



Delft University of Technology

Proefstuderen Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft

Zandbergen, B.T.C.; Kouwe, E.M.; Melkert, J.A.; Bergsma, O.K.

Publication date

2001

Document Version

Final published version

Citation (APA)

Zandbergen, B. T. C., Kouwe, E. M., Melkert, J. A., & Bergsma, O. K. (2001). *Proefstuderen Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek, TU Delft*. Delft University of Technology.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

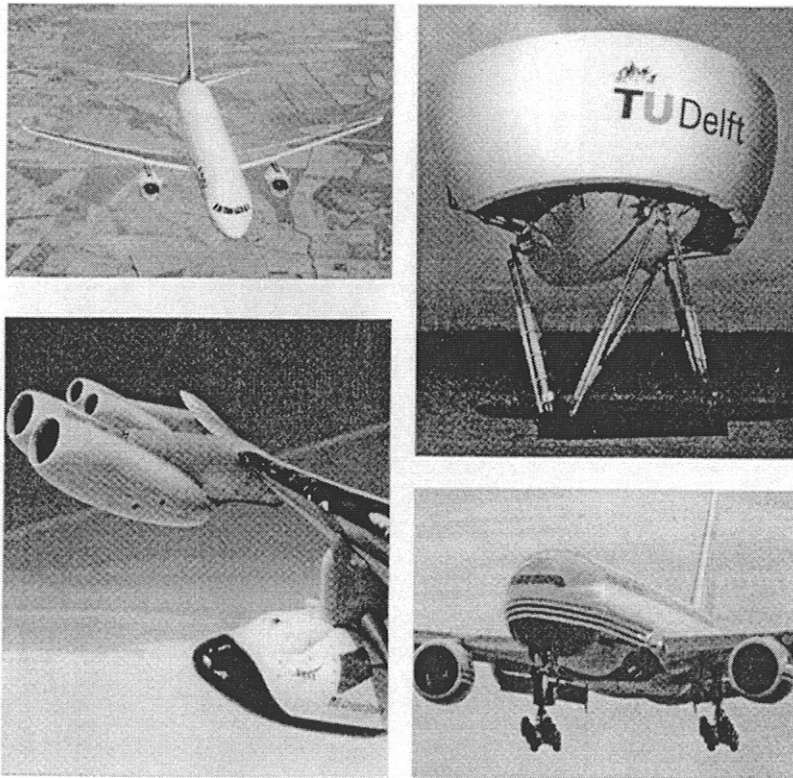
Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*This work is downloaded from Delft University of Technology.
For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to a maximum of 10.*

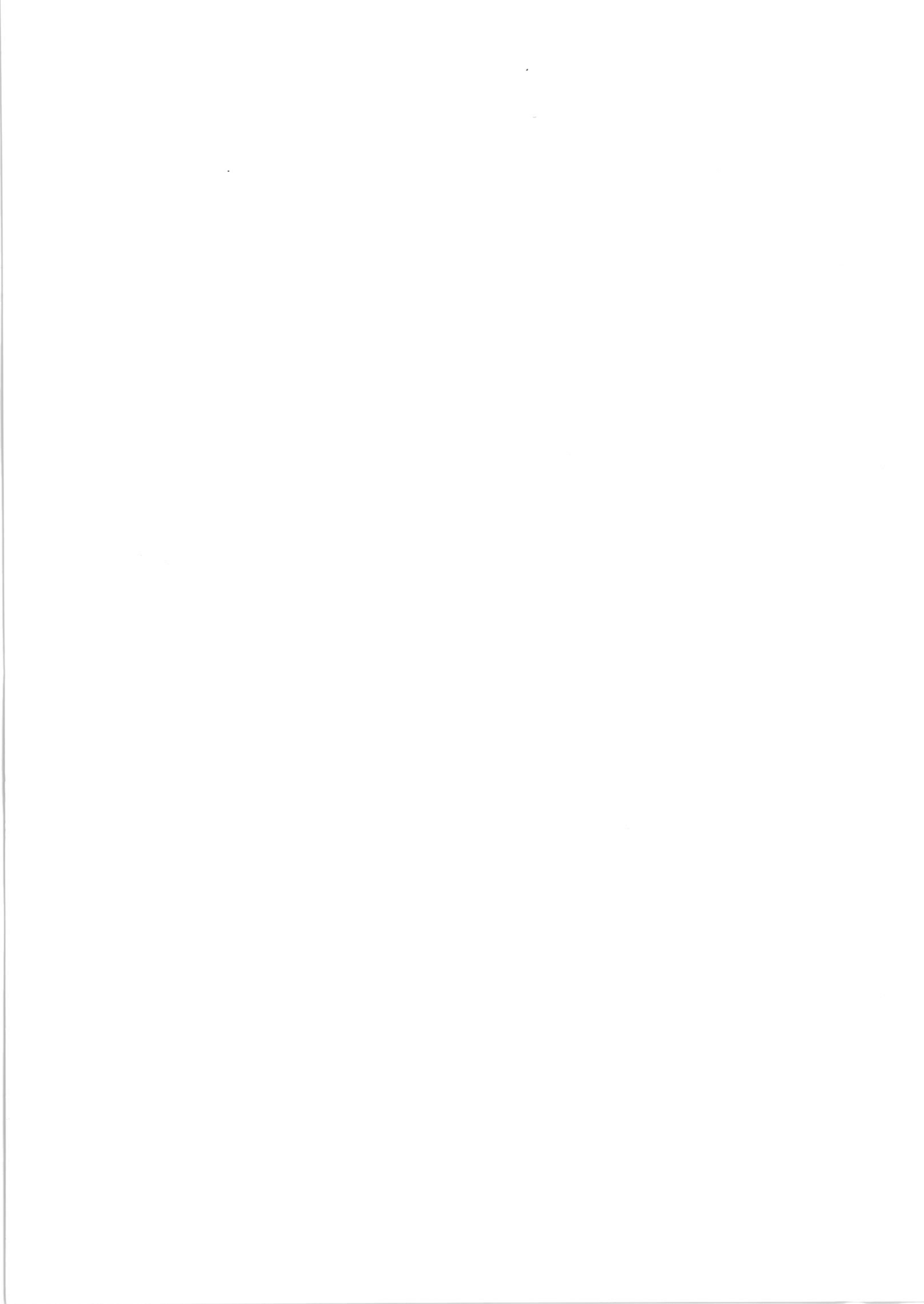


Proefstuderen februari 2001

Faculteit Luchtvaart- en Ruimtevaarttechniek

Technische Universiteit Delft

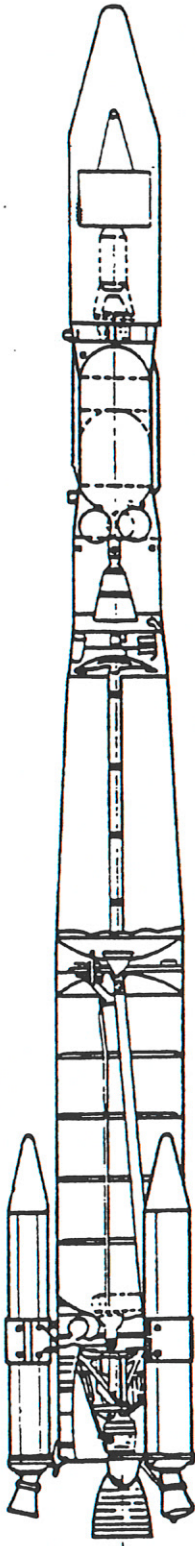




Deel I

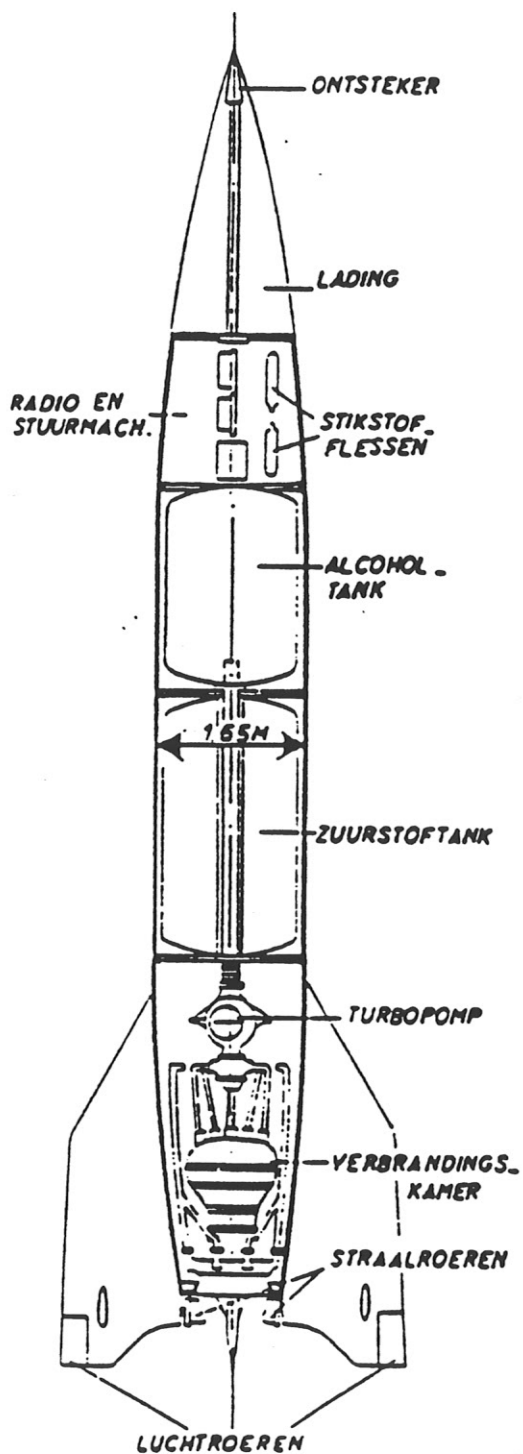
Raketconstructie

ir. E.M. Kouwe

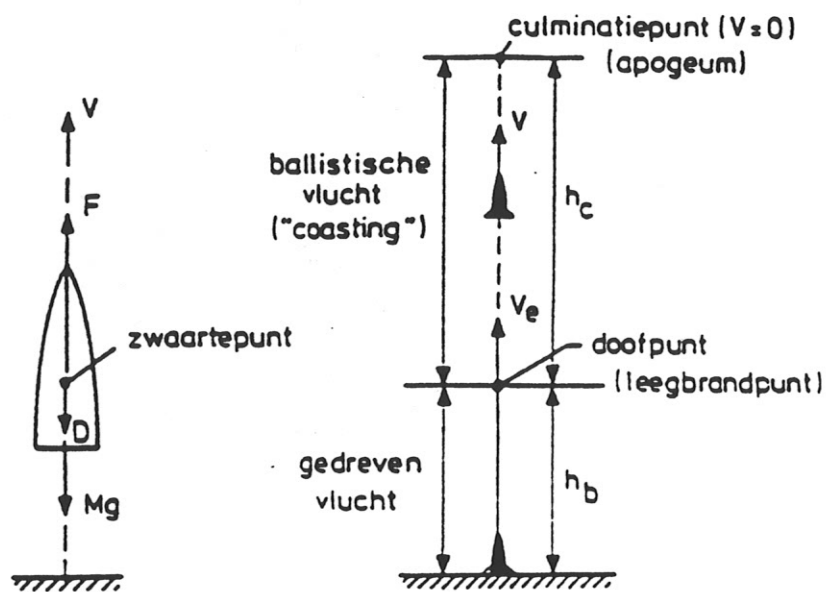


RAKET- CONSTRUCTIE

College behorende bij
Proefstuderen 1 februari 2001
Ir. E.M. Kouwe

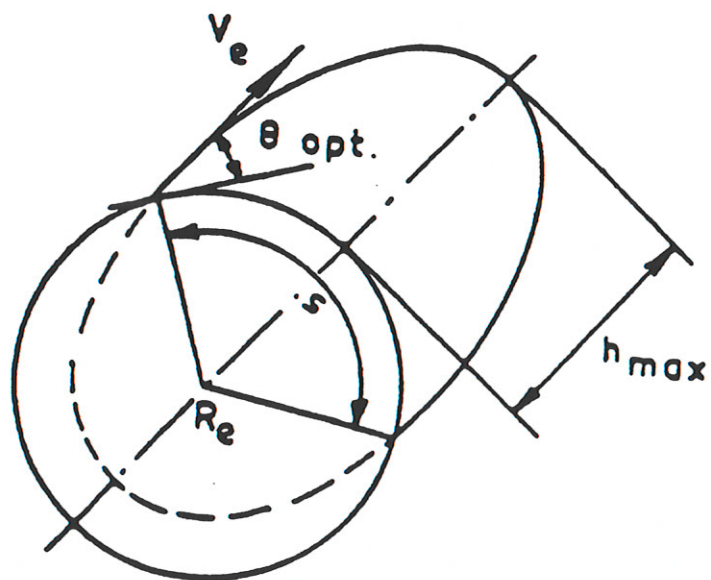


Raket V-2 (-1940)



Verticale vlucht van de raket.

DE BAAN VAN EEN INTERCONTINENTALE BALLISTISCHE RAKET



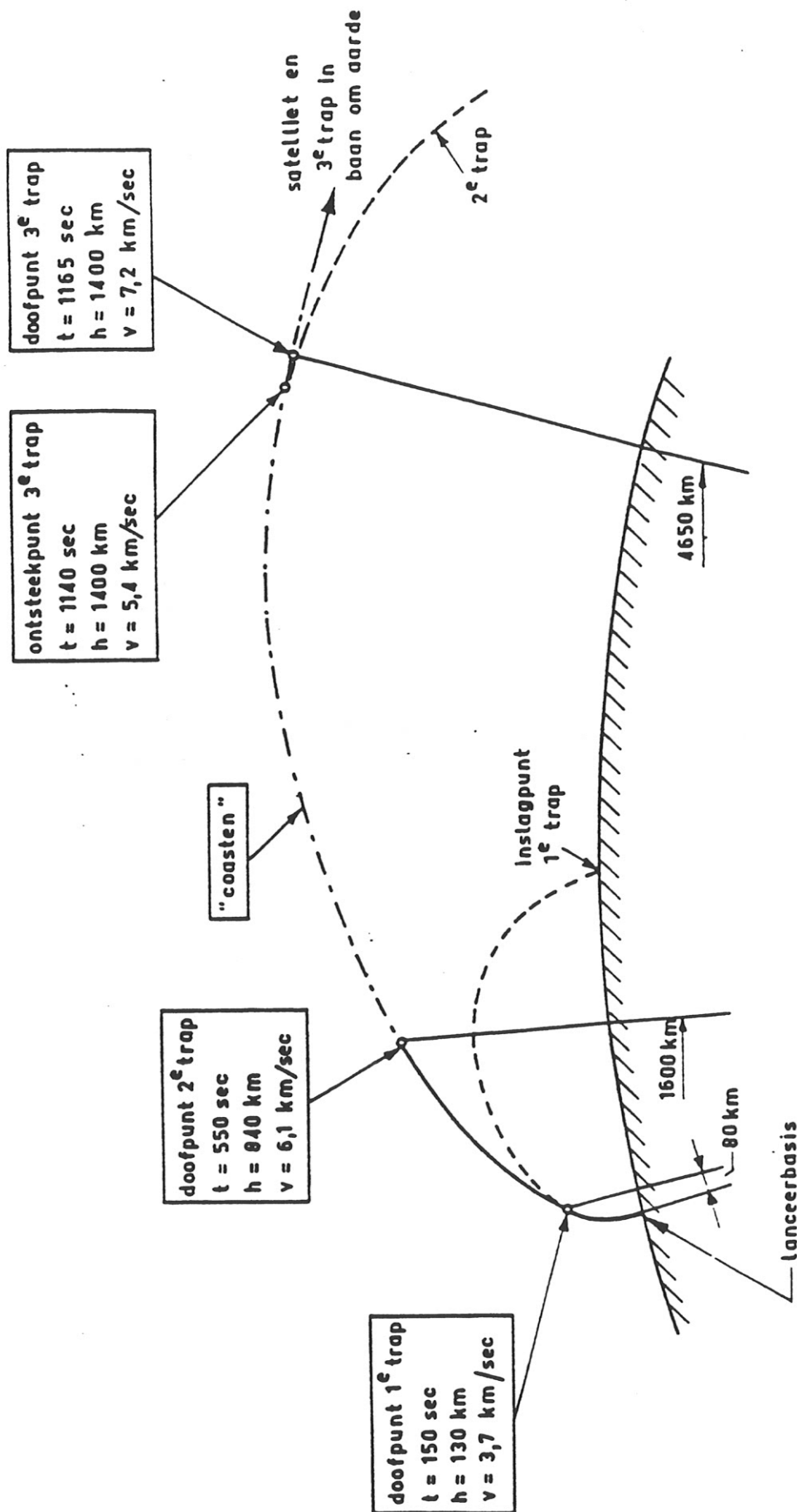


Fig. 6 : Lancering van een satelliet

Sondeerraket 'Véronique'

nuttige last (instrumenten)	59 kg	4,4 %
constructie (metaal)	207 kg	15,6 %
stuwstof	<u>1064 kg</u>	80,0 %
Totaal	1330 kg	

Stuwkracht 39 142 N

Maximale versnelling _____ m/s²

Beweging in:	vacuüm	atmosfeer
snelheid in doofpunt	2,42 km/s	1,88 km/s
hoogte in doofpunt	41,1 km	35 km
hoogte in culminatiepunt	340 km	219 km

Table Order of magnitude of the drag parameter and the thrust-to-weight ratio for some typical launch vehicles and sounding rockets

	K (m^2/MN)	ψ_0
Launch Vehicles:		
Saturn V	0.3	1.2
Titan IID/SLV 5D	1.5	2
Delta	4	1.5
Scout D	5	2.5
L III S	6	1.2
Sounding Rockets:		
Astrobee	10	5
Black Brant 5A	13	13
Agate	18	7
Nike-Cajun	21	33
Skua I	23	32

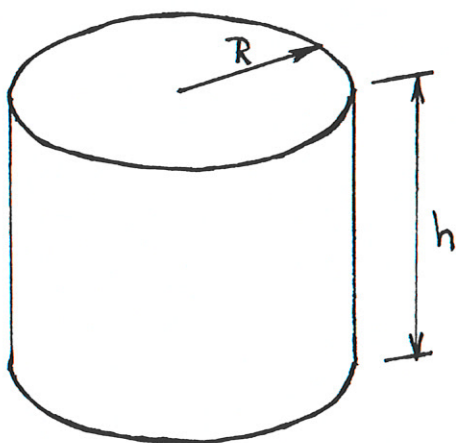
BEPALING VORM VAN DE RAKET

Minimaliseer $W_{\text{eight}} + D_{\text{rag}}$

$W =$

$D =$

HET OPTIMALE CONSERVENBLIK



$V =$

$A =$

STERKTEBEREKENINGEN

Druk gebaseerd op trekproeven

Voor isotrope materialen geldt: $\text{druk}_{\max} = \text{trek}_{\max}$

Genormeerd: $\sigma_{\max} =$

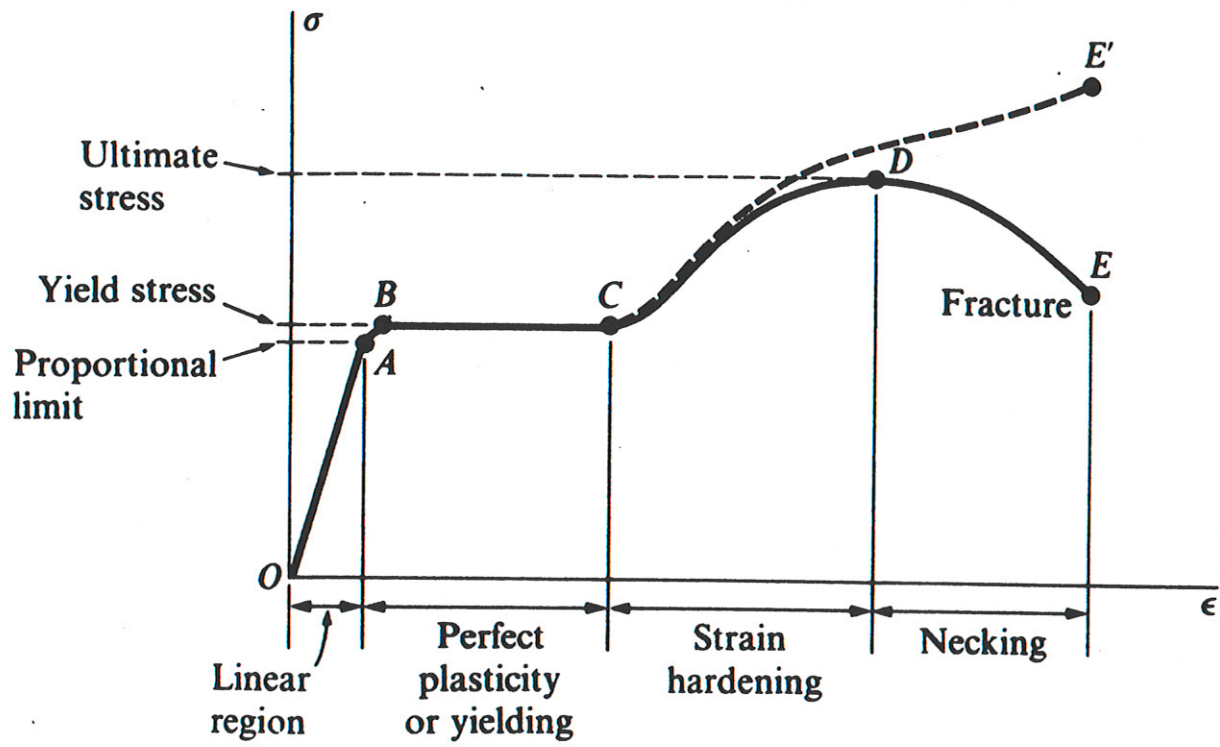
Geldt niet voor:

Gietijzer

Beton

Vezelversterkte kunststoffen (Glare e.d.)

SPANNINGS-REKDIAGRAM



IEDER MATERIAAL IS VEERKRACHTIG

Elasticiteitsmodulus E

E is de kracht nodig om een kubus met zijden 1 m uit te rekken tot een rechthoek van 1 x 1 x 2 m.

$$F_{\text{standaard}} = E$$

$$F_{\text{bruikbaar}} = E$$

Legering	dichtheid kg/m ³	Elasticiteits- modulus E GPa	dwarscontractie coëfficiënt ν	Vloeispanning σ MPa
Al 2014-T6	2800	73	0,33	410
Al 6061-T6	2700	70	0,33	270
Al 7075-T6	2800	72	0,33	480
Fe ASTM-A36	7850	210	0,30	250
Fe ASTM-A572	7850	210	0,30	340
Fe ASTM-A514	7850	210	0,30	700
Beton	2400	17-31	0,15	10-70

KNIK

Eulerknik

$$F_{knik} = \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad I = \pi t R^3$$

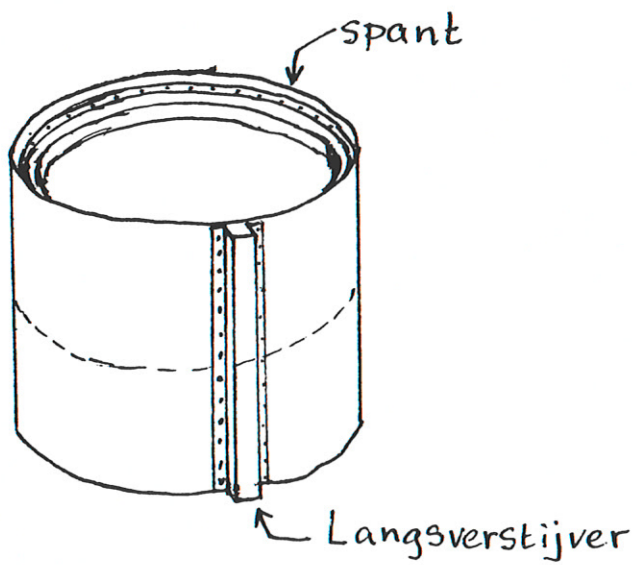
Lokale knik

$$\sigma_{knik} = \frac{E}{\sqrt{3(1 - \nu^2)}} \cdot \frac{t}{R}$$

$$\sigma_{toelaatbaar} = 0,2 - 0,9 \sigma_{knik}$$

CONSTRUCTIEVE OPLOSSINGEN

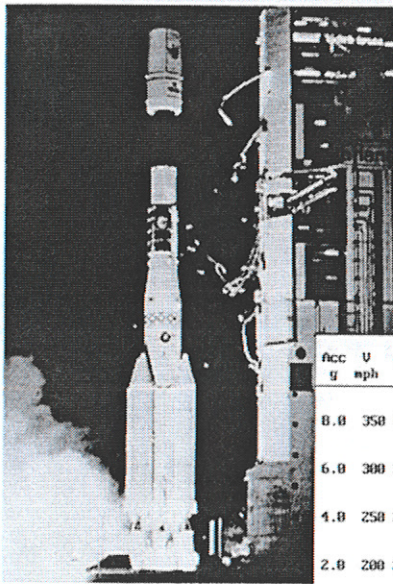
- Langsverstijvers
- Spanten



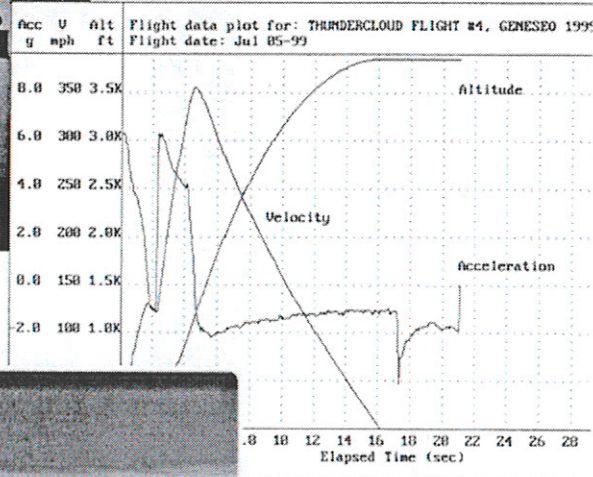
Deel II

Beweging van raketten

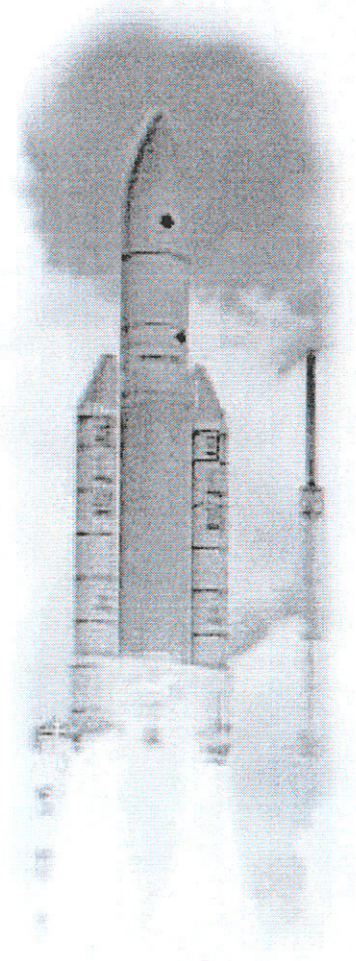
ir. B.T.C. Zandbergen



Ariane 44 L



Pegasus



Ariane 5

BEWEGING VAN RAKETTEN

Naar een tekst van prof.ir. H. Wittenberg

Aangepast door

Ir. B.T.C. Zandbergen

Voor "Proefstuderen 2001", 1 februari 2001

1. Inleiding

De oudste vorm van een raket is de vuurpijl, waarvan de oorsprong teruggaat tot vóór de jaartelling in China. In de 16^e eeuw werd de vuurpijl ook bekend in Europa en aldaar werden in de 18^e en 19^e eeuw projectielen met raketvoortstuwing gebouwd, die later echter verdrongen werden door de verdere ontwikkeling van de kanonnen.

In het begin van de 20^{ste} eeuw werden de grondslagen van de raketontwikkeling gelegd door de Rus K.E. Tsiolkowski (1857 - 1935); een latere bekende pionier van raketten met vloeibare stuwstoffen was de Amerikaan R.H. Goddard (1883 - 1945), die in de periode 1920 - 1940 belangrijke bijdragen tot de rakettechniek leverde. De belangrijkste doorbraak in de ontwikkeling van grote raketten was echter de bouw en toepassing van de Duitse raket A-4 (later V-2 genoemd, figuur 1) vóór en tijdens de Tweede Wereldoorlog. Deze V-2 raket was het prototype van de latere lange-afstandsraketten, die in het bijzonder door Amerika en Rusland na W.O. II werden ontwikkeld en waaruit de grote lanceerraketten zijn voortgekomen.

Raketten worden vandaag de dag voornamelijk gebruikt om een bepaalde lading (nuttige last) in korte tijd te versnellen tot een hoge snelheid (kinetische energie) van enkele kilometer per seconde (afgekort km/s), waarna deze in een vrije vlucht (ook wel aangeduid met 'vrije val' of graviteren) zijn weg vervolgd. Belangrijke toepassingen van raketten zijn o.a.:

1. Als sondeerraket: Hierbij wordt de hoge snelheid van de raket gebruikt om het voertuig tot grote hoogte boven het aardoppervlak te laten stijgen.
2. Als ballistische raketwapen, waarbij na een verticale start de vliegbaan wordt afgebogen en de snelheid gebruikt om een zekere afstand over het aardoppervlak af te leggen.
3. Als lanceer- of ruimteraket: Hierbij wordt aan een ruimtevoertuig de snelheid gegeven, die nodig is voor het volgen van een bepaalde baan in de ruimte.

Bij al deze toepassingen kenmerkt de raketvlucht zich door korte periode(n) waarin voortstuwing plaatsvindt (gedreven of gestuwde vlucht) met behulp van zgn. raketmotoren, gevolgd door (een) lange periode(n) van vrije vlucht, waarin de beweging (voornamelijk) wordt bepaald door de zwaartekracht (ook wel gravitatiekracht genoemd). I.h.a. maakt de raket daarbij geen gebruik van aërodynamische draagkracht zoals bij vliegtuigen. Eerder wordt deze kracht op de raket als storend gezien.

T.a.v. de voortstuwingswijze geldt voor de raket, dat de voortstuwende kracht wordt verkregen door het versnellen van (gas) massa naar achteren, waarbij de uitgestoten massa geheel in het voertuig zelf wordt meegevoerd. De werking van de gebruikte raketmotoren is onafhankelijk van de omgeving van de raket waardoor deze ook in vacuum (in de ruimte) zijn vlucht kan uitvoeren.

In het algemeen bestaat een raket uit de navolgende hoofdonderdelen (zie als voorbeeld de V-2 raket in figuur 1):

- constructie, die de raket zijn sterkte geeft en voor vormbehoud zorgt;
- voortstuwingsinstallatie, die de raket voortstuwt door de atmosfeer dan wel ruimte (raketmotor met vaste stuwstoffen of met vloeibare stuwstoffen, waarbij de laatste in afzonderlijke tanks zijn opgeslagen);
- besturingssystemen, waarmee de raket gestuurd wordt zodanig dat een stabiele vlucht resulteert zonder koersafwijkingen (veelal geschiedt de besturing met behulp van de hoofdmotoren of afzonderlijke stuurraketten);
- nuttige last, d.w.z. de meegevoerde lading, zoals een onbemande satelliet of een bemand ruimtevoertuig.

Teneinde de prestaties van een raket te verhogen, is de raket veelal in meerdere trappen uitgevoerd, waarbij elke trap wordt afgeworpen nadat de daarin opgeslagen stuwstoffen zijn verbruikt. Op deze wijze wordt de massa verkleind die met de stuwstof in de overblijvende trappen moet worden versneld. Kenmerk van vrijwel alle raketten is dat de meegevoerde stuwstofmassa een zeer groot percentage van de startmassa bedraagt (70 - 95 %), zie bijvoorbeeld tabel 1.

In dit document worden de grondslagen van de raketbeweging besproken aan de hand van een 1-trapsraket. Kenmerk van zulke raketten is dat de eindsnelheid beperkt is tot maximaal ongeveer 4 kilometer per seconde (afgekort km/s).

2. Het principe van de raketaandrijving

De werking van een raketmotor berust op het principe van actie en reactie. Dit principe zegt dat iedere kracht (actie) die op een lichaam wordt uitgeoefend, een even grote tegenkracht (reactie) opwekt, die tegengesteld gericht is. Dat kan worden geïllustreerd aan de hand van een ballon. Als men een met gas gevulde afgesloten ballon loslaat, dan zal deze zich hoegenaamd niet verplaatsen. We zeggen de resulterende kracht op de bol is gelijk aan nul. Wordt de ballon echter lokaal onderbroken door een gat, dan zal een resulterende kracht op de ballon aangrijpen; tegengesteld gericht aan de uitstroomrichting van het gas. Werken er verder geen krachten (bijvoorbeeld luchtkrachten en zwaartekracht) op de ballon, dan kunnen we de eindsnelheid van de ballon bepalen met de wet van behoud van impuls¹. Stel dat de ballon een massa M_1 heeft uitgedrukt in kilogram (kg) en gevuld wordt met een gas met massa M_2 idem in kg. Stel verder dat de snelheid V_2 uitgedrukt in meter per seconde (m/s) waarmee de gasmassa wordt uitgestoten bekend is, dan

¹ Wet van behoud van impuls: In een afgesloten systeem is de som van de hoeveelheden van beweging constant.

volgt voor de eindsnelheid V_1 (in m/s) van de ballon:

$$V_1 = \frac{M_2 V_2}{M_1}$$

Opdracht 1: Veronderstel een ballon met een massa van 2 gram gevuld met 250 milligram lucht. Veronderstel verder dat de lucht uit de ballon stroomt met een snelheid van 10 meter per seconde (afgekort m/s), bepaal dan de eindsnelheid van de ballon in tegenovergestelde richting met behulp van bovenstaande vergelijking. (Antwoord: 1,25 m/s).

Opdracht 2: Veronderstel een skater op een skateboard. Skater en skateboard tesamen hebben een massa van 95 kg. De massa van het skateboard bedraagt 5 kg en van de skater 90 kg. Veronderstel dat de skater van het bord afstapt en dat hij daarbij het skateboard met een snelheid van 9 m/s in tegenoverstelde richting wegstoot. Bepaal de snelheid waarmee de skater van het skateboard is gestapt in een richting tegengesteld aan de bewegingsrichting van het skateboard onder verwaarlozing van weerstand en wrijving. (Antwoord: 0,5 m/s).

Opdracht 3: Rekenen aan een waterraket: Neem een lege fles (bijvoorbeeld een cola fles met een inhoud van 1,5 liter) en bepaal de massa van de fles. Hier zullen we veronderstellen dat de massa 130 gram bedraagt. Vul de fles met een halve liter water, sluit hem af met een kurk voorzien van ventiel en zet de fles onder druk (zie beschrijving "Hoe maak je een waterraket?"). Op een bepaald moment wordt de druk in de fles te hoog worden en komt de stop los. Het water spuit nu met grote kracht uit de fles! Veronderstel een constante uitstroomsnelheid van 26 m/s. Bepaal met de eerder gegeven betrekking voor de impuls de snelheid van de fles als deze volledig is leeggestroomd. (Antwoord: 100 m/s).

Een ander aspect dat bij de ballon (en ook de waterraket) speelt, is dat de ballon door zijn gasvoorraad heen raakt. Als dit gebeurt zal de ballon als een dood vogeltje uit de lucht vallen. Voor een ballon en of waterraket gebeurt dit vaak al na enige seconden. Een raketmotor daarentegen moet vaak vele minuten aan een stuk kunnen werken. Dit betekent dat over die tijd de druk in de motor op peil moet blijven. Dit kan alleen als de gasvoorraad voortdurend wordt aangevuld. Bij een raketmotor gebeurt dit d.m.v. het verbranden van een brandstof (bijvoorbeeld kerosine of vloeibare waterstof). De daarvoor benodigde oxidator (bijv. zuurstof) wordt in de raket meegevoerd. De combinatie brandstof-oxidator wordt wel aangeduid met stuwstof.

We kunnen nu de volgende conclusie trekken:

Daar de raket zelf de stuwstof met zich meedraagt en de uitstroomsnelheid slechts afhankelijk is van de processen in de raket is voortstuwing in vacuüm mogelijk.

3. De basisvergelijking voor raketten

Het verband tussen massa en snelheid zoals dat op voorgaande bladzijde is gegeven, geldt alleen voor een vereenvoudigde situatie, nl. wanneer een raket door een kortstondige uitstoot van een gasmassa een éénmalige krachtige impuls ondervindt, zodanig dat aangenomen mag worden dat de gasmassa in zijn geheel uitstroomt bij een constante snelheid van het voertuig. Voor de meeste raketten gaat dit echter niet op. Vaak is de werkingsduur van een raket van de orde van enige minuten dat de voortdurende snelheidsverandering van de raket tijdens de uitstoot niet langer verwaarloosd mag worden.

De Rus Tsiolkowsky slaagde er als een van de eersten in om de verandering van de massa tijdens de gestuwde fase van een raket een plaats te geven in het eenvoudige principe van actie is reactie. Hiervoor baseerde Tsiolkowsky zich op de tweede wet van Newton². In de nu volgende tekst wordt dit nader uitgewerkt.

De tweede wet van Newton in formulevorm luidt:

$$K = M a = M \frac{dV}{dt} = \frac{d(MV)}{dt} = \frac{dI}{dt}, \text{ waarin } I = MV = \text{impuls}$$

Deze wet mag uitsluitend worden toegepast op een systeem van constante massa. Tsiolkowsky beschouwde daarom het systeem van raket en uitgestoten gasmassa als één geheel. Beweegt het systeem in een gravitatie-vrije ruimte (afwezigheid van zwaartekracht) en in vacuüm (hierna aangeduid als 'ideale geval'), dan werken op dit systeem géén uitwendige krachten ($6k_u = 0$). De impulsverandering over een eindig tijdsduur Δt wordt beschouwd t.o.v. een vast-assenstelsel (figuur 3). Voor de impuls van het systeem op het tijdstip t geldt:

$$I_t = M \cdot V \tag{1}$$

De impuls van het systeem na een tijdsinterval Δt bedraagt :

$$I_{t+\Delta t} = (M + \Delta M) (V + \Delta V) - u \Delta M \tag{2}$$

De snelheid u van de gassen t.o.v. het inertiaal-assenstelsel is samengesteld uit de uitstroombnelheid w van de gassen t.o.v. de raket en de snelheid V van de raket t.o.v. het vaste assenstelsel (figuur 3):

$$u = V - w \tag{3}$$

² De kracht (hier aangeduid met K) is gelijk aan de verandering van de hoeveelheid van beweging (impuls I) in een oneindig klein tijdsinterval.

Substitutie van (3) in (2) levert met verwaarlozing van het product van twee kleine grootheden:

$$I_{t+\Delta t} = MV + M \Delta V + w \Delta M \quad (4)$$

Voor de impulsverandering per tijdseenheid volgt na deling door de tijdsduur Δt en daar op het systeem geen uitwendige krachten werken:

$$\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I_{t+\Delta t} - I_t}{\Delta t} = M \frac{\Delta V}{\Delta t} + w \frac{\Delta M}{\Delta t} = 0 \quad (5)$$

of:

$$M \frac{\Delta V}{\Delta t} = - \frac{\Delta M}{\Delta t} w = mw \quad (6)$$

Veronderstellen we de uitstroomsnelheid w constant, wat in het algemeen het geval is voor een raketmotor, en nemen we uiterst kleine tijdstappen, waarbij we per stap de verandering in de snelheid en massa van de raket bijhouden en sommeren, dan kunnen we een eenvoudige uitdrukking voor de (ideale) snelheidsverhoging van de raket afleiden. Er volgt dat de ideale eindsnelheid gelijk is aan de (constante) uitstroomsnelheid van de stuwstof, vermenigvuldigd met de natuurlijke logaritme ($\ln$) van het quotient van de startmassa M_0 en de momentane massa M (massa op een willekeurig moment tijdens de gestuwde vlucht) van de raket:

$$\Delta V = V - V_0 = w \ln \frac{M_0}{M} \quad (7)$$

In een raketvlucht, waarbij de massa van M_0 tot M_e afneemt, geldt dus:

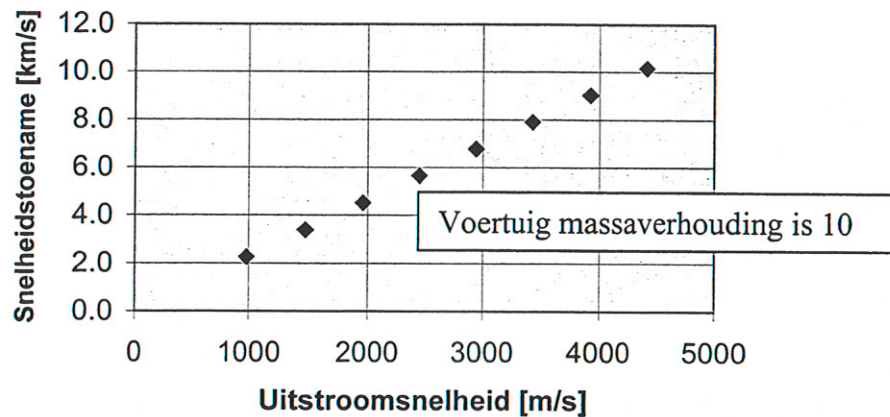
$$\Delta V_e = V_e - V_0 = w \ln \frac{M_0}{M_e} = w \ln / \quad (8)$$

ΔV_e = de snelheidsverhoging van de raket
 $/ = M_0/M_e$ = massaverhouding

De uitdrukking (8) voor ΔV_e wordt ook wel de formule van Tsiolkowski genoemd. Merk op dat de snelheidsverhoging ΔV onafhankelijk is van de wijze waarop de uitgestoten massa tijdens de vlucht met de tijd varieert (tussen M_0 en M_e).

Typerende waarden voor de uitstroomsnelheid van raketmotoren liggen tussen enkele honderden en duizenden meters per seconde terwijl voor de massaverhouding van bijvoorbeeld 1-trapsraketten waarden gelden tussen de 3 en 20. In tabel 2 zijn enige waarde van de natuurlijke logaritme gegeven voor

voorkomende massaverhoudingen, terwijl in figuur 4 waarden voor de snelheidstoename zijn gegeven als functie van de uitstroomsnelheid bij een gegeven massaverhouding van 10.



Figuur 4: Ideale snelheidstoename raket als functie van de uitstroomsnelheid bij een massaverhouding van 10.

Opdracht 4a: Bepaal voor de waterraket uit opdracht 3 de ideale eindsnelheid m.b.v. de vergelijking van Tsiolkowsky. (Antwoord: $(\exists V_e)_{\text{ideaal}} = 41 \text{ m/s}$).

Opdracht 4b (Hersenkraker?): Veronderstel dat op het skateboard uit opdracht 2 twee skaters staan met elk een massa van 45 kg in plaats van 1 skater met een massa van 90 kg. Stel dat beide skaters na elkaar (dus niet gelijktijdig) met dezelfde snelheid van het bord afstappen als de skater uit opdracht 2 in dezelfde richting. Bepaal voor deze situatie de eindsnelheid van het skateboard. Aanwijzing maak hierbij gebruik van betrekkingen (1) t/m (3) en ga uit van twee (tijd)stappen.

Opdracht 5: Verklaar waarom de eindsnelheid in het geval van opdracht 4a en 4b lager uitvalt dan in het geval van opdracht 3 respectievelijk opdracht 2.

4. De raketstuwkracht en de bewegingsvergelijking van een raket

Het verband tussen de stuwkracht van de raketmotor en de beweging van de raket kan als volgt worden gelegd. We schrijven hiervoor uitdrukking (6) als:

$$M \frac{dV}{dt} = -w \frac{dM}{dt} = +mw,$$

waarin wordt uitgegaan van uiterst kleine tijdstappen met $m = -dM / dt =$ de per tijdseenheid uitgestoten (gas)massa.

Wordt als uitwendige kracht op de raket gedefinieerd:

$$F = mw, \quad (9)$$

dan kan (ook in dit geval van variabele massa) de bewegingsvergelijking van de raket in vacuüm en in een gravitatievrije ruimte worden geschreven als:

$$M \frac{dV}{dt} = F \quad (10)$$

Derhalve kan de beweging van de raket (met variabele massa) ook worden afgeleid uit de wet $K = ma$ mits daarbij de kracht F volgens (9) als uitwendige kracht wordt beschouwd. Deze kracht F wordt aangeduid met de stuwkracht van de raketmotor met als eenheid de Newton (N).

Voor het eerder beschouwde gesloten systeem van raket en gasmassa is deze stuwkracht een inwendige kracht (F is de kracht die de gasmassa naar achter versnelt en als reactie op de raket in voorwaartse richting werkt).

Opdracht 6: Bepaal voor de waterraket uit opdracht 3 en 5 de massastroom water en de stuwkracht als gegeven is een dichtheid van het water van 1000 kg/m^3 en een diameter van de uitstroomopening van de fles van 2 cm. (Antwoord: $m = 8,2 \text{ kg/s}$; $F = 212 \text{ N}$).

5. De raket in de verticale vlucht in een gravitatieveld

Met behulp van de in paragraaf 4 afgeleide bewegingsvergelijking voor de raket volgt voor de verticale vlucht bij aanwezigheid van een gravitatieveld en een atmosfeer (figuur 3):

$$M \frac{dV}{dt} = F - Mg - D \quad (11)$$

waarin g de valversnelling voorstelt (hier verder constant verondersteld met een grootte van 10 m/s^2), Mg het momentane gewicht van de raket en D de luchtweerstand. Oplossen van betrekking (11) voor hele kleine tijdstappen dt , bijhouden van de snelheidsverandering per tijdstap en rekening houdend met eventuele veranderingen in weerstand en gewicht tijdens de motorwerking, levert voor de eindsnelheid V_e , indien de raket start vanuit stilstand:

$$V_e = V_{e \text{ id}} - \ominus V_g - \ominus V_D \quad (12)$$

Hierbij is $(V_e)_{\text{ideaal}}$ de ideale eindsnelheid, die in de gravitatievrije ruimte en in vacuüm wordt bereikt, terwijl $\ominus V_g$ en $\ominus V_D$ het snelheidsverlies t.g.v. de zwaartekracht en de luchtweerstand voorstellen.

Bij een constante valversnelling en bij verwaarlozing van de luchtweerstand of bij een vlucht in vacuüm (géén luchtweerstand) volgt voor de bereikte eindsnelheid:

$$V_e = w \ln / - g t_b \quad (13)$$

Hierin is t_b de stuwtijd. Combinatie van betrekking (8) en (13) geeft voor het snelheidsverlies als gevolg van de werking van de zwaartekracht $\ni V_g$:

$$\ni V_g = - g t_b$$

$\ni V_g$ neemt dus toe met toenemende stuwtijd; dit is begrijpelijk daar de stuwstofmassa in de raket gedurende een langere tijd tegen de zwaartekracht in moet worden versneld.

Voor de stuwtijd gelden i.h.a. bepaalde beperkingen. Houden we de massastroom m constant, dan volgt voor de stuwtijd t_b :

$$t_b = \frac{M_0 - M_e}{m} \quad (14)$$

Opdracht 7a: Bepaal voor de eerder genoemde waterraket de stuwtijd bij de eerder bepaalde massastroom. (Antwoord: $t_b = 0,06$ seconde).

Opdracht 7b: Bepaal tevens het gravitatieverlies. (Antwoord: $\ni V_g = 0,6$ m/s. Merk op dat de invloed van gravitatie op de eindsnelheid van de waterraket beperkt is).

Opdracht 7c: Als voor de waterraket gegeven is een weerstandscoefficient van 0,7 gebaseerd op het frontaal oppervlak van de raket en een diameter van het frontaal oppervlak van 9 cm, bepaal dan of de maximale weerstand die de waterraket tijdens de gestuwde vlucht ondervindt groter of kleiner is dan 5 N en of de invloed van de weerstand meer of minder belangrijk is dan de zwaartekracht. (Antwoord: $D < 4,5$ N, even belangrijk).

Bij een verticale opstijging is uiteraard belangrijk te kunnen bepalen tot welke hoogte de raket komt. Allereerst is daar de hoogte waarop de motor is uitgewerkt (het doofpunt) en de raket de ideale eindsnelheid heeft bereikt.

Opdracht 8: Bepaal voor een verticale opstijging van de waterraket de hoogte waarop de stuwkracht weg valt, aannemende dat de raket direct de ideale eindsnelheid bereikt van 41 m/s. (Antwoord: 2,5 m).

Vervolgens vervolgt de raket de verticale vlucht zonder voorstuwing (zgn. ballistische vlucht). T.g.v. de werking van de zwaartekracht vermindert de snelheid en de raket bereikt de grootste hoogte indien de snelheid tot nul is gereduceerd (in het zgn. culminatiepunt). Voor de ballistische vlucht (Engels

‘coasting’) bij afwezigheid/verwaarlozing van luchtweerstand geldt:

$$M_e \frac{dV}{dt} = -M_e g \quad (F=0) \quad (15)$$

Integratie levert:

$$V - V_e = -g_0 t \quad (16)$$

De ‘coast tijd’, waarin de snelheid vanaf het doofpunt tot nul is afgenomen is dus:

$$t_c = \frac{V_e}{g} \quad (17)$$

Voor de afgelegde weg in de ballistische vlucht in vacuüm gerekend vanaf het doofpunt volgt:

$$h_c = \int_0^{t_c} V dt = V_e t_c - g \frac{t_c^2}{2} \quad (18)$$

Opdracht 9: Bepaal m.b.v. betrekking (18) voor de eerder beschouwde waterraket in een verticale stijgvlucht de coast tijd en de maximale hoogte die tijdens de ballistische vlucht in vacuüm wordt overwonnen en vergelijk deze met de afstand (hoogte) afgelegd tijdens de gestuwde vlucht. (Antwoord: $t_c = 4,1$ seconde, $h_c = 84,05$ m).

In het geval dat de raket een ballistische vlucht uitvoert in de atmosfeer, kan de weerstand in het algemeen niet verwaarloosd worden. Hoe in dat geval de hoogte moet worden bepaald voert echter te ver voor het tijdsbestek van “Proefstuderen”, maar komt zeker aan bod als je met de daadwerkelijke studie aanvangt.

Tabel 1: Gegevens van enkele bekende lanceervoertuigen.

Type draagraket	Delta II (Boeing)	Ariane 44L (ESA)	Ariane 5 (ESA)	Space Shuttle (NASA)
Aantal trappen	2 of 3 + 3 tot 9 boosters	3 + 4 boosters	2 + 2 boosters	Orbiter + tank + 2 boosters
Totale lengte (m)	38,4	57-60	32	56
Startmasa (10^3 kg)	217,6	470	716	2040
Stuwkracht bij start (kN)	2646	5000-6000	11770	34370
Stuwstofmassa (10^3 kg)	191 (3-traps)	430	622	1740
Nuttige last (kg) voor:				
- Lage circulaire baan	3983 (2-traps)	7000	22000	29500
- Geostationaire baan	1447 (3-traps)	4200	6800	--

Tabel 2: Enige waarden van de natuurlijke logaritme
voor verschillende waarden van de massaverhouding.

/	ln(/)
3	1.10
4	1.39
5	1.61
6	1.79
7	1.95
8	2.08
9	2.20
10	2.30
11	2.40
12	2.48
13	2.56
14	2.64
15	2.71
16	2.77
17	2.83
18	2.89
19	2.94
20	3.00

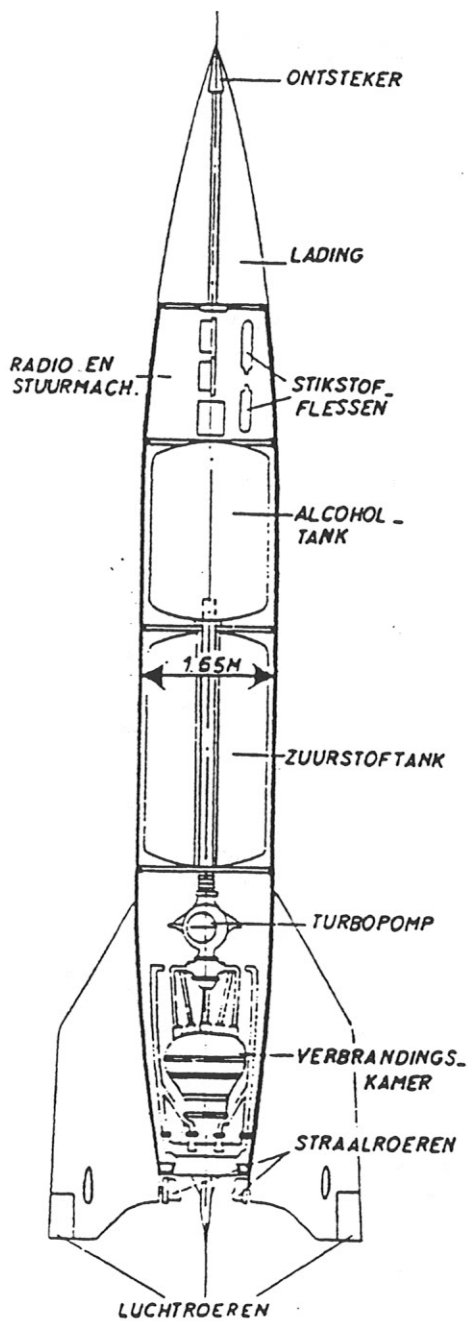


Fig. 1: Raket V-2 (~1940)

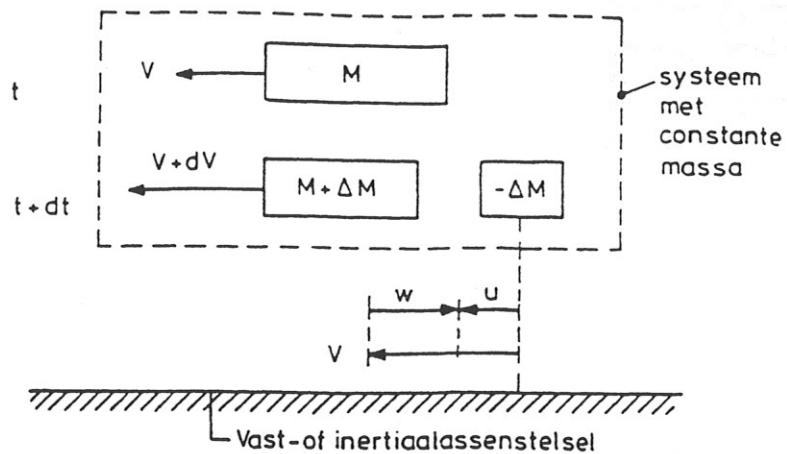


Fig. 2 : Systeem met variable massa.

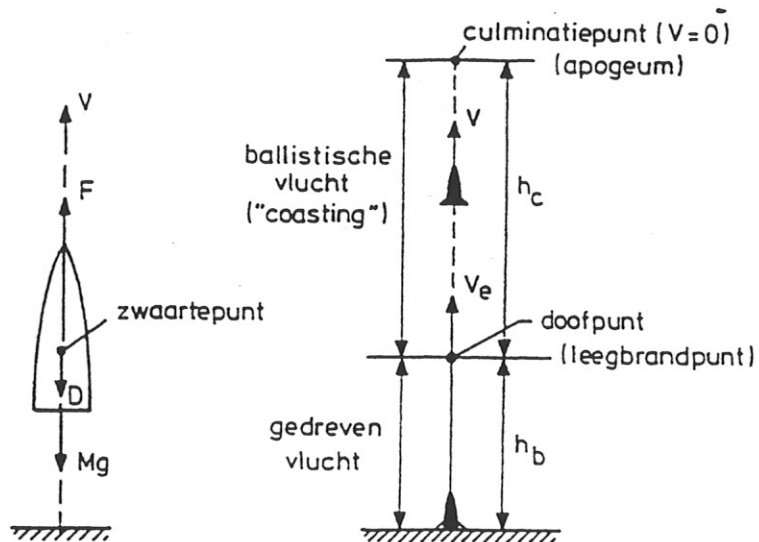


Fig. 3: Verticale vlucht van de raket.

HOE MAAK JE EEN WATERRAKET?

BESTE RAKETBOUWER,

Een raket bouwen moeilijk?

Niet als je precies doet wat hier allemaal staat.

Lees voor je begint eerst ALLES goed door.

Vooraf het hoofdstukje "Veilig Bouwen" is belangrijk.

Veel plezier met het bouwen en lanceren van je eigen waterraket!

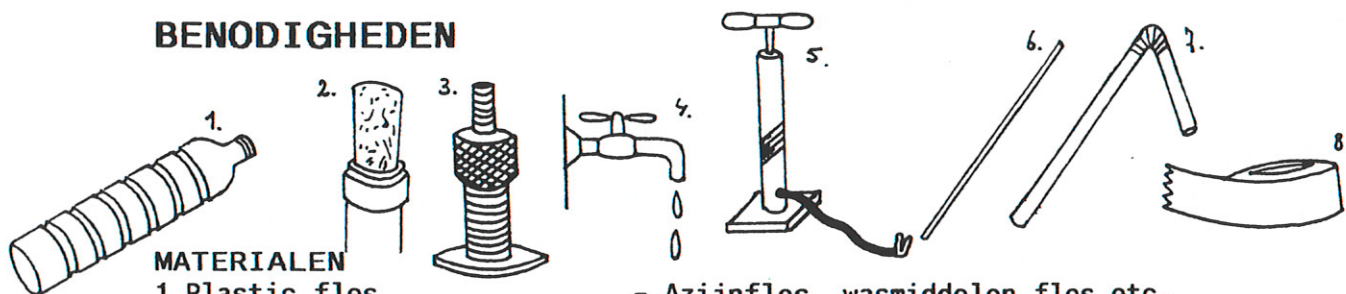
VEILIG BOUWEN

- Bij knutselen ALTIJD denken aan je eigen veiligheid
- Gebruik daarom UITSLUITEND de genoemde gereedschappen en materialen
- Doe ALLES steeds in de juiste volgorde
- Vraag ALTIJD hulp als je het niet zo goed meer weet

VEILIG LANCEREN

- Lanceer van een open plek
- Zorg er voor dat geen huizen, auto's, bomen etc. dicht in de buurt staan
- Lanceer ALTIJD recht omhoog
- Toeschouwers moeten ALTIJD achter de lanceerder staan

BENODIGHEDEN

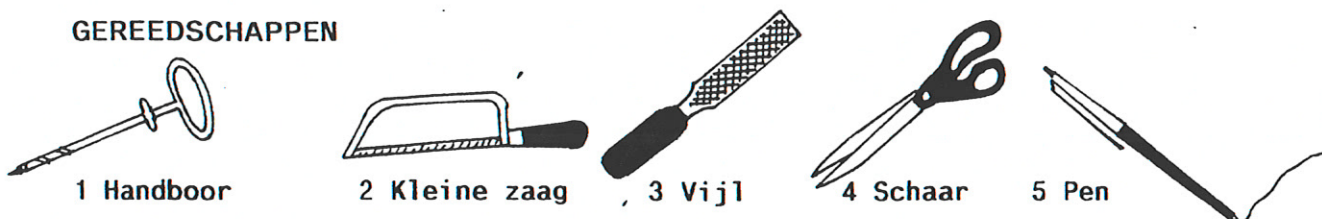


MATERIALEN

- 1 Plastic fles
- 2 Een kurk
- 3 Een compleet fietsventiel
- 4 Water
- 5 Fietspomp
- 6 Fietsspaak
- 7 Milk-shake rietje
- 8 Isolatie tape

- Azijnfles, wasmiddelen fles etc.
- Passend of bijna passend op de fles
- Uit een oude fietsband
- Dit is de brandstof
- Pomp met slang met knijper
- ±50 cm; recht, dun en stevig
- Dit is de waterraket-geleider
- Hiermee zet je straks het rietje vast

GEREEDSCHAPPEN



1 Handboor

2 Kleine zaag

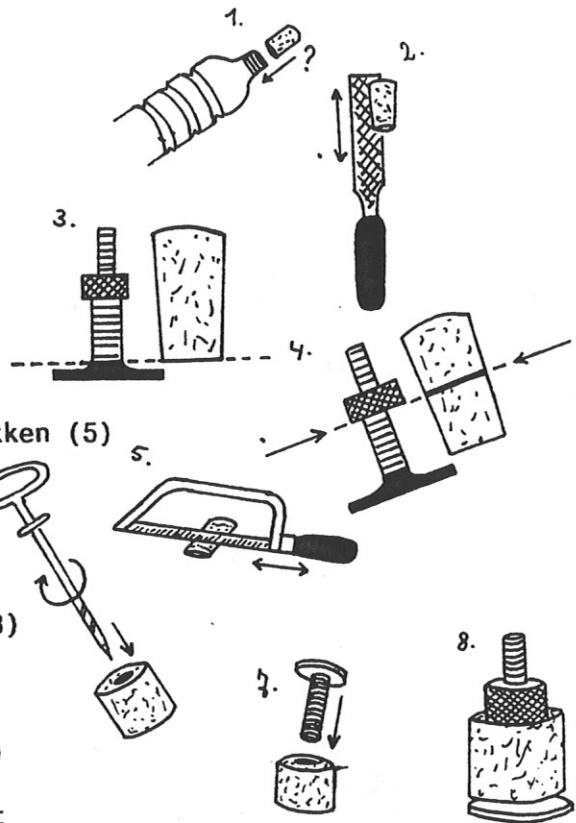
3 Vijl

4 Schaar

5 Pen

BOUW BESCHRIJVING

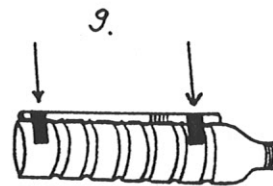
- A - Pak de kurk
- Past de kurk goed op de fles? (1)
 - Vijl de kurk zonodig passend (2)
- B - Pak het complete fietsventiel
- Houdt deze opzij tegen de kurk aan (3)
 - Kijk waar het dikke gedeelte van het ventiel naast de kurk begint
 - Zet daar een streepje op de kurk (4)
 - Zaag de kurk op het streepje in 2 stukken (5)
- C - Boor een gat door de kurk (6)
- Haal het fietsventiel uit elkaar
 - Steek het fietsventiel door het geboorde gat in de kurk (7)
 - Zet het fietsventiel weer in elkaar (8)
- D - De afsluiter van de raket is klaar
- Past de kurk nog op fles?
 - Zo niet; bijvijlen! (Zie A tekening 2)
- E - Maak het rietje met isolatie-tape vast op de fles (9)



Je waterraket is klaar voor lancering

LANCEREN

- F - Vul de plastic fles voor één derde gedeelte met water
- Doe de afsluiter (kurk) op de fles
 - Draai de fles om en kijk of deze niet lekt
 - Een zacht druppelend ventiel is niet erg
- G Neem mee naar buiten:
- De gevulde fles
 - De fietspomp
 - De rechte fietspaak
- H - Zoek een open plek op
- Steek de fietsspaak in de grond
 - Houdt de fles op zijn kop
 - Schuif het rietje van de raket over de spaak
 - Maak de pompslang vast aan de kurk met het ventiel (10)



Alles is nu gereed voor lancering. Ga nu pompen. Je hoort de lucht in het water komen. De fles gaat een beetje bol staan. En floep, weg is ie!

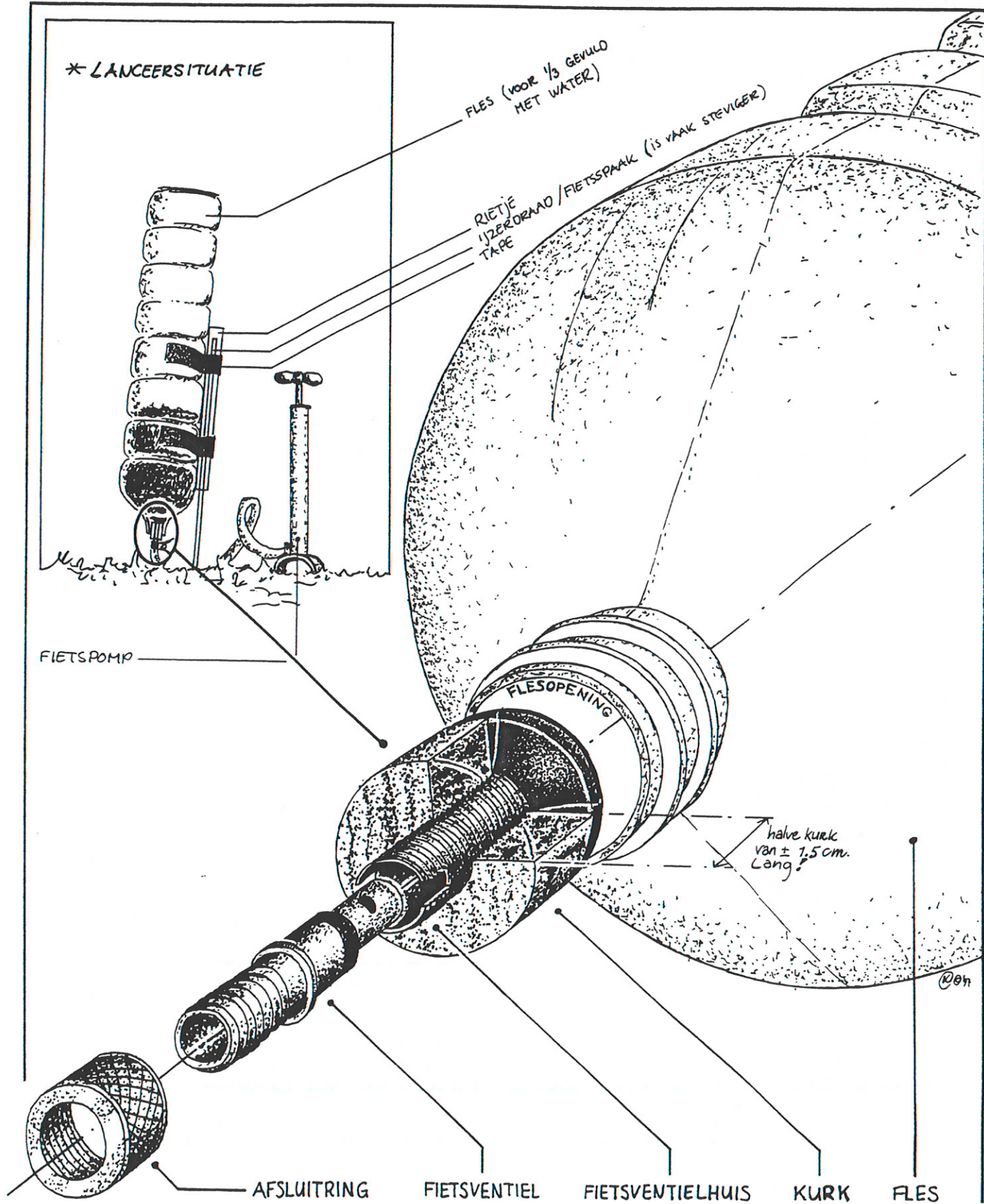
BIJ WEIGERING; NOOIT JE HOOFD BOVEN DE RAKET HOUDEN!

Veel succes!

De redactie van "Zo Zit Dat" en Noordwijk Space Expo aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor het bouwen en lanceren van waterraketten

NOORDWIJK SPACE EXPO KEPLERLAAN 3 NOORDWIJK

* LANCEERSITUATIE



Deel III

Verbindingen en materialen

dr.ir. O.K. Bergsma

Verbindingen en materialen

Inhoudsopgave:

- 1 Introductie
- 2 Belastingen
- 3 Algemene verbindingen
- 4 Starre verbindingen

1 Introductie

In de luchtvaart- en ruimtevaarttechniek worden voertuigen ontworpen, die al of niet personen door de lucht en of ruimte transporteren. Deze voertuigen bestaan uit vele onderdelen, waarbij deze onderdelen onderling verbonden zijn. De verbindingen die nodig zijn om onderdelen op een effectieve en liefst ook efficiënte wijze aan elkaar vast te maken, zijn vaak de kritische delen in een constructie. Daarnaast zijn verbindingen relatief zwaar te opzichte van de delen die ze verbinden. In het algemeen kan dan ook gesteld worden dat er een streven is naar het minimaliseren van het aantal verbindingen.

Verbindingen verbinden onderdelen, ze zorgen ervoor dat belastingen die op één onderdeel uitgeoefend worden, naar een ander onderdeel "getransporteerd" worden, zodat uiteindelijk het geheel (het voertuig) deze belasting kan dragen. Voordat duidelijk gemaakt wordt wat voor soort verbindingen er zijn, zal eerst uitgelegd worden wat belastingen zijn, en tot welke belastingen we ons hier zullen beperken. Als laatste zal ingegaan worden op starre verbindingen die voorkomen in de luchtvaart- en ruimtevaarttechniek.

2 Belastingen

Wat zijn belastingen? Het woord belasting heeft vele betekenissen. Denk maar aan belastingen van de overheid (btw (belasting toegevoegde waarde), inkomstenbelasting, onroerendgoedbelasting, wegenbelasting, toeristenbelasting, hondenbelasting, etc, etc), belasting in de zin van geestelijke werkdruk (college geven), fysieke belastingen (bij mensen: boodschappen sjouwen). In dit college zullen we ons beperken tot fysieke belastingen op constructies. Tot deze belastingen worden gerekend:

1. Thermische belastingen, verwarming of afkoeling, zetten materialen aan tot uitzetten of krimpen. Dit kan verschillende effecten op een constructie hebben:
 - a. Als de thermische belasting niet overal hetzelfde is (meestal het geval) zullen verschillende delen verschillend uitzetten of krimpen (in het algemeen heet dit vervormen). Hierdoor zullen onderdelen niet meer passen, (ze komen klem te zitten, of ze gaan juist los zitten), wat tot bezwijken van een constructie kan leiden. In de ruimtevaart komt deze thermische belasting vaak voor doordat de zon meestal één zijde van een ruimtevaartvoertuig bestraalt, hetgeen resulteert in grote temperatuurverschillen. Bij het afkoelen tijdens productieprocessen (b.v. gieten), zullen dikke delen langzamer afkoelen dan dunne delen. Dit verschil in afkoelsnelheid leidt tot vormveranderingen (kromtrekken) en tot interne spanningen (deze resulteren soms in microscheurtjes).
 - b. Als de thermische belasting groot is kunnen eigenschappen van materialen en daardoor eigenschappen van constructies veranderen. Denk hierbij aan een kunststof

bal die bij kamertemperatuur zacht is en stuitert, terwijl diezelfde bal bij $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ hard is en breekt zodra je probeert te stuiten. Bij metalen kun je verwachten dat de sterkte bij kamertemperatuur groter zal zijn dan de sterkte bij temperaturen ter grootte van de smelttemperatuur.

2. Mechanische belastingen, krachten en momenten die op een constructie worden uitgeoefend zullen de materialen in deze constructie doen vervormen, of zelfs breken, waardoor zo'n constructie kan bezwijken.

Een constructie is bezwiken als deze zijn taak niet meer kan volbrengen. Op een stoel waarvan een poot breekt kan je niet meer fatsoenlijk zitten. De stoel is dan bezwiken. Op een autoband die langzaam leegloopt, kan op een gegeven moment niet meer gereden worden, deze is dan bezwiken (maar wel gemakkelijk te repareren). Bezwijken is dus een ruimer begrip dan stukgaan!

Wat zijn krachten en momenten?

Het begrip krachten is een ieder redelijk bekend. Als je met een naald in je vinger prikt, dan is dit een kracht die je op je vinger uitoefent. In dit geval is er zelfs sprake van een puntkracht (puntbelasting), meestal treden krachten meer gespreid op, als je bijvoorbeeld een boek pakt, dan druk je met je duim op het kaft. Ongeveer 1 cm^2 drukt dan op het kaft. Zo'n kracht noem je een verdeelde kracht, vaak ook genoemd een verdeelde belasting. Aërodynamische krachten zijn altijd verdeelde krachten, terwijl een landing van een vliegtuig vaak als een punt belasting wordt gezien.

Momenten zijn moeilijker te visualiseren. Een moment kan gezien worden als een koppel, twee even grote evenwijdige tegengestelde, maar niet samenvallende, krachten. De grootte van de afstand tussen de krachten (de arm) vermenigvuldigd met de grootte van de kracht geeft de grootte van het koppel, of te wel het moment. In een uitdrukking geschreven ziet dat er als volgt uit: $M = R \times F$. (Er is hier expres arm maal kracht geschreven, omdat "blijkt" dat wanneer er met vectoren gewerkt gaat worden, de richting van het moment juist is. Als er kracht maal arm wordt gedaan, dan is de richting van het moment (linksom of rechtsom draaiend) verkeerd.) Als je een deksel van een potje afdraait, dan oefen je een moment op het deksel uit.

Wat voor gevolgen hebben krachten en momenten?

Krachten leiden tot translaties (verplaatsingen). Als je met een vinger tegen de muis van de computer duwt (kracht), en je duwt door het zwaartepunt dan transleert de muis. Als je niet door het zwaartepunt duwt, dan transleert de muis niet alleen, hij roteert ook! (de kracht heeft een arm t.o.v. het zwaartepunt, waardoor een moment t.o.v. het zwaartepunt ontstaat.)

Momenten leiden tot rotaties (verdraaiingen). Als je een rond geldstuk op zijn kant op tafel zet en je spint het geldstuk door met twee vingers een tegengestelde kracht op de rand uit te oefenen, dan begint het geldstuk te roteren. Je hebt een moment uitgeoefend. Vaak verplaatst het geldstuk zich ook nog, waaruit blijkt dat de krachten die je op de rand hebt uitgeoefend niet precies even groot zijn, er is blijkbaar een resultante.

Het is belangrijk dat je beseft dat momenten geen krachten zijn, en dat krachten geen momenten zijn. Ze hebben wel met elkaar te maken, maar moeten als onafhankelijk verschijnselen worden behandeld, omdat daardoor simpele modellen van de werkelijkheid, de werkelijkheid heel goed benaderen.

Posities in de ruimte om ons heen zoals wij die waarnemen, kunnen beschreven worden met drie onafhankelijke getallen (x,y,z). Deze getallen zijn vaak

plaatscoördinaten in een carthesisch assenkruis. Hierbij zijn drie richtingen gedefinieerd (b.v. x, y, z) die onderling loodrecht staan, en waarbij de derde as (z) in de richting wijst zoals die aangewezen wordt door de duim van de rechterhand, als van de eerste (x) as naar de tweede (y) as wordt gedraaid. Het zogenaamde rechtsdraaiende assenkruis. Niet alleen posities in de ruimte om ons heen worden met drie onafhankelijke coördinaten beschreven, ook richtingen worden op deze wijze beschreven. Er zijn dus drie onafhankelijke richtingen te onderscheiden in de ruimte om ons heen. Als een vliegtuig in x -richting beweegt, kunnen we dat dus niet uitdrukken als een combinatie van bewegingen y en z richting. Krachten en momenten hebben ook een richting. Van krachten is dat zondermeer duidelijk, van momenten misschien niet. Maar als je een moment voorstelt als een draaiende beweging om een as (b.v. het draaien van een pen om zijn eigen lengte as), en je weet dat er drie onafhankelijke assen zijn (x, y, z), dan is het duidelijk dat er drie onafhankelijke draaiende bewegingen mogelijk zijn.

Omdat translaties en rotaties ook een richting hebben, zijn er dus ook drie onafhankelijke translaties en drie onafhankelijke rotaties mogelijk. Het zal je dan ook niet verbazen dat elk van de drie onafhankelijke krachten en elk van de drie onafhankelijke momenten gekoppeld is aan de drie onafhankelijke translaties en drie onafhankelijke rotaties. Of te wel een kracht in x -richting geeft een verplaatsing in x -richting, een kracht in y -richting geeftin y -richting, en een moment in x -richting geeft een rotatie om de x -as, een moment in y -richting geeft ...om de y -as etc.

Zodra onderdelen van een constructie aan elkaar verbonden worden, dan betekent dat, dat in één of meerdere richtingen bewegingen beperkt worden. Omdat er zes (3 translaties en 3 rotaties) onafhankelijke bewegingen mogelijk zijn (dit worden vrijheidsgraden genoemd), zijn er zes blokkeringen mogelijk. Als een beweging geblokkeerd wordt dan betekent dat, dat er een mechanische belasting doorgeleid wordt. Als b.v. de translatie in y -richting geblokkeerd wordt dan wordt in y -richting een kracht doorgeleid, als de rotatie om de z -as geblokkeerd wordt dan wordt in z -richting een moment doorgeleid.

Verbindingen zijn dus niets anders dan blokkeringen van bewegingen tussen onderdelen. Een verbinding beperkt dus het aantal vrijheidsgraden tussen twee onderdelen.

3 Algemene verbindingen

Als twee onderdelen verbonden worden, wordt het aantal vrijheidsgraden beperkt. Als er 1,2,3,4 of 5 vrijheidsgraden worden verhinderd dan spreekt men van een scharnier. Hiervan zijn er dus zeer vele. Als alle zes vrijheidsgraden verhinderd worden dan spreekt men van een starre verbinding.

Hieronder worden van de mogelijke beperkingen wat voorbeelden gegeven.

Één vrijheidsgraad beperkt.

Als twee onderdelen op deze wijze verbonden zijn, dan wordt meestal niet van een scharnier gesproken, maar van een lagering. Een voorbeeld hiervan is een bol die zich tussen twee evenwijdige platen bevindt. De bol kan om alle richtingen roteren, en kan in twee richtingen transleren. Alleen de translatie loodrecht op de platen is niet mogelijk.

Twee vrijheidsgraden beperkt.

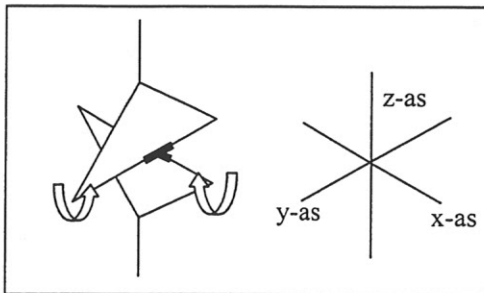
De verbinding tussen de kogeltjes en het huis van de lagering in een (keuken)lade is een voorbeeld van een beperking van twee vrijheidsgraden. De kogeltjes kunnen om alle drie de richtingen roteren, ze kunnen slechts in één richting transleren.

Drie vrijheidsgraden beperkt.

Als de drie translatie mogelijkheden worden verhinderd dan is er sprake van een bolscharnier. Denk b.v. aan de verbinding tussen het dijbeen en het bekken. Het dijbeen eindigt in een bolvorm die precies past in het bekken, zodat alleen rotaties mogelijk zijn. Andere mogelijkheden zijn natuurlijk twee translaties en één rotatie verhinderen (wat kan je zich hierbij voorstellen?), etc,etc.

Vier vrijheidsgraden beperkt.

Een typisch voorbeeld van deze beperking is een cardanscharnier. Hierbij zijn twee



onderling loodrechte rotaties mogelijk.

Vijf vrijheidsgraden beperkt.

Lijnscharnieren zijn een typisch voorbeeld van verbindingen waarbij één rotatievrijheid is toegestaan. Hierbij kun je denken aan pianoscharnieren, maar ook aan een "schroef"verbinding zoals je die terugvindt bij een schaar. Een glijcharnier staat translatie in één richting toe, (bijvoorbeeld een uithouder van een raam) waardoor deze ook slechts één graad van vrijheid heeft. (Als de as van de uithouder om zijn eigen lengte as kan draaien, dan is de verbinding in vier vrijheidsgraden beperkt.

Zes vrijheidsgraden beperkt.

Verbindingen waarbij het de bedoeling is dat alle zes de vrijheidsgraden verhinderd worden zijn starre verbindingen. Alle krachten en momenten worden dus doorgegeven. Omdat dit een zeer veel voorkomende verbinding is wordt deze hieronder nader toegelicht.

4 Starre verbindingen

Verbindingen met vrijheidsgraden worden opzettelijk toegepast, vaak moet er een bepaalde beweging van de onderdelen ten opzichte van elkaar mogelijk zijn. (Denk hierbij aan voertuigen (fiets), maar ook aan het menselijk lichaam, deze bestaat uit zeer vele scharnieren). Verbindingen waarbij alle vrijheidsgraden beperkt zijn, zijn vaak verbindingen die t.g.v. beperkingen in productieprocessen toegepast worden. Denk bij dit soort beperkingen b.v. aan:

- de grootte van het onderdeel (afmetingen zijn meestal beperkt)
- toepassing van verschillende materialen (de materialen kunnen blijkbaar niet in het zelfde proces verwerkt worden)
- beperkingen in vormen t.g.v. het productieproces (b.v. de stalen handvatten aan een stalen pan, de handvatten kunnen niet tegelijk mee uit plaat geperst worden, als het echter een gietpan is dan kunnen de handvatten wel meegegoten worden)

In de luchtvaart- en ruimtevaarttechniek wordt zo licht mogelijk geconstrueerd. Dit leidt vaak tot dunwandige constructies. Om deze reden zullen we ons hier dan ook beperken tot verbindingen van dunwandige constructies. Vele van deze verbindingen zijn echter eveneens toepasbaar voor dikwandige constructies.

Omdat deze starre verbindingen vaak noodzakelijk zijn, zijn er een groot aantal bedacht. In categorieën ondergebracht kunnen we denken aan:

- Boutverbindingen (mechanische verbinding)
- Klinkverbindingen (mechanische verbinding)
- Lijmverbindingen (chemische verbinding)
- Lasverbindingen (chemische verbinding)
- Combinaties van deze categorieën (b.v. inserts)

Als we de materialen die gebruikt worden in dunwandige plaatconstructies beschouwen dan blijkt dat bepaalde verbindingen voor bepaalde materialen toegepast worden. In het overzicht hieronder is aangegeven met plussen en minnen welke verbinding bij welk materiaal toegepast wordt.

	Metalen	Thermoplastische composieten	Thermohardende composieten
Boutverbindingen type A	-	+	+
Boutverbindingen type B	++	--	--
Klinkverbindingen	++	--	--
Lijmverbindingen	+	++	++
Lasverbindingen	++	+	--
Combinaties	-	++	++

Bij boutverbindingen type A vertonen de platen een overlap, waarin gaten geboord zijn om de bout in aan te brengen. De kracht wordt niet overgebracht door de steel van de bout maar door flenzen (ringen) die bij de kop van de bout en bij de moer zijn aangebracht. De moer moet in deze verbinding zeer beheerst aangebracht worden.

Bij boutverbindingen type B vertonen de platen eveneens overlap, waarin gaten geboord zijn om de bout in aan te brengen. De kracht wordt overgebracht door de steel van de bout. Deze ligt tegen de te verbinden onderdelen aan, en kan daardoor een kracht overbrengen.

Bij klinkverbindingen vertonen de platen een overlap, waarin gaten geboord zijn om de klinknagel in aan te brengen. De kracht wordt overgebracht door de steel van de klinknagel. Tijdens het aanbrengen van de klinknagel wordt het geboorde gat opgevuld door de klinknagel.

Bij lijmverbindingen vertonen platen een overlap, na schoonmaken van de overlap wordt lijm aangebracht en uitgehard. De kracht wordt overgebracht door de lijn.

Bij lasverbindingen worden de platen kops verbonden. De kracht wordt door de las overgebracht.

Bij combinaties kan gedacht worden aan b.v. een metalen plaatje met schroefdraad dat in een composiet wordt gelijmd. De lijn brengt de kracht over van plaatje naar de composiet, terwijl de bout die in het schroefdraad van het plaatje past de kracht naar het plaatje overbrengt.

Momenten worden meestal overgedragen door het toepassen door meerdere bouten, klinknagels, etc. Het moment wordt dan vaak gezien als een koppel, dus twee krachten met een zekere arm (de arm is b.v. de afstand tussen twee bouten).

Als we een verbinding tussen twee vlakke platen beschouwen dan kunnen we de over te brengen krachten indelen in:

Krachten in het vlak van de plaat (twee richtingen)

Krachten loodrecht op het vlak van de plaat (één richting)

Voor momenten kunnen we dit ook doen:

Momenten in het vlak van de plaat (twee richtingen, buigende momenten genoemd)

Momenten loodrecht op het vlak van de plaat (één richting, torderend moment genoemd)

In de volgende tabel wordt aangegeven welke krachten en momenten doorgeleid kunnen worden door de verschillende verbindingen.

	Kracht in het vlak	Kracht loodrecht op vlak	Moment in het vlak	Moment loodrecht op vlak
Boutverbindingen type A	++	+	++	++
Boutverbindingen type B	++	+	++	++
Klinkverbindingen	++	+	++	++
Lijmverbindingen	++	-	-	+
Lasverbindingen	++	+	+	+
Combinaties	++	+	+	+
* er moeten minimaal twee bouten of klinknagels aanwezig zijn				

Om wat meer in detail te kunnen gaan zijn de volgende acht pagina's gekopieerd uit de publicatie:

Vezelversterkte kunststoffen in constructieve toepassingen (vm 119)

Uitgegeven door de Federatie NRK en de vereniging FME-CWM.

Hoofdstuk 6

Verbindingen

6.1 Introductie

6.1.1 Waarom verbindingen

Verbindingen komen in producten om een groot aantal redenen voor. Enkele redenen zijn in tabel 6.1 weergegeven.

tabel 6.1 Enige redenen om verbindingen in producten aan te brengen met enige voorbeelden

reden	voorbeeld
verbinden van ongelijksoortige materialen	verbinding van een rotorblad aan de turbine-as (figuur 2.23 in hoofdstuk 2)
gekozen productietechniek	een doosconstructie met vlakke panelen (figuur 2.24 in hoofdstuk 2); opbouw van een brug uit standaardprofielen (figuur 2.5, 2.10 en 2.12 in hoofdstuk 2)
eindige afmetingen bij productie of transport	dakgoot (figuur 2.27 in hoofdstuk 2); biogasreactoren (figuur 2.15 in hoofdstuk 2)
opbouwen van product op locatie	loopbordes (figuur 2.11 in hoofdstuk 2)

Verbindingen moeten echter zoveel mogelijk worden vermeden, omdat ze duur zijn, de constructie zwaar maken en veelal een zwakke schakel zijn in het product. Zoals we later in dit hoofdstuk uitleggen, komt dit voornamelijk door het doorleiden van de belasting over de verbinding, wat gepaard gaat met spanningsconcentraties. Als een verbinding nodig is, maak deze dan op een plaats waar de belasting laag is en kies een geometrie die gunstig is.

6.1.2 Type verbindingen en eigenschappen

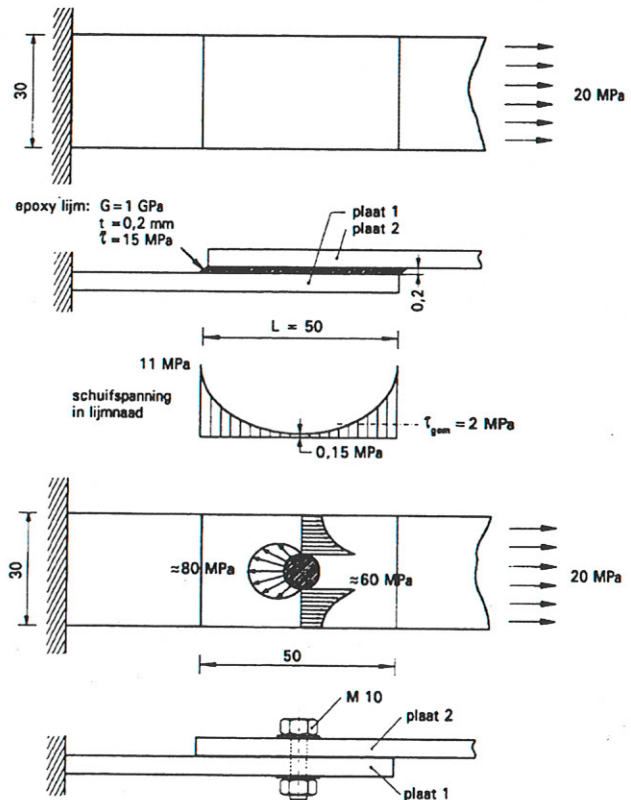
De drie belangrijkste hoofdgroepen van verbindingen voor draagconstructies zijn:

1. *Lijmverbindingen*. Hieronder vallen ook de gelamineerde verbindingen zoals toegepast in hoofdstuk 2 bij een sluis (zie figuur 2.6 en 2.8) en een jachtromp (zie figuur 2.18).
2. *Mechanische verbindingen* (bouten, schroeven, klinken, pennen) zoals bijvoorbeeld toegepast bij het bordes in figuur 2.12.
3. *Hybride lijm-/mechanische verbindingen*

Eerst wordt aan de hand van een voorbeeld een globale karakterisering van de eigenschappen gegeven. Daarna worden de belangrijkste voor- en nadelen genoemd. Verderop in dit hoofdstuk wordt elke groep verbindingstechnieken meer in detail behandeld.

Ter vergelijking van een lijm- en boutverbinding veronderstellen we dat 2 strippen glasvezelversterkt epoxy moeten worden verbonden. Figuur 6.1 geeft de geometrie van de verbinding en de relevante mechanische eigenschappen van het materiaal. De figuur laat tevens zien dat de spanningsverdeling in de strippen voor be-

de verbindingen essentieel anders is. De boutverbinding heeft spanningspieken rond de gatrand en de bout veroorzaakt een hoge vlaktedruk op het laminaat. Bij de lijmverbinding treden spanningspieken op aan de uiteinden van de lijmverbinding. In de lijmverbinding zijn de optredende spanningen veel lager dan in de boutverbinding, maar omdat composiet materiaal in verschillende richtingen sterk verschillende sterkte-eigenschappen bezit, betekent dit niet altijd dat de lijmverbinding sterker is.



figuur 6.1 Karakteristieke eigenschappen van een bout- en een lijmverbinding

Elk van de technieken kent voor- en nadelen en heeft een aantal karakteristieke kenmerken. De belangrijkste worden hieronder genoemd.

Lijmverbindingen

Voordelen

- ▶ relatief lage spanningsconcentraties: hoge sterkte; hoge vermoeiingssterkte;
- ▶ gas- en vloeistofdicht;
- ▶ gladde/onzichtbare verbinding;
- ▶ weinig last van corrosie.

Nadelen

- ▶ niet losneembaar;
- ▶ oppervlaktevoorbereiding noodzakelijk;
- ▶ moeilijk te inspecteren;
- ▶ temperatuur en vocht kunnen de sterkte beïnvloeden.

Mechanische verbindingen (bouten, klinknagels, schroeven, pennen)

Voordelen

- ▶ geen oppervlaktevoorbereiding nodig;
- ▶ losneembaar;
- ▶ eenvoudig te inspecteren.

Nadelen

- ▶ hoge spanningsconcentraties: lage sterkte, vermoeiingsgevoelig;
- ▶ gas- en vloeistofdichtheid vereist speciale maatregelen;
- ▶ corrosie van metalen bevestigingsmiddelen.

Hybride lijm-/mechanische verbindingen

Voordelen

- ▶ bouten verzorgen de klemkracht tijdens het uitharden van de lijm
- ▶ als de lijmverbinding in tact is, worden de bouten niet belast.
- ▶ de bouten fungeren als back-up voor een gefaalde lijmverbinding.

Nadelen

- ▶ veelal duurder dan lijmen of bouten, maar kan in sommige gevallen echter economisch verantwoord zijn;
- ▶ zwaar;
- ▶ onduidelijkheid over het aandeel in de belastingoverdracht van respectievelijk lijm en bouten.

6.1.3 Functionele eisen

Binnen de drie groepen verbindingen bestaat er een groot aantal uitvoeringsvormen. De keuze in het ontwerp van een verbinding wordt met name bepaald door de volgende eisen:

- ▶ de richting en grootte van de belasting;
- ▶ zowel de statische als de vermoeiingssterkte kunnen de uiteindelijke keuze bepalen;
- ▶ geometrie, materiaal en oppervlak van de te verbinden delen;
- ▶ fabricage, productie en montage-aspecten waaronder ook toolingkosten en installatietijd;
- ▶ omgevingsinvloeden, levensduur, lekdicht zijn voor gassen of vloeistoffen en corrosie;
- ▶ het uiterlijk van de verbinding: onzichtbaar, glad;
- ▶ losneembaarheid;
- ▶ betrouwbaarheid en mogelijkheid tot inspecteren;
- ▶ onderhouds-/afdoelings-eisen.

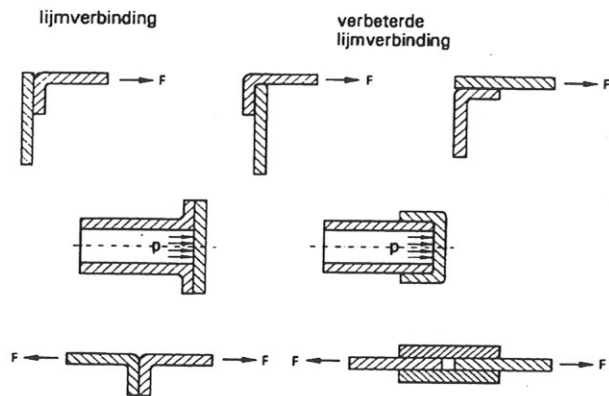
6.2 Lijmen

6.2.1 Inleiding

De lijmverbinding is een bekende, niet losneembare, verbinding. Door verbetering van de lijmen en de oppervlaktevoorbereiding methoden, alsmede meer kennis in de bedrijven, wordt lijmen steeds vaker, en met succes, toegepast. In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van aspecten waarmee rekening moet worden gehouden bij het toepassen van een lijmverbinding.

6.2.2 Principe van een lijmverbinding

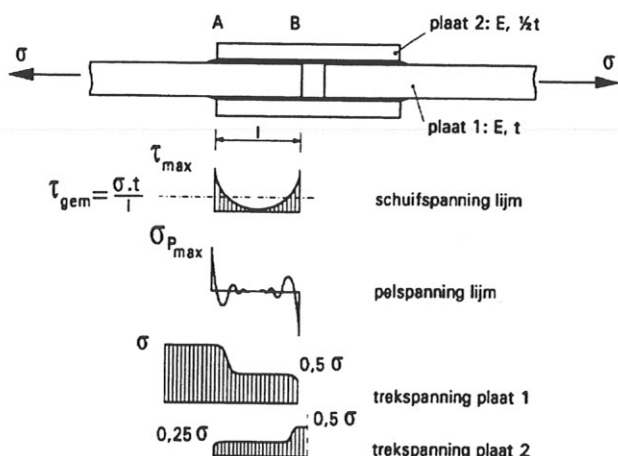
De plotseling stijfheidsovergang van de plaat naar de lapnaad geeft aanleiding tot lokaal hoge spanningen (zie figuur 6.1). De lijm, die meestal een lage elasticiteitsmodulus heeft, zorgt ervoor dat deze piekspanningen beperkt blijven. De treksterkte van lijm is gering. Om een sterke lijmverbinding te maken, moet de belasting via afschuiving worden overgedragen. Het optreden van een pelbelasting (zie ook figuur 6.3) moet worden voorkomen. Figuur 6.2 geeft enkele goede en slechte voorbeelden van lijmverbindingen.



figuur 6.2 Goede en slechte lijmverbindingsopties

Het spanningsverloop in een lijmverbinding heeft enkele karakteristieken (zie figuur 6.3):

- ▶ bij de stijfheidsovergang op plaats A wordt belasting van plaat 1 via de lijm overgedragen naar plaat 2. Op plaats A treedt in de lijm de voor de lijmverbinding karakteristieke piek in de schuifspanning op;
- ▶ op plaats B moet de resterende belasting van plaat 1 worden overgedragen naar plaat 2. Ook hier treedt een piek op in de schuifspanning;
- ▶ de gemiddelde schuifspanning in de lijm volgt direct uit het krachterevenwicht van de te verbinden platen;
- ▶ de schuifspanningverdeling heeft in de lijmnaad de karakteristieke badkuipvorm. Bij een korte lijmnaad is de minimale spanning hoger dan bij een lange lijmnaad;
- ▶ bij het overdragen van de belasting treden ook pelspanningen op. Op plaats A is dit een trekspanning en op plaats B een drukspanning.



figuur 6.3 Spanningsverloop in een lijmverbinding

6.2.3 De sterkte van een lijmverbinding

Lijm heeft, ten opzichte van de te verbinden delen, een lage elasticiteitsmodulus en een lage sterkte (zie tabel 6.2). De pelsterkte van de lijm en het composiet zijn in het algemeen beide gering. Veelal bezwijkt de lijmverbinding op plaats A of B (figuur 6.3). Afhankelijk van de materiaaleigenschappen treden de in figuur 6.4 getekende breukmechanismen op. De cohesieve breukvormen worden bepaald door de sterkte van respectievelijk de lijm en het composiet en zijn direct

tabel 6.2 Karakteristieke materiaalgrootheden

materiaal	elasticiteitsmodulus (GPa)	treksterkte (MPa)	afschuifsterkte (MPa)	pelsterkte (MPa)
glas-epoxy Quasi-isotroop	16	160	45 (interlaminair)	16
koolstof-epoxy Quasi-isotroop	70	600	45 (interlaminair)	45
epoxylijm	1,7	-	15	-
polyurethaanlijm	0,4	-	2	-

afhankelijk van de materiaalkeuze. De adhesieve breuk wordt daarentegen ook sterk bepaald door de oppervlaktevoorbehandeling. Oppervlaktevoorbehandeling is de achilleshiel van de lijmverbinding. Daarom wordt hieraan in § 6.2.7 aandacht geschonken.



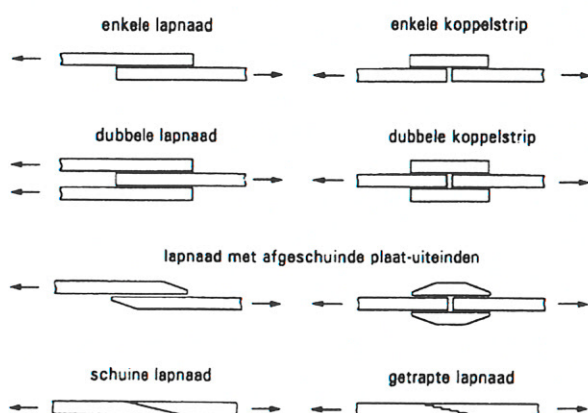
figuur 6.4 Breukmechanismen in lijmverbindingen

6.2.4 Ontwerpen van een lijmverbinding

Figuur 6.5 laat enkele veel voorkomende lijmverbindingen zien. Bij het ontwerpen van een lijmverbinding zijn er 3 belangrijke aandachtsgedebieden:

- ▶ belast de lijm niet op trek (zie figuur 6.2). Pas de verbinding zo aan dat de primaire belasting in de lijmnaad afschuiving is. De lijm mag wel op druk worden belast, maar fungeert dan meer als 'pakkingmateriaal';
- ▶ reduceer pelspanningen en piekschuifspanningen;
- ▶ voorkom kruip.

De piekspanningen bepalen in hoge mate de sterkte van de lijmverbinding. Hieronder wordt uitgelegd hoe piekspanningen kunnen worden verminderd en kruip kan worden voorkomen.



figuur 6.5 Lijmnaadgeometrieën

Reductie van piekspanningen

In figuur 6.1 en 6.3 zijn voorbeelden gegeven van lijmverbindingen en de daarin optredende spanningen. De piekspanningen worden bepaald door de excentriciteit van de krachten, de stijfheidsprong,

de dikte van de lijmnaad en de elasticiteitsmodulus van de lijm. Om enig gevoel te geven voor de grootte van deze effecten geeft tabel 6.3 enkele berekende spanningen voor de lijmnaad uit figuur 6.1 bij verandering van één van de parameters.

De piekspanningen in een lijmverbinding worden lager bij:

- ▶ een geringe stijfheidsprong in de verbinding. De grootste piekspanning treedt op bij de grootste stijfheidsprong. Kies daarom geen grote verschillen in stijfheid tussen de te verbinden platen. Zorg er ook voor dat de koppelstrippen voldoende stijfheid en sterkte hebben (zie figuur 6.3);
- ▶ een dikke lijmnaad. Voor lijmverbindingen die op sterkte worden ontworpen, is het beheersen van de lijmnaaddikte belangrijk;
- ▶ een flexibele lijm;
- ▶ verkleining van de excentriciteit. Een dubbele lapnaad geeft minder hoge pelspanningen dan een enkele lapnaad. Een schuine lapnaad heeft minder excentriciteit dan een enkele lapnaad.

De stijfheidsprong kan ook kleiner worden gemaakt door het uiteinde van de plaat af te schuiven (figuur 6.5). De schuifpiek wordt hierdoor breder en lager.

Kruip

Uit tabel 6.3 blijkt dat verlenging van de lapnaad nauwelijks invloed heeft op de piekspanningen, maar wel de minimum schuifspanning beïnvloed. Kruip kan optreden als de schuifspanning over de gehele lijmnaad hoog is. Kruip kan dus worden gereduceerd of voorkomen door de lijmnaadlengte zo te kiezen dat de minimum schuifspanning laag is. Een dikke lijmnaad en een slappe lijm zullen de kruip nadelig beïnvloeden.

Laminaatopbouw en randeffecten

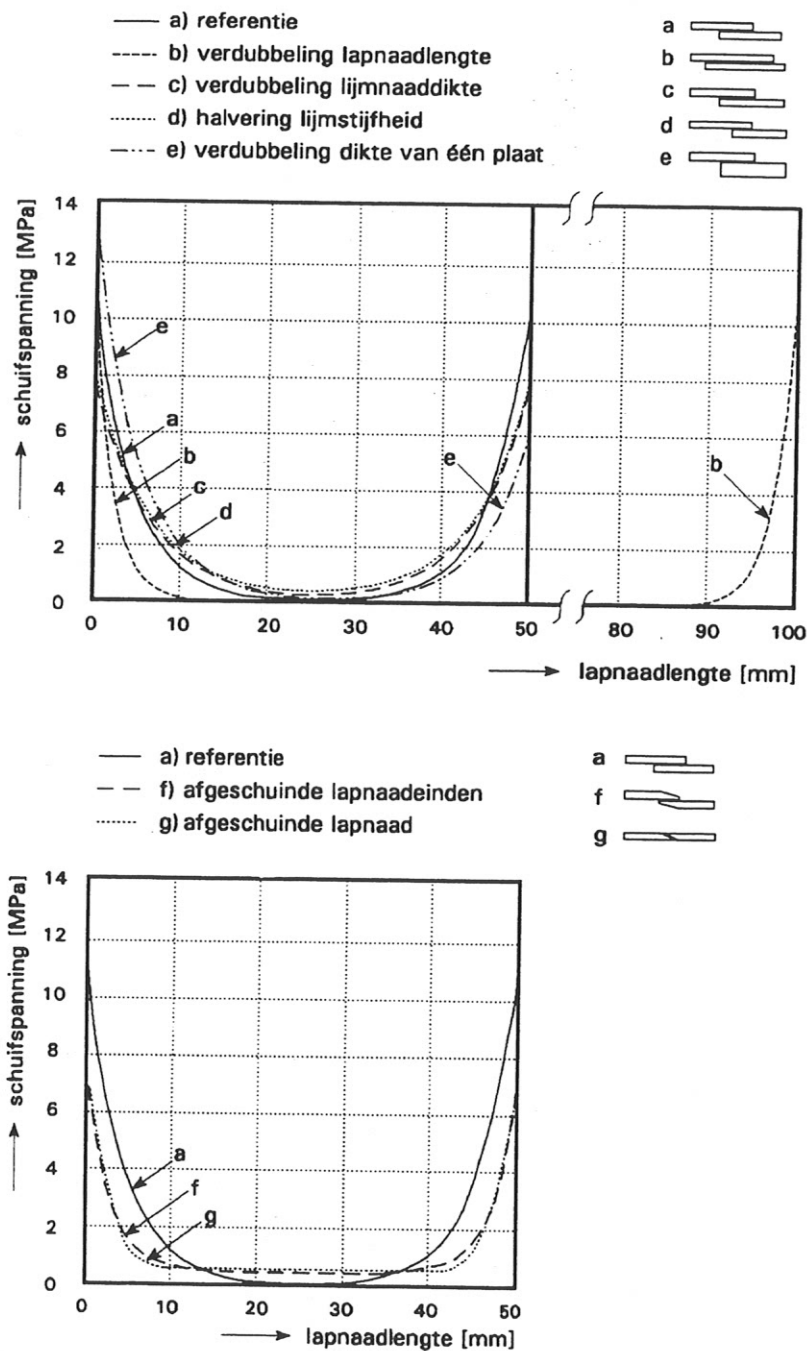
Voor een lijmverbinding is de laminaatopbouw geen overheersende ontwerpparameter. Ook sterk georiënteerde laminaten kunnen worden gelijmd. In de voorbeelden is tot nu toe gesproken over de langsstijfheid en is een oneindig brede plaat verondersteld. Bij de beëindiging van een lapnaad treden op de hoekpunten extra hoge piekspanningen op. Verschillen in dwarscontractie van de te verbinden platen zullen deze pieken verhogen. Daarom is de kans op initiatie van breuk het grootst op de hoekpunten van een lijmnaad.

6.2.5 Gelamineerde verbinding

Tot nu toe is verondersteld dat de verbinding gemaakt wordt door platen te verlijmen. Bij composieten wordt echter ook veel gebruikgemaakt van gelamineerde verbindingen. Hierbij wordt de verbinding gemaakt door niet uitgehard composiet materiaal op de te verbinden delen te lamineren en vervolgens uit te harden.

tabel 6.3 De invloed van de geometrie, lijmaaddikte en lijmsijfheid op de schuifspanningen in een single lapverbinding bij een kracht van 3 kN. De gearceerde vakken geven aan welke parameter gevarieerd is t.o.v. de referentie

effect van:	t_1 (mm)	t_2 (mm)	L (mm)	t_{lijm} (mm)	E_{lijm} (MPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{min} (MPa)	figuur- nummer
referentie enkele lapnaad	5	5	50	0,2	1000	10,9	0,2	6.6a
vergroten lapnaadlengte	5	5	100	0,2	1000	10,8	0	6.6b
vergroten lijmdikte	5	5	50	0,4	1000	7,7	0,4	6.6c
verlagen lijmsijfheid	5	5	50	0,2	500	7,7	0,4	6.6d
vergroten plaatdikte	5	10	50	0,2	1000	12,6 / 6,3	0,2	6.6e
afschuining plaatuiteinden	5	5	50	0,2	1000	7,3	0,7	6.6f
schuine lapnaad verkleint de excentriciteit	5	5	50	0,2	1000	7,3	0,7	6.6g



figuur 6.6 Invloed van de geometrie, lijmaaddikte en lijmsijfheid op de schuifspanning

Kenmerkend is dat de hars de functie vervult van lijm-materiaal en matrixmateriaal. Een gelamineerde verbinding is altijd van het type "koppelstrip". Benadrukt wordt dat de stijfheid en sterkte van de "koppelstrip" voldoende moet zijn om de belasting over te dragen. (zie figuur 6.3: trekspanning plaat 2). Gelamineerde verbindingen worden onder meer gebruikt voor het koppelen van buizen aan flenzen en het repareren van composiethuiden. Vaak worden de uiteinden van de "koppelstrip" afgeschuind.

6.2.6 Lijmsoorten

Er bestaat een veelheid van lijmsoorten die op verschillende manieren kunnen worden gerangschikt:

- ▶ thermoplasten, thermoharders;
- ▶ noodzaak tot mengen: 1- en 2-componenten lijmen. Dit heeft veelal gevolgen voor de houdbaarheid en opslagtemperatuur van de lijm;
- ▶ verwerkingsmethode van de lijm: pasta, poeder, vloeistof, kit, film;
- ▶ wijze waarop verlijming tot stand komt: verwarmen van thermoplasten; uitharden van thermoharders; aandrukken van kit en filmachtige lijmen. Binnen de diverse lijmen bestaan vervolgens variaties in uithardingsnelheid en mechanisme;
- ▶ variatie, temperatuur, chemicaliënbestendigheid, taaiheid.

De meest gebruikte constructielijmen zijn:

- ▶ epoxylijmen;
- ▶ polyurethaanlijmen;
- ▶ gemodificeerde acryllijmen;
- ▶ gemodificeerde fenollijmen.

6.2.7 Oppervlaktevoorbereiding en uitharden

Oppervlaktevoorbereiding is belangrijk voor het succesvol toepassen van een lijmverbinding, omdat dit mede bepalend is voor de hechting en is daarom een aspect dat in de materiaalkeuze en het ontwerp van de verbinding moet worden meegenomen. Oppervlaktevoorbereidingen zijn erop gericht om de mechanische verankering, de intermoleculaire krachten tussen lijm en lijmvlak of de chemische activiteit van het lijmvlak te vergroten. Hieronder wordt voor kunststoffen een opsomming gegeven van enkele veelvoorkomende behandelingen die, vaak in combinatie, worden toegepast:

- ▶ verwijderen van verontreiniging: ontvetten, verwijderen van scheidsmiddelen gebruikt in de productie van het composietdeel;
- ▶ vergroten van de mechanische verankering, verwijderen van vaste verontreiniging en het vergroten van de chemische activiteit: schuren, gritstralen;
- ▶ drogen van de constructie. Vocht kan tijdens het uitharden de hechting en de sterkte van de lijm beïnvloeden. Bij reparatie van composieten wordt aanbevolen de constructie te drogen;
- ▶ speciale behandelingen gericht op het vergroten van de oppervlakte-activiteit van het lijmvlak: plasma, corona, etsen.

Een voor kunststof veel toegepaste combinatie is: ontvetten, schuren en ontvetten.

Bij de productie van een composietproduct kan het te verlijmen vlak ook worden afgedekt met een scheurweefsel. Dit scheurweefsel, veelal voorzien van een middel dat de hechting van het weefsel aan het product minimaliseert, wordt vlak voor het verlijmen verwijderd. Zo is het lijmvlak gedurende de productie be-

schermd tegen verontreinigingen. Niettemin dient men, afhankelijk van de toepassing en de gebruikte folie, een aanvullende oppervlaktevoorbereiding te geven.

Gangbare oppervlaktevoorbereidingen voor metalen zijn:

- ▶ verwijderen van verontreiniging: ontvetten;
- ▶ vergroten van de mechanische verankering, verwijderen van vaste verontreiniging, corrosie en ongewenste oppervlaktelagen: schuren, gritstralen;
- ▶ etsen en primen van het lijmvlak. Hiermee wordt een goed hechtende tussenlaag gevormd tussen het substraat en de lijm.

Na de oppervlaktevoorbereiding moet uiteraard worden voorkomen dat het oppervlak opnieuw verontreinigt. In sommige toepassingen is het aanraken van het lijmvlak met de vingers al voldoende reden om opnieuw te ontvetten. Voorbehandelde lijmvlakken worden daarom in de regel afgedekt.

Uitharden van thermohardende lijmen

Het uitharden van thermohardende lijmen is sterk afhankelijk van de soort. De fabrikant verstrekt de verwerkingsvoorschriften. In deze publicatie volstaan we met enkele kanttekeningen. De mengverhouding bepaalt mede de sterkte van de verbinding. Nauwkeurig afwegen en goed mengen is essentieel. Ook als de fabrikant enkele grenzen voor de mengverhouding aangeeft, kan de sterkte variëren. Sommige lijmen hebben een exotherm uithardingsproces. Veelal is dit vanwege de geringe dikte van de lijmlaag geen probleem. De fabrikant geeft een minimale verwerkingstemperatuur en uithardings-temperatuur aan, eventueel met opwarmkromme. Variatie in temperatuur en uitharding heeft veelal effect op de sterkte van de verbinding.

6.3 Mechanische verbindingen

6.3.1 Inleiding

Er is een grote verscheidenheid aan mechanische bevestigingsmiddelen die gerelateerd is aan een pen-gat-verbinding: bouten, schroeven, inserts; klinken, enz. Al deze middelen hebben een aantal gelijke kenmerken en worden daarom niet apart behandeld. Andere mechanische verbindingen, zoals klikverbindingen, klemmen en drukvoegen, worden niet behandeld.

6.3.2 Uitvoeringsvormen

Bout met moer

Bij een bout met moer zijn de beide te verbinden delen voorzien van een cilindrisch gat. De aandraai-voorzieningen (moer en boutkop) liggen buiten de platen. Afhankelijk van de gewenste wijze van belastingoverdracht (zie § 6.3.3) wordt de bout onder een beperkte voorspanning gezet of wordt de bout met een zekere passing in het gat geplaatst. Zowel de boutkop als de moer zijn er in vele vormen. Bij verbindingen die op sterkte worden gedimensioneerd, is het van belang een sluitring te gebruiken.

Bout met aandraaivoorziening in de plaat

Een van de te verbinden delen is voorzien van een cilindrisch gat. Het andere deel is, of wordt tijdens het plaatsen, voorzien van schroefdraad. Als het deel waarin wordt geschroefd van metaal is, dan kan een fijne schroefdraad worden gebruikt. Voor hout en zachte materialen, zoals vezelversterkte

composieten, wordt schroefdraad met een grove spoed en grotere draadhoogte gebruikt. Bij deze materialen blijft de uittreksterkte echter laag. Om die reden worden soms inserts toegepast. Hiermee wordt tevens de losneembaarheid verbeterd.

Klinknagels

De klinknagel heeft als kenmerk dat bij het plaatsen de nagel plastisch vervormt, waardoor de steel het gat vult en er tevens een kop wordt gevormd. De vorm van de kop en de sluitkop kunnen sterk verschillen. Soms worden sluitringen gebruikt. Voor composieten zijn, met name voor vliegtuigbouwtoepassingen, speciale nagels ontwikkeld, waarmee hoge belastingen kunnen worden overgedragen.

6.3.3 Principe van de verbinding

Net als bij lijmen (zie figuur 6.2) geldt dat een verbinding op trek, druk of schuif kan worden belast. Hieronder wordt gemakshalve uitgegaan van een boutverbinding. Bij trek wordt de belasting via dwarskracht op het laminaat overgedragen op de bout en vervolgens overgedragen op het andere laminaat.

Bij een schuifbelasting zijn er twee mogelijkheden:

- ▶ de belasting wordt via vlaktedruk in het laminaat ingeleid (zie figuur 6.1). De bout heeft hiervoor niet onder voorspanning te worden geplaatst en wordt derhalve primair op afschuiving belast.
- ▶ de belasting wordt via wrijving overgebracht. Voorspanning van de bout is essentieel. In composieten wordt hiervan echter nauwelijks gebruik gemaakt, omdat in dikterichting kruip kan optreden, waardoor de sterkte van de verbinding in de loop van de tijd terugloopt.

Voorgespannen boutverbindingen worden derhalve niet behandeld. Hierna wordt daarom verondersteld dat de belasting via vlaktedruk wordt overgedragen op de laminaten. Veelal wordt deze aanname ook gedaan voor klinkverbindingen.

6.3.4 De sterkte van de verbinding

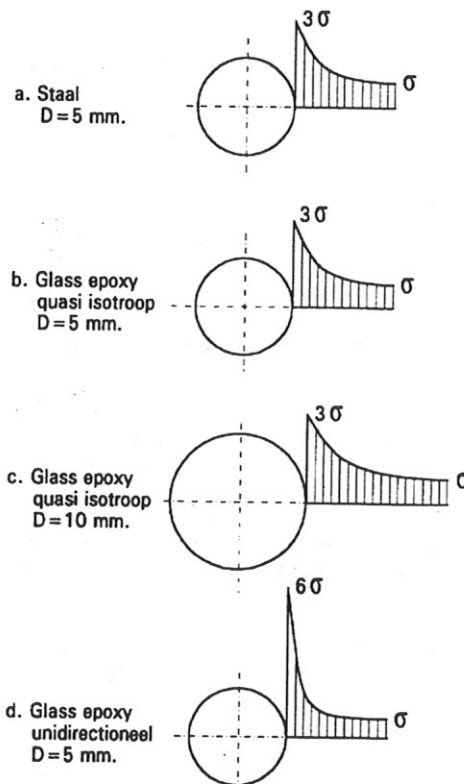
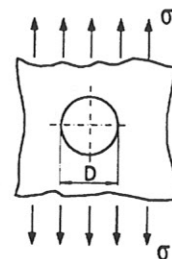
Vlaktedruk

Zoals gezegd, wordt het boutgat op vlaktedruk belast (zie figuur 6.1). De vlaktedruk is onder meer afhankelijk van de gatpassing, de laminaatopbouw en de zijdelingse ondersteuning van de gatrand (bijvoorbeeld door ringen). De toelaatbare vlaktedruk wordt experimenteel bepaald.

Spanningsconcentratie rond een gat

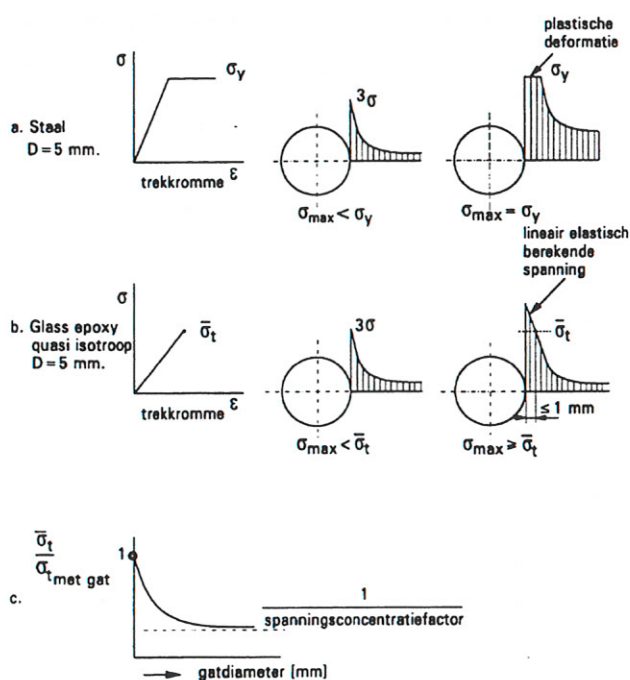
Naast vlaktedruk treedt in de boutverbinding op de minimum netto doorsnede spanningsconcentraties op. Bij composieten is het gedrag bij spanningsconcentraties anders dan bij metalen. In figuur 6.7 zijn enkele spanningsconcentraties rond een gat in een lineair elastische oneindig grote plaat getekend. Hierover de volgende opmerkingen:

- ▶ de hoogte van de spanningsconcentratie is afhankelijk van de elasticiteitsmoduli en glijdingsmodulus; vergelijk figuur 6.7a, b en d. Voor composieten varieert de spanningsconcentratiefactor tussen 1,5 en 7. Voor gangbare laminaten varieert de factor echter slechts tussen 2 en 4;
- ▶ in de meeste gevallen mag een strip met een breedte die 3 maal groter is dan de boutdiameter als een oneindig grote plaat worden benaderd. Voor smallere strippen moeten correctiefactoren worden gebruikt;
- ▶ als de gatbreedte toeneemt, neemt de breedte van de spanningspiek evenredig toe; vergelijk figuur 6.7b en c;



figuur 6.7 Lineair elastische spanningsverdeling rond een gat in een oneindig grote plaat

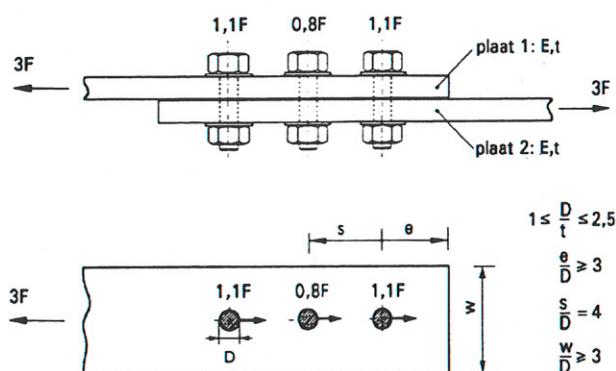
Als bij een metaal (dat plastisch kan vervormen) de piekspanning groter wordt dan de vloeigrens, dan zal de plaat bij de gatrand plastisch vervormen (zie figuur 6.8a), maar het leidt niet tot breuk. Composieten daarentegen hebben veelal een bros breukgedrag (zie figuur 6.8b). Omdat plastisch gedrag ontbreekt, zou worden verwacht dat, als de piekspanning de statische sterkte overschrijdt, het laminaat breekt. Dit blijkt niet het geval te zijn. Vezelversterkte composieten zijn in geringe mate vergevingsgezind ten aanzien van spanningsconcentraties. Een gangbaar criterium voor deze vergevingsgezindheid is, dat op een bepaalde afstand van de gatrand de lineair elastisch berekende spanning de ongestoorde sterkte niet mag overschrijden (zie figuur 6.8b). Deze afstand, in het voorbeeld 1 mm, wordt experimenteel bepaald. De afstand is afhankelijk van een groot aantal factoren en mag niet als een "materiaal-parameter" worden beschouwd. De afstand ligt echter veelal tussen de 1 en 3 mm. Uit figuur 6.7 blijkt dat de spanningspiek voor een groot gat breder is dan voor een klein gat. Het gevolg is dat een groot gat zich "brosser" gedraagt dan een klein gat. Bij grote gaten benadert de sterkte van de strip met gat de ongestoord breuksterkte gedeeld door de spanningsconcentratiefactor (zie figuur 6.8c).



figuur 6.8 Sterkte van een oneindig grote plaat met een gat

Belastingoverdracht in een rij bouten

In analogie met de schuifspanningsverdeling in een lijmnad is ook de kracht die door een bout uit een boutrij wordt overgedragen afhankelijk van de dikte en stijfheid van de te verbinden platen en de plaats van de bout in de boutrij. In figuur 6.9 wordt een voorbeeld gegeven van een strip met 3 bouten. Naarmate de boutrij langer wordt, zullen de middelste bouten minder belasting overdragen. Om deze reden worden veelal maximaal 4 bouten toegepast.



figuur 6.9 Belastingoverdracht in een boutrij

Effect van de bypass-belasting

In figuur 6.1 is aangegeven dat de boutkracht een piekspanning (60 MPa) geeft in de netto doorsnede. Bij de boutrij in figuur 6.9 passeert een deel van de stripbelasting de eerste bout. Dit wordt de bypass-belasting genoemd. Deze bypass-load geeft een extra hoge spanningsconcentratie in de netto doorsnede.

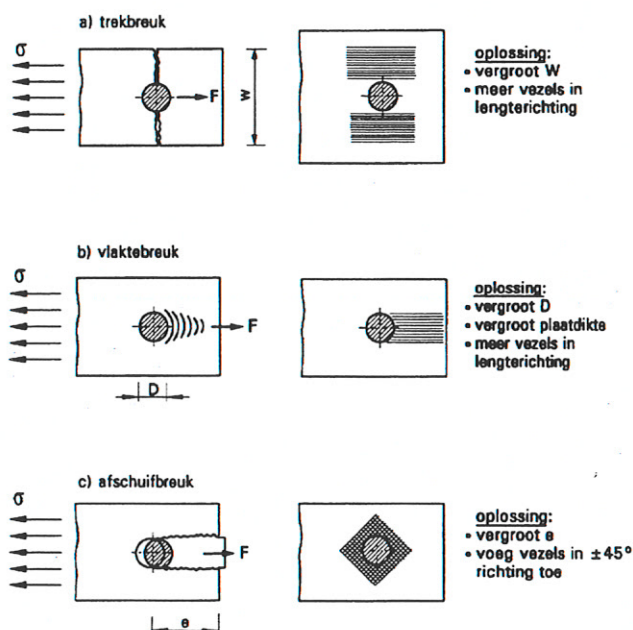
Breukvormen

In een boutverbinding kunnen de in figuur 6.10 getekende breukvormen optreden:

- trekbreuk in de netto doorsnede (zie figuur 6.10a)

ten gevolge van de spanningsconcentratie. Verbreden van de strip en het toevoegen van vezels in de lengterichting kan deze breuk voorkomen;

- bezwijken op vlaktedruk (zie figuur 6.10b). Dit is de meest gewenste breukvorm. De sterkte kan worden opgevoerd door het laminaat in dikterichting te ondersteunen. Hiervoor kunnen sluitringen worden gebruikt.
- afschuifbreuk (zie figuur 6.10c). Deze breukvorm kan worden voorkomen door de eindafstand te vergroten en vezels in $\pm 45^\circ$ -richting toe te voegen.
- vermoeiingsbreuk (bij verbindingen die statisch op vlaktedruk breken). Op het contactvlak tussen bout en gat bezwijken de vezels zeer lokaal op druk. Hierdoor gaat de boutpassing gedeeltelijk verloren en treedt herverdeling van de belasting over de boutverbinding op. Niet zelden treedt vermoeiingsbreuk in de bout of onder de verzonken boutkop op.



figuur 6.10 Breukvormen van een boutverbinding

6.3.5 Ontwerp van boutverbindingen

Op grond van de hiervoor genoemde aspecten worden de volgende ontwerpregels opgesteld:

- de boutdiameter is 1 tot 2,5 maal de plaatdikte;
- de randafstand is groter dan 3 maal de boutdiameter;
- de stripbreedte is groter dan 3 maal de boutdiameter;
- pas maximaal 4 bouten (in belastingsrichting) in de boutrij toe met een steek van 4 maal de boutdiameter;
- sterk georiënteerde laminaten worden afgeraden. Rond de bout zijn vezels in 0° , $\pm 45^\circ$ en 90° richting nodig. De opbouw 0° -45%, 90° -15% en $\pm 45^\circ$ -40% is veelal een gunstige keus;
- sluitringen verhogen de toelaatbare vlaktedruk.

6.3.6 Materiaalkeuze

De materiaalkeuze wordt, net zoals bij het verbinden van metalen, veelal bepaald door afschuifsterkte en aanhaalmoment. Voor het mechanisch verbinden van koolstofvezelversterkte kunststoffen dient echter, om-

dat koolstof elektrisch geleidend is, rekening te worden gehouden met corrosie. Het elektrisch isoleren van de verbinding, bijvoorbeeld met een dunne glasvezelversterkte composietlaag en/of het 'nat' monteren van de bout, is veelal afdoende.

6.4 *Hybride bout-lijmverbindingen*

6.4.1 *Inleiding*

In een hybride verbinding wordt gebruikgemaakt van twee verbindingstechnieken die eventueel ook zelfstandig kunnen worden gebruikt. Zo kunnen lijmverbindingen worden gecombineerd met:

- klikken;
- drukvoegen (lokaal materiaal plastisch vervormen);
- puntlassen (voor metalen en thermoplasten);
- pen-gat verbindingen, zoals bouten en klinken.

De voordelen van een hybride verbinding, ten opzichte van alleen lijmen, zijn:

- de mechanische verbinding verzorgt voor de lijm de benodigde aandrukkracht;
- verkorting van de productietijd, doordat de uitharding van de lijm plaatsvindt tijdens de volgende procesgangen. De mechanische verbinding geeft het product direct voldoende sterkte en stijfheid om het product te hanteren. De maximale sterkte wordt na uitharding verkregen;
- de lijm kan, naast het overbrengen van belasting, ook een functie hebben als vullaag voor het opheffen van fabricagetoleranties of het vloeistof- of gasdicht maken van de verbinding.

Met een hybride verbinding kunnen interessante combinaties worden gemaakt, die nadelen van een verbindingstechniek reduceert. Soms wordt om economische redenen gekozen voor een hybride techniek. Dit betreft dan veelal de productie van grote series. In civiele constructies zal als hybride verbinding vaak worden gekozen voor de combinatie lijmen en een pen-gat verbinding. Korte tijdshalve wordt hierna gesproken over de bout-lijmverbinding.

6.4.2 *Bout-lijmverbinding*

Twee algemene voordelen van de bout-lijmverbinding zijn:

- de bouten leveren de vereiste klemkracht tijdens het uitharden van de lijm;
- de bouten kunnen de effecten van pelspanningen reduceren.

Een nadeel is dat het aandeel van respectievelijk de bouten en de lijm in de belastingoverdracht onduidelijk is. Afhankelijk van de verhouding tussen de stijfheid van de lijmmaad en de bouten zal dit variëren. Daarom wordt onderscheid gemaakt tussen bout-lijmverbindingen met een dikke en een dunne lijmmaad.

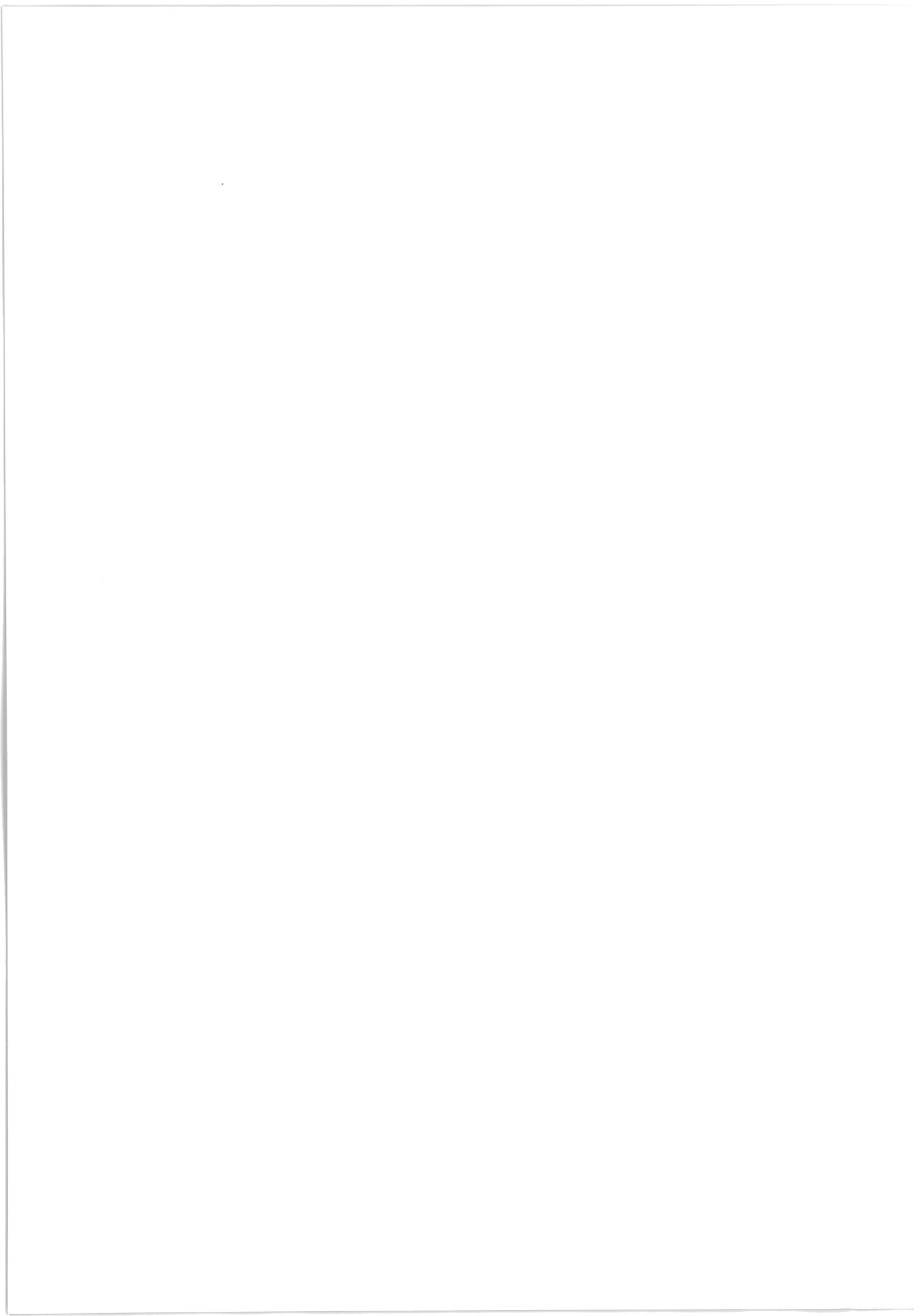
Bout-lijmverbinding met een dunne lijmmaad

De lijmverbinding is zeer stijf. Over een afstand van slechts enkele plaatdiktes wordt de belasting ingeleid (zie figuur 6.1). De bouten brengen in dit geval een te verwaarlozen belasting over. Als de lijmverbinding echter (gedeeltelijk, lokaal) faalt, zal een bout de belasting over gaan dragen. In de omgeving van deze bout zullen de pelspanningen in de lijmmaad worden onderdrukt. De bout heeft hiermee een functie in het ondervangen van de gevolgen van fouten in de oppervlaktevoorbehandeling of bij het aanbrengen van lijm. Daarnaast kunnen de

bouten hun dienst bewijzen in het overdragen van eenmalige, extreme belastingen.

Bout-lijmverbinding met een dikke lijmmaad

Een dikke, slappe lijmmaad zal de belasting over een grote lijmmaadlengte willen overdragen. De bouten kunnen in dit geval zo stijf zijn dat zij wel belasting zullen overdragen. Veelal wordt verondersteld dat de bouten de volledige belasting overdragen. De lijm fungeert in dit geval als vulmiddel of 'pakking'. Er wordt op gewezen dat de lijmverbinding echter al snel stijver is dan de boutverbinding.



Deel IV

Stromingsleer

ir. J.A. Melkert

College Aerodynamica

ir. J.A. Melkert

1. Inleiding
2. Het vliegtuig en zijn onderdelen
3. Het vleugelprofiel
4. De wet van Bernoulli
5. Stromingskarakteristieken
6. Vleugelprofielen en vlakke platen
7. Invalshoek en draagkrachtscoëfficiënt
8. Vormgeving en stroomlijnen
9. Stroming in een raket
10. Huiswerk