverbinding. De kap van de kraan (rechts) is voorzien van klikhaken, voor de veiligheid is om de verbinding een metalen band gelegd.



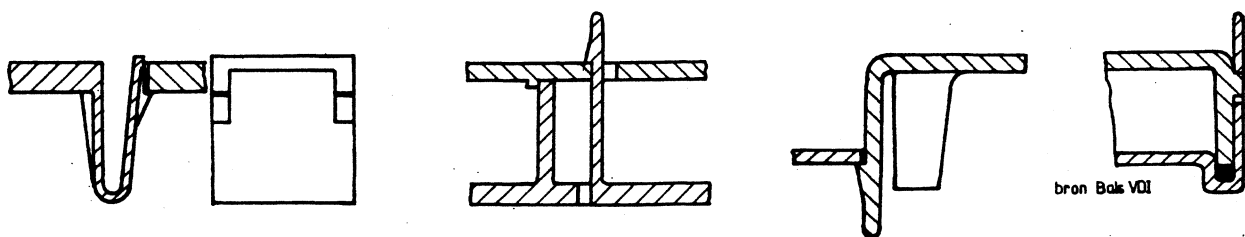
figuur 6.49 Klikvingers.

Het sluiten en openen van de verbinding links in figuur 6.49 vergt veel minder kracht dan nodig is bij een gesloten ring. Het huis van de schakelaar rechts is geheel van klikvingers voorzien, in de matrijs komen geen schuiven voor.



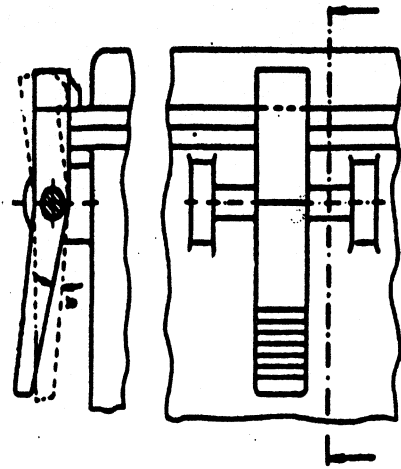
figuur 6.50 Klinkverbinding van een schakelaar.

De klikvingers van de constructie van figuur 6.50 A zijn erg kort, de belasting van de kunststof bij het sluiten van de verbinding is dan hoog. De constructie van B is veel beter.

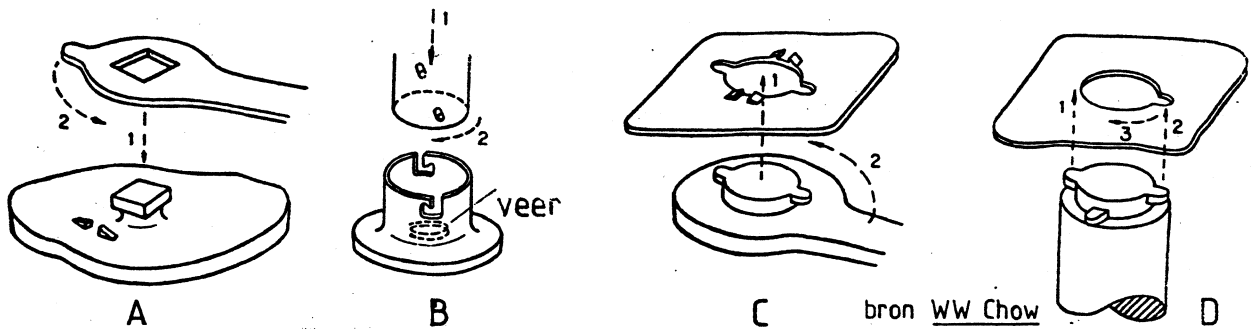


figuur 6.51 Klikverbindingen bij deksels of klepjes.

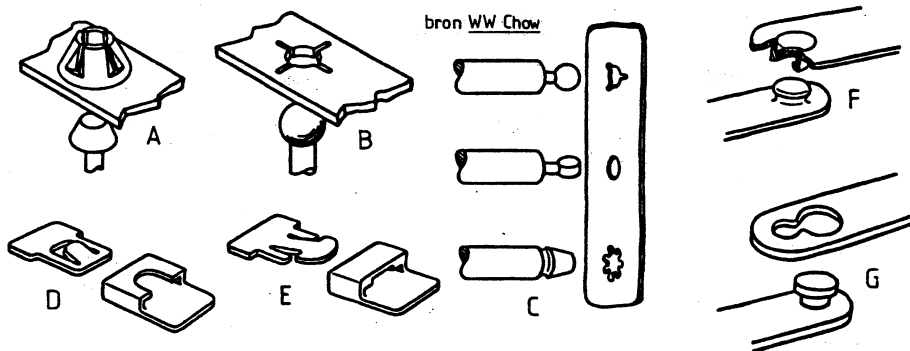
Voor het monteren van deksels of kasten kunnen de constructies figuur 6.51 toegepast worden. De middelste twee klikverbindingen hebben een slagbegrenzer zodat de klikhaak niet te hoog belast kan worden, In de rechter constructie is nog een afdichting gemonteerd.



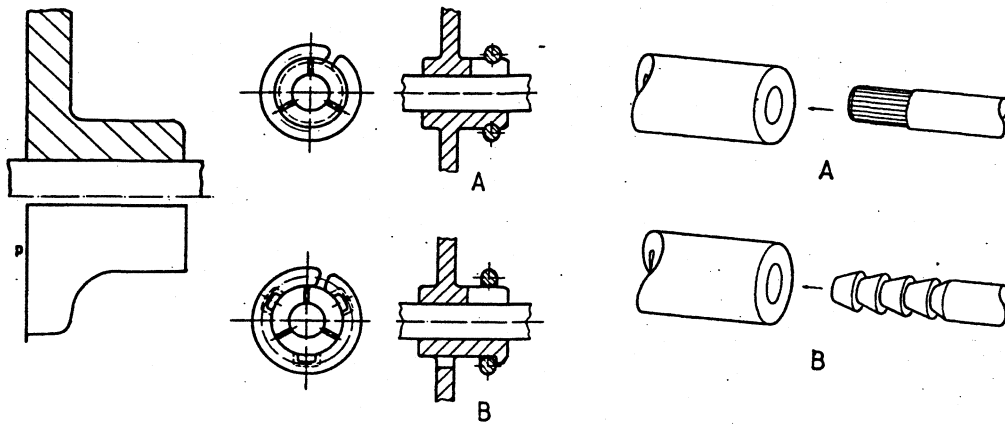
figuur 6.52 Een torsie-klikverbinding waarmee een deksel op een doos wordt vastgezet.



figuur 6.53 Klikverbindingen voorzien van een soort bajonet- sluitingen. De montage gebeurt door een translatie 1 gevolgd door een rotatie 2.



figuur 6.54 Een aantal afwijkende klikverbindingen.

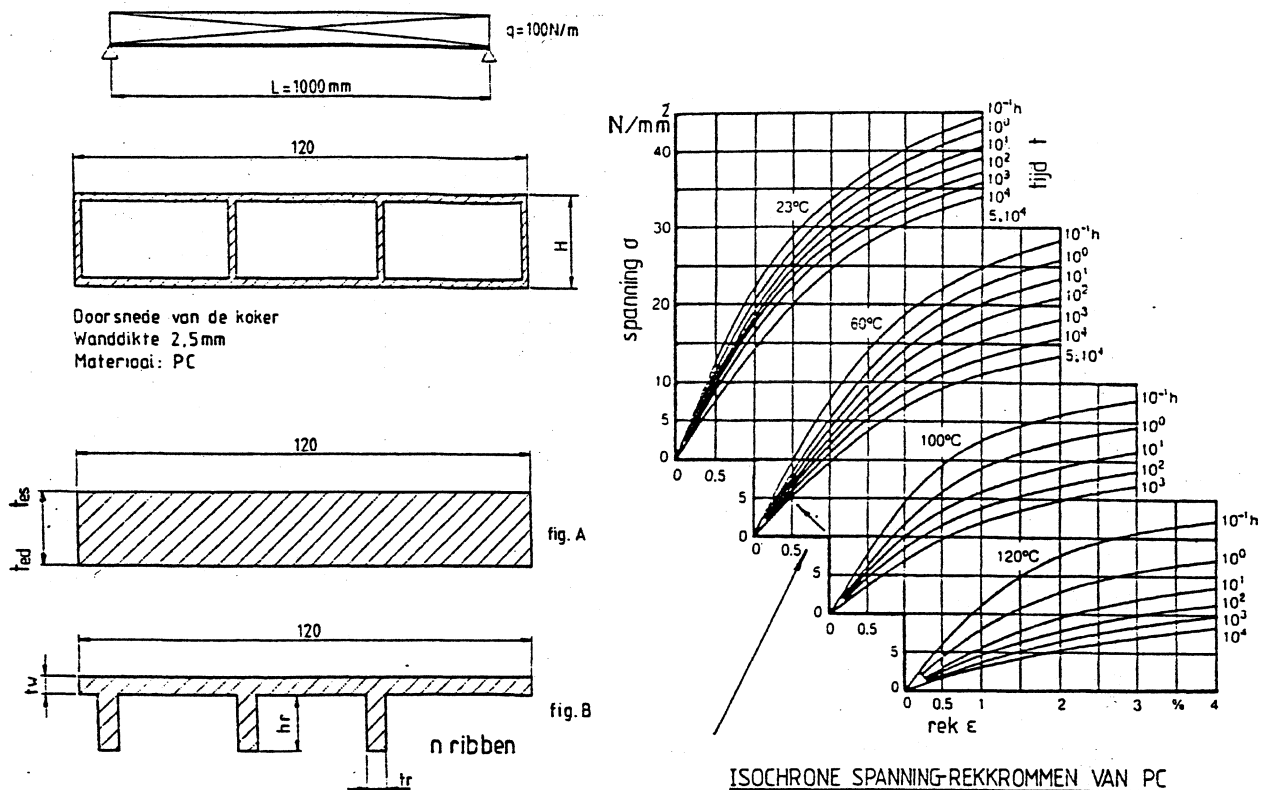


figuur 6.55 Persverbindingen.

Bij persverbindingen moeten we rekening houden met kruip en met de invloed van de temperatuur. Als we een as persen in een tandwiel of in een schijf met een naaf, dan blijkt dat de vlaktedruk tussen as en naaf ter hoogte van de flens groter is dan in de rest van de naaf (figuur 6.55 links). De vlaktedruk tussen as en naaf kan vergroot worden als om de naaf een stalen veer gelegd wordt (midden). Voor het vergroten van het over te brengen koppel kunnen langsrillen op de as aangebracht worden, willen we de uittrekkraft vergroten dan passen we dwarsrillen toe (rechts).

6.8 Voorbeeldopgaven

Voorbeeld 1. Verribbing



figuur 6.56 Opegelegde balk en isochrone spanning-rek krommen van PC.

Gegevens:

Een aan beide einden opegelegde balk wordt belast met een gelijkmatig verdeelde belasting q (figuur 6.56 linksboven).

- verdeelde belasting: $q = 100 \text{ N/m}$
- de omgevingstemperatuur is 60°C
- het toegepaste materiaal is een onversterkt PC
- kritieke rek van PC: $\varepsilon_F = 0,8\%$
- de toe te passen veiligheidscoëfficiënt: $V = 1$
- maximale doorbuiging in het midden van de balk: $f_{\max} = 10 \text{ mm}$
- belastingsduur: 50.000 uren
- maximale breedte van de balk: 120 mm

De doorsnede van de balk mag kokervormig zijn met een wanddikte van 2,5 mm of rechthoekig met verstevigingsribben (figuur 6.56 linksonder) waarbij $t_r = t_w$. De maat t_w rond men af op hele millimeters. In verband met knik is $h_r \leq 7 t_r$.

Bereken

- de dikte h van de koker
- de afmetingen van de verribde plaat met behulp van de diagrammen van Lipshey
- het materiaalverbruik

Deze berekeningen worden uitgevoerd met behulp van isochrone spanning-rek-krommen.

- bereken nu de afmetingen van de koker met alleen de materiaalspecificaties volgens DIN of ASTM (einde hoofdstuk 5)

Oplossing

De balk wordt eerst gedimensioneerd op de maximale doorbuiging en daarna volgt de controle op de toelaatbare rek. Als de rek te hoog uitvalt zal men opnieuw moeten dimensioneren maar dan op de kritieke rek.

a. De doorbuiging kan men berekenen met behulp van de vergeetmenietjes uit de sterkteleer door de opgelegde balk op de helft denkbeeldig in te klemmen. Voor de doorzakking bij de gelijkmatig verdeelde belasting q geldt:

$$f = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_c \cdot I}$$

Voor het traagheidsmoment I geldt dus:

$$I = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_c \cdot f}$$

De kruipmodulus halen we uit de isochrone spanning-rek-kromme bij 60°C en bij 50.000 uren belasting (figuur 6.56). Bij een rek van $\varepsilon = 0,5\%$ behoort een spanning van $\sigma = 5 \text{ N/mm}^2$.

De kruipmodulus is dan:

$$E_c = \frac{\sigma}{\varepsilon} = 1000 \text{ N/mm}^2$$

Het traagheidsmoment van de doorsnede wordt nu door invulling van de gegevens:

$$I = 130.208 \text{ mm}^4$$

Het traagheidsmoment van de kokervormige doorsnede is:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{(b-4t) \cdot (h-2t)^2}{12} = 130.208 \text{ mm}^4$$

Door proberen kan h snel worden gevonden: $h = 30,5 \text{ mm} \Rightarrow I = 131.730 \text{ mm}^4$

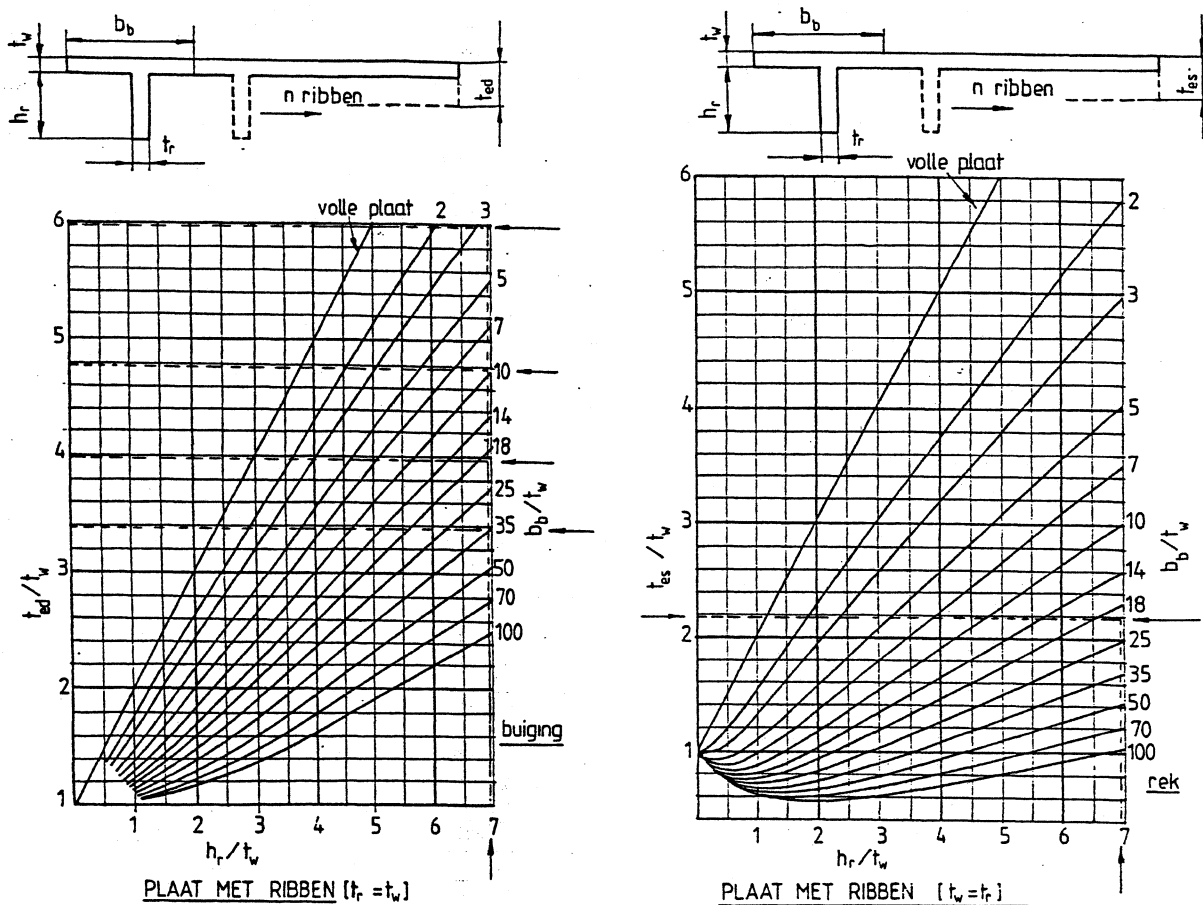
Voor de rek geldt:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M}{E \cdot W}$$

Met: $M = \frac{q \cdot l^2}{8} = 12.500 \text{ Nmm}$ en $W = \frac{I}{\frac{1}{2}b} = 8640 \text{ mm}^3$

De rek is dus: $\varepsilon = 0,15\% \ (\leq \varepsilon_F)$

Het oppervlak van de doorsnede $A = 855 \text{ mm}^2$



figuur 6.57 Liphey diagrammen. Links voor equivalente stijfheid en rechts voor equivalente sterkte.

b. De dikte t_{ed} van een plaat zonder ribben met dezelfde stijfheid als de uiteindelijk plaat met ribben en een dikte t_w volgt uit:

$$I = \frac{b \cdot t_{ed}^3}{12} = 130.208 \text{ mm}^4$$

Hieruit volgt $t_{ed} = 24 \text{ mm}$.

Neem nu een aantal waarden voor t_w aan. Uit de grafiek volgt bij een gegeven $h_r/t_w = 7$ de waarden voor b_b/t_w . Uit deze waarden bepalen we b_b en n .

t_w	t_{ed}/t_w	b_b/t_w	b_b	n	Oppervlak van de doorsnede mm ²
4	6	3	12	10	1600
5	4,8	10	50	3	1125
6	4	20	120	1	972
7	3,4	35	245	1	1183

We kiezen $t_w = 6$ mm (figuur 6.57 links).

In de plaat met een dikte t_{es} heerst dezelfde spanning of rek als in een plaat met dikte t_w die voorzien is van ribben.

Uit de rechter grafiek van figuur 6.57 volgt met $h_r/t_w = 7$ en $b_b/t_w = 20$:

$$t_{es}/t_w = 2,2 \quad \Rightarrow \quad t_{es} = 13,2 \text{ mm}$$

Het weerstandsmoment van deze plaat is

$$W = \frac{b \cdot t_{es}^2}{6} = 3485 \text{ mm}^3$$

De rek in deze doorsnede:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M}{E \cdot W} = 0,36\% \quad (\leq \varepsilon_F)$$

c. Het minimale materiaalverbruik wordt bereikt met een koker. Van de plaat met ribben geeft de plaat van 6 mm dikte met één rib de beste resultaten.

d. Voor deze berekening gaan we uit van een E_0 van 2800 N/mm².

Voor de correctie op tijd hebben we:

$$\gamma \cdot 10^4 \text{ uur} = 0,4 \quad \text{en} \quad \gamma \cdot 10^5 \text{ uur} = 0,35. \quad \text{Neem } \gamma = 0,38$$

Voor de correctie op temperatuur nemen we

$$\delta \cdot 60/20 \text{ }^\circ\text{C} = 0,7^2 = 0,50$$

De kruipmodulus:

$$E_C = E_0 \cdot \gamma \cdot \delta = 532 \text{ N/mm}^2$$

Het traagheidsmoment:

$$I = \frac{5}{384} \frac{q \cdot l^4}{E_C \cdot f} = 244.750 \text{ mm}^4$$

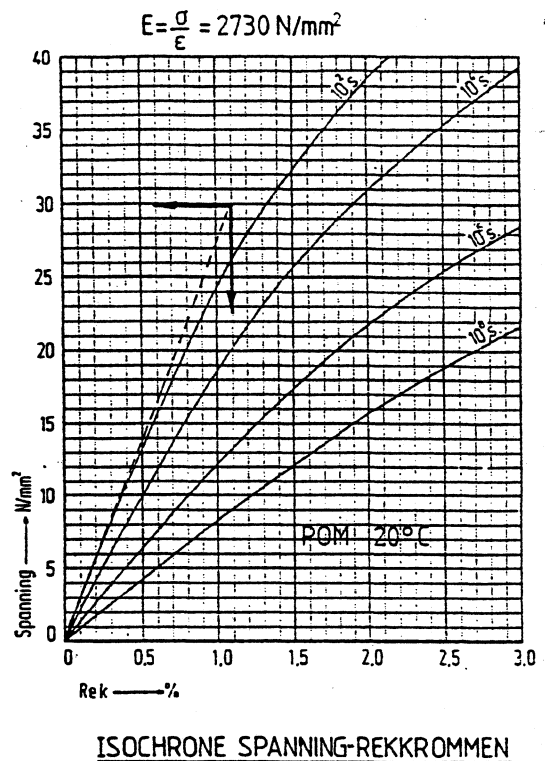
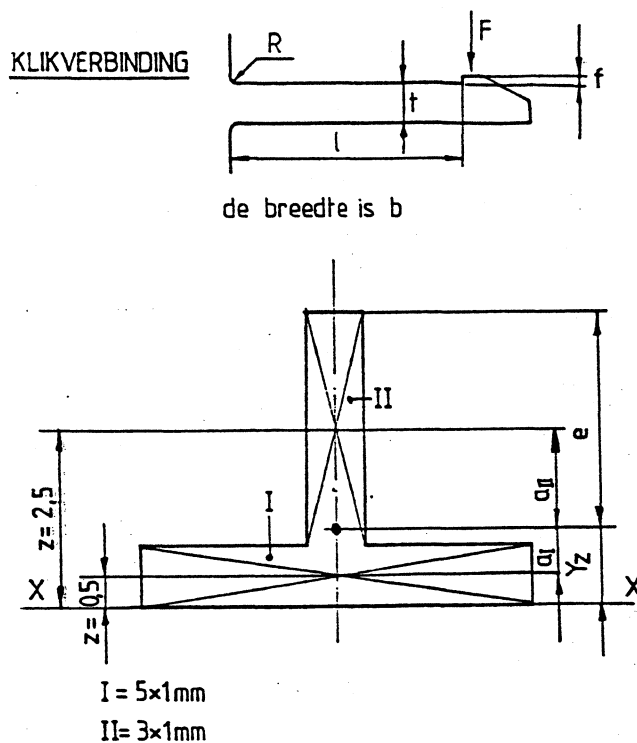
$$\text{Stel } h = 40 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad I = 246.980 \text{ mm}^4$$

De hoogte wordt dus wel iets groter. In plaats van 30,5 mm wordt de hoogte $h = 40$ mm.

Het weerstandsmoment:
$$W = \frac{I}{\frac{1}{2}b} = 12350 \text{ mm}^3$$

De rek:
$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M}{E \cdot W} = 0,19 \%$$

Voorbeeld 2. Klikvinger



figuur 6.58 Klikvinger en isochrone spanning-rek krommen van een POM.

De klikvinger van figuur 6.58 heeft de volgende afmetingen

- lengte $l = 30 \text{ mm}$
- dikte $t = 1 \text{ mm}$
- breedte $b = 5 \text{ mm}$
- doorvering $f = 1 \text{ mm}$
- straal $R = 0,25 \text{ mm}$

Het materiaal van de klikvinger is een POM, de temperatuur bedraagt 20°C.

Bereken:

- a. de rek in de klikvinger
- b. de spanningsconcentratiefactor K_t
- c. de kracht F

Oplossing:

a. De spanning ter plaatse van de inklemming is

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{W} = \frac{F \cdot l \cdot t}{2 \cdot I}$$

In deze formule zijn de spanning σ en de kracht F onbekend.

Verder geldt voor de rek: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F \cdot l \cdot t}{2 \cdot E \cdot I}$ en de doorbuiging: $f = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}$

Elimineer door delen de grootheden F en E

$$\varepsilon = \frac{3}{2} \cdot \frac{f \cdot t}{l^2} \cdot 100\% = 0,17\%$$

b. De spanningsconcentratiefactor K_t volgens figuur 6.2 (linksonder) bedraagt $K = 1,5$

De rek bij de inklemming bedraagt:

$$\varepsilon_{\max} = K_t \cdot \varepsilon = 1,5 \cdot 0,17\% = 0,26\%$$

c. De kracht F volgt uit:

$$f = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

Uit de isochrone spannings-rek-kromme van figuur 6.58 (rechts) vinden we:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{30}{1,1 \cdot 10^{-2}} \approx 2730 \text{ N/mm}^2$$

Dit is de waarde bij 100 seconden belasting, de echte E zal iets groter zijn. Bij een veel grotere rek moet met de secansmodulus gerekend worden deze zal dan kleiner zijn dan $E = 2730 \text{ N/mm}^2$

Het traagheidsmoment I is: $I = \frac{b \cdot t^3}{12} = 0,417 \text{ mm}^4$

De kracht F is: $F = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} = 0,127 \text{ N}$

Voorbeeld 3. Klikvinger met rib

Plaats een rug van 1 mm breed en 3 mm hoog op de onderzijde van de klikvinger van voorbeeld 2 (figuur 6.58 linksonder).

Bereken:

- de rek ε bij de inklemming
- de kracht F

Oplissing:

De doorsnede van de balk is in figuur 6.58 linksonder weergegeven. Voordat het traagheidsmoment van de doorsnede berekend kan worden moet men de ligging van het zwaartepunt bepalen. Statisch moment ten opzichte van X - X:

	Opp. A	Zwaartepunt	Statisch moment
deel I	5mm ²	0,5mm	2,5mm ³
deel II	3mm ²	2,5mm	7,5mm ³
Totaal	8mm ²		10 mm ³

De ligging van het zwaartepunt $Y_z = 10/8 \text{ mm} = 1,25 \text{ mm}$

Berekening van het traagheidsmoment:

	I eigen	a	A	a ² A
Deel I	0,147	0,75	5	2,81
Deel II	2,25	1,25	3	4,69
	2,67			7,50

Het traagheidsmoment: $I = 2,67 + 7,50 = 10,17 \text{ mm}^4$

Het weerstandsmoment: $W = I/e = 10,17/2,75 = 3,7 \text{ mm}^3$

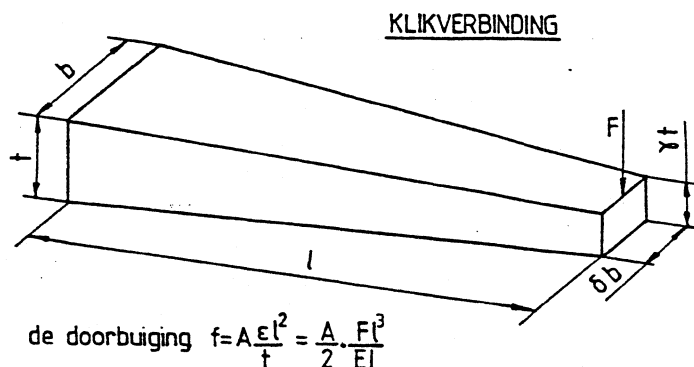
De kracht F wordt nu: $F = \frac{3 \cdot E \cdot I}{l^3} = 3,1 \text{ N}$

De spanning bij de inklemming is: $\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{W} = 25,1 \text{ N/mm}^2$

De rek: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 0,92\%$

Let op dat de spanningsconcentratie bij de inklemming nu niet is meegenomen.

Voorbeeld 4. Taps verlopende klikvinger



$\delta \backslash \gamma$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,2	3,33	1,93	1,37	1,07	0,88
0,4	2,73	1,67	1,21	0,97	0,80
0,6	2,36	1,49	1,12	0,90	0,75
0,8	2,11	1,36	1,03	0,83	0,70
1,0	1,92	1,26	0,96	0,79	0,67

waarden voor A

figuur 6.59 Taps verlopende klikvinger en berekeningswaarden.

Het is gunstig een op buiging belaste klikvinger een verlopende vorm te geven. Beschouw de klikvinger uit voorbeeld 2 met dien verstande dat de dikte verloopt van 2,5 mm bij de inklemming tot 1 mm bij het uiteinde en de breedte verloopt van 5 naar 2 mm.

Bereken

- a. de kracht F
- b. de rek bij de inklemming

Oplossing

Uit figuur 6.59 halen we $\gamma = \delta = 0,4$

Uit de tabel volgt voor de waarde $A = 1,67$

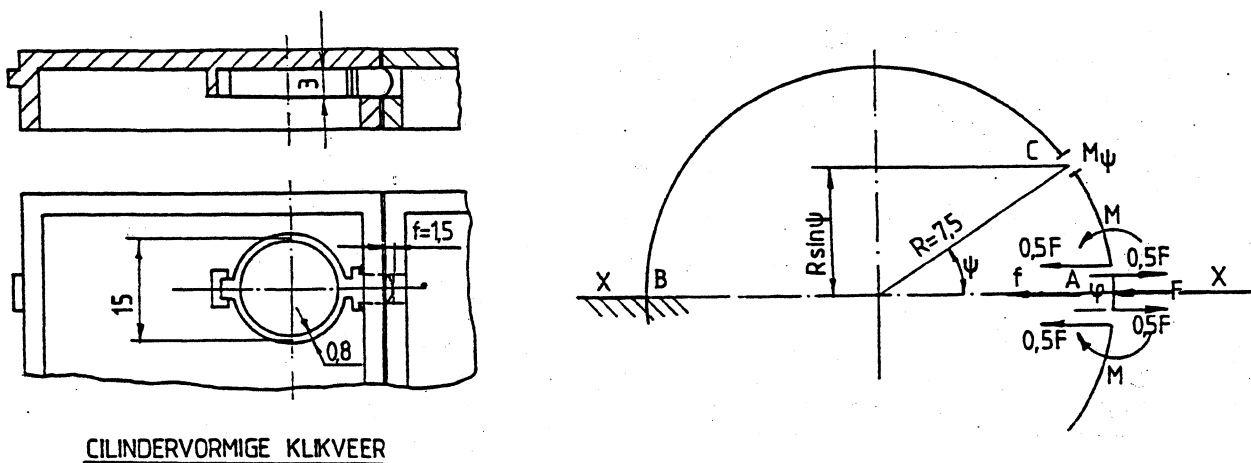
Het traagheidsmoment (bij de inklemming) $I = 6,5 \text{ mm}^4$

a. de kracht F is:
$$F = \frac{2 \cdot f \cdot E \cdot I}{A \cdot l^3} = 0,8 \text{ N}$$

b. de rek bedraagt:
$$\varepsilon = \frac{f \cdot t}{A \cdot l^2} = 0,17\%$$

Deze rek is gelijk aan die uit voorbeeld 2.

Voorbeeld 5. Cilindervormige klikveer



CILINDERVORMIGE KLIKVEER

figuur 6.60 Cilindervormige klikveer en berekeningsschema.

Een cilindervormige veer levert de verende werking van een klikverbinding. De klikverbinding dient om een klepje losneembaar vast te zetten in een kastvormig product (figuur 6.60).

Het materiaal van de veer is een POM met een elasticiteitsmodulus E van 2700 N/mm^2
De temperatuur bedraagt 20°C .

Bereken

- a. de veerstijfheid

- b. de maximale kracht F_{\max}
 c. de maximale rek ε_{\max}

Oplossing

De veer is een gesloten cilinder die symmetrisch wordt belast volgens figuur 6.60 rechts. De veer wordt aan één zijde bij B ingeklemd en aan de andere zijde over de belasting F doorgesneden.

De hoek verdraaiing φ ter plaatse van A is nul. Voor het oplossen van dit probleem past men de methode van het gereduceerde momentenvlak M/EI toe.

Het buigend moment in C is:

$$M_{\psi} = \frac{1}{2} F \cdot R \cdot \sin \psi - M_A$$

Het oppervlak onder de buigende momentenlijn is:

$$\int_0^{\pi} M_{\psi} \cdot R \cdot d\psi$$

Het oppervlak van het gereduceerde momentenvlak is gelijk aan de hoekverdraaiing bij A:

$$\varphi_A = 0 = \int_0^{\pi} \frac{M_{\psi} R \cdot d\psi}{E \cdot I} = \int_0^{\pi} \frac{\frac{1}{2} F \cdot R^2 \sin \psi - M_A \cdot R}{E \cdot I} \cdot d\psi$$

$$\varphi_A = 0 = \left[-\frac{1}{2} F \cdot R^2 \cos \psi - M_A \cdot R \psi \right]_0^{\pi} \Rightarrow M_A = \frac{F \cdot R}{\pi}$$

De verplaatsing f ter plaatse van A berekent men met het statisch moment van het gereduceerde momentenvlak:

$$f_A = \int_0^{\pi} \frac{M_{\psi} \cdot R \sin \psi \cdot R \cdot d\psi}{E \cdot I} \quad \text{met} \quad M_{\psi} = \frac{1}{2} F \cdot R \sin \psi - \frac{F \cdot R}{\pi}$$

$$f_A = \frac{FR^3}{EI} \cdot \int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2} \sin^2 2\psi - \frac{\sin \psi}{\pi} \right) \cdot d\psi$$

$$f_A = \frac{FR^3}{EI} \cdot \left[-\frac{1}{8} \sin 2\psi + \frac{1}{4} \psi - \frac{1}{\pi} \cos \psi \right]_0^{\pi} = 0,149 \frac{F \cdot R^3}{E \cdot I}$$

Met: $I = \frac{1}{12} b \cdot b^3 = \frac{1}{12} \cdot 3 \cdot 0,8^3 = 0,128 \text{ mm}^4$

Wordt de veerstijfheid: $\frac{F}{f_A} = \frac{E \cdot I}{0,149 \cdot R^3} = 5,5 \text{ N/mm}$

De kracht F_{\max} bij een doorbuiging van $f = 1,5 \text{ mm}$ is: $F_{\max} = 8,3 \text{ N}$

Het moment in een doorsnede in C is:

$$M_{\psi} = \frac{1}{2} F \cdot R \cdot \sin \psi - \frac{F \cdot R}{\pi} = F \cdot R \cdot \left(\frac{\sin \psi}{2} - \frac{1}{\pi} \right)$$

$$M_{\psi \max} \left(\text{voor } \psi = \frac{\pi}{2} \right) = 0,18 \cdot F \cdot R$$

In A is het moment: $M_A = \frac{F \cdot R}{\pi} = -0,32 \cdot F \cdot R$

De buigspanning in A is: $\sigma = \frac{M_A}{W} = \frac{0,32 \cdot F \cdot R}{2 \cdot I} \cdot 0,8 = 61,9 \text{ N/mm}^2$

De maximale rek in A bij sluiten van de verbinding is: $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = 2,3\%$

6.9 Literatuur

- 1 Ribbed plastic parts, A.L. Lipshey, Machine Design, may 30, 1974
- 2 Dupont, Design Handbook.
- 3 Hoechst, Berechnen: Gestalten Anwenden B 3.1, B 3.4.
- 4 Bayer, Praxisinformation, Schnappverbindungen aus Kunststoff.
- 5 William W. Chow, Snap fits and press fits, Mechanical Engineering 8 Part A, Edward Miller S.P.E. (1981), Marcel Dekker Inc. New York Basel.
- 6 Josef Bals, Fügen von Kunststoff Formteilen, VDI Verlag. GmbH Düsseldorf (1977).
- 7 H.M. Ruyten, Prijsbewust ontwerp van een duurzaam massa-artikel, De Konstrukteur 8-1982 blz. 30.
- 8 I. Schmidt, Pressverbindungen bei Kunststoff-Teilen, Kunststoffe 66(1976)2 S90-97, 66(1976)3 5170-173.
- 9 J. Shields, Adhesives handbook, Butterworths London
- 10 Roark, Formulas for stress and strain.

Hoofdstuk 7. Verbindingstechnieken

Een product zal vaak uit meerdere onderdelen bestaan, die onderling verbonden moeten worden. Hiervoor zijn verschillende technieken beschikbaar afhankelijk van de toepassing. De eisen die men aan een ideale verbindingstechniek mag stellen zijn:

- reproduceerbare sterkte en stijfheid van de verbinding
- goed mechaniseerbaar
- de verbinding moet direct belastbaar zijn
- voor het verbinden zijn geen afzonderlijke onderdelen nodig
- er zijn geen chemicaliën nodig bij het verbinden

Hieruit volgt een globale voorkeursvolgorde voor de verschillende verbindingstechnieken.

- klikverbindingen
- ultrasoon lassen, klinken en felsen
- wrijvingslassen
- schroeven en lijmen

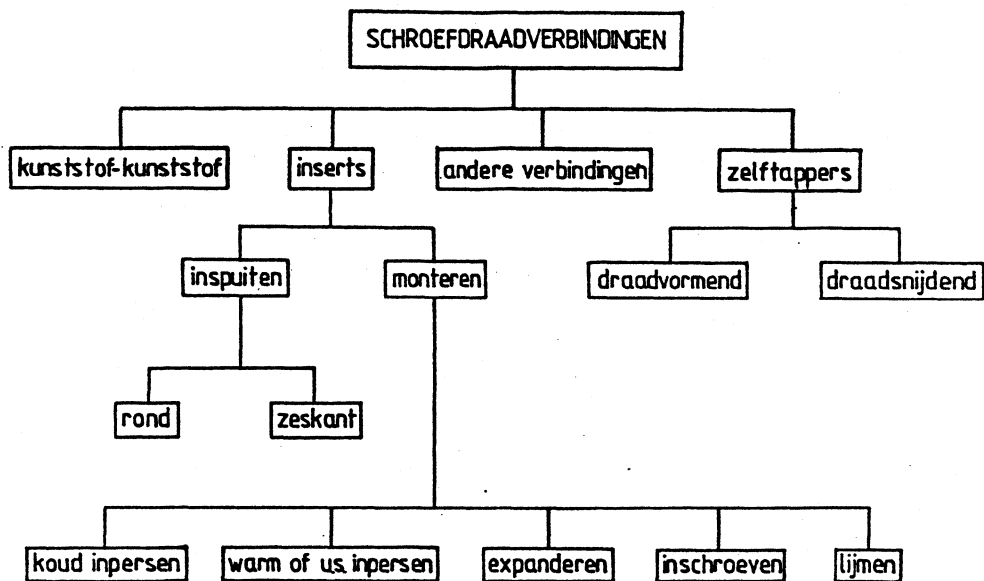
Klikverbindingen zijn in het vorige hoofdstuk reeds besproken. Hieronder worden een aantal andere verbindingstechnieken besproken.

7.1 Schroefdraadverbindingen

In dit hoofdstuk behandelen we het verbinden van kunststof onderdelen aan elkaar en het verbinden van metalen onderdelen aan kunststof met behulp van schroeven en moeren of met alleen schroeven. In figuur 7.1 is een overzicht gegeven van de diverse schroefdraadverbindingen. Bij kunststof - kunststof verbindingen zijn de bout en de moer van kunststof. Deze verbindingselementen zijn in hoofdstuk 4 behandeld.

Onderdelen van een constructie die dikwijls los en weer vastgemaakt moeten worden, verbindt men met metalen schroeven en metalen moeren, 'inserts' genaamd. Soms worden metalen inserts om veiligheidsredenen toegepast; in sommige landen zijn inserts voor bepaalde apparaten voorgeschreven.

In verbindingen die geheel niet of slechts enkele malen losgemaakt moeten worden past men zelftappers toe, die direct in de kunststof worden gedraaid. Een verbinding met zelftappers is goedkoper dan met inserts.



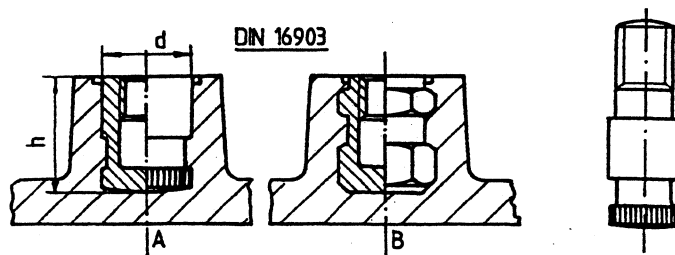
figuur 7.1 Indeling van schroefdraad verbindingen.

7.1.1 Inserts

Bij de indeling van de diverse typen moeren of inserts maakt men onderscheid tussen inserts die tijdens de fabricage van het product mee worden ingespoten en die na het fabriceren van het product hierin worden gemonteerd. Beide typen inserts kunnen in thermoplasten en in thermoharders worden toegepast.

Inspuiten

De inspuitmoeren maar ook inspuitbouten zijn in diverse vormen en maten verkrijgbaar. In figuur 7.2 zijn links een cilindrische en een zeskant insert weergegeven. Deze inserts zijn meestal aan één zijde gesloten om het inlopen van de kunststof tijdens de fabricage te voorkomen. Rechts in figuur 7.2 is een bout weergegeven die mee ingespoten wordt bij de fabricage van het kunststof onderdeel. In hoofdstuk 4 is uitvoerig ingegaan op meegesputgiete inserts.



figuur 7.2 Inspuitmoeren (links) en inspuitbout (rechts).

Achteraf monteren

Naast het gebruik van inspuitmoeren en bouten is het mogelijk om inserts achteraf in een kunststof product te monteren. Het achteraf monteren biedt een aantal voordelen:

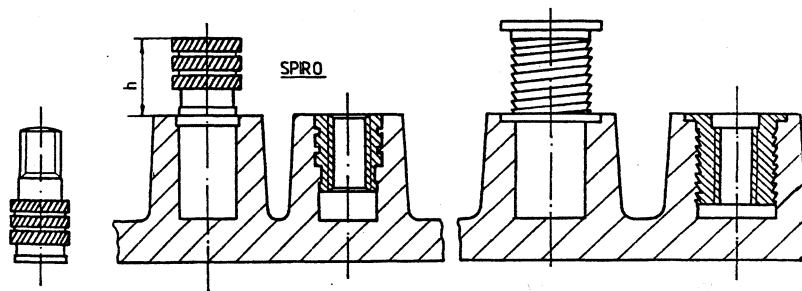
- verkorting van de spuitcyclus omdat in de openstaande matrijs geen inserts gezet moeten worden
- de spuitgietmachine kan automatisch lopen
- geen kans op beschadiging van de matrijs door losgeschoten inserts

De nadelen van montage achteraf zijn:

- extra investering voor een moerenindrukmachine
- extra montageplaats
- voor thermohardende materialen is warm indrukken of ultrasoon indrukken niet mogelijk

Koud inpersen

De meest eenvoudige montage van inserts is het koud inpersen van deze onderdelen in het kunststof gat (figuur 7.3 a en b). De buitenzijde van de insert is in één richting onder een hoek gekarteld. Een ander type inpersmoer die in PUR-schuim wordt toegepast is aan de buitenzijde van een soort schroefdraad voorzien (figuur 7.3 c). Dit type insert is ook als bout verkrijgbaar.

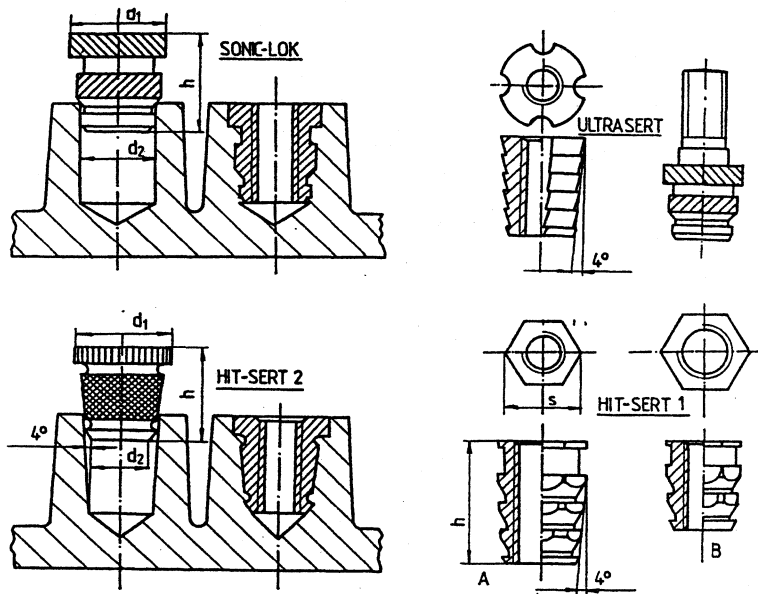


figuur 7.3 Inserts voor koud inpersen.

Warm of ultrasoon inpersen

De meest toegepaste montagemethode en ook de beste methode is het warm inpersen of het ultrasoon inpersen van de inserts. Dit is in figuur 7.4 weergegeven. Voor het warm indrukken moeten de inserts in een speciaal persje snel opgewarmd worden. Is een juiste temperatuur bereikt dan drukt het persje de insert in het kunststof product. Een ultrasoon indrukapparaat is voorzien van een speciaal aangepaste sonotrode die via een hoogfrequentgenerator in trilling wordt gebracht, De hoogfrequente wrijving tussen kunststof en moer smelt de kunststof en daarna drukt men de moer in het product.

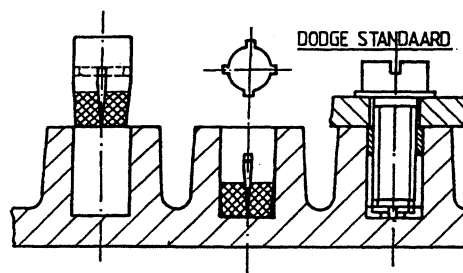
Het tegelijk indrukken van een aantal moeren kan met een ultrasoon-apparaat problemen geven, omdat de sonotrode niet willekeurig groot gemaakt kan worden; de sonotrode is trillingsbegrensd.



figuur 7.4 Inserts voor warm of ultrasoon inpersen.

Expandeerbare moer

Een geheel ander type insert is de expandeerbare moer. De moer drukt men in het gevormde gat in de kunststof. Door het indraaien van de metalen schroef worden de wanden uit elkaar gedrukt in het kunststof. In de insert van figuur 7.5 zorgt een plaatje in het draadgat voor het spreiden van de moer. De inserts volgens de figuur 7.6 zijn door een zaagsnede zo slap gemaakt dat ze bij montage naar binnen buigen. De schroef drukt beide delen van de moer naar buiten waardoor deze delen in de kunststof haken. Het nadeel van deze inserts is dat het montagemoment op de schroef door de wrijving groter is dan bij de andere inserts.

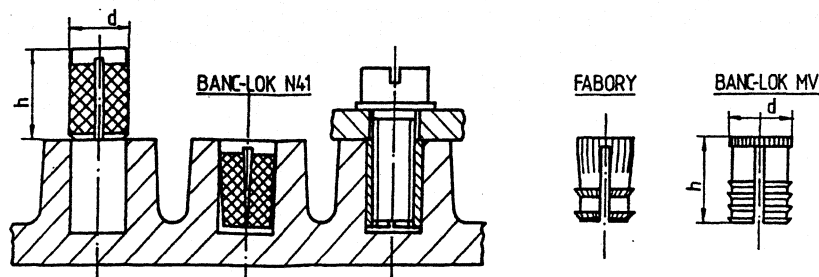


figuur 7.5 Expandeerbare moer met plaatje voor het spreiden van de moer.

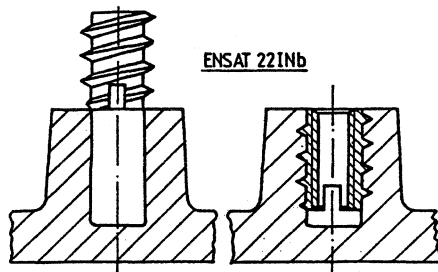
Overige

De insert van figuur 7.7 is aan de buitenzijde voorzien van schroefdraad. De twee gleuven aan een zijde van de moer zorgen er voor dat de buitendraad zelfsnijdend is. De moer schroeft men op een spil van de montagemachine die draaiend de moer in de kunststof schroeft.

Bij PUR producten komt het voor dat speciaal gefabriceerde moeren of bouten in het product worden vastgelijmd.



figuur 7.6 Gemakkelijk expandeerbare moeren door diepe zaagsnede.



figuur 7.7 Moer met zelfsnijdende draad, met name voor PUR schuim.

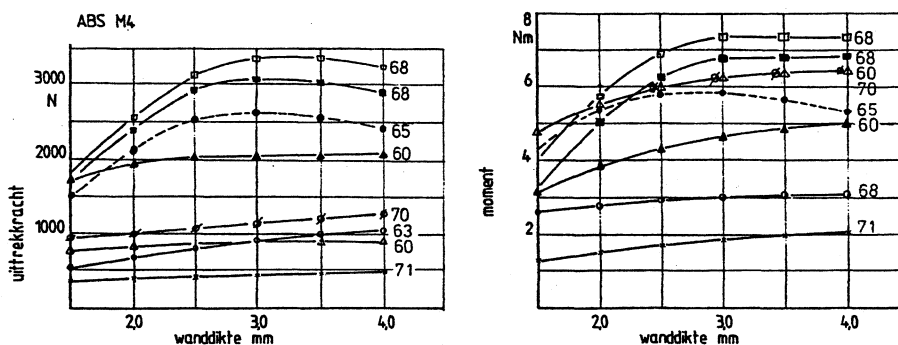
Uittrekkraft en doldraaimoment

Bij het beoordelen van de diverse inserts is het belangrijk te letten op de uittrekkraft die nodig is om een insert uit het product te trekken en het doldraaimoment waarbij de insert gaat meedraaien. De uittrekkraft en het doldraaimoment zijn afhankelijk van:

- het type insert
- de kunststof
- het verschil in diameter tussen het gat in de nok en de insert
- de wanddikte van de nok

Voorbeelden

In figuur 7.8 zijn de uittrekkraft en het doldraaimoment van diverse inserts uitgezet tegen de wanddikte van de nok. Het materiaal van de nok is een ABS. Alle inserts zijn voorzien van M4 draad. De warm ingeperste moeren (nrs. 68) komen het beste uit de test.



figuur 7.8 Uittrekkraft en doldraaimoment van M4 insertmoeren in ABS uitgezet tegen de wanddikte van de nok. (68 = hit-insert2, 65 = sonic-lok, 70 = dodge-stand., 71 = banc-lok).

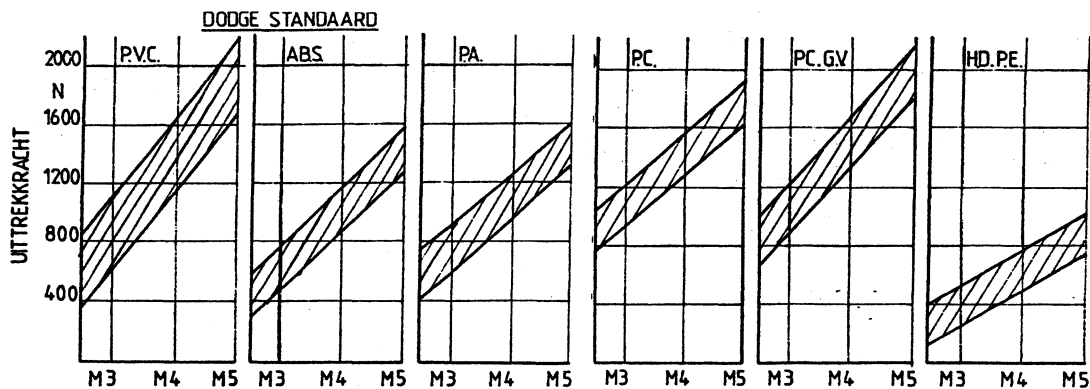
De optimale wanddikte van de nokken ligt tussen de drie en de vier mm. Een richtlijn voor de diameter van de nok is:

$$d_{nok} = 1,6 - 1,8 \cdot d$$

Voor expandeerbare moeren: $d_{nok} = 2 \cdot d$

d = de buitendiameter van de insert.

In figuur 7.9 is de uittrekkraft van de Dodge standaard insert van figuur 7.5 uitgezet als functie van diverse typen kunststoffen. PE en ook PP zijn minder geschikte materialen voor dit type insert.

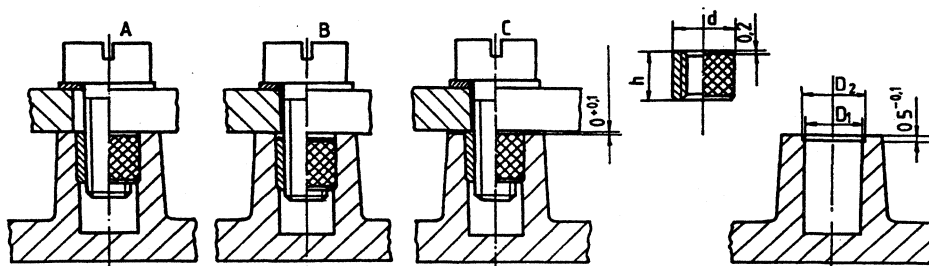


figuur 7.9 Uittrekkraft van de expandeerbare moer van figuur 7.5 voor verschillende kunststoffen.

De uittrekkraft en het doldaikoppel zijn afhankelijk van het diameterverschil tussen het gat in de nok en de buitendiameter van de insert. De fabrikant van de insert geeft de diameter van het gat in de nok nauwkeurig op. Er wordt onderscheid gemaakt tussen de diameter voor brosse en voor taaie kunststoffen. Het diameterverschil voor taaie materialen is groter dan die van brosse kunststoffen.

In figuur 7.10 is een ander type insert voor ultrasoon indrukken weergegeven. In A wordt de moer op trek belast, het gat van de nok wordt op afschuiving belast en in de nok treedt kruip op. De nok van B wordt op dezelfde wijze belast als die van A, omdat de insert te diep in de nok zit. In de nok van C treedt geen schuifspanning op zolang tussen beide gemonteerde delen geen krachten optreden. Deze laatste constructie is de beste van de drie.

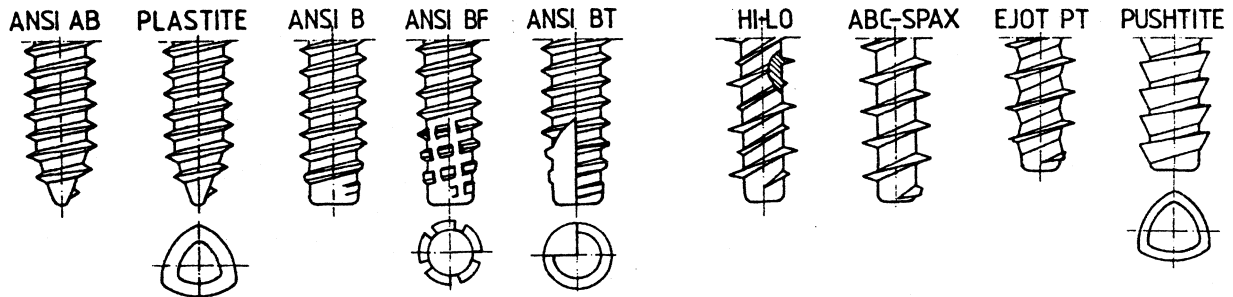
Gegevens over inserts zijn te vinden in de catalogi van de diverse fabrikanten.



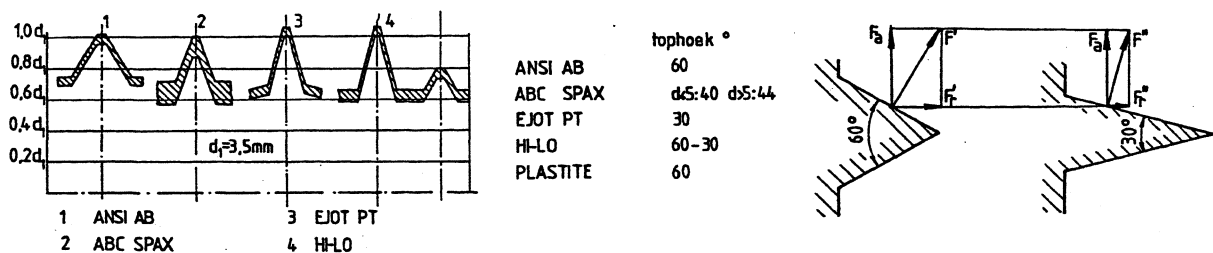
figuur 7.10 Insert voor ultrasoon indrukken.

7.1.2 Zelftappers

Zelftappers of plaatschroeven zijn in de jaren twintig ontstaan in de Amerikaanse automobiellndustrie. Het bijzondere van de plaatschroef is dat men de schroef in een voorgevormd gat draait zonder dat eerst door een tapbewerking schroefdraad aangebracht is. Vanaf de jaren vijftig zijn dezelfde schroeven toegepast voor het verbinden van kunststof onderdelen. Omdat de plaatschroeven in Amerika zo ingeburgerd zijn en ze via de automobiellndustrie in Europa zijn gekomen heeft men alleen de afmetingen vertaald in mm-maten. Zelfs de codeletteraanduiding in de ISO en NEN normen zijn dezelfde als die van de ANSI normen (American National Standards Institute).



figuur 7.11 Zelftappers uit de automobiellndustrie (1 t/m 5) en zelftappers speciaal ontwikkeld voor kunststoffen (6 t/m 9).



figuur 7.12 Tophoeken van een aantal typerende zelftappers.

Schroefgeometrie

In de figuur 7.11 zijn diverse plaatschroeven weergegeven, deels zijn het draadvormende zelftappers, deels draadsnijdende zelftappers.

Van de draadvormende zelftappers worden de typen ANSI AB en B het meest toegepast voor het verbinden van thermoplasten. Het type AB uit vergt een dieper schroefgat dan het type B, omdat de effectieve schroeflengte van de eerste kleiner is. Bij de DIN normen moet men er aan denken dat letteraanduidingen anders zijn dan die volgens de ISO en de NEN normen.

De "plastite-schroef" heeft een driehoekvormige doorsnede waardoor de spanningen rond het gat lager zijn dan bij schroeven met een cirkelvormige doorsnede. Dit zelfde type schroef is ook uitgevoerd met metrische draad. De benaming van die schroef is "taptite schroef". Een bijkomend voordeel van dit type schroeven is dat ze veel moeilijker lostrillen dan schroeven met cirkelvormige doorsneden.

De draadsnijdende zelftappers worden toegepast in kunststoffen met een kleine rek bij breuk, zoals thermohardende kunststoffen, en voor glasvezelgevulde thermoplasten. De meest toegepaste draadsnijdende plaatschroeven zijn die van het type ANSI BF en BT. Deze plaatschroeven zijn goedkoper dan de andere draadsnijdende plaatschroeven en veroorzaken lagere spanningen in de kunststof.

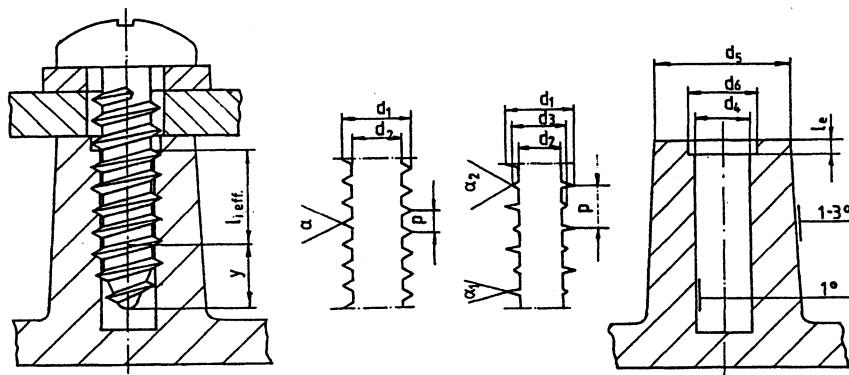
Bij blinde gaten moet het gat dieper zijn bij draadsnijdende plaatschroeven dan bij draadvormende schroeven om de spanen te kunnen bergen. Hiervoor is ongeveer 20 % van de schroeflengte nodig. Bij doorlopende gaten kunnen de spanen in het te monteren apparaat komen. Dit is in het algemeen niet toegestaan. Het opnieuw toepassen van draadsnijdende plaatschroeven in hetzelfde schroefgat is mogelijk als men bij de tweede maal schroeven zeer voorzichtig te werk gaat

Er zijn ook zelftappers speciaal voor kunststoffen ontwikkeld (figuur 7.11 6 t/m 9). Het kenmerkende van deze zelftappers is dat de tophoek van de schroefdraad kleiner is dan van normale plaatschroeven. De tophoek van de draad van normale plaatschroeven is 60° , de tophoek van de speciale schroeven varieert van 30° tot 48° . De kerndiameter van deze schroeven is ook kleiner dan die van de normale ANSI-plaatschroeven (figuur 7.12). De belasting van het schroefgat F_r wordt lager naarmate de tophoek van de draad afneemt.

Een geheel ander type schroef is de axiale inpersschroef "PUSHITITE". Deze schroeven worden axiaal in het gat geperst. Bij demontage van het apparaat kan men er de schroef op een normale wijze uitdraaien. Deze schroef past men toe voor kunststoffen met een lage E-modulus.

De nok

Kunststof constructies zijn meestal dunwandig uitgevoerd. Bij het toepassen van zelftappers voorziet men de constructie dan meestal van nokken. In een centraal gat in de nok draait men de zelftapper. De nokken krijgen aan de buitenzijde een lossingsschuinite van 1 tot 3° om het uitstoten van de nok uit de matris eenvoudiger te maken. Soms krijgt het schroefgat een lossing van 1° enkele schuinite. In figuur 7.13 zijn de specifieke maten van de nok en van de plaatschroef weergegeven.



figuur 7.13 De specifieke maten van een nok in een kunststof product en een plaatschroef.

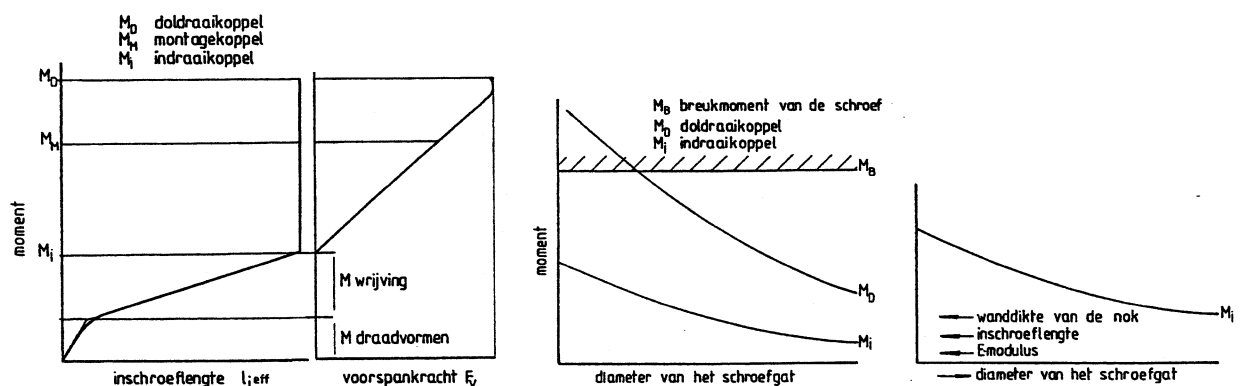
Het montageproces

Het indraaien van de zelftapper met een buitendiameter d_1 en een gat met een diameter d_4 gebeurt met een pneumatische of elektrische schroevendraaier met een instelbare slipkoppeling. In de voorste gangen van de schroef wordt de draad gevormd. Hiervoor is een

bepaald koppel nodig van de schroevendraaier. Afhankelijk van het materiaal en van de schroef neemt de wrijvingskracht tussen nok en schroef toe tijdens het indraaien (figuur 7.14 links). Het moment van de schroevendraaier zal tijdens het indraaien dus toenemen. Dit moment noemt men indraaimoment. Nadat de schroef volledig is ingeschroefd kan door verder te draaien de voorspankracht F_v aangebracht worden. Deze kracht hangt af van het ingestelde montagekoppel M_m . Is het montagekoppel zo groot dat de schroefdraad uit het gat getrokken wordt dan noemt men het montagekoppel het doldraaikoppel. Laat men de lengte van de schroef toenemen, dan kan voordat het doldraaimoment is bereikt de schroef breken. Dit verschijnsel kan ook optreden als het gat in de nok te klein is (figuur 7.14 rechts). De invloedsgrootheden op het indraaikoppel, het doldraaikoppel, de voorspankracht, de uittrekkkracht, de breuk van de schroef, de breuk van de nok en de beschadiging van de draad zijn:

- de schroef
- de kunststof (bij PUR: de soortelijke massa)
- de diameter van het schroefgat
- de diameter van de nok
- de inschroeflengte l_{i-eff}
- het ontlastingsgat $d_6 : l_e$
- het toerental van de schroevendraaier

Bij mechanische montage is het noodzakelijk dat er een zo groot mogelijk verschil is tussen het doldraaikoppel en het montagekoppel.



figuur 7.14 Optredende momenten bij het indraaien van een schroef.

Het bepalen van de afmetingen van de schroef en de nok

De meest eenvoudige methode om de sterkte van schroefverbinding te beoordelen is het uitvoeren van een trekproef op deze verbinding. De verbinding kan falen door:

- breuk van de schroef
- breuk van de nok
- het afschuiven van de draad uit de nok

Voor de breuksterkte van de schroef geldt:

$$F_s = \frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 \cdot \sigma_s$$

De treksterkte van een zelftapper uit het staal C15 is 600 tot 900 N/mm². De grote spreiding in de treksterkte en de vrij grote vervaardigingstolerantie op de diameter van de schroef is er de oorzaak van dat F_s slecht voorspelbaar is.

Voor de breuksterkte van de nok geldt:

$$F_n = \frac{\pi}{4} \cdot (d_5^2 - d_1^2) \cdot \sigma_n$$

Voor het afschuiven van de schroefdraad geldt:

$$F_u = \pi \cdot d_1 \cdot l_{i-eff} \cdot \tau_n$$

Met de grensspanningshypothese van Huber-Hency Von Mises:

$$\tau_n = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_n \approx 0,6 \cdot \sigma_n$$

en met de gelijkstelling van F_n en F_u wordt de buitendiameter van de nok:

$$d_5 = \sqrt{\frac{4}{\sqrt{3}} \cdot d_1 \cdot l_{i-eff} + d_1^2}$$

In de bovengenoemde formules is σ_n gelijk aan de spanning bij de vloeigrens.

Is er geen duidelijke vloeigrens aanwezig dan neemt men voor σ_n de maximum spanning in het spannings-rek diagram van de trekproef.

Het voorgaande geldt ook voor PUR. Worden in PUR de schroefgaten geboord dan neemt men:

$$\tau_n = 0,4 \cdot \sigma_n$$

Kiest men:
$$l_{i-eff} \geq 2,5 \cdot d_1$$

dan wordt de buitendiameter van de nok:

$$d_5 \geq 2,6 \cdot d_1$$

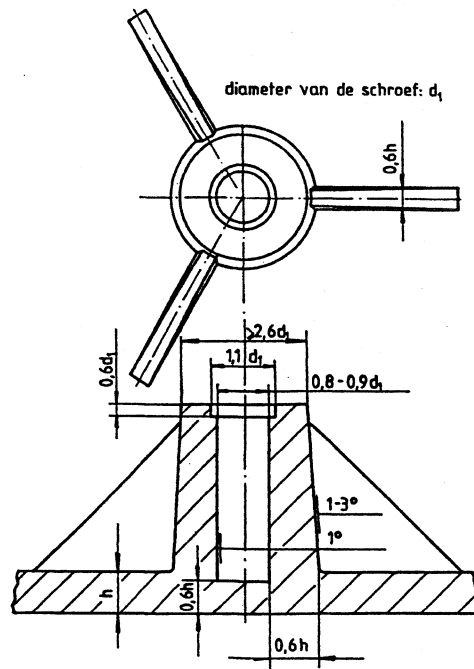
Voor materialen met een lage elasticiteitsmodulus mag l_{i-eff} groter dan $2,5 \cdot d_1$ genomen worden zonder dat men breuk van de schroef riskeert.

Als l_{i-eff} niet door constructieve beperkingen gegeven is moet l_{i-eff} zo groot mogelijk gekozen worden, omdat de afstand tussen het doldaaimoment en het indraaimoment toeneemt met toenemende l_{i-eff} .

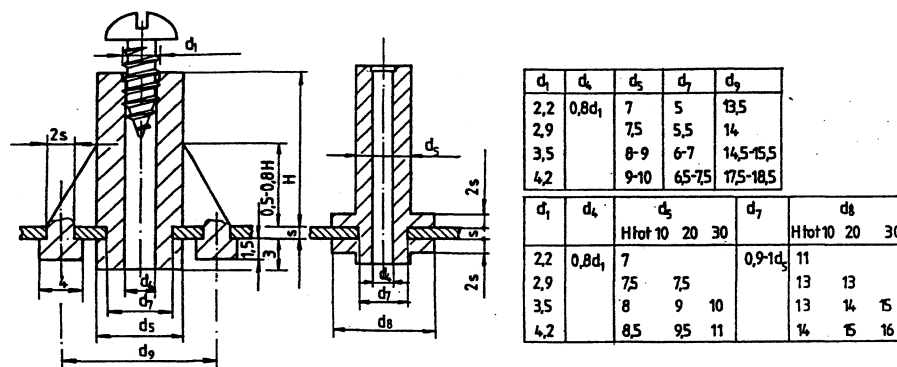
De diameter van het schroefgat d_4 neemt men ongeveer 0,8 – 0,9 maal de buitendiameter van de schroef d_1 afhankelijk van of het materiaal taai of bros is en de grootte van de diameter.

In figuur 7.15 en in figuur 7.16 zijn de afmetingen respectievelijk van normale schroefnokken en van schroefnokken voor outserts weergegeven.

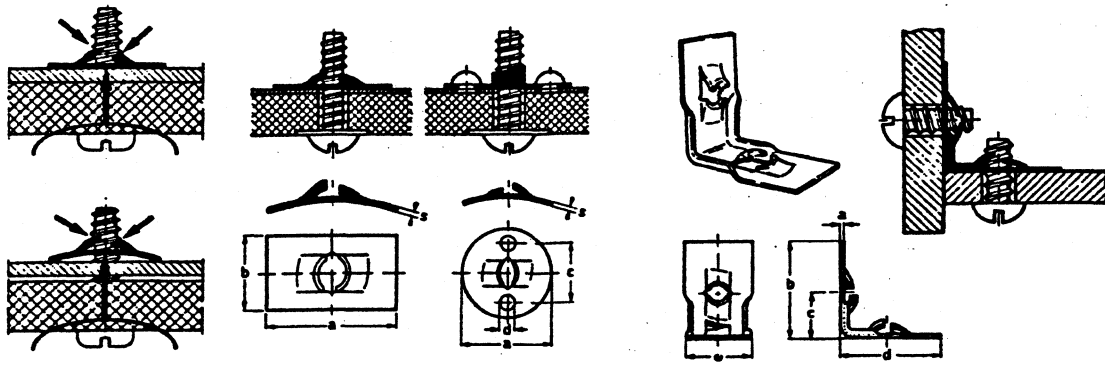
Heeft men zelftappers nodig dan moet men de catalogi van de verschillende fabrikanten raadplegen.



figuur 7.15 Afmetingen van de nok in een kunststof product.



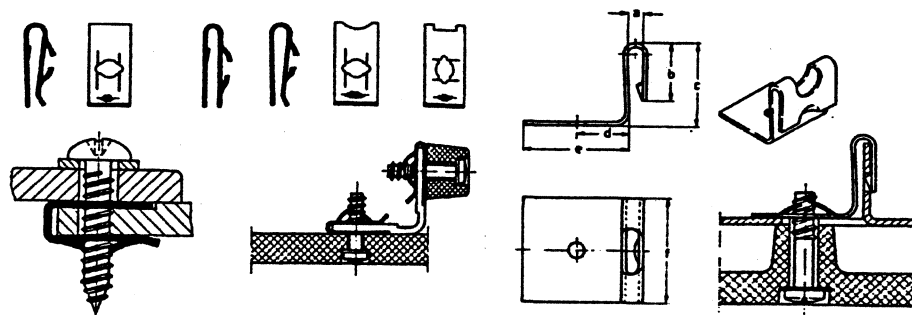
figuur 7.16 Afmetingen van een nok gemaakt door outserts techniek.



figuur 7.17 Plaatmoeren.

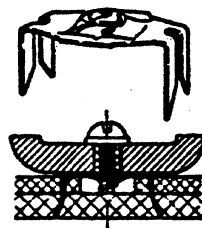
7.1.3 Andere schroefdraad verbindingen

De verbindingen die in deze paragraaf worden besproken zijn geen typische verbindingen van of voor kunststof onderdelen. Het zijn verbindingstechnieken uit de automobielwereld die ook hun toepassing hebben gevonden bij de montage van kunststof onderdelen.



figuur 7.18 Klikmoeren.

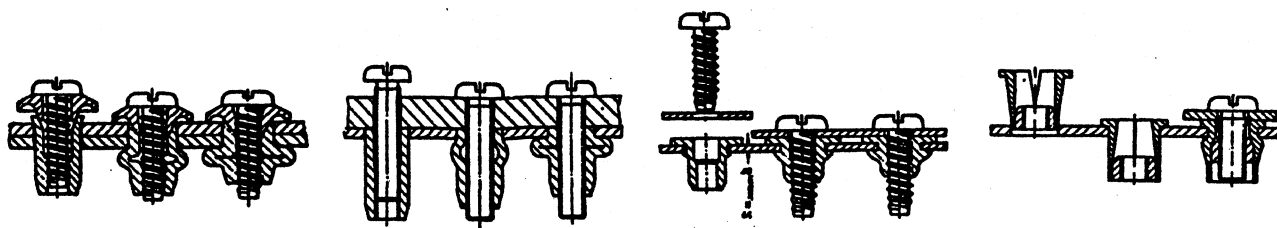
In figuur 7.17 zijn enkele verbindingen getekend met behulp van metalen plaatmoeren (Speednut). De gebruikte schroeven zijn de bekende ANSI-plaatschroeven. Er zijn ook speciale plaatmoeren om bijvoorbeeld een hoekverbinding te maken. Een variant op de plaatmoer is de klikmoer die ook uit de automobielwereld komt. Enkele toepassingen van klikmoeren zijn in figuur 7.18 weergegeven.



figuur 7.19 Ankermoer.

Voor polyurethaan met een laag soortelijk gewicht kunnen ankermoeren gebruikt worden (figuur 7.19). Deze moeren worden met een aangepast gereedschap in de constructie van

polyurethaan geslagen. De rest van de constructie kan via deze moer aan het PUR onderdeel vastgezet worden.



figuur 7.20 Stuikmoeren.

In figuur 7.20 zijn een viertal verbindingen getekend met behulp van stuikmoeren. De moer uit deze soort verbindingen is gemaakt van polyamide (PA). Bij het aandraaien van de schroef stuikt de moer op en vormt op deze wijze de verbinding tussen een aantal onderdelen. De toegepaste schroeven hebben metrische draad of draad van de plaatschroeven volgens ANSI-normen.

7.2 Lasverbindingen

Het lassen van kunststoffen wordt niet alleen toegepast voor het verbinden van halffabrikaten, zoals folie, plaat of buis, maar ook voor het verbinden van spuitgietproducten.

Het lassen van kunststoffen moet men zich anders voorstellen dan het lassen van metalen. De kunststof wordt door toevoeren van warmte “vloeibaar” gemaakt. De viscositeit van de thermoplast blijft echter hoog zodat de beide delen plus het eventueel toegevoegde materiaal niet tezamen vloeien zoals bij de metalen. Het samenvoegen of lassen vindt plaats doordat de zacht geworden delen op elkaar gedrukt worden en men de verbinding in deze toestand laat afkoelen.

De toe te voeren hoeveelheid warmte is bij het lassen van kunststoffen veel minder dan bij het lassen van metalen. De smeltemperatuur van kunststoffen is veel lager dan van metalen en de warmtegeleiding in kunststoffen is veel minder, zodat er minder warmte weglekt dan bij het lassen van metalen. Het lassen van semi-kristallijne kunststoffen vergt meer warmte dan het lassen van amorfe materialen. De lastijd bij de eerste is meestal langer of de trillingsamplitude moet groter zijn bij ultrasoon lassen.

De hoge uitzettingscoëfficiënt van kunststoffen heeft tot gevolg dat tijdens het afkoelen krimpspanningen ontstaan die scheurvorming in de lasnaad kunnen geven. Bij de diverse lasmethoden voor kunststoffen moet men rekening houden met het feit dat tijdens het aandrukken van de las vloeibaar materiaal ontwijkt uit de lasnaad. Als men geen constructieve maatregelen neemt kan dit materiaal het uiterlijk van het product schade doen. Alleen thermoplasten kunnen gelast worden. In eerste instantie kan men stellen dat alleen dezelfde materialen aan elkaar te lassen zijn. Amorfe kunststoffen kan men niet aan semi-kristallijne kunststoffen lassen, men kan ook geen twee verschillende kristallijne materialen aan elkaar lassen. Amorfe materialen kan men meestal wel aan elkaar lassen als het verwekingstraject van beide materialen niet te ver uiteen ligt. Bij het behandelen van de diverse lasmethoden geven we aan welke materialen aan elkaar gelast kunnen worden.

Bij het lassen van kunststoffen past men diverse methoden van warmtetoevoer toe. De verbinding ontstaat bij al deze methoden door de naad onder druk te zetten. Bij automatisch werkende lasapparaten zijn de warmtetoevoer en de druk op de lasnaad tijdgeremd.

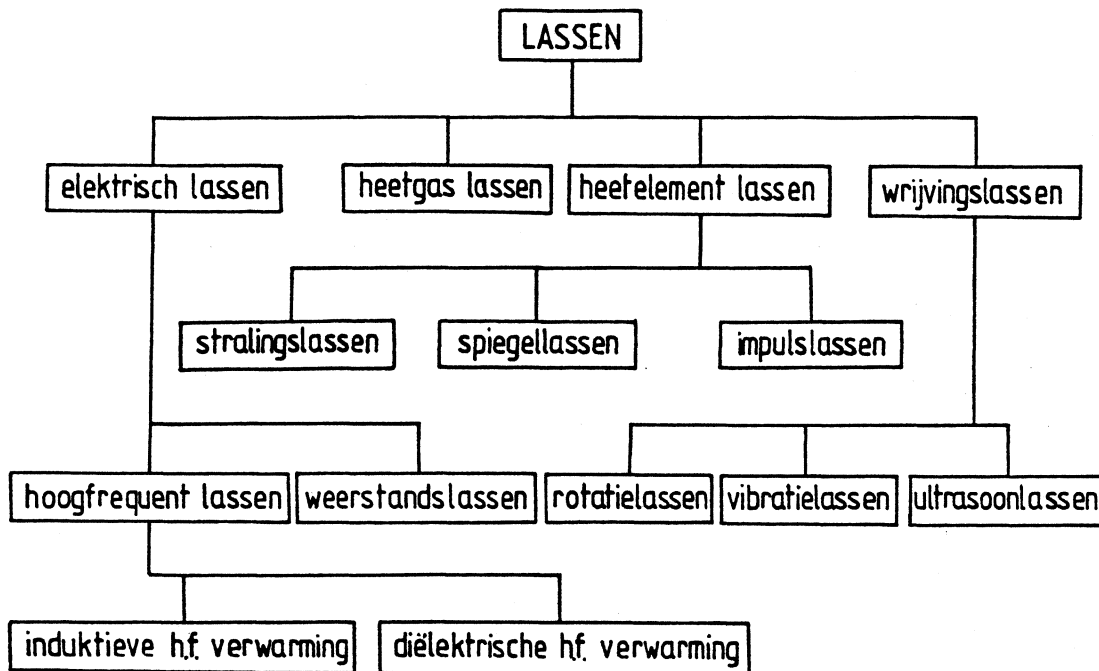
De belangrijkste lasmethoden zijn:

- elektrisch lassen
- heetgas-lassen
- heetelement-lassen (spiegellassen)
- wrijvingslassen

Voor een verdere indeling wordt verwezen naar figuur 7.21.

In de literatuur maakt men ook nog onderscheid in de verwerking van de halffabrikaten bij de naamgeving van het lassen, bijvoorbeeld:

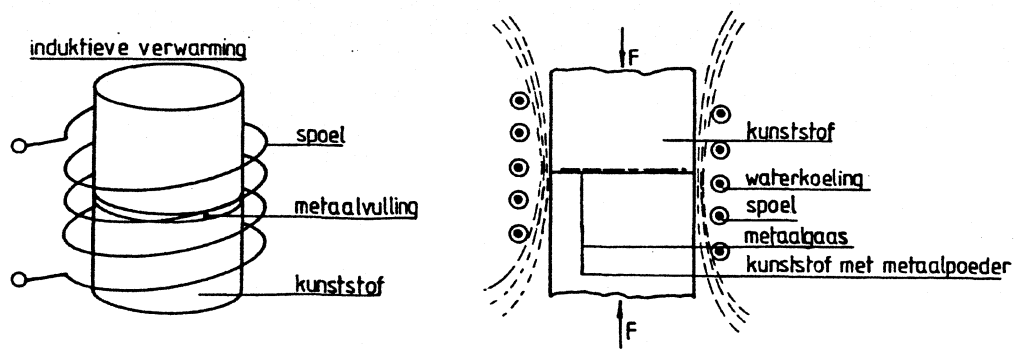
- pijplassen
- plaatlassen
- folielassen



figuur 7.21 Overzicht van diverse lasmethodes voor kunststoffen.

7.2.1 Elektrisch lassen

Bij verwarming van buitenaf wordt het oppervlak van een product sterker verwarmd dan de kern. Door de lage warmtegeleidingscoëfficiënt dringt de warmte langzaam door naar de laszone, tenzij men de laszone direct kan verwarmen. Men kan als warmtebron een elektrische wisselstroom toepassen met een hoge frequentie. Men spreekt wel van een koude verwarming, omdat bij hoogfrequente verwarming geen geleiding of straling nodig is voor de warmteoverdracht. De warmte wordt in het product opgewekt met behulp van hoogfrequente magnetische velden.

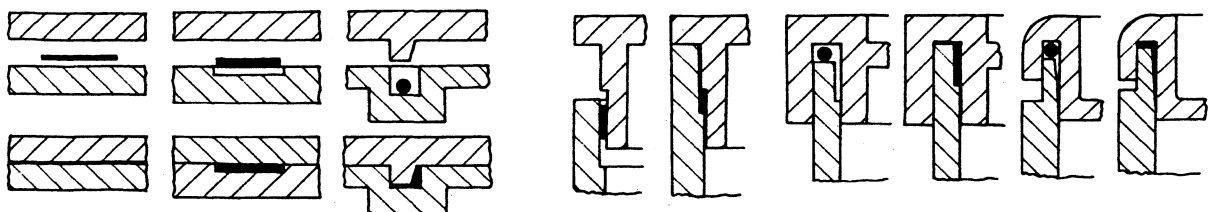


figuur 7.22 Elektrisch lassen.

Bij het verwarmen van de lasnaad met behulp van hoogfrequente wisselstromen moet onderscheid worden gemaakt tussen elektromagnetisch- of inductieve hoogfrequente verwarming en diëlektrische hoogfrequente verwarming of capacitieve verwarming.

Inductief of elektromagnetisch lassen

Voor het verhitten van elektrisch geleidende materialen maakt men gebruik van de inductieve methode, waarbij het product in een spoel van één of meer windingen wordt gebracht. Door de spoel gaat een elektrische wisselstroom met een frequentie van 4 tot 8 MHz. De in het product geïnduceerde wisselstroom is de oorzaak van de verwarming. Met deze methode kan men niet-geleidende materialen zoals kunststoffen niet verwarmen. Om dit probleem te vermijden brengt men in het lasvlak een stalen plaat of een stuk gaas aan. Het metaal wordt heet en de kunststof gaat smelten. Men kan ook in de las een preform aanbrengen uit dezelfde kunststof als de te lassen delen. Deze preform is gevuld met ijzeroxide. In figuur 7.23 zijn een aantal voorbeelden van het inductief- of elektromagnetisch lassen met preforms weergegeven.



figuur 7.23 Inductief- of elektromagnetisch lassen.

Met deze methode kan men alle thermoplasten aan dezelfde thermoplast lassen. In de hieronder geplaatste tabel zijn ook de combinaties van verschillende thermoplasten weergegeven die aan elkaar gelast kunnen worden.

	ABS	PMMA	PC	PPO	PS	SAN
ABS	•	•	•			•
PMMA	•	•	•		•	•
PC	•	•	•			•
PPO				•	•	
PS		•	•	•	•	•
SAN	•	•	•		•	•

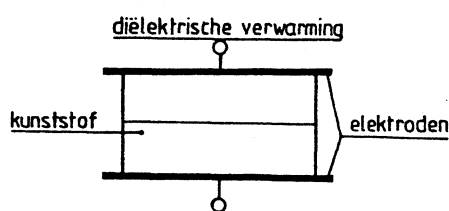
Als men twee verschillende materialen aan elkaar last moet men er rekening mee houden dat de sterkte van de las ten opzichte van de sterkte van het originele materiaal lager uitvalt dan bij het aan elkaar lassen van dezelfde materialen. Dit principe geldt voor alle lasmethoden.

Men kan voor het inductief lassen machines verkrijgen tot een vermogen van ongeveer 5kW. De dosering van de warmte, dus de tijd, temperatuur en de plaats, zijn goed te regelen. De opwarmtijd bedraagt ongeveer 0,1 sec.

Diëlektrische hoogfrequente verwarming

Voor het verwarmen van elektrisch niet-geleidende materialen moet men diëlektrische hoogfrequente verwarming of capacitieve verwarming toepassen.

De kunststof wordt bij deze methode tussen 2 metalen platen, de elektroden, verwarmd (figuur 7.24). Sluit men de aldus gevormde condensator aan op een wisselspanning met een zeer hoge frequentie dan kan in de kunststof een warmteontwikkeling plaatsvinden.



figuur 7.24 Diëlektrische verwarming.

De warmteontwikkeling of vermogen is:

$$p = 2 \cdot \pi \cdot E^2 \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \tan \delta$$

waarin:

- E = spanning in V
- f = frequentie in Hz
- ε = diëlektrische constante
- δ = verlieshoek in rad

De aangelegde spanning moet beneden de doorslagspanning van de kunststof blijven ± 20 kV/mm. De frequentie f is voor industriële apparaten wettelijk vastgelegd op 27,12 MHz.

De diëlektrische constante ε ligt voor de meeste thermoplasten tussen 2 en 4.

De thermoplasten kunnen alleen voldoende snel verwarmd worden als $\tan \delta > 0,01$.

De materialen die hieraan voldoen zijn PVC, PA en PMMA. Deze lasmethode wordt het meest voor het lassen van PVC folie toegepast.

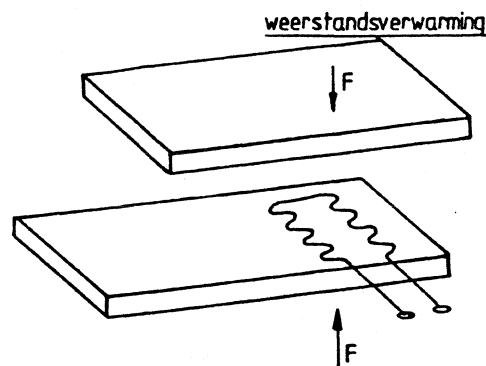
Voor het verwarmen van PVC folie binnen 1 tot 3 sec. is een vermogen van 25 - 60 W per cm^2 lasvlak nodig. Bij de huidige machines kan tot 2000 cm^2 lasvlak gelast worden.

De optimale dikte van de te lassen folie is 0,5 mm. Is de folie dunner, dan is minder warmte nodig om de folie te verwarmen maar de verliezen door geleiding naar de elektroden worden relatief groter. Er is dan een hogere spanning nodig om de verliezen te compenseren, de spanning wordt begrensd door de doorslagspanning. Is de folie dikker dan 0,5 mm dan neemt de opwarmtijd toe. Bij dikkere folie neemt ook de hoeveelheid plastisch materiaal toe dat bij

aandrukken weggeperst wordt; de maximale toe te laten dikte van de folie is 2 x 2 mm. Hoogfrequent capacitief lassen is één van de methodes om folie te lassen. In figuur 7.30 en figuur 7.31 zijn nog een aantal methoden weergegeven die een vrije materiaalkeuze toelaten.

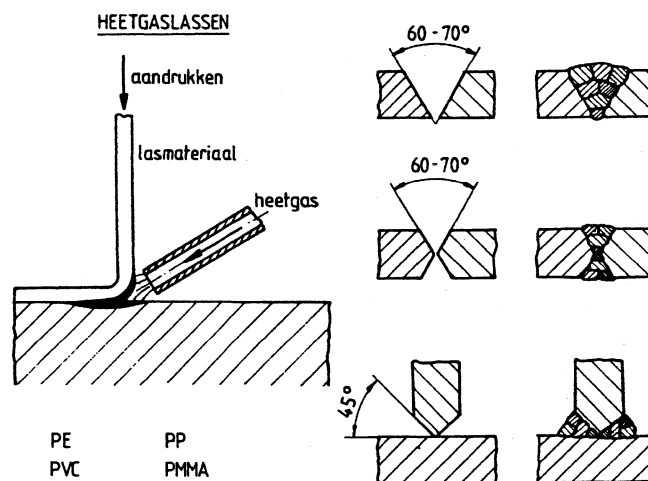
Weerstandslassen

Bij deze methode wordt op de lasnaad een weerstandsdraad aangebracht (figuur 7.25) met een dikte van 0,3 - 0,5 mm. Op de beide einden van de draad zet men een elektrische spanning van maximaal 42 V. Nadat voldoende warmte is toegevoerd wordt de las onder druk afgekoeld. De lasdraad blijft in het product achter.



figuur 7.25 Weerstandslassen.

7.2.2 Heetgas-lassen



figuur 7.26 Heetgas lassen.

Voor het lassen wordt een elektrisch laspistool gebruikt, dat lucht of een neutraal gas sterk verhit. Dit warme gas verhit op zijn beurt de lasdraad en het moedermateriaal. De te lassen onderdelen worden net als bij de metalen van te voren afgeschuind en men gebruikt lasdraad van hetzelfde materiaal als de onderdelen (figuur 7.26). Dit houdt in dat men alleen gelijksoortige materialen kan lassen. Men moet wel letten op oververhitting van zowel de lasdraad als het te lassen materiaal. In sommige gevallen kan men als gas lucht gebruiken bijvoorbeeld bij PVC. In andere gevallen moet men gas gebruiken dat niet oxiderend werkt,

zoals bijvoorbeeld stikstof. Stikstof wordt onder andere gebruikt bij het lassen van polyetheen en polypropreen, die erg oxidatiegevoelig zijn. Men kan met dit procédé vrij grote voorwerpen in elkaar lassen, zoals bijv. ventilatoren en buizen voor de chemische industrie. In de meest eenvoudige vorm wordt het lasapparaat en de lasstaaf met de hand bediend.

Voor seriewerk bestaat ook volledig gemechaniseerde lasapparatuur.

7.2.3 Heetelement-lassen

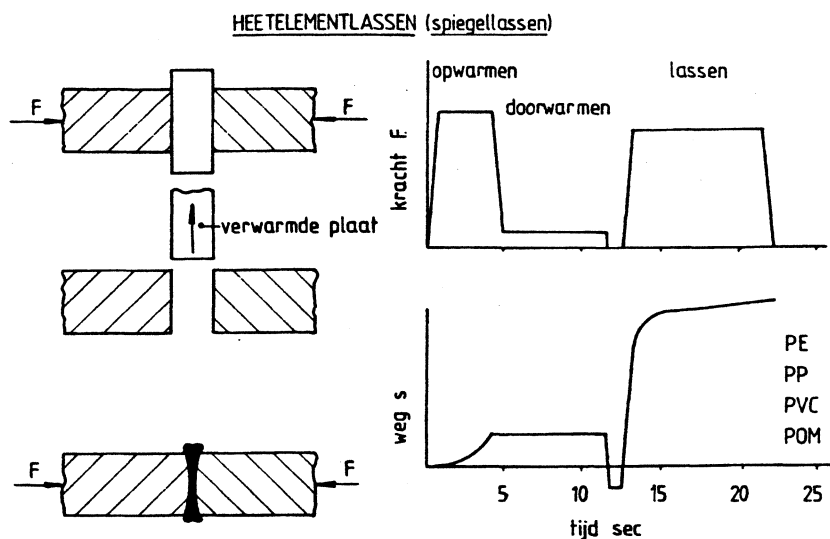
Bij heetelementlassen wordt de warmte via een metalen plaat, die op een constante temperatuur wordt gehouden, aan de lasnaad toegevoerd.

Men onderscheidt naar de aard van de warmtetoever drie verschillende methoden:

- het directe heetelementlassen of spiegellassen
- het indirecte heetelementlassen
- het stralingslassen

Spiegellassen

Het proces van het spiegellassen is in figuur 7.27 weergegeven. De lasvlakken worden tegen de spiegel gedrukt. Na een bepaalde opwarmtijd verwijdert men het element en de lasvlakken worden nu gedurende een bepaalde tijd tegen elkaar gedrukt.



figuur 7.27 Spiegellassen.

De belangrijkste lasparameters zijn:

- de temperatuur van de spiegel
- de druk bij het opwarmen
- de opwarmtijd
- de lasdruk
- de koeltijd

De cyclustijd is afhankelijk van het materiaal en van de dikte van de las, de tijd ligt tussen 20 en 200 sec.

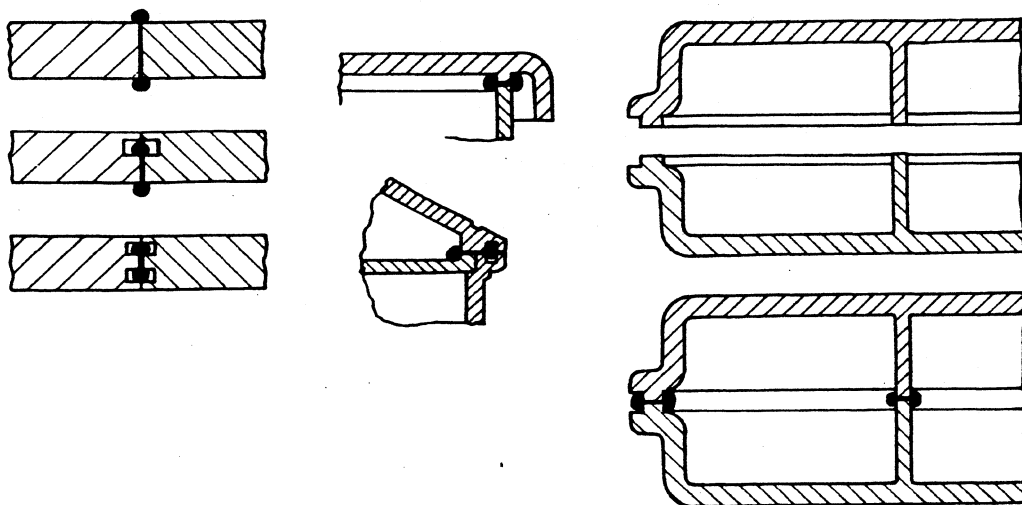
De voordelen van het spiegellassen zijn:

- de oneffenheden van de te lassen kanten worden weggesmolten
- de temperatuur van de las en de verwarmingstijd zijn nauwkeurig in te stellen
- de afmetingen van de te lassen onderdelen zijn bijna onbegrensd

Het spiegellassen werd in eerste instantie toegepast bij de niet verlijmbare polyolefinen. Nu kan men zeggen dat bijna alle thermoplasten op deze wijze gelast kunnen worden. De sterkte van de lasverbinding ligt tussen 0,6 en 0,9 van de sterkte van nietgelaste delen. Met deze methode kan men bijvoorbeeld ook PMMA aan ABS lassen. De sterkte van de lasverbinding is dan lager dan de boven aangehaalde waarden.

Het verwarmingselement maakt men bij temperaturen tot 300°C uit aluminium. Is de werkteemperatuur hoger dan kiest men aluminiumbrons.

De spiegel wordt bekleed met een laag PTFE of met glasvezel- versterkte PTFE-folie om het kleven van de kunststof aan de spiegel te voorkomen.

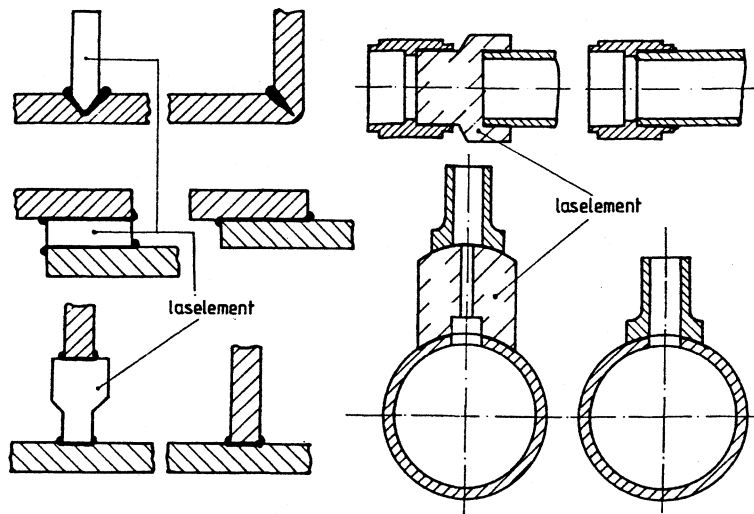


figuur 7.28 Het verbergen van bramen die ontstaan bij spiegellassen.

De lasnaad vertoont aan beide zijden een braam van weggedrukt gesmolten materiaal (figuur 7.28). Voor leidingen waar een kleine stromingsweerstand van belang is of bij producten die er netjes uit moeten zien, moet men constructieve maatregelen treffen om de braam weg te werken. We kunnen overstroomkamers aanbrengen. In figuur 7.28 zijn enkele constructieve methoden aangegeven. Men moet er wel rekening mee houden dat de sterkte van de lasnaad vermindert als men overstroomkamers toepast. We kunnen hier wat aan doen door de lasvlakken te verbreden of door de lasbraam af te dekken met een overstekende rand.

Met spiegellassen is het ook mogelijk drie onderdelen tegelijk aan elkaar te lassen.

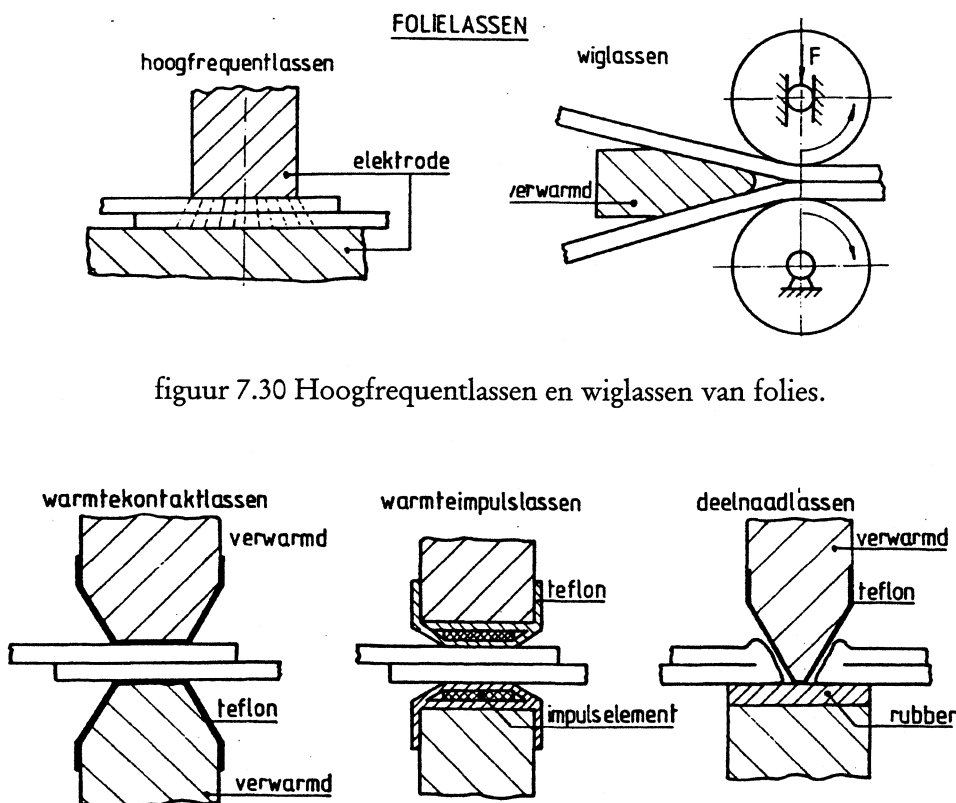
Met het spiegellassen of heetelementlassen kan men met aangepaste elementen een reeks montagewerkzaamheden uitvoeren aan onderdelen uit bijvoorbeeld de chemische industrie (figuur 7.29)



figuur 7.29 Voorbeelden van spiegellassen.

Indirect heetelementlassen

Bij het indirect heetelementlassen wordt de warmte door de kunststof naar het lasvlak gevoerd. Omdat de warmtegeleiding van kunststoffen laag is, past men deze methode alleen toe bij het lassen van folies. In figuur 7.31 is links het warmtecontactlassen weergegeven. De warmte wordt via een continu verwarmd stempel aan de kunststof afgegeven. Midden in figuur 7.31 is het warmte-impulslas schetsmatig weergegeven. De warmte wordt discontinu aan de kunststof afgegeven.



figuur 7.30 Hoogfrequentlassen en wiglassen van folies.

figuur 7.31 Links en midden: warmtecontact- en warmteimpulslas zijn vormen van indirect heetelementlassen. Rechts: deelnaadlassen is een vorm van spiegellassen.

Stralingslassen

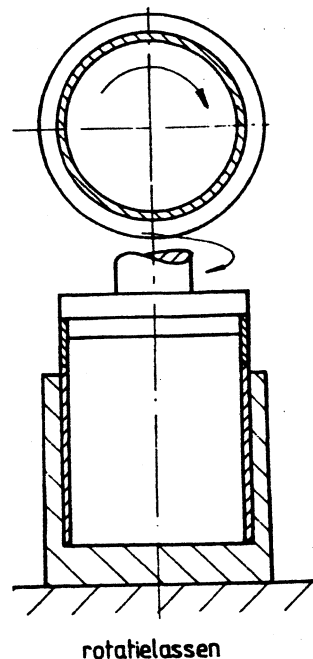
Het stralingslassen vindt plaats als de viscositeit van de lasnaad zo gering is dat de adhesie van de smelt op het spiegeloppervlak groter is dan de cohesie van de smelt. Voor de stralingsverwarming gebruikt men een spiegel van corrosievast staal of van een aluminium-bronslegering. De verwarming van de kunststof geschiedt door straling. Hierbij wordt de afstand van de spiegel tot het kunststof oppervlak tussen 0,5 en 1 mm gehouden. De temperatuur van de spiegel ligt rond 500°C. Bij stralingsverwarming vindt geen afvlakken plaats van oneffenheden. De materialen die met deze methode worden gelast zijn PA en Acryl-copolymeren.

7.2.4 Wrijvingslassen

Bij wrijvingslassen wordt mechanische energie omgezet in warmte. Omdat bij deze methode door de lage warmtegeleidingscoëfficiënt weinig warmte weglekt, kunnen korte cyclustijden bereikt worden. Deze liggen tussen 1 en 10 sec.

Tot de wrijvingslasmethode behoren:

- rotatielassen
- vibratielassen
- ultrasoonlassen



figuur 7.32 Rotatielassen.

Rotatielassen

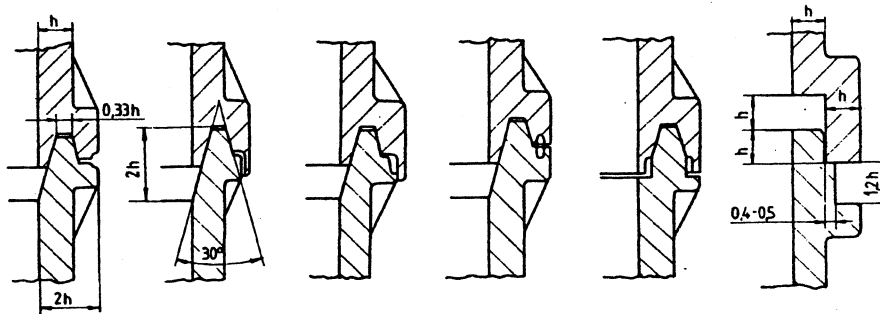
Deze lasmethode is alleen mogelijk voor ronde voorwerpen. De ene helft van het product wordt in een mal opgenomen, de andere helft wordt vastgezet in een draaibare meenemer (figuur 7.32). Drukt men het draaiende deel op het niet draaiende deel dan ontstaat op het scheidingsvlak de wrijvingswarmte die de laszone doet smelten. Door de rotatie te stoppen en na het aanbrengen van een druk komt de lasverbinding tot stand. De aandrijvende motor geeft zijn energie af aan een vliegwiel. De tijd die hiervoor nodig is, hangt af van de benodigde

arbeid. De omtreksnelheid van de laszone bedraagt ongeveer 10 tot 15 m/sec, het toerental kan oplopen tot 15000 omw/min.

De belangrijkste lasparameters zijn:

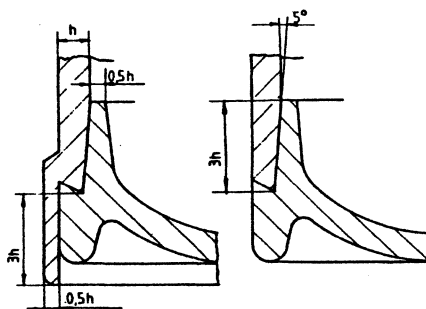
- toerental en omtreksnelheid
- energieopslag in het vliegwiel
- aandrukkracht na plastificering
- lastijd

Deze parameters zijn instelbaar bij de in de handel verkrijgbare machines.



figuur 7.33 Lasnaadconstructies voor rotatielassen.

In figuur 7.33 zijn een aantal lasnaadconstructies weergegeven. Ook hier moet men weer constructieve maatregelen treffen om de braam aan het zicht te onttrekken. In radiale richting zijn de constructies stijf gemaakt. Als dit niet mogelijk is moet de opvangmal zo uitgevoerd zijn dat tijdens het plastificeren van het materiaal de wand niet naar buiten kan buigen.



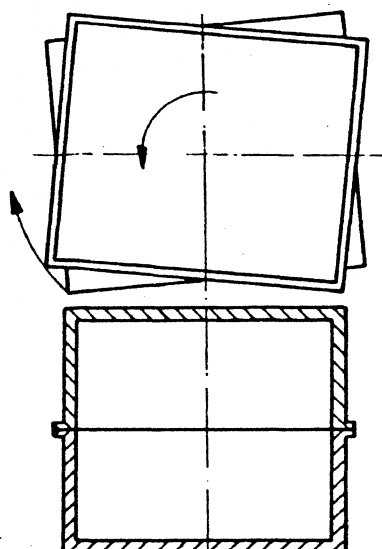
figuur 7.34 Bodem-pijp constructies voor rotatielassen.

In figuur 7.34 zijn constructieve uitvoeringen getekend van bodem-pijpconstructies. We moeten rekening houden met het feit dat, hoe dunner de wand is, des te sneller deze afkoelt na het lassen en des te hogere spanningen optreden in de lasnaad. Vooral bij amorfe materialen die minder snel relaxeren geeft dit verschijnsel een lagere lasnaadsterkte.

Vibratielassen

De beweging van de productonderdelen bestaat bij vibratielassen uit een intermitterende beweging. De lasmachines kan men indelen naar de aard van de beweging van de productdelen ten opzichte van elkaar;

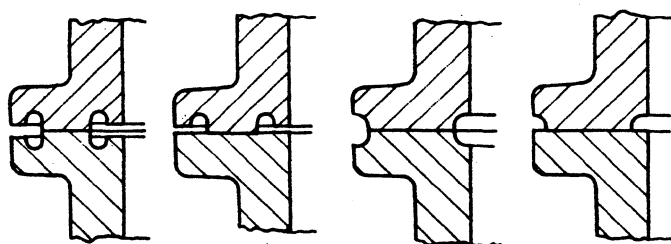
- intermitterende roterende beweging (figuur 7.35)
- intermitterende lineaire beweging



vibratielassen

figuur 7.35 Vibratielassen.

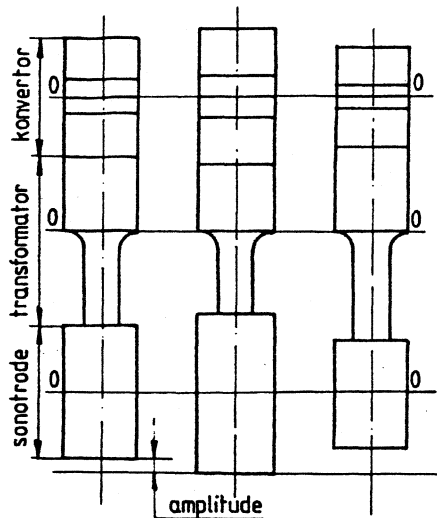
De heen en weergaande beweging wordt verkregen langs elektromagnetische weg of via een normale elektromotor. Bij de elektromagnetische aandrijving beweegt alleen het bovenste deel, het onderste deel van het product zit vast in een mal. Met een elektromotor kan men kiezen welk deel men wil laten bewegen; men kan ook beide delen laten bewegen. De machines zijn uitgerust met regelapparatuur waardoor op het moment van vastlassen de producten goed ten opzicht van elkaar gepositioneerd zijn. Met vibratielassen kunnen grote delen aan elkaar gelast worden, bijvoorbeeld bumpers van auto's. In figuur 7.36 zijn een aantal lasnaadconstructies weergegeven.



figuur 7.36 Lasnaadconstructies bij vibratielassen.

We moeten er rekening mee houden dat bij deze methode ook weer een hoeveelheid smelt uit de lasnaad gedrukt wordt. Producten die er behoorlijk uit moeten zien zal men van een opvangruimte dienen te voorzien waarin de overtollige smelt opgevangen wordt. Het lasvlak moet een bepaalde breedte hebben uit het oogpunt van sterkte. Bij dunne wanden leidt dit tot het aanbrengen van een kraag aan het product. Bij een messing-groef lasnaad moet de groef, die dwars op de bewegingsrichting staat, breder zijn dan twee maal de amplitude plus de dikte van de messing (figuur 7.37).

benodigde frequentie. De amplitude van de convertor bedraagt 10 nm en deze trilling is te klein om er effectief mee te kunnen lassen. Via een mechanische transformator wordt de amplitude vergroot. De energie wordt overgedragen aan een sonotrode, die soms ook nog een vergroting van de amplitude geeft. De werkzame lasamplitude bedraagt 30 nm en het vermogen ligt tussen 50 en 4000 Watt.

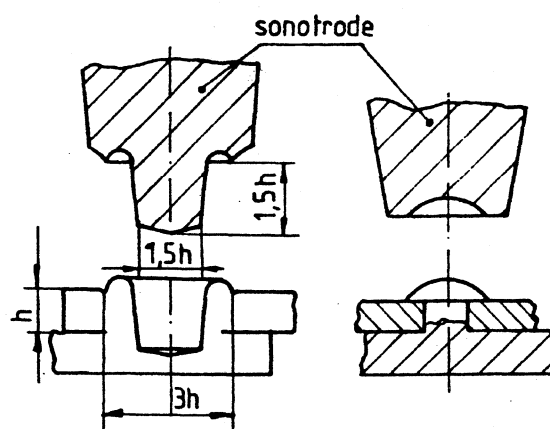


figuur 7.38 Ultrasoonlassen.

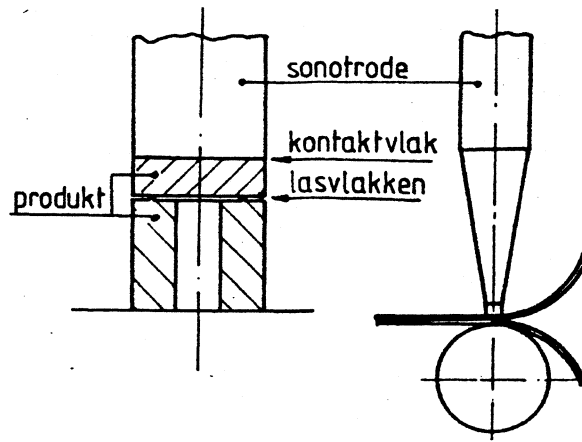
De functie van de sonotrode is:

- overdracht van de energie aan de kunststof
- overdracht van de aandrukkracht
- transformatie van de amplitude
- vormgeving aan het product

Bij klinken, felsen en puntlassen geeft de sonotrode de eindvorm aan het product (figuur 7.39).

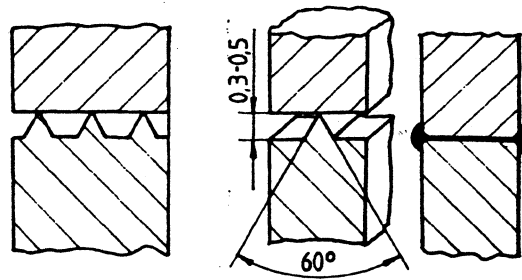


figuur 7.39 Sonotrode geeft de eindvorm aan het product.



figuur 7.40 Het product wordt ondersteund door een aambeeld (links) of door een opnamemal. Het arbeidsvlak van de mal of van het aambeeld moet geometrisch aan het productgedeelte worden aangepast (rechts).

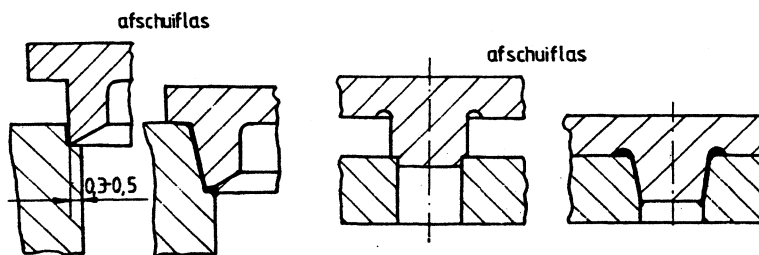
Als twee thermoplastische kunststof onderdelen op elkaar worden gelegd, zullen onder invloed van de ultrasonische trillingen en de druk de contactvlakken warm worden en plastificeren. Door gebruik te maken van energiegeleiders of energieverdichters is men er zeker van dat op die plaats de warmteontwikkeling groot is zodat het materiaal snel smelt.



figuur 7.41 Kegeltjes (links) en lasril (rechts) op het lasvlak.

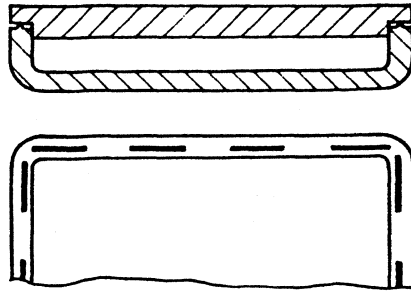
Het geleiden of concentreren van de energie kan op verschillende manieren gebeuren en wel:

- door het aanbrengen van kegeltjes op een van de lasvlakken (figuur 7.41 links)
- door een lasril (figuur 7.41 rechts)
- door contact op één zijde van het lasvlak (figuur 7.42) de zogenaamde schuiflas of afschuiflas



figuur 7.42 Schuiflas of afschuiflas.

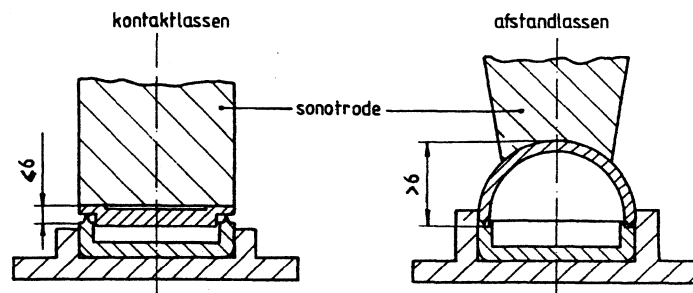
De beide laatste methoden worden het meeste toegepast. Past men een lasril toe dan hoeft men deze niet over de gehele lasnaad door te trekken, men past de lasril bij gedeelten toe (figuur 7.43). Men kan ook twee delen verbinden door de afschuiflas als een pen-gatverbinding uit te voeren (figuur 7.42 rechts).



figuur 7.43 Lasril in gedeelten over het lasoppervlak.

Bij het ultrasoonlassen onderscheiden we diverse lassoorten:

- contactlassen
- afstandlassen
- puntlassen
- naadlassen



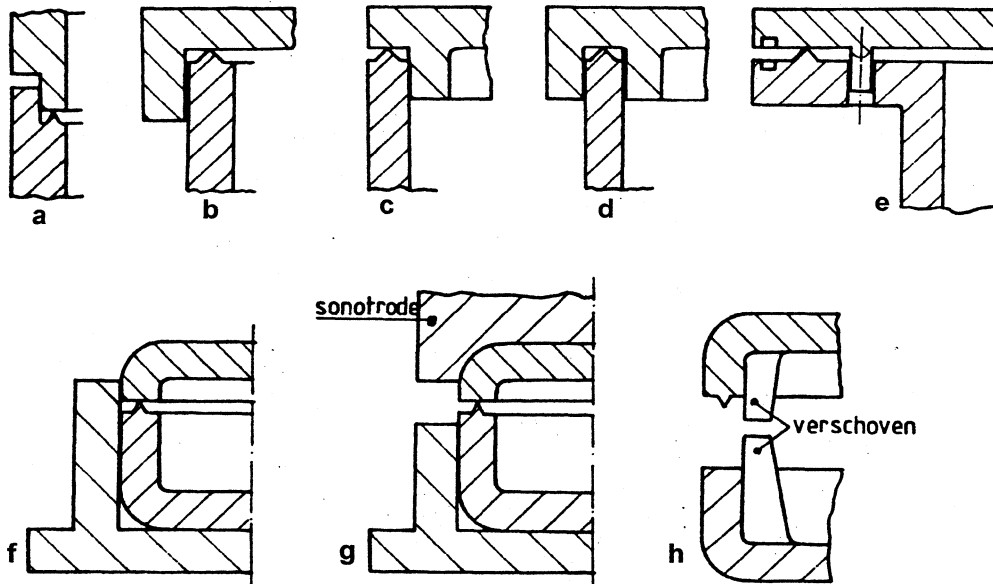
figuur 7.44 Contactlassen (links) en afstandlassen (rechts).

Bij contactlassen zit de sonotrode in de onmiddellijke nabijheid van de lasplaats (figuur 7.44). Bij afstandlassen is de lasplaats verder van de sonotrode verwijderd. Kunststoffen met een lage E-modulus en een hoge inwendige demping, kunnen niet of minder goed op afstand gelast worden. Bij het construeren moet men er rekening mee houden dat alleen een contactlas uitvoerbaar is. Tot de bovenbedoelde materialen behoren PE, PP, ABS, PA, CA en CAB.

Een puntlas wordt daar gebruikt waar vlakke delen zonder lasrillen met elkaar verbonden moeten worden, bijvoorbeeld vacuümgezogen of geëxtrudeerde producten. De puntige sonotrode laat men door het bovenste kunststof deel in het onderste deel dringen (figuur 7.39). Op de contactvlakken van die delen ontstaat een warmteontwikkeling en onder druk van de sonotrode last het materiaal aan elkaar.

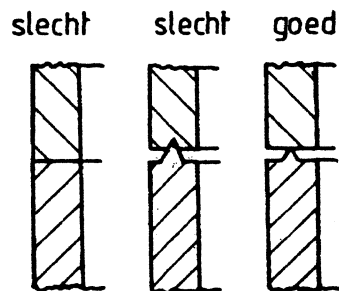
Het naadlassen kan alleen bij het lassen van foliën gebeuren; het lasproces is continu. Men gebruikt een aangepaste sonotrode en een eveneens aangepast aambeeld (figuur 7.40 rechts).

centreren voor het lassen



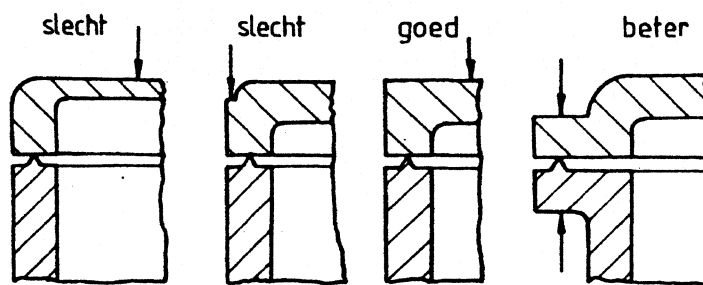
figuur 7.45 Centreren van de productdelen bij het ultrasoonlassen.

Bij het ultrasoonlassen moet het onderste en bovenste productdeel zodanig gecentreerd zijn dat ze bij het lassen hun positie behouden. In figuur 7.45 zijn een aantal oplossingen getekend. In f en g is de centrering alleen in de mal, of in de mal en in de sonotrode gelegd. Bij het ultrasoonlassen treedt ook weer vloeibaar materiaal uit de lasnaad. Bij de constructies van c, f, g en h is dit aan de buitenzijde zichtbaar. Als deze braam niet zichtbaar mag zijn, moet men kiezen uit de oplossingen van a, b, d en e.



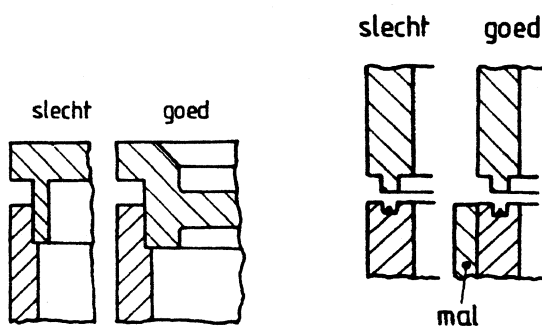
figuur 7.46 Contactvlak bij ultrasoonlassen.

Bij het ultrasoonlassen moet men een aantal regels in acht nemen om slechte lasverbindingen te vermijden. Men zal energiegeleiders toepassen om een constante lasverbinding over de gehele omtrek te verkrijgen (figuur 7.46 links en rechts). Laat men de lasril in een groef vallen (midden) dan kan ter plaatse weinig vervorming van de ril optreden. De las zal niet constant over de gehele omtrek aanwezig zijn. De sonotrode moet over voldoende groot en stijf oppervlak zijn energie overdragen.

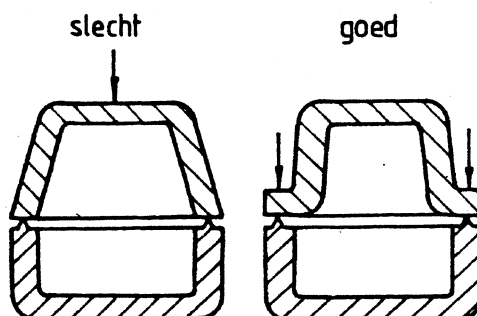


figuur 7.47 Positie van de sonotrode.

Als in figuur 7.47 A de sonotrode niet voldoende ver op de rand staat zal het dunne bovenvlak gaan klapperen. In B is het overdrachtsvlak te klein, er straalt onvoldoende energie door en de kans is groot dat het contactvlak met de sonotrode beschadigd wordt. In C en D zijn betere oplossingen weergegeven. In D vindt een directe energietoevoer plaats naar de lasril en over een voldoende groot vlak van de sonotrode. De onderste rand moet ook ondersteund worden.



figuur 7.48 Als de lasplaat (links) te dun is kan het vlak zijdelings gaan trillen. Hetzelfde verschijnsel treedt ook op in de constructie rechts. Door de dunne wand in een mal te steunen zullen er echter geen problemen ontstaan.



figuur 7.49 De tekening links geeft een afstandslas weer. Als het vlak van de sonotrode aan de kleine kant is, treden trillingen op in het bovenvlak, er ontstaat geen las of een slechte las. De oplossing van rechts is veel beter.

Vrijstaande ribben en nokken kunnen door het overdragen van ultrasone trillingen beschadigd worden. Het aanbrengen van radii aan hoeken, kanten en overgangen heeft een gunstig effect op deze trillingen. Ook het aanbrengen van een trillingsdempende laag in de mal, of korte lastijden toepassen, kan beschadigingen van nokken en ruggen voorkomen.

Een te hoog vochtgehalte van de kunststof heeft een negatieve invloed op de lasverbinding. Producten met een hoog vochtgehalte moeten voor het lassen gedroogd worden.

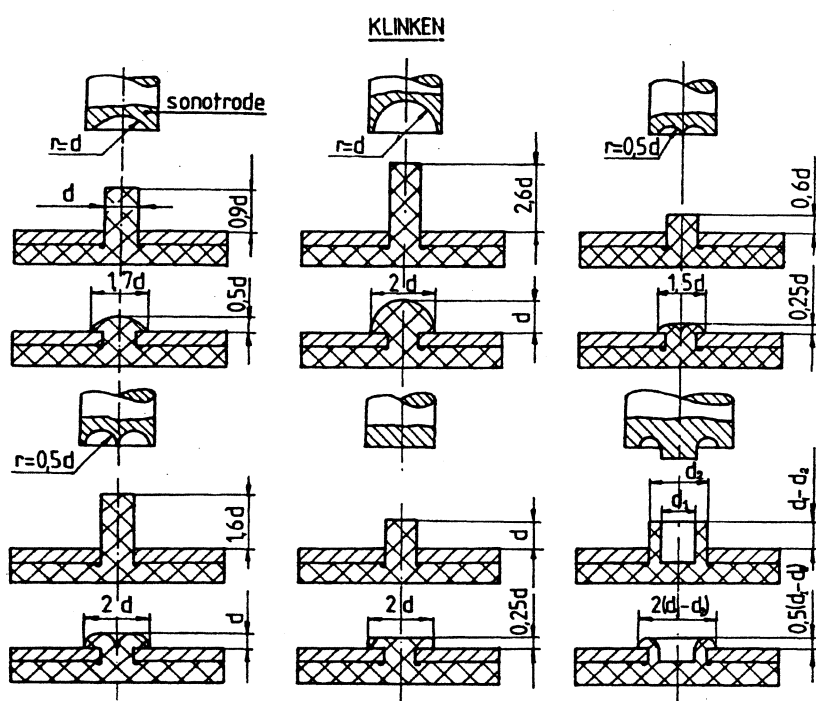
Bij polyamide wordt de verlangde taaheid verkregen door conditionering, dus door vochtopname. Dit conditioneren moet na het lassen gebeuren en niet er voor.

7.3 Diverse verbindingen

Hieronder worden een aantal verbindingstechnieken in het kort beschreven. Er wordt geen volledig overzicht gegeven van alle aanwezige technieken.

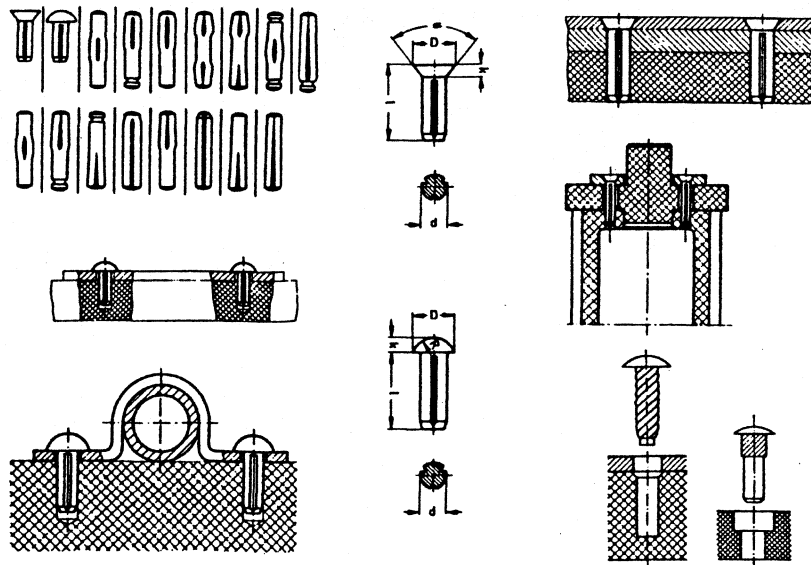
7.3.1 Klinken

Bij het klinken maakt men gebruik van geprofileerde sonotroden. De vorm van de kop is geheel aangepast aan de gewenste kop van de klinknagel (figuur 7.50). Het is ook mogelijk met een verwarmde stempel de steel in de juiste vorm te drukken. Men kan kunststof onderdelen ook met metalen klinknagels verbinden.



figuur 7.50 Klinken

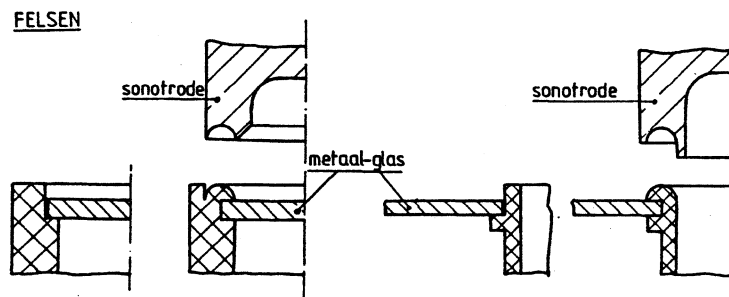
Bij het verbinden van kunststoffen, vooral bij thermohardende polyurethanen, worden ook wel kerfstiften of slagschroeven toegepast (figuur 7.51). De slagschroeven zijn van metaal, de kerfstiften kunnen van metaal of van kunststof zijn.



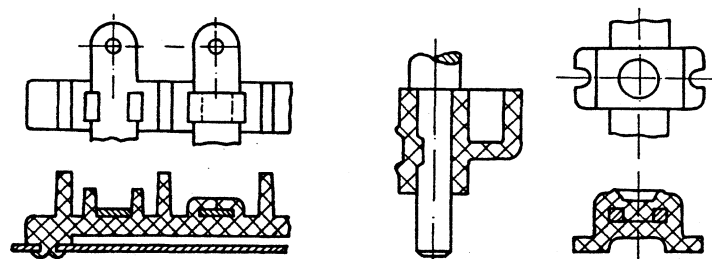
figuur 7.51 Kerfstiften en slagschroeven

7.3.2 Felsen

Met een ultrasoon lasapparaat kan men ook felsenverbindingen maken (figuur 7.52). Men kan kunststof onderdelen aan elkaar verbinden, maar men kan ook metaal, keramiek en glas aan kunststof verbinden. In figuur 7.53 zijn enkele bijzondere felsenverbindingen weergegeven.



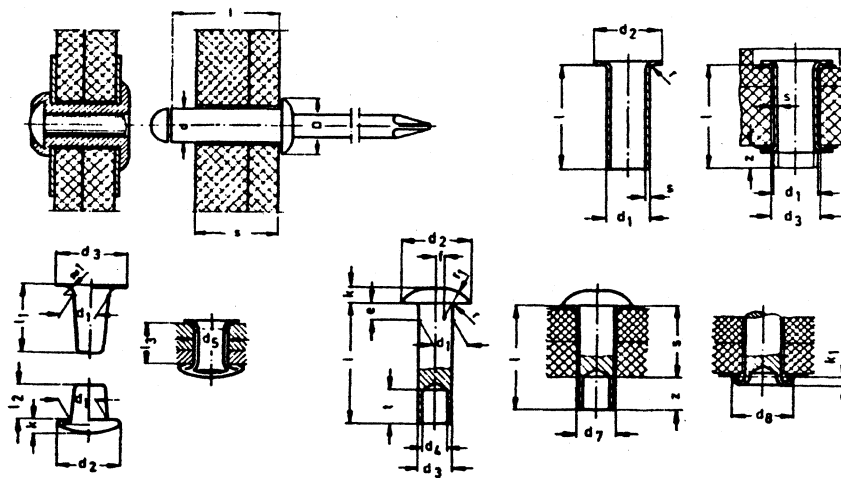
figuur 7.52 Felsen



figuur 7.53 Bijzondere felsenverbindingen

Felsenverbindingen kan men ook maken met een verwarmde stempel die de vorm hebben van de verbinding.

In thermohardende polyurethaan constructies past men felsverbindingen toe met metalen felsbussen of men felst met metalen treknagels (figuur 7.54).

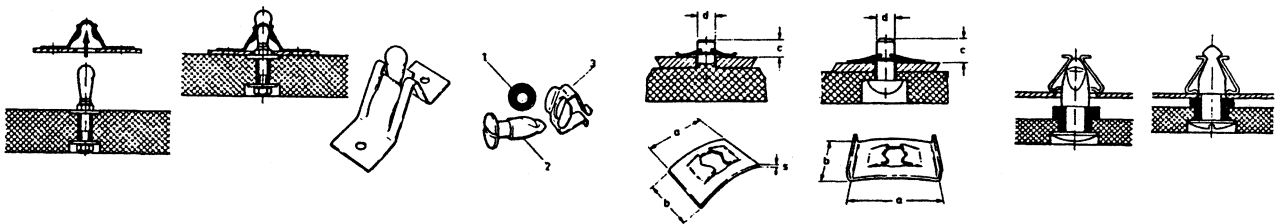


figuur 7.54 Felsbussen, treknagels

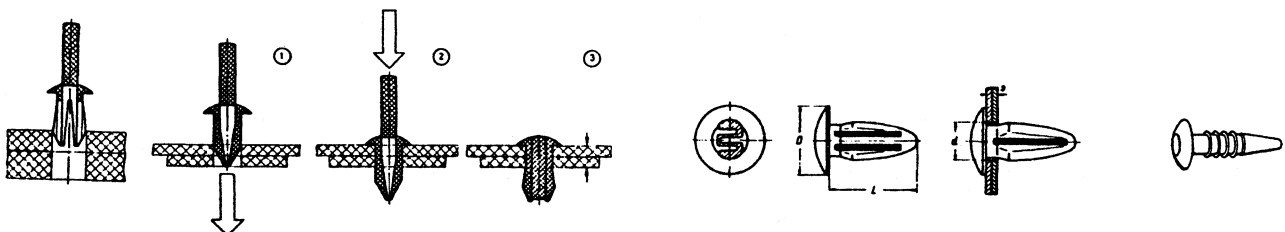
7.3.3 Niet integrale klikverbindingen

De klikhaak of klikvinger vormt hier geen deel van de kunststof constructie. Het verende element wordt afzonderlijk toegevoegd. Het kan van kunststof of van metaal zijn. In figuur 7.55 zijn een aantal metalen verbindingselementen weergegeven, in figuur 7.56 zijn een aantal kunststof verbindingselementen weergegeven. Deze onderdelen zijn in diverse vormen en afmetingen in de handel verkrijgbaar, het materiaal is meestal POM, maar soms zijn ze ook in PA verkrijgbaar.

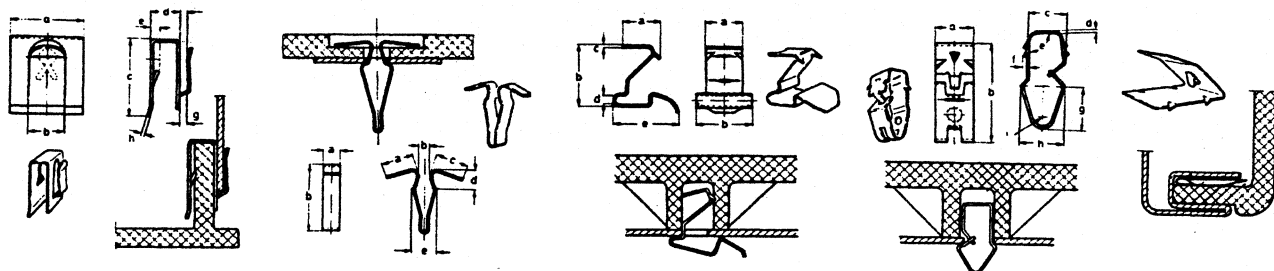
In figuur 7.57 zijn nog een aantal verbindingen met metalen veren te zien.



figuur 7.55 Metalen verbindingselementen



figuur 7.56 Kunststof verbindingselementen

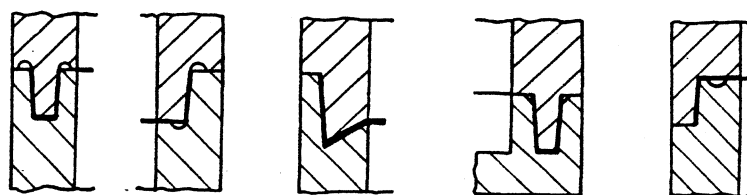


figuur 7.57 Verbindingen met metalen veren

7.3.4 Lijmen

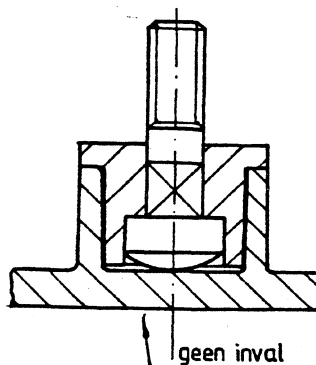
Het lijmen als verbindingstechniek is een zeer uitgebreid vakgebied. Hiervoor wordt ook verwezen naar het dictaat "lijmen" uit de reeks IO bijzondere onderwerpen.

Bij het aan elkaar lijmen van onderdelen met een wanddikte tot 4 a 5 mm moet de constructie zodanig uitgevoerd zijn dat de lijmverbinding op afschuiving belast wordt en niet op trek. Als aan de buitenzijde esthetische eisen worden gesteld, mag de overflow niet aan de buitenzijde zichtbaar zijn. Men moet de constructie zodanig maken dat de overtollige lijm naar binnen weggeperst wordt. Een constructieve oplossing wordt ook verkregen door in de wand overflow kamers te maken waarin de overtollige lijm wordt opgevangen (figuur 7.58). Als de lijm zorgvuldig wordt aangebracht, kan men vloeistof en luchtdichte constructies verkrijgen.



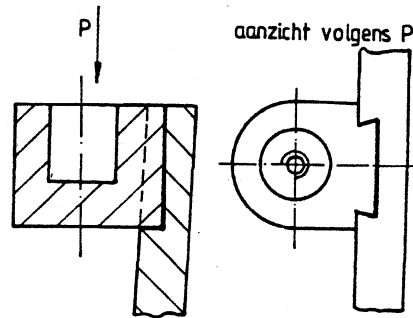
figuur 7.58 Lijmen, overtollige lijm wordt opgevangen in overflow kamers

Bij grote spuitgietproducten die niet automatisch gespuitsgiet kunnen worden, of waarbij aan de pers nog nabewerkingen worden verricht, kunnen ook onderdelen ingelijmd worden. In figuur 7.59 is een hoogbelaste metalen bout met behulp van een kunststof prop in een groot kunststof deel gelijmd. Een verbinding met zelftappers leverde problemen op omdat de nok groot moest worden en men last van inval kreeg.



figuur 7.59 Inlijmen van een bout met behulp van een kunststof prop.

Een andere constructie is weergegeven in figuur 7.60. Een kunststof dopje met een metalen insert wordt aan de binnenzijde van een bak gelijmd. De gereedschapskosten van de bak zijn nu veel lager, omdat de stempel van de matrijs geen schuif bevat.



figuur 7.60 Inlijmen van een kunststof bakje met metalen insert.

7.4 Literatuur

Schroefverbindingen

1. Klaus Kobusch
Gewinde einsetze, Fügen von Kunststoff-Formteilen,
VDI-Verlag GmbH Dusseldorf 1977
2. Threaded Fasteners for Plastics: The Precision Screw and MFG Company Ltd.
Longacres Willenhall. WV13 2JS Staffs. England
3. Geyer Gemmer Strelow
Qualitätsformteile aus thermoplastischen Kunststoffen
VDI Verlag Düsseldorf 1974
4. Klepek Georg
Konstruieren mit PUR-Integral-Hartschaumstoff
Carl Hanser Verlag München Wien 1980.
5. VDI Richtlinien VDI 2001
Gestaltung von Pressteilen aus hartbaren Kunststoffen
6. VDI Richtlinien VDI 2006
Gestaltung von Spritzgussteilen aus thermoplastischen Kunststoffen
7. VDI Richtlinien VDI 2012
Gestaltung von Werkstücken aus GFK
8. Hans Joachim Burger
Verbindungen mit gewindeschneidenden und -pral schrauben Fügen von
Kunststoff-Formteilen VDI Verlag Dusseldorf 1977
9. Gerhard J.E. Strickle
Machinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen, Grundlagen und
Verbindungselemente
VDI Verlag Düsseldorf 1974

-
10. Lincoln Gomes Braden
Mechanical Fastening of Plastics
Marcel Dekker Inc. New York and Basel 1984
 11. Onasch
Zum verschrauben von Bauteilen aus Polymerwerkstoffen mit Gewindeformenden
Metallschrauben
Institut für Werkstofftechnik Universität Kass Diss. 1982.
 12. Grossberndt
Directschraubverbindungen an thermoplastischen Kunststoffe 73 (1983) 11 S. 701
 13. Grossberndt Ociepka
Selbstformende Schrauben für Thermoplaste-Gewinde Profile und Auslegen der
Einschraubtuben Kunststoffe 69 (1979)6 5.344.
 14. Reiss
Berechnung der Belastbarkeit von gewindeprägenden Schrauben in Kunststoff formteile
Plastverarbeiter 30 (1979) nr. 5 S.251
 15. Borstlap BV
Fabory Masters in Fasteners.
Zevenheuvelenweg 44. Postbus 5034 5004 EA TILBURG
 16. Arnold Knipping GmbH
Schrauben fabriken D527 Gammersbach Postf. 1529

Lasverbindungen

17. Ronald D. Beck
Plastic product design
Van Nostrand Reinhold Company
18. Thermoplastische kunststoffen
Voorlichtingsbladen voor de metaalindustrie VM 13 FME 1968 968
Heetelementlassen VM 38 FME 1979 979
Wrijvingslassen van kunststoffen VM 27 FME 1974 974
19. Branson
Ultraschall für das Kunststoff-Fügen
20. Branson
Schallkraft GmbH 6056 Heusenstamm
21. Mecasonic
Application of ultrasonics to thermoplastic material
Mecasonic SA 74100 ANNEMASSE:
22. Fügen von Kunststoff-Formteilen
VDI-Verlag GmbH Düsseldorf
23. Plastic products design handbook, part A and B
Edited by Edward Miller
Marcel Dekker Inc. New York and Basel

-
24. Schwartz and Goodman
Plastics Materials and Processes
Fastening and Joining Techniques p. 757
Van Nostrand Reinhold Company
 25. ZVEI
Fügen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen
Kunststoffen mit Ultraschall
Fachverband Elektroschweissgeräte Frankfurt/M
 26. Pieschel D.
Heizelement schweissen von Formteilen
Diss RWTH Aachen 1975
 27. Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten
Merkblatt DVS 2205 (1974)
Deutscher Verband für Schweißtechnik e.v.
 28. Voorlichtingsbrochures van diverse firma's:
AKZO, General Electric, Bayer, Basf, Dupont, Staatsmijnen, Hoechst, Borg Warner
 29. Rationelles Verschweissen von Kunststoffen
Branson Schallkraft GmbH 6056 Heusenstamm
 30. Electromagnetic Welding
Emabond Inc. Norwood N.J.
Engineering Plastics
PFM Sanders 4631 NV Hoogerheide
 31. F. Tschech
Warmkontaktschweißverfahren für Kunststoffe
Kunststoffe 74 (1984) 4 S 213
 32. H. Vowinkel
Heizelement-Warmgas und Extrusionsschweiß
Kunststoffe 71 (1981) 10 S 753
 33. H. Thews
Reibschweissen
Kunststoffe 71 (1981) 10 S 764
 34. Abel und Beck
Ultraschall- und Hochfrequenzschweissen
Kunststoffe 71 (1981) 10 S 758
 35. Ochs
Rationeller Schweißen mit Ultraschall- Sondermaschinen
Plastverarbeiter 34 (1983) 9 S 795
 36. Campbell
Joining plastics with fusion bonding
Machine Design Oct 9 1980 p. 186

Diverse verbindingen

37. Branson
Ultraschall für das Kunststoff-Fügen
Branson Schallkraft GmbH
6056 Heusenstamm
38. Mecasonic
Application of ultrasonics to thermoplastic materials
Mecasonic SA 74100 ANNEMASSE
39. Fügen von Kunststoff-Formteilen
VDI Verlag GmbH Düsseldorf 1977
40. Erhard/Strickle
Maschinenelemente aus thermoplastischen Kunststoffen
VDI Verlag GmbH Düsseldorf 1974
41. Schwartz/Goodman
Plastics materials and processes
Fastening and Joining Techniques p. 757
Van Nostrand Reinhold Company
42. Klepek, Georg
Construieren mit PUR-Integral-Hartschaumstoff
Carl Hanser Verlag München, Wien 1980
43. Skiest I
Handbook of adhesives 2^e ed.
van Nostrand Reinhold Company 1977 New York
44. Lijmconstructies VM 32 VM 40 en VM 41
FME publicatie
45. J Shields
Adhesives handbook
Butterworths London 1976

Bijlage A Checklist materiaalkeuze kunststof product

1. Benaming en functie

2. Productieaantallen

- totaalserie
- jaarserie
- bestelserie

3. Verwerkingstechniek

- centrifugaal gieten
- extruderen
- rotatiegieten
- vacuümvormen
- spuitgieten
- dieptrekken
- warmpersen
- blazen
- koudpersen
- verspanend bewerken
- kalanderen
- andere verwerkingstechniek

4. Nabewerking en montage

- klikverbindingen
- lassen (welke methode?)
- felsen
- inpersen van metalen
- klinken
- lijmen
- draadvormende of -snijdende zelftappers

5. Esthetische eisen

- glashelder
- galvaniseren
- gekleurd doorzichtig
- opdampen
- lichte kleur
- bedrukken (welke methode?)
- glanzend
- lakken
 - mat

-
- hoogglanzend
 - glanzend
 - rimpel
 - hamerslag

6. Bestand tegen:

- welke chemische stoffen
- weersinvloeden (licht UV stralen)
- ioniserende stralen
- organismen
 - micro (schimmels, bacteriën)
 - macro (insecten, planten, knaagdieren)
- levensmiddelen en medicijnen
- (Aan welke voorschriften moet het materiaal voldoen)

7. Brandbaarheid

- Aan welke voorschriften moet het product voldoen
- Aan welke brandbaarheidseisen moet het materiaal voldoen

8. Fysische eisen

- Soortelijke massa
- Vochtopname welke klimaattest?
- Gas- en dampdoorlaatbaarheid
- Optische eisen
 - lichtdoorlaatbaarheid
 - brekingsindex

9. Thermische eisen

- soortelijke warmte
- warmtegeleidingscoëfficiënt
- lineaire uitzettingscoëfficiënt
- maximale gebruikstemperatuur (kortstondig en continu)
- minimale gebruikstemperatuur (continu)
- maximale en minimale temperatuur bij transport en opslag
- vormbestandheid volgens NEN, DIN of ISO
- welke testen zijn voorgeschreven volgens normen ?

10. Elektrische eisen

- Voor hoogfrequent apparatuur en hoogspanningsisolatie
 - diëlektrische verliesfactor $\tan\delta$
 - diëlektrische constante
- Voor elektronica en laagspanningsapparatuur
 - isolatieweerstand
 - oppervlakteweerstand
- Voor hoogspanningsapparatuur
 - doorslagspanning
 - kruipstroomsterkte

11. Tribologische eisen

- glij-element van
- loopt tegen element van
- glij-snelheid
- aandrukkracht
- smering / geen smering
- temperatuur

12. Maat en vormtoleranties

- Kritische functionele maten
- vlakheid
- slingering

13. Mechanische eisen

- Toelaatbare vervorming
 - lengteverandering
 - doorbuiging
 - hoekverdraaiing
 - vormverandering
- Soort belasting
 - trek
 - druk
 - buiging
 - torsie
- Type belasting
 - statische belasting
 - wisselende belasting
 - stootbelasting
- Duur van de belasting
 - korte duur
 - lange duur (kruip, relaxatie)
- Spanningstoestand
 - eenassig
 - meerassig
- Aan welke testen moet het product voldoen.

14. Milieueisen

Tabel 1 Stoffen uit de Europese zwarte lijst

Antraceen	arseen	asbest
Benzeen	beryllium	cadmium
Kwik	naphtaleen	PCB's
PCT's	tolueen	vinylchloride
Xylenen	ethyleenglycol-ethers	
epichloorhydrine	halogeenkoolwaterstoffen	

Tabel 2 Stoffen uit de Europese grijze lijst

acrylonitril	chrom (hexavalente compounds)	
cyanides	dioxines	formaldehyde
hydrazine	lood	metaalcarbonyl
methylbromide	seleen	telluur
polychlorodibenzofuranen	thallium	
aromatische polycyclische koolwaterstoffen		

NB. In sommige Europese landen wordt deze stoffenlijst ook als zwarte lijst behandeld.

- Bevat het product stoffen uit de Europese zwarte lijst in Tabel 1?
- Bevat het product stoffen uit de Europese grijze lijst in Tabel 2?
- Bevat het product radioactieve elementen?
- Bestaat er tijdens het gebruik van het product kans op gasontwikkeling?
- Geeft het product ultraviolette straling af?
- Kunnen er bij vernietiging van het product gevaarlijke reacties ontstaan? (bijvoorbeeld met lucht of met vocht)
- Bevat het product chemische stoffen waardoor in het afvalstadium schade aan het milieu kan worden toegebracht, bijvoorbeeld door uitloggen naar grondwater op vuilstorthopen, emissie als rook of gas bij vuilverbranding, of bij verwerking in afvalproducten als "waste derived fuel" of compost?

Als op één van de bovenstaande vragen bevestigend geantwoord wordt dient contact opgenomen te worden met een milieudeskundige of met de materiaalleverancier. Als de keuze strijdig is met de wet dient een ander materiaal gekozen te worden.

Bijlage B Checklist keuze verwerkingstechnologie

Productie-aantallen

- Totale productieserie
- Jaarserie
- Bestelserie

Geometrie

- Afmetingen van het product
- Nauwkeurigheid (toleranties)
- Minimum bereikbare wanddikte
- Maximum bereikbare wanddikte
- Worden aan beide zijden eisen gesteld?
- Oppervlakte kwaliteit (glad, glanzend, mat, textuur, lakbaar en bedrukbaar)
- Vormvrijheid
- Materiaalkeuzevrijheid
- Vormnauwkeurigheid
- Reproduceerbaarheid
- Lossingshoeken
- Inserts toepasbaar

Kosten

- Materiaalkosten in verband met de seriegrootte
- Loon- Machinekosten
- Gereedschapskosten
- Wijzigingskosten
- Orderkosten
- Levertijd eerste producten
- Minimale bestelserie
- Flexibiliteit met betrekking tot wijzigingen
- Aanbod mogelijke leveranciers
- Afstand tot leveranciers