

Toepassing van die eindige-elementmetode vir die strukturele ontwerp van die magnete, vakuumkaners en resonators van 'n oopsektorsiklotron

J.A. v. B. Strasheim en R.J. du Preez

Instituut vir Struktuuringenieurswese, Universiteit van Stellenbosch

UITTREKSEL

Die sentrale rol wat eindige-elementontleding in die struktuurontwerp van die magnete, vakuumkaners en resonators van 'n 200MeV oopsektorsiklotronfasiliteit vir die Nasionale Versnellersentrum by Faure, Suid-Afrika, gespeel het, word bespreek.

Die ontwerp het gegroei om 'n reeks konsepuitlegte van die strukture wat daarby betrokke is. Eindige-elementmodelle van 'n magneet, 'n magneetvakuumkaner, een van 'n resonator, drie van 'n resonatorvakuumkaner en drie van 'n valleivakuumkaner is tot op datum opgestel.

Die strukture word tipies aan relatief hoë kragte, van magnetiese en lugdrukvoorsprong, onderwerp.

Absolute en relatiewe verplasingbeperkingskriteria was die beherende faktore in die ontwerp, en die resultate wat verkry is van die eerste eindige-elementmodel van die resonator en vakuumkaner, het tot die strukturele uitleg waarop die tweede model gegrond is, gelei. 'n Verdere ontleding het aangetoon dat die laasgenoemde struktuur aan die ontwerp kriteria voldoen.

'n Derde model van die resonatorvakuumkaner is ontleed toe die vervaardigers detailontwerpveranderinge aangevra het om die vervaardigingsproses te vereenvoudig en te bespoedig. Die ontleding het getoon dat die struktuur in sy gewysigde vorm nog aan die ontwerp kriteria voldoen het.

Die ASKA eindige-elementprogramstelsel is deurgaans gebruik en voor- en naverwerkingsprogramme is intensief benut om die modeldata na te gaan en om die resultate te interpreteer.

Detail van die struktuur uitleg, materiale en belastings, eindige-elementmodel uitleg en parameters, ontledingswerk en die resultate wat verkry is, word in hierdie navorsingsbrief aangebied.

ABSTRACT

Application of the finite element method in the structural design of the main magnets, vacuum chambers and resonators of an open sector cyclotron

The central role played by finite element analysis in the structural design of the main magnets, vacuum chamber and resonator of a 200 MeV open sector cyclotron facility for the National Accelerator Centre at Faure, South Africa, is described.

The design evolved through a series of conceptual layouts of the structures involved. A finite element model of a main magnet, a main magnet vacuum chamber, one of a resonator, three of a resonator vacuum chamber and three of a valley vacuum chamber have been drawn up so far.

The structures are typically subjected to large magnetic and air-pressure related forces.

Absolute and relative displacement limit criteria were the controlling factors for the design and results obtained in the first model of the resonator and vacuum chamber led to the second structural layout which conformed to the design criteria.

A third model of the resonator vacuum chamber was analysed when the manufactures called for detail design changes to expedite the manufacturing process. The analysis proved that the design criteria still met with the alterations made to the structure as required.

The ASKA finite-element programming system was used throughout and extensive use of pre- and post-processors were made in the validation of the data and the interpretation of the results.

Details of the structural geometry, material and load specification, finite-element model layout and parameters, analysis effort and results obtained are presented in this paper.

1. INLEIDING

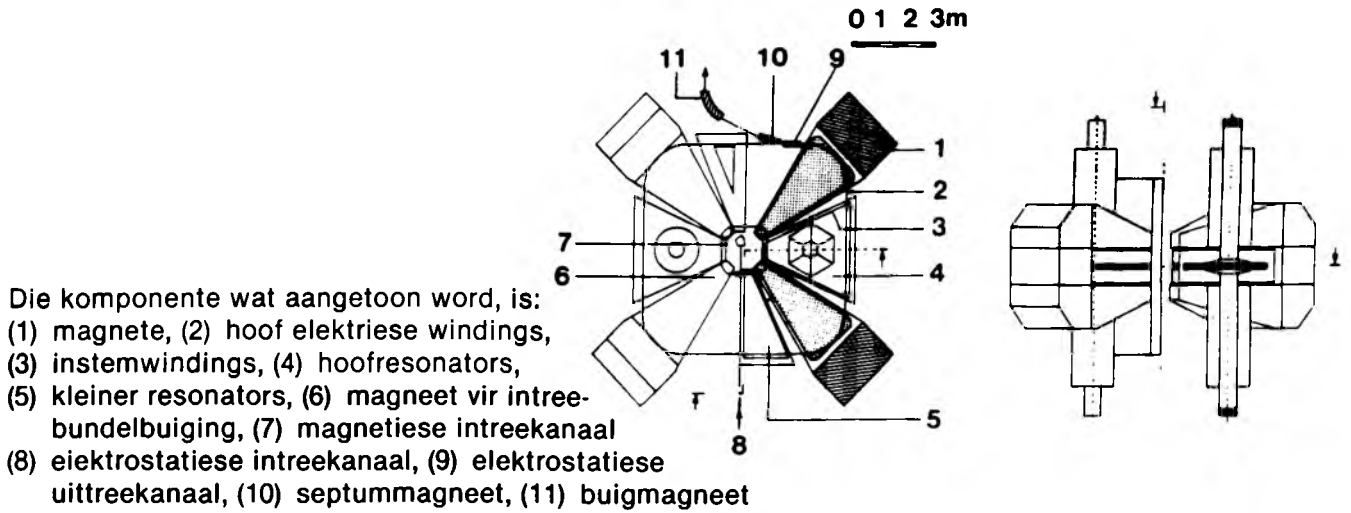
Die ontleding van die gedrag van die strukturele onderdele van 'n oopsektorsiklotron word in hierdie artikel behandel.

Die siklotron is die belangrikste onderdeel van die Nasionale Versnellersentrum (N.V.S.) van die Wetenskaplike en Nywerheidsnavorsingsraad (W.N.N.R.) wat op die oomblik in aanbou is by Faure, Suid-Afrika.

Die uitleg van die belangrikste struktuuronderdele waaruit die versneller opgebou kan word, word in figuur 1.1 aangedui. Die onderdeel is:

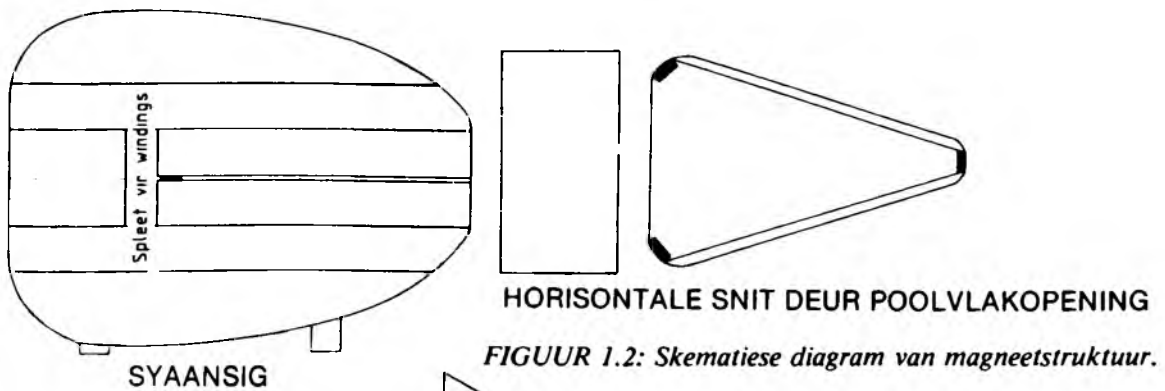
- (a) Vier magnete (Figuur 1.2)
- (b) Vier magneetvakuumkaners (Figuur 1.3)
- (c) Twee resonators (Figuur 1.4)
- (d) Twee resonatorvakuumkaners (Figuur 1.5)
- (e) Twee valleivakuumkaners.

Eindige-elementontledings van modelle van som-



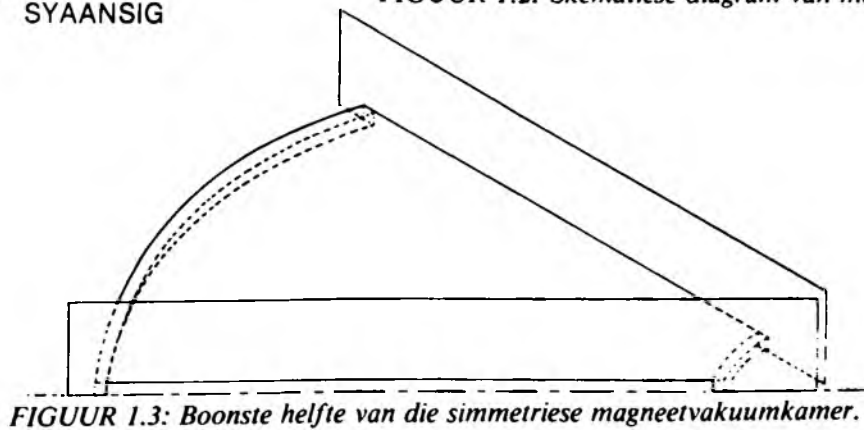
Die komponente wat aangetoon word, is:
 (1) magnete, (2) hoof elektriese windings,
 (3) instemwindings, (4) hoofresonators,
 (5) kleiner resonators, (6) magneet vir intree-
 bundelbuiging, (7) magnetiese intreekanaal
 (8) elektrostatiese intreekanaal, (9) elektrostatiese
 uittrekanaal, (10) septummagneet, (11) buigmagneet

FIGUUR 1.1: Syaansig van die oopsektorsiklotron (figuur regs) en booaansig (figuur links).

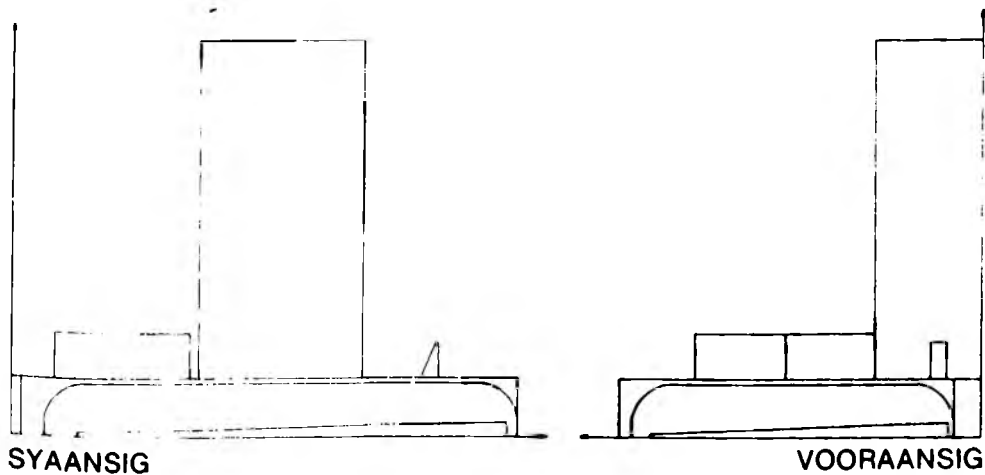


HORISONTALE SNIT DEUR POOLVLAKOPENING

FIGUUR 1.2: Skematiese diagram van magneetstruktuur.



FIGUUR 1.3: Boonste helfte van die simmetriese magneetvakuunkamer.



SYAANSIG

VOORAANSIG

FIGUUR 1.4: Die resonatorvakuunkamersubstrukture.

mige van die konseptontwerpe van bogenoemde strukture is deur die Instituut vir Struktuuringeniërsweese (I.S.I.) aan die Universiteit van Stellenbosch onderneem.

'n Kort beskrywing van elke struktuur, die ontwerp kriteria, materiaaleienskappe en belastings word gegee. Inligting in verband met die eindige-elementmodelle, ontledingstegnieke, modelbelastings en die resultate verkry, word verskaf.

2. BESKRYWING VAN DIE STRUKTURE

2.1 Die magnete

Een van die vier driedimensionele soliede gietys-termagnete word in figuur 1.2 getoon.

Unieke geometriese eienskappe sluit in: die keep vir die elektriese windings, die gaping tussen die poolvlakke in die middel, die poolvlakspasieerblokke en die drie voetstukke waarop 'n magneet staan.

Die magnete bestaan uit agt onafhanklik gegote en gemasjineerde onderdele wat bo-op mekaar met horisontale penne bevestig word, wat in groewe pas wat in die oppervlakke van die individuele blokke gesny word.

Die totale massa van een magneet bedra ongeveer 360 ton.

2.2 Die magneetvakuumkamers

Hierdie strukture word in die gapings tussen die poolvlakke van die magnete bevestig.

Figuur 1.3 toon die detail van 'n tipiese kamer aan.

Die struktuur is simmetries om 'n horisontale vlak en bestaan uit twee parallelle, sektorvormige, horisontale 8 mm dik plate. Die plate word verstyf met vertikale webbe op die kante en ringbalke op die punte en word met 18 mm-boute aan die poolvlakke van die magnete vasgeheg. Die vertikale webbe word ook aan die magnete vasgeheg met 18 mm-boute.

2.3 Die resonators

Die strukture bestaan uit 'n koperbinnegeleier wat aan die buitegeleier met twee horisontale ondersteunings (spinnkoppe) by elke punt vasgeheg word.

Figuur 1.4 toon die detail van die verskeie onderdele van so 'n struktuur aan.

Die diktes van die koperplate wissel van 20 tot 25 en 32 mm.

Die binnegeleier ondersteun die delta. Laasgenoemde is 'n struktuur wat simmetries om 'n vertikale vlak geleë is en een helfte bestaan uit twee horisontale driehoekige plate wat met die vertikale deltamuurplate aan mekaar geheg is.

Die deltamuurplate strek om die hele omtrek van die deltaplate en bevat 'n spleetvormige opening vir die partikelbundel. Die binnegeleier is aan die vier horisontale deltaplate gekoppel.

2.4 Die vakuumkamers van die resonators

Die strukture waarna hier verwys word, word in figuur 1.4 getoon. 'n Kamer het die vorm van 'n trapesiumvormige vlekvrystaalhouer wat die resonatordelta omhul. Die koperbuis van die buitegeleier word aan die vakuumkamer geheg. Die struktuur is

simmetries om 'n horisontale en vertikale vlak geleë.

Die dikte van die vlekvrystaalplate wat vir die konstruksie gebruik word, wissel van 30 tot 50 mm en die koperplate is 32 mm dik.

Bo-op die wyer agterste gedeelte van die vakuumkamer word 'n houër vir die kapasitorplate aangetref.

Ondersteuning in die vertikale rigting word by drie voetstukblokke en in die horisontale rigting by 'n spesiale aanhegtingstuk verskaf.

Die binne- en buitegeleiers word bo en onder meganies aan mekaar verbind met 'n spinnkopvormige struktuur met 'n balgafsluiting. Langs die syweb van die kamer word 'n vakuumafdigting van vlekvrystaal en neoprene aangebring, wat aan die balgafsluiting tussen die vakuumkamer en die resonatorvakuumkamer geheg is.

Die lang horisontale gleuf in die syweb dien as 'n opening waardeur die versnelde partikels beweeg. Verskeie ander openinge in die struktuur word verskaf vir vakuumpompe, die instemkapasitor en afgeslote openinge vir toegang tot die ruimte wat die struktuur omsluit.

2.5 Wysigings aan die ontwerp van die vakuumkamer

Die eerste ontleding van die vakuumkamer en die resonator het aangetoon dat vertikale verplasinge van tot 4 mm langs die syweb onder lugdrukbelasting as gevolg van die vakuüm binne die houër voorkom. Hierdie verplasing is as onaanvaarbaar beskou en wysigings is aan die ontwerp van die struktuur aangebring.

Die materiaal van die kamer is van koper na vlekvrystaal verander, met 'n koperbekleding aan die binnekant, en die plaatdiktes is vergroot.

'n Verstywer is aan die agterkant van die struktuur aangebring om die verplasing loodreg op die agterste plaat te beperk.

Die afmetings van die syweb is verander om balgafsluiting se afdigtingseël te huisves en om voorsiening te maak vir lippe wat deur die gleuf steek. 'n Verdere wysiging is aan die gleuf se vorm gemaak om die vervaardiging daarvan te vereenvoudig.

'n Nuwe metode van ondersteuning is ingevoer en die struktuur is aan die bo- en onderkant by die voorpunt ondersteun. Die resonatordelta en die binnegeleier word nou onafhanklik vanaf die bokant van die buitegeleier ondersteun.

Groot openinge vir vakuumpompe en die instemkapasitore is aangebring.

3. ONTWERPKRITERIA

3.1 Die magnete

Die struktuurontwerpbeperkings wat op die magnete betrekking het, is die volgende:

- 'n Beperkte mate van verplasing en distorsie van die poolvlakke van die magnete word toegelaat.
- Maksimum druk- en trekspannings in die gietblokke van die magnete word gespesifiseer.
- Die individuele gietblokke mag nie oor mekaar

gly of van mekaar skei wanneer die magnete belas word nie.

Kriterium (a) spruit voort uit die vereiste dat die magnetiese vloed eweredig oor die gaping tussen die poolvlakke versprei moet wees. Die boonste en onderste poolvlakke word deur spasieringsblokke geskei en spanningskonsentrasies kan in die omgewing van die blokke in die gietstukke voorkom. Die individuele blokke waaruit die magnete bestaan, word deur gravitasie in posisie gehou, en die magnetiese krag werk loodreg op die skeidingsvlakke tussen die blokke in, terwyl wrywingskragte parallel aan die skeidingsvlakke optree.

3.2 Die magneetvakuümkamer

Die ontwerp kriteria wat hier van toepassing is, is as volg:

- Die kamer moet nêrens meer as 1,5 mm deflekter wanneer dit onderhewig is aan atmosferiese druk (vakuüm effek) en die eie gewig nie.
- Die trek- en drukspannings in die vlekvrystaalplate moet nie 160 MPa oorskry nie.
- Die trek- en drukspannings in die vashegtingsboute moet nie 160 MPa oorskry nie.
- Oormatige skuifspannings by die aansluiting tussen die plate en die vashegtingsboute moet vermy word.
- Die drukspannings in die vertikale webbe moet sodanig wees dat knik nie voorkom nie.

3.3 Die resonator

Die belangrikste ontwerp kriteria vir die resonatorbinnegeleier en die delta dek die absolute en relatiewe verplasing van die hele struktuur en dele van die struktuur. Die struktuur word baie akkuraat opgestel om uniforme elektriese velde, waar nodig, te verseker. Verplasing van meer as 2 tot 3 mm onder bedryfstoeleende kan die werkverrigting van die siklotron benadeel. Areas waar die trek- en drukspannings 60 tot 80 MPa en skuifspannings 40 tot 50 MPa oorskry, moes aangedui word.

3.4 Die resonatorvakuümkamer

Die ontwerp kriteria vir die resonatorvakuümkamer verwys na die beperking van die verplasing van die struktuur in sekere areas.

Die vertikale verplasing langs die gleuf moet nie 2,5 mm onder bedryfstoeleende oorskry nie. Die horisontale verplasing van die syweb, loodreg op die vertikale vlak waarin dit lê, moet tot 2 tot 3 mm beperk word, om te verseker dat die spesiale balgafdigting tussen die resonator en die magneetvakuümkamer dig bly.

Die ontleding moes ook 'n raming lewer van die beweging van die struktuur as gevolg van sy eie gewig.

Die beweging van die ondersteuningstuk en die voorste plaat wanneer atmosferiese druk en die druk in die balgseël inwerk, moes bepaal word.

Reaksiekragte by die ondersteuningspunte en maksimum spannings is ook benodig.

4. MATERIAALDATA VAN DIE STRUKTUURONDERDELE

4.1 Die magnete

Die magnete word gegiet uit 'n spesiale tipe gietyster met die eienskappe:

Elastisiteitsmodulus – 212 GPa

Poissonverhouding – 0,284

Gewigsdigtheid – 76,82 kN/m³

Die spaseerblokke in die bundelopening word uit brons vervaardig. Die materiaaleienskappe lees:

Elastisiteitsmodulus – 101 GPa

Poissonverhouding – 0,333

Gewigsdigtheid – 76,82 kN/m³

4.2 Die magneetvakuümkamer

Die kamer word van vlekvrystaalplate met die onderstaande eienskappe vervaardig:

Elastisiteitsmodulus – 200 GPa

Poissonverhouding – 0,300

Gewigsdigtheid – 76,52 kN/m³

4.3 Die resonator

Oorspronklik sou die resonator, soos dit ontwerp was, van koperplate met die volgende eienskappe vervaardig word:

Elastisiteitsmodulus – 118 GPa

Poissonverhouding – 0,330

Gewigsdigtheid – 87,20 kN/m³

4.4 Die resonatorvakuümkamer

Die resonatorvakuümkamer word vervaardig van vlekvrystaalplate met die eienskappe:

Elastisiteitsmodules – 205 GPa

Poissonverhouding – 0,250

Gewigsdigtheid – 78,48 kN/m³

Die buitegeleiergedeelte wat aan die resonatorvakuümkamer vasgeheg word, bestaan uit koperplate met die eienskappe:

Elastisiteitsmodulus – 118 GPa

Poissonverhouding – 0,330

Gewigsdigtheid – 87,20 kN/m³

5. BELASTINGS WAT OP DIE STRUKTURE INWERK

5.1 Die magnete

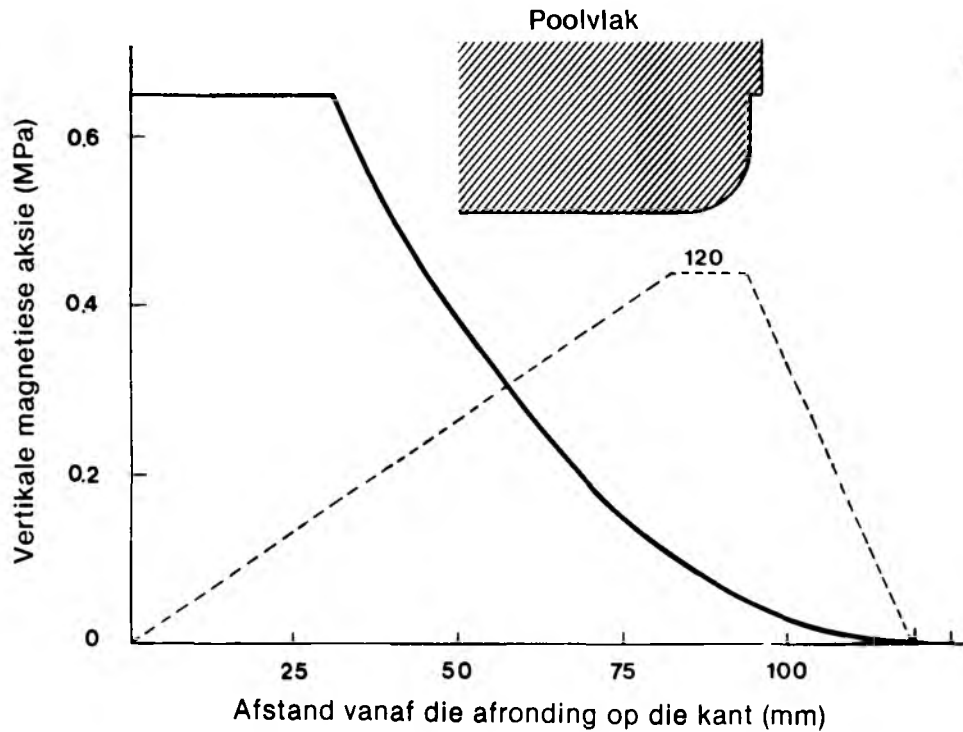
Die belastings wat in die ontleding van die magneetstruktuur 'n rol gespeel het, was:

Die materiaalgewig van die magnete van 76,82 kN/m³. Die totale gewig van een magneet is ongeveer 360 ton.

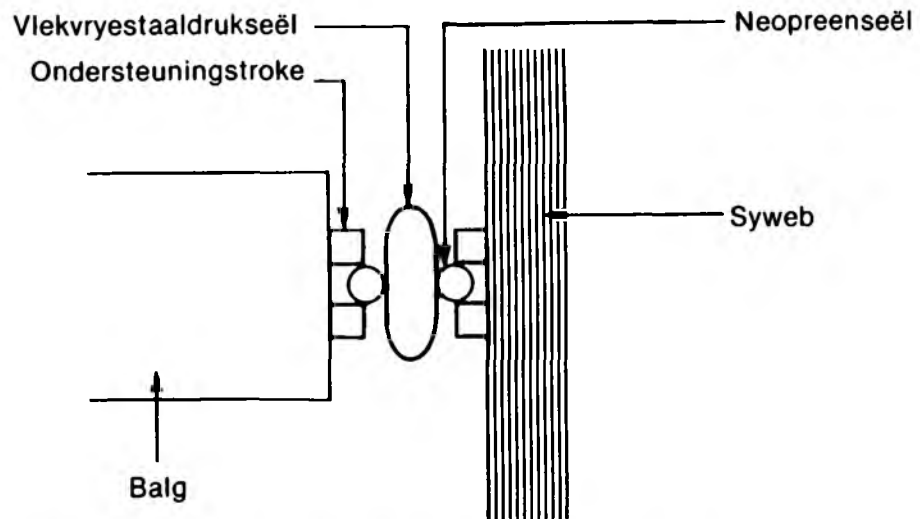
Die gewig van die vakuümkamers, wat met 'n reeks vashegtingsboute aan die poolvlakke van die magnete vasgeheg is, bedra 0,62 kN/m².

Die lugdruk op die vakuümkamers as gevolg van die vakuüm daarin. Laasgenoemde druk van 100 kPa werk vertikaal afwaarts op die boonste poolvlak en vertikaal opwaarts op die onderste poolvlak in en word deur die vashegtingsboute na die poolvlak oorgedra.

Die gewig van die elektriese windings wat aan die magnete vasgeheg word, lewer 'n krag van



FIGUUR 5.1: Vloedverspreiding by die rand van die magneet.



FIGUUR 5.2: Snit deur die balgseël (seël nie onder druk nie).

0,656 kN/m³ langs die lyn waar die windings vasgeheg word.

Die magnetiese vloed tussen die poolvlakke met 'n uniforme digtheid van 1,275 Wb/m² sal 'n aantrekkingsaksie van 0,647 MPa tussen die vlakke veroorsaak. By die afgeronde kante van die poolvlak vind 'n geleidelike afname in die aantrekkings plaas, soos in figuur 5.1 getoon.

5.2 Die magneetvakuümkamer

Die belastings wat op die magneetvakuümkamer aangewend word, bestaan uit die gewig van die struktuur van 0,624 kN/m² en die lugdruk op die kamer van 100 kPa.

5.3 Die resonator

Die belastings waaraan die resonator onderhewig

is, sluit die gewig van die struktuur van $87,20 \text{ kN/m}^3$ en die lugdruk van 100 kPa op die binnekant van die binnegeleier en die flens aan die onderkant van die binnegeleier in.

5.4 Die resonatorvakuumkamer

Die belastings wat op die resonatorvakuumkamer aangewend word, is die volgende:

Tydens die bedryf van die resonator word 'n druk wat absolute vakuümtoestande benader, binne die vakuümkamer bewerkstellig. Hierdie situasie word gesimuleer deur 'n verspreide las van $101,325 \text{ kPa}$ (een standaardatmosfeer) op al die oppervlakte van die plate van die struktuur wat aan die atmosfeer blootgestel is, aan te wend. 'n Krag van $9,81 \text{ kN/m}$ word langs die lyn waar die spesiale balgseël (figuur 5.2) vasgeheg word, aan die syflens van die kamer aangewend. Die seël word benodig om die kontinuïteit van die vakuümhouer tussen die valleivakuüm-kamers, die resonatorvakuümkamers en die magneetvakuümkamers te bewerkstellig. Die gewig van die materiale sluit die vlekvrystaalplate ($78,48 \text{ kN/m}^3$), die koperplate ($87,20 \text{ kN/m}^3$) en die gewig van die water in die hidrouliese verkoelingsbane van die buitegeleier ($9,81 \text{ kN/m}^3$) in. 'n Vakuümpomp met 'n gewig van $9,81 \text{ kN}$ en 'n instemkapsitor met 'n gewig van $0,235 \text{ kN}$, word aan die resonatorvakuümkamer geheg. Om die effek van verstelkragte te bepaal wat dalk nodig sou wees om die geometrie van die struktuur in sy vervormde toestand te wysig, is 'n eenheidslas by 'n punt naby die middel van die syflens op die rant van die boonste plaat aangewend.

6. EINDIGE-ELEMENTONTLEDINGSMETODIEK

6.1 Apparaatuur

Die apparaatuur wat gebruik is vir die eindige-elementontledingswerk wat in hierdie artikel beskryf word, het hoofsaaklik bestaan uit 'n minirekenaar wat aan 'n hoofraamrekenaar gekoppel is. Die hoofraamrekenaar is vir die 'syferbreek'-werk benut, terwyl die minirekenaar vir al die voor- en naverwerking en ander redaksie- en grafiese werk gebruik is.

Die masjiene ter sprake was 'n UNIVAC 1110 hoofraam en 'n Hewlett Packard Serie 3000 mini, wat later met 'n VAX 11/780 vervang is. Die mini is aan 'n reeks alfanumeriese en grafiese terminale en ook 'n klein en groot stipper en lyndrukker gekoppel. 'n Terminaal na die hoofraam was beskikbaar om die verloop van die take wat van die mini versend is, te monitor.

6.2 Programmatuur

Die ASKA-eindige-elementstelsel wat by die Universiteit van Stuttgart ontwikkel is, is deurgaans in die ontledingswerk gebruik.¹ Laasgenoemde programstelsel is geïmplementeer om die take in fases deur te voer soos elders beskryf.^{2,3}

'n Reeks voor- en naverwerkers om koördinaatversyfering,⁴ grafiese maasverifikasie,⁵ die trek van lyngrafieke⁶ en kontoergrafieke van die resultate⁷ moontlik te maak, is by die I.S.I. ontwikkel.

6.3 Eienskappe van die eindige-elementmodelle

Die fasebenadering tot die rekenaartake is gekoppel aan die substruktuurontledingskonsep van die modelle in die vorm van subnette wat deur 'n hoofnet aan mekaar gekoppel word. Die implementasie van die ASKA-stelsel maak op 'n elegante manier vir laasgenoemde werkmetode voorsiening en beperk die take wat op die hoofraamrekenaar uitgevoer word tot beheerbare omvang.

Die subnetdupliseringsfasiliteit van die ASKA-stelsel is deurgaans benut.

Die spesifiseer van materiaalipes, plaatdiktes en verspreide elementoppervlak- en volumebelastings, is deur die elementgroepering wat in ASKA beskikbaar is, grootliks vergemaklik.

7. EINDIGE-ELEMENTMODELLE VAN DIE STRUKTURE

7.1 Die magnete

Die simmetrie van die magneetstruktuur om 'n sentrale vertikale as het die opbou van 'n eindige-elementmodel van een helfte van die struktuur moontlik gemaak. Die model het uit 12 subnette bestaan, soos in tabel 7.1 en figuur 7.1 aangetoon word.

Drie tipes drie-dimensionele eindige elemente is gebruik om die model van die struktuur te spesifiseer. Die ASKA HEXE8, PENTA6 en TET4 elemente is gebruik (figuur 7.2). Die elemente het drie translasië-vryheidsgrade by elke knooppunt.

Alhoewel die struktuur basies simmetries om 'n sentrale horisontale vlak is, kon die subnetsupliseerfasiliteit van die ASKA-program nie benut word nie. Die styfheidsmatrikse van subnette wat spieëlbeelde van mekaar is, is nie direkte duplikate van mekaar nie. Die hoeveelheid datavoorbereidingswerk is egter dramaties verminder deur dieselfde topologiese beskrywing, met verskillende stelle koördinate, vir subnette van soortgelyke onderdele te gebruik.

Die voorste en agterste voetstukke is deur enkele HEXE8-elemente voorgestel terwyl die voorste en agterste blokke tussen die poolvlakke deur respektiewelik een en twee HEXE8-elemente voorgestel is.

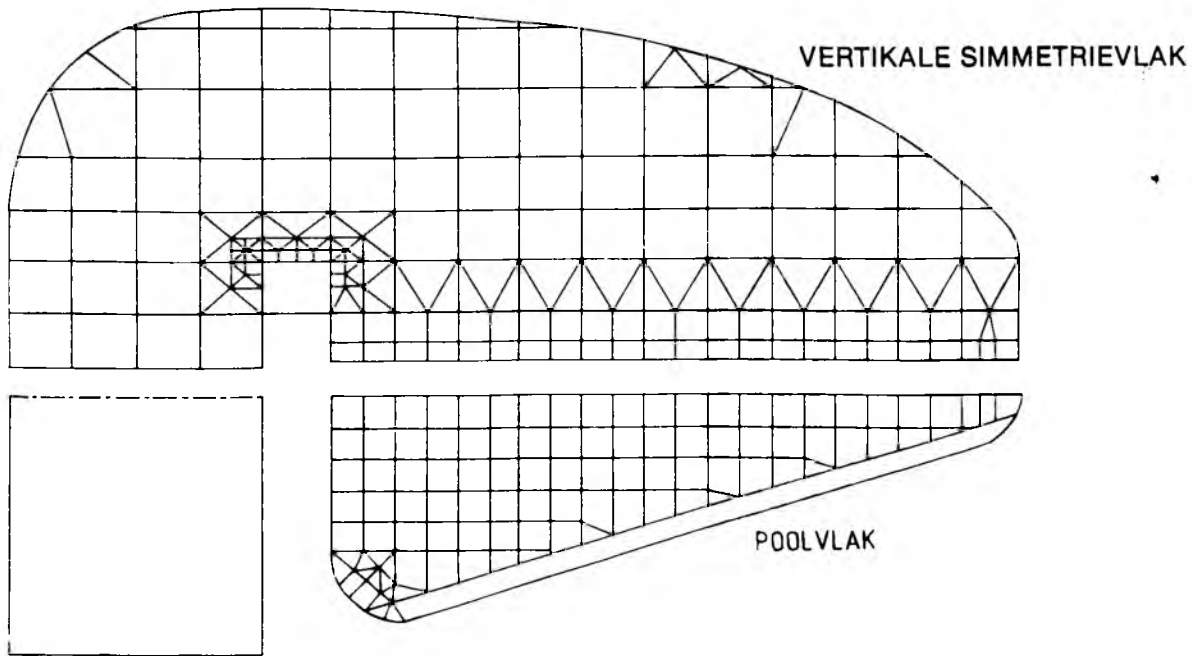
7.2 Die magneetvakuümkamer

Slegs een helfte van hierdie simmetriese struktuur is gemodelleer. Die subnetdupliseerfasiliteit is grootliks benut en van die 28 subnette waaruit die model bestaan het, was 18 duplikate van vooraf gedefinieerde nette.

Die TRIB3-plaatelement wat in die ASKA-stelsel ingesluit is, is gebruik om die horisontale en vertikale plate te idealiseer (figuur 7.4). Die ondersteuningsboute van die vertikale flens is met BECOS-balkelemente voorgestel. Die detail van die subnette word in tabel 7.2 en figuur 7.3 getoon.

7.3 Die resonator

Die ontwerp van die resonator en die resonatorvakuümkamer is heeltemal gewysig nadat die model wat hier beskryf word, ontleed is. Die model het beide die resonator en die vakuümkamer ingesluit. Die



FIGUUR 7.1: Eindige-elementmaas wat op die poolvlak en vertikale simmetrie-as van die magneet gebruik is.

FIGUUR 7.2: Driedimensionele soliede elemente.

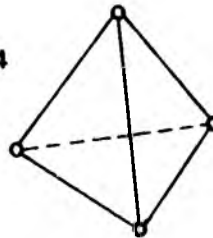
BESKRYWING van ELEMENT

Tipe: Soliede tetraëder

Aantal knooppunte: 4

Vryheidsgrade: 3 per knooppunt

TET4



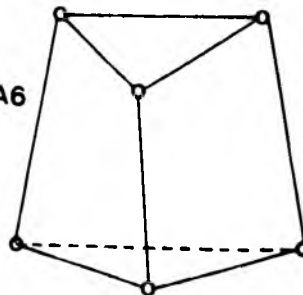
BESKRYWING van ELEMENT

Tipe: Soliede pentaheder

Aantal knooppunte: 6

Vryheidsgrade: 3 per knooppunt

PENTA6



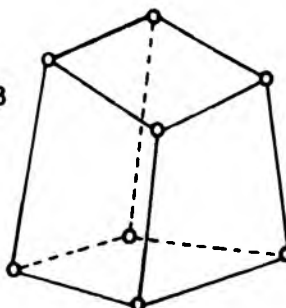
BESKRYWING van ELEMENT

Tipe: Soliede hekshaëder

Aantal knooppunte: 8

Vryheidsgrade: 3 per knooppunt

HEXE8



TABEL 7.1
DETAIL VAN DIE EINDIGE-ELEMENTMODEL VAN DIE MAGNETE

Subnetinligting					
Nr.	Beskrywing	Aantal			
		Knooppunte	Elemente	Vryheidsgrade	Skakelpunte
1	Boonste driehoekige poolvlak	975	825	920	208
2	Middelste gedeelte tussen boonste en poolvlak	600	841	823	196
3	Boonste deel van magneet	230	104	274	84
4	Boonste blok by agterkant van die magneet	237	260	222	88
5	Onderste blok by agterkant van die magneet	237	260	222	88
6	Onderste deel van die magneet	230	104	274	84
7	Middelste gedeelte tussen onderkant en poolvlak	600	841	823	196
8	Onderste driehoekige poolvlak	975	825	920	208
9	Agterste voetstuk	8	1	0	4
10	Voorste voetstuk	8	1	0	4
11	Agterste blok in opening	12	1	0	12
12	Voorste blok in opening	8	1	0	8
	Totaal	4120	4065	4478	1180
Hoofnetinligting					
Nr.	Beskrywing	Aantal knooppunte		Vryheidsgrade	
101	Hoofnet	1240		2066	

nuwe model van die vakuümkamer word in die volgende afdeling beskryf.

Die resonatormodel het uit 23 subnette met QUAB dikkopelemente bestaan (figuur 7.6). Detail van die subnette word in tabel 7.3 en figuur 7.5 gegee.

7.4 Die resonatorvakuümkamer

Twee modelle van die vakuümkamer is ontleed.

Die eerste model het uit 11 subnette bestaan, waarna daar vir die tweede model subnette 12 en 13 bygevoeg is. (Verwys na tabel 7.4 en figuur 7.7.) Die TRIB3-plaatelement is in al die subnette gebruik (figuur 7.4). Die buitegeleier is as 'n ortotropiese plaat gemodelleer. Die plaat se laagdiktes in die een rigting is bereken deur na die afmetings van die waterleidingsbuis in die plaat te verwys.

8. BELASTINGSDATA VIR DIE EINDIGE-ELEMENTMODELLE

8.1 Die magnete

8.1.1 Lasgeval 1 – Gewig van die struktuur en lugdruk

Die eie gewig van die magnete is as 'n verspreide elementlas in die negatiewe Z-rigting aangewend.

Die gewig van die vakuümkamer is as 'n reeks knooppuntlaste op die boonste en onderste poolvlakmaas aangewend. Die relatiewe area van die kamer wat deur elke bout ondersteun word, in verhouding tot die totale area, is gebruik om die kragte te bepaal. Verwys na figuur 8.1 vir verdere inligting.

Die lugdrukbelasting as gevolg van die vakuüm in die vakuümkamer is as knooppuntlaste aangewend op dieselfde manier as die gewig van die kamer.

Die gewig van die elektriese windings is ook as 'n reeks puntlaste op die aangewese plekke aangewend.

8.1.2 Lasgeval 2 – Magnetiese kragte tussen die poolvlakke

Die aantrekkingskrag weens die magnetiese vloed tussen die poolvlakke kan voorgestel word as 'n gelykverspreide oppervlakbelasting. Weens die feit dat die ASKA HEXE-, PENTA- en TET- elemente nie die opsie van verspreide belastings op daardie stadium gebied het nie, is die ekwivalente knooppuntlaste bereken en by die knooppunte aangewend.

'n Enkele lasgeval wat uit 'n gelykverspreide volumelas vir die materiaalgewig en 'n oppervlaklas vir die druk weens die vakuüm in die kamer bestaan, is vir die eindige-elementontleding gespesifiseer.

TABEL 7.2
DETAIL VAN DIE EINDIGE-ELEMENTMODEL VAN DIE MAGNEETVAKUUMKAMER

Subnetinligting						
Nr.	Dupli- kaat	Beskrywing	Aantal			
			Knooppunte	Elemente	Vryheidsgrade	Skakelpunte
1		Sektor aan die agterkant	103	77	154	12
2		Horisontale plaat 3:2	24	12	10	10
3	2		24	12	10	10
4		Horisontale plaat 4:2	24	15	15	11
5	2		24	12	10	10
6		Horisontale plaat 2:2	23	8	5	8
7	4		24	15	15	11
8	6		23	8	5	8
9	6		23	8	5	8
10	4		24	15	15	11
11	2		24	12	10	10
12	4		24	15	15	11
13	6		23	8	5	8
14	4		24	15	15	11
15		Horisontale plaat 1:2	22	4	0	6
16	4		24	15	15	11
17	4		24	15	15	11
18		Horisontale plaat by skerp punt	15	9	6	5
19		Buiterand van vertikale randbalk	24	13	15	9
20		Middel van vertikale randbalk	24	13	15	9
21	20		24	13	15	9
22	20		24	13	15	9
23	20		24	13	15	9
24	20		24	13	15	9
25	20		24	13	15	9
26	20		24	13	15	9
27		Vertikale randbalk	38	16	15	10
28		Binnerand van vertikale randbalk	25	55	16	4
		Totaal	751	452	484	267
Hoofnetinligting						
Nr.	Beskrywing	Aantal				
		Knooppunte	Vryheidsgrade			
101	Hoofnet	204	461			

8.3 Die resonator

Twee lasgevalle is gebruik:

8.3.1 Lasgeval 1 – Die gewig van die struktuur

Die gewig van die struktuur is as 'n reeks volume-belastinge op die verskeie elemente aangebring.

8.3.2 Lasgeval 2 – Lugdruk weens die vakuüm

Die belasting is as 'n verspreide oppervlaklas vir die toepaslike elemente aangewend.

8.4 Die resonatorvakuümkamer

8.4.1 Lasgeval 1 – Lugdrukbelasting

Die lugdruk op die elemente van die plate wat aan

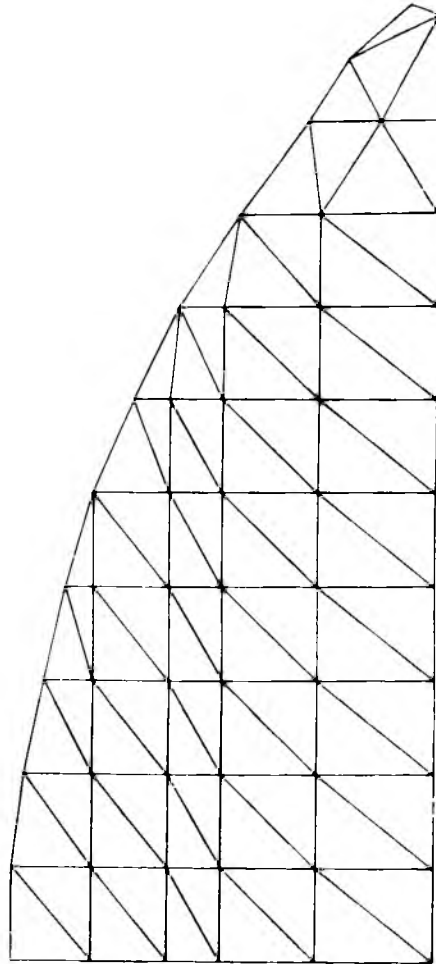
die atmosfeer aan die een kant en die vakuüm aan die ander kant blootgestel is, is as 'n gelykverspreide elementlas gemodelleer.

Die balgseëldruk is as 'n reeks puntlaste langs die lyn waar die seël by die kamer aansluit, aangewend.

Lugdrukkrigte op die pompe en die instemkapasitor by die oop flense is as ekwivalente knooppuntkrigte langs die flensrante aangewend.

8.4.2 Lasgeval 2 – Gewig van die plate van die struktuur

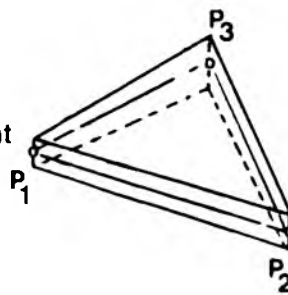
Die gewig van die plate is as 'n volumekrag op al die elemente van toepassing aangewend.



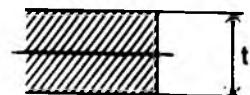
FIGUUR 7.3: Magneetvakuumkamersubnetmaas.

BESKRYWING van ELEMENT

Tipe: Driehoekige membraam en plaalement
 Aantal knooppunte: 3
 Vryheidsgrade: 6 per knooppunt



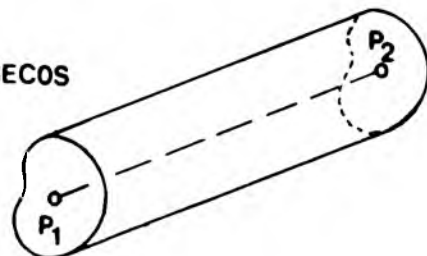
TRIB3



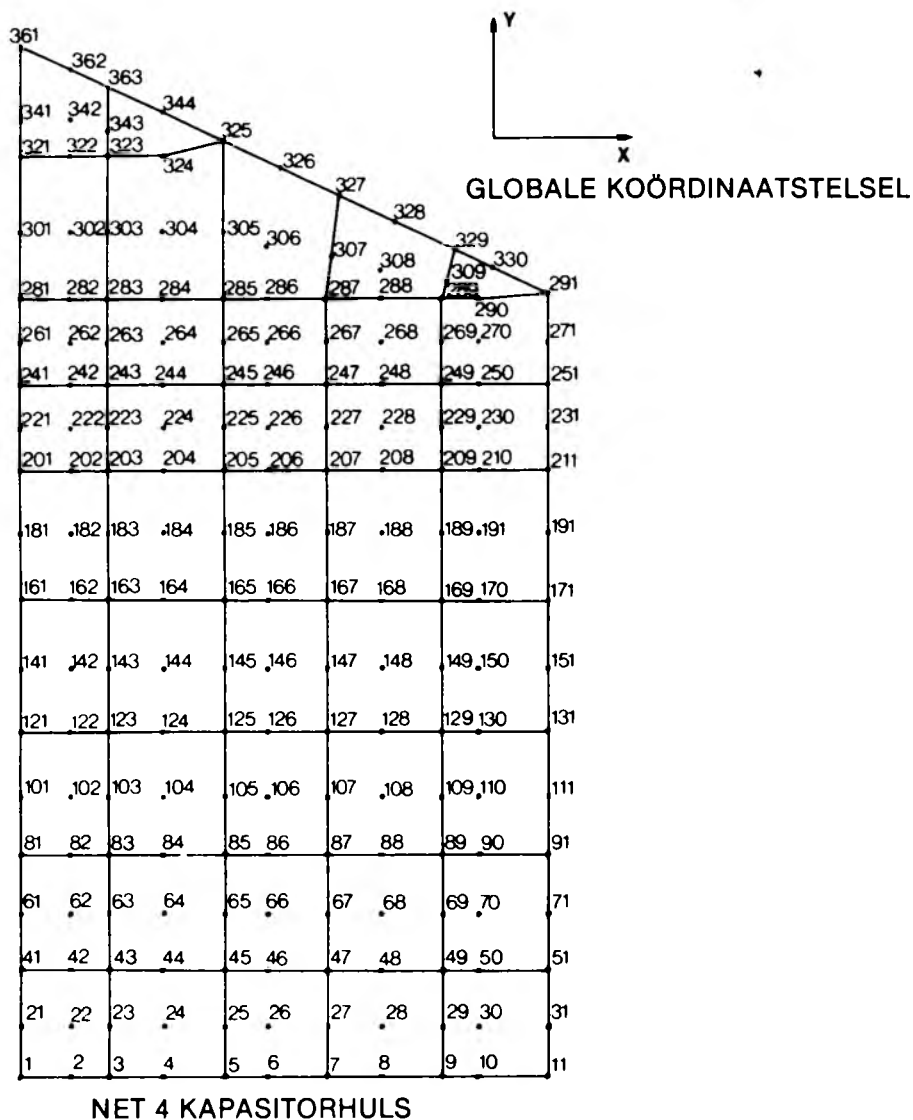
BESKRYWING van ELEMENT

Tipe: Soliede balk met konstante dwarsnit, St. Venant-torsie, geen skuifvervorming in buiging
 Aantal knooppunte: 2
 Vryheidsgrade: 6 per knooppunt

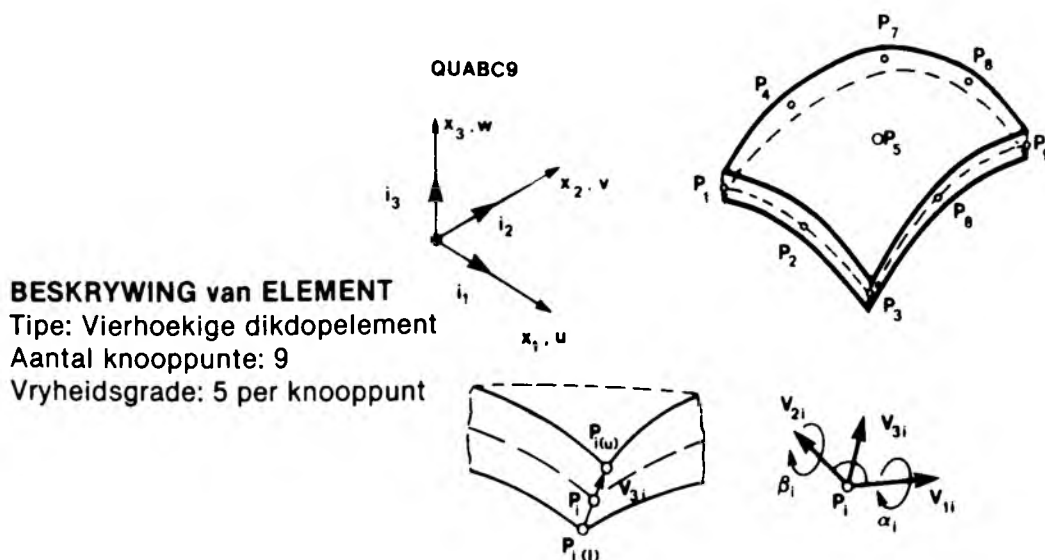
BECOS



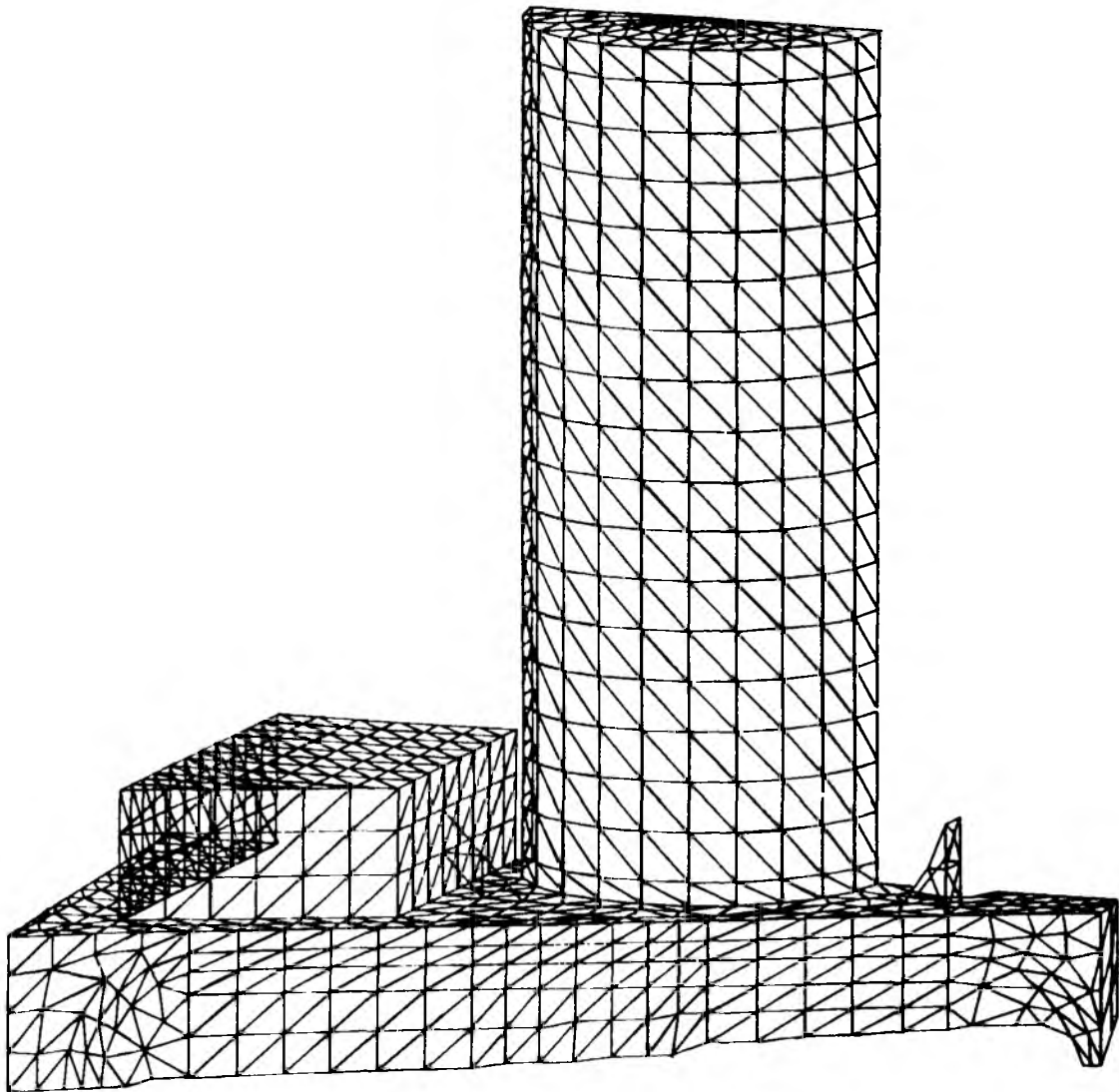
FIGUUR 7.4: Plaat- en balkelemente.



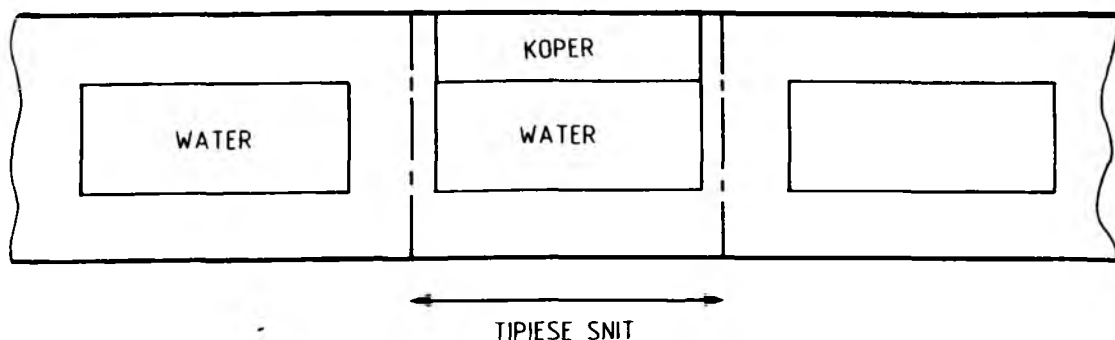
FIGUUR 7.5: Tipiese elementnet van die resonator.



FIGUUR 7.6: Dikdopelement.



FIGUUR 7.7: Eindige-elementmaas van die resonatorvakuunkamer.



FIGUUR 7.8: Afmetings (in mm) van die geleibuis vir die verkoelingsvloeistof van die buitegeleier.

8.4.3 Lasgeval 2 – Eenheidslas by die verstelpunt

'n Enkele eenheidslas is by 'n voorgestelde verstelpunt op die boonste plaat, waar die struktuur deur middel van domkragte in lyn getrek sou kon word, aangewend.

9. RESULTATE VERKRY

Voorbeelde van tipiese resultate word in figuur 9 getoon.

Die klem het in al die ontledings op die verplasinglimietkriteria geval en slegs maksimum spannings is uit die resultaatleërs onttrek.

Die som van die ekwivalente knooppunktkragte is met die reaksiekragte en die aangewende kragte vir elke lasgeval vir elke model vergelyk. Die tipiese akkuraatheid wat verkry is, was in die orde van 'n 4- tot 5-persentfout.

Die maksimum vernouing van die gaping tussen die poolvlakke is in die orde van 0,2 mm onder magnetiese vloedbelasting. Die mediaanvlak van die gaping van die model het met 0,17 mm by die voorste punt van die magneet verplaas. Die verplasing het goed vergelyk met metings op 'n volskaalse toetsmodel, wat in Switzerland gebou is.⁵

TABEL 7.3
DETAIL VAN DIE EINDIGE-ELEMENTMODEL VAN DIE RESONATOR

Subnetinligting						
Nr.	Dupli- kaat	Beskrywing	Aantal			
			Knooppunte	Elemente	Vryheidsgrade	Skakelpunte
1		Boonste ronde endplaat	249	48	847	50
2		Boonste buitegeleier	849	80	1415	50
3		Boonste binnegeleier	1849	160	2914	75
4		Boonste kapasitorhulsdak	363	42	722	43
5		Boonste kapasitorhulsmure	429	84	1477	86
6		Boonste plaat van vakuumkamer	768	98	1381	137
7		Boonste vakuumkamer mure	1451	137	2523	107
8		Boonste deel van deltaweb	525	26	261	106
9		Boonste horisontale plaat van delta	985	105	1703	78
10		Binneste boonste deel van delta	130	14	115	25
11		Onderste ronde endplaat	249	48	847	50
12		Boonste binnegeleier	849	80	1415	50
13		Onderste buitegeleier	1849	160	2914	75
14		Onderste kapasitorhulsdak	191	42	685	54
15		Onderste kapasitorhulsmure	429	94	1575	114
16		Onderste plaat van die vakuumkamer	768	98	1381	137
17		Onderste vakuumkamer mure	1451	137	2523	107
18		Onderste deel van die deltaweb	525	26	261	106
19		Onderste horisontale plaat van die delta	985	105	1703	78
20		Binneste onderste gedeelte van die delta	130	14	115	25
21	9	Binneste onderste horisontale deltaweb	985	105	1703	78
22	19	Binneste boonste horisontale deltaweb	985	105	1703	78
23		Verbindingstuk tussen die boonste en onderste deltas	523	12	126	52
		Totaal	17517	1820	30309	1761
Hoofnetinligting						
Nr.	Beskrywing	Aantal				
		Knooppunte	Vryheidsgrade			
101	Hoofnet	2000	3913			

Die maksimum drukspanning wat in die eindige-elementmodel aangetref is, was 5,74 MPa.

Die magnetiese vloed veroorsaak 'n drukspanning van 0,64 MPa op al die vlakke van diskontinuiteit in die magnete. Die netto normaalspanning by 'n punt waar glij van die blokke kon plaasvind, is in die orde van 0,05 MPa (druk). Dit lei tot 'n skuifweerstand van 0,039 MPa. Die skuifspanning wat by 'n punt kan voorkom, kan tot 0,5 MPa bedra. Dus kan glij tussen sommige vlakke van die gietblokke voorkom.

Weens die relatief hoë koste verbode aan 'n nie-lineêre ontleding van die magneet, is daar besluit om nie die moontlikheid van glij in wese te ondersoek

nie. Verskaffing van voorspanning oor vlakke waar probleme in die praktyk voorkom, is as 'n doenbare alternatief aanvaar.

9.2 Die magneetvakuumkamer

Die maksimum verplasing wat bepaal is, was 0,56 mm vir die horisontale plaat en 4,2 mm vir die vertikale web.

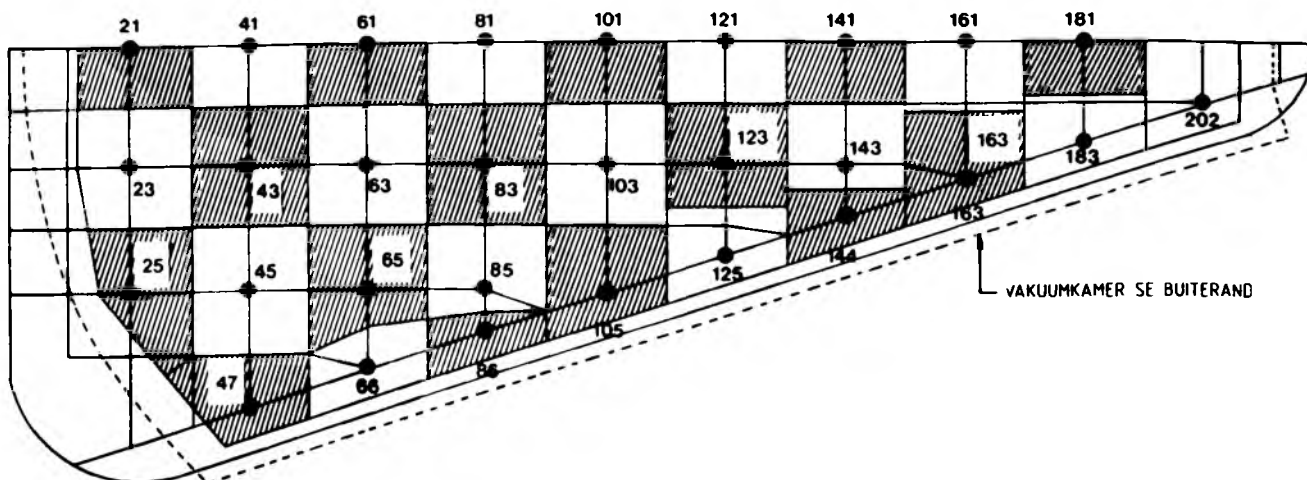
Trekspanningswaardes in die model word deur 54 MPa in die horisontale plaat en 120 MPa in die vertikale flens naby die voorste punt begrens.

Die maksimum krag in 'n vashegtingsbout word op 8,1 kN geraam. Dit is ekwivalent aan 'n eenvoudige

TABEL 7.4
DETAIL VAN DIE EINDIGE-ELEMENTMODEL VAN DIE RESONATORVAKUUMKAMER

Subnetinligting					
Nr.	Beskrywing	Aantal			
		Knooppunte	Elemente	Vryheidsgrade	Skakelpunte
1	Voorste plaat van kamer	15	16	15	12
2	Syweb	134	215	487	39
		(175)	(282)	(665)	(42)
3	Agterste plaat	75	111	203	35
4	Boonste plaat	165	236	365	92
5	Ondersteuningstuk	11	12	24	7
6	Voorste plaat van kapasitorhuls	36	46	70	22
7	Plaat van die sykant van die kapasitorhuls	28	36	50	18
8	Agterste plaat van kapasitorhuls	48	66	100	28
9	Boonste plaat van kapasitorhuls	75	117	220	31
10	Buitegeleier	247	432	1122	60
11	Boonste dekplaat van buitegeleier	53	84	165	20
(12)	Verstywer aan die agterkant van kapasitorhuls	(6)	(4)	(5)	(5)
(13)	Verstywer aan die voorkant van kapasitorhuls	(6)	(4)	(5)	(5)
	Totaal – Eerste model	887	1375	2821	364
	– Tweede model	(940)	(1450)	(2974)	(384)
Hoofnetinligting					
Nr.	Beskrywing	Aantal			
		Aantal knooppunte	Vryheidsgrade		
101	Hoofnet	231	1038 (Eerste model)		
101	Hoofnet	231	1089 (Tweede model)		

() Verwys na die tweede model



FIGUUR 8.1: Plan van die magneetpoolvlakmaas waar die vakuumbokamer en relatiewe belastingareas van die vashegtingsboutte aangetoon word.

skuifspanning van 12,4 MPa oor 'n 45-grade-skuinsvlak.

Die vertikale web behoort nie onder die drukspanning van 18 MPa wat daarin optree, met die tussenondersteuningsafstande van 0,41 m te knik nie.

9.3 Die resonator

Die waarneming dat die vakuumkanermure vertikaal afwaarts deur 'n afstand van 3,76 mm verplaas en dié verplasing aan die hele struktuur oordra, het tot 'n totale herontwerp van die resonator en resonatorvakuumkaner gelei.

Tipiese totale verplasing op ander dele van die model was 2,50 tot 3,80 mm en 0,07 tot 0,26 mm vir die differensiële verplasing van spesifieke subnette.

Spanningslimietkriteria is op twee plekke in die oorspronklike model van die konsepstruktuur oorskry. Die spannings in die kamermure en die binne-deltas was in die orde van 90 tot 100 MPa.

9.4 Die resonatorvakuumkaner

Die oorspronklike model het met 2,27 mm op die rand van die buitegeleier afwaarts verplaas, terwyl 'n verplasing van 2,43 mm in 'n uitwaartse rigting normaal t.o.v. die syweb aangeteken is.

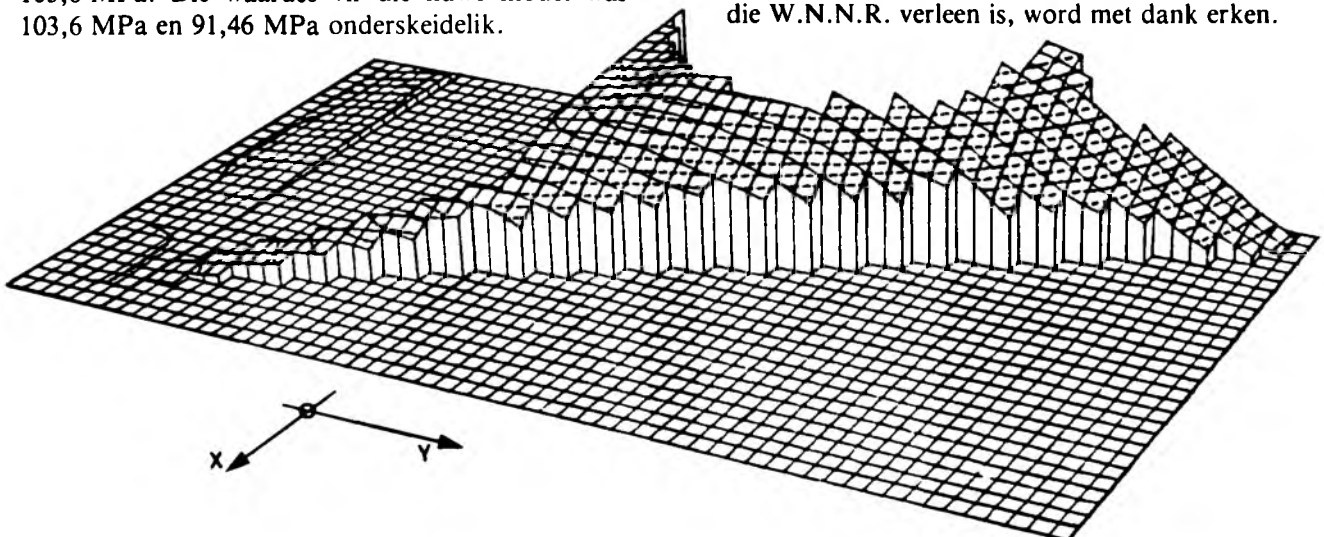
Die buitegeleier het met 0,40 mm in die oorspronklike model en 0,95 mm in die finale model, met die gewysigde syflens, oorgeel.

As gevolg van die druk in die balgafdigtingseël en die lugdruk, buig die ondersteuningstuk agtertoe. Die verplasing in die tweede model was 0,773 vir die vorentoebeweging van 'n punt onder die ondersteuning en 1,345 afwaarts aan die agterkant. Laasgenoemde waardes as respektiewelik 0,97 en 1,523 mm in die eerste model.

Die verplasing van die struktuur onder sy eie gewig, met 'n maksimum waarde van ongeveer 0,22 mm, is as 'n orde van grootheid laer as dié van die lugdruk met die vakuumtoestand bepaal.

Die voorste plaat het deur 'n afstand van 1,18 mm om sy rante en 1,361 mm by sy middelpunt op die simmetrie-as vorentoe verplaas. Waardes van 1,043 en 1,077 mm is op die nuwe model bepaal.

Die maksimum drukspanning wat gevind is, was 117,4 MPa en die maksimum trekspanning was 103,6 MPa. Die waardes vir die nuwe model was 103,6 MPa en 91,46 MPa onderskeidelik.



FIGUUR 9.7: Vertikale verplasing van die boonste (net 4) van die resonatorvakuumkaner onder vakuumlus.

10. ARBEID- EN REKENAARHULPBRONNE BENODIG VIR DIE ONTLEDINGS

'n Voorbeeld van die hulpbronne wat benut word tydens 'n tipiese ontleding soos dié van die resonatorvakuumkaner, word in tabel 10.1 gegee.

Die manure verbruik word verdeel in: ingenieursopleidingsvlak en tegniese assistentvlak.

Tabel 10.2 bevat 'n opsomming van die rekenaarhulpbronne verbruik tydens die ontleding. Die model waarna verwys word, het op subnetvlak 2800 grade van vryheid besit en 1000 op hoofnetvlak. Die totale aantal elemente in die model het op 1380 te staan gekom.

11. GEVOLGTREKKINGS EN BESPREKING

In die huidige stadium (Julie 1983) is die valleivakuumkaners ontwerp en ontleed op 'n soortgelyke manier soos hierbo beskryf.

Die magnete is reeds gegiet en gemasjineer en word opgestel. Die magneetvakuumkaners is reeds vervaardig en gemasjineer. Die resonatorvakuumkaners word in Duitsland vervaardig en onder vakuumlus getoets.

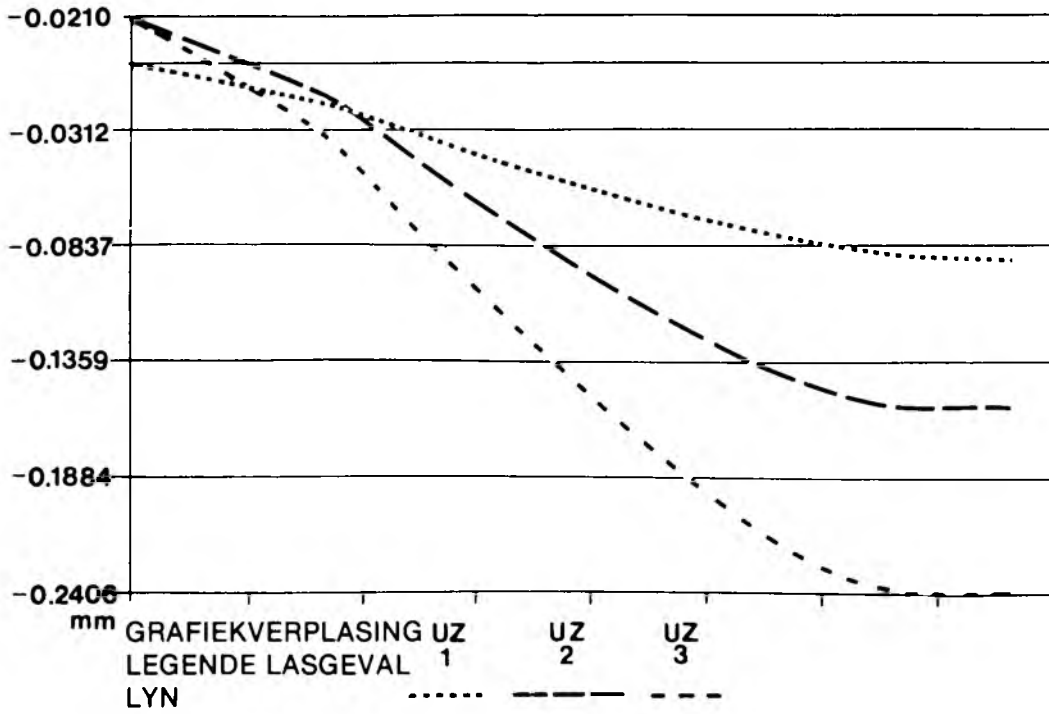
Die noodsaaklikheid van die toepassing van die eindige-elementmetode in die ontwerpproses van relatief ingewikkelde strukture, waarvan dié wat in hierdie artikel beskryf word 'n goeie voorbeeld is, word deesdae as 'n feit in die struktuuringenieursweseparktyk aanvaar.

Die voordeel van die gebruik van 'n kwaliteitstuk programtuurgereedskap soos die ASKA-stelsel in die projekte soos hier beskryf, is onomstootlik bewys.

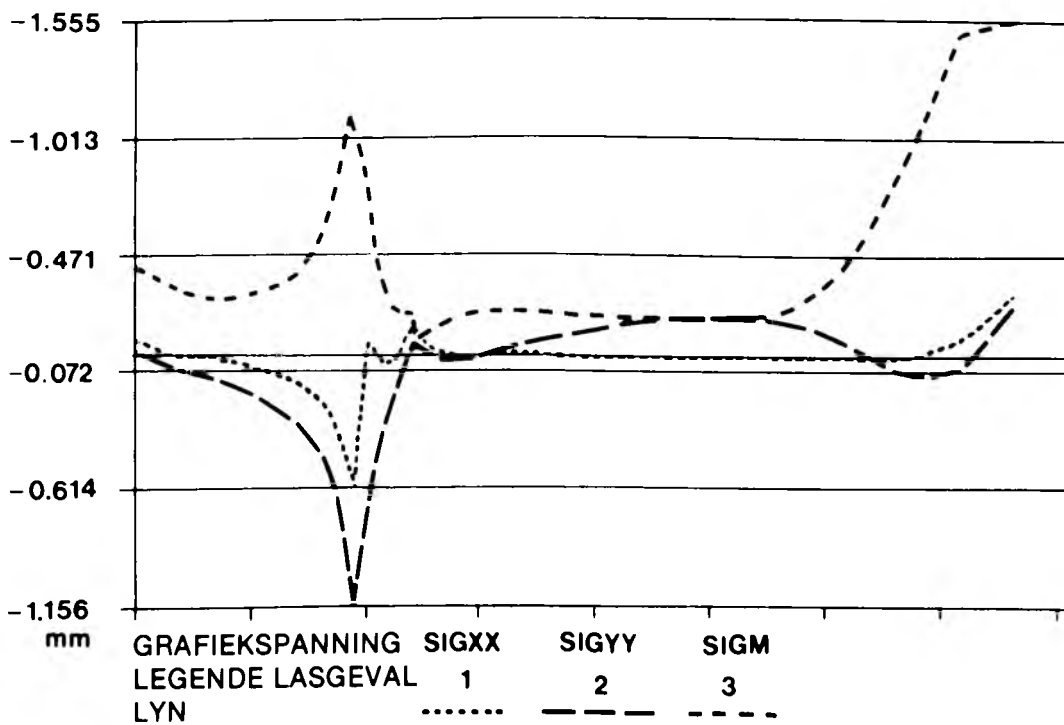
Die goeie gevolge wat die projekte in terme van stimuli vir ander programtuurontwikkelingsprojekte ingehou het, is legio. Voor- en naverwerkerprogramme,^{4, 5, 6, 7} vir eindige-elementwerk en die algemene ASKA-beheerprogram² het ontwikkel uit behoeftes wat tydens die projekte ontstaan het. Die programme is dan ook in die loop van die projekte geëvalueer, verbeter en getoets.

12. ERKENNING

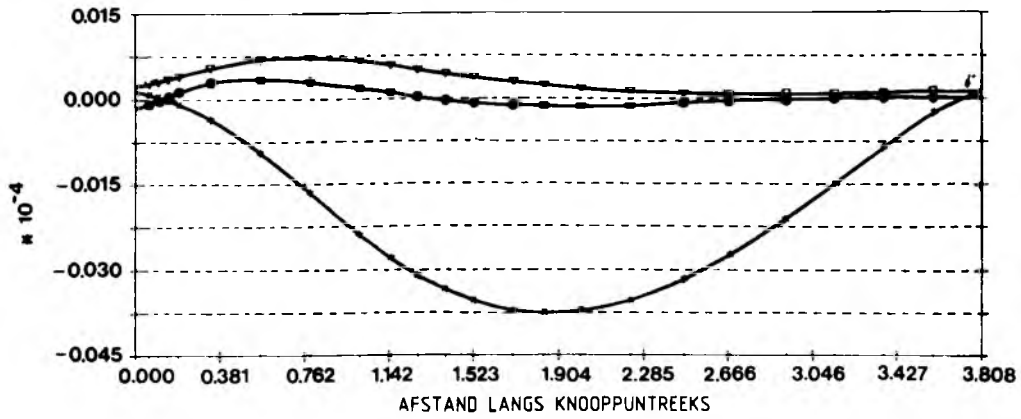
Die toestemming om hierdie navorsingsbrief te publiseer, wat deur die Direkteur van die N.V.S. van die W.N.N.R. verleen is, word met dank erken.



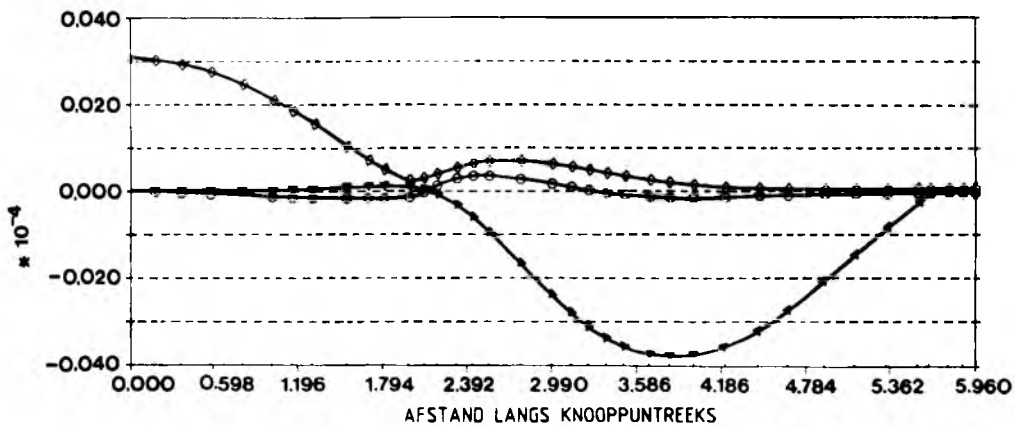
FIGUUR 9.1: Verplasing van 'n vlak tussen net 1 en 2 van die magneet.



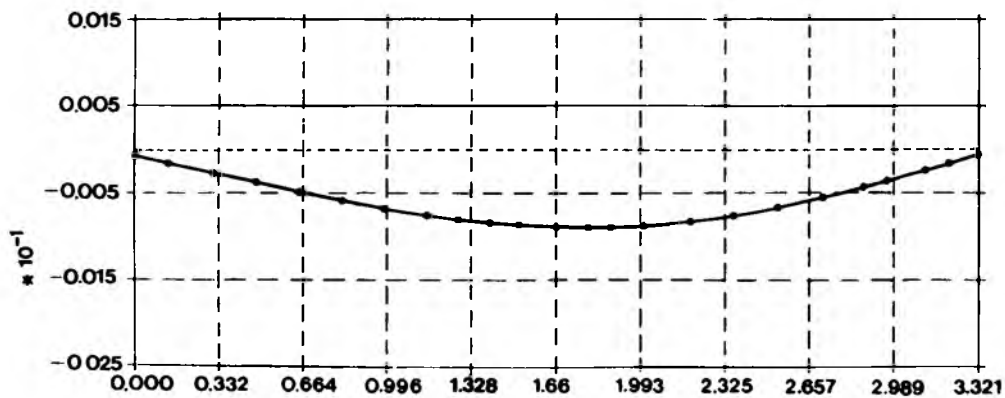
FIGUUR 9.2: Spannings op 'n vlak tussen net 1 en 2 van die magneet.



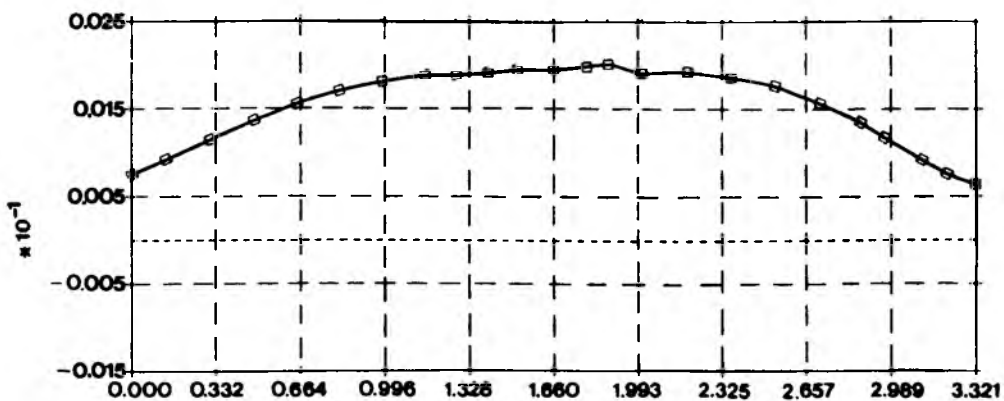
FIGUUR 9.3: Verplasing van die boonste plaat van die vakuumkamer van die resonator.



FIGUUR 9.4: Verplasing van die boonste vakuumkamersymure van die resonator.



FIGUUR 9.5: Horisontale verplasing langs die gleuf van die syweb (net 2) van die resonatorvakuumkamer onder vakuumlas.



FIGUUR 9.6: Horisontale verplasing langs die gleuf van die syweb (net 2) van die resonatorvakuumkamer onder vakuumlas.

TABEL 10.1
RESONATORVAKUUMKAMER: MANURE BENODIG VIR ONTLEDING

Aktiwiteit	Manure	
	Tarief 1 *	Tarief 2 +
Detailtekening van maas	16	5
Knooppuntsyfering	2	
Vorberei van topologiese data	7	
Topologiese datatoevoer		8
Interaktiewe grafiese maas en dataverifikasie	12	
Materiaal- en belastingdatavorbereiding	16	
Datatoevoer en -oordra na hoofraam	22	
'TOPOLOGY'-fase vir ASKA	15	
'LOADS'-fase vir ASKA	3	
'SOLVE'-fase vir ASKA	1	
'BACKSUBSTITUTE'-fase vir ASKA	7	
Omskryf van afvoerlëers	1	
Oordra van lëers na minirekenaar	1	
Naverwerking vir opstel van lyngrafieke	10	
Skryf en redigeer verslag	55	8
Totaal	146	43

* Tarief 1 – Ingenieursvlak

+ Tarief 2 – Tegniese-assistentvlak

TABEL 10.2
RESONATORVAKUUMKAMER:
REKENAARHULPBRONNE GEBRUIK TYDENS
ONTLEDING

Minirekenaar			
Aktiwiteit	Muurtyd (ure)	Verwerking (minute)	Stipper (ure)
Knooppuntversyfering	2,0	3,0	
Koördinaatgenerasie	0,25	1,0	
Topologiedatatoevoer	8,0	0,5	
Topologiegrafika	13,0	100,0	5,0
Materiaal- en lasdata-toever	25,0	33,0	
Grafieke en naverwerking	10,0	60,0	3,0
Totaal	53,25	197,5	8,0
Hoofraamrekenaar			
Aktiwiteit	Verwerking (minute)		
Topologie en styfheid	13,0		
Lasdata en -vektore	1,2		
Oplos van vergelykings	4,3		
Terugsubstitusie vir subnette	3,5		
Opstel van afvoerlëers	2,0		
Oordra van lëers na minirekenaar	0,8		
Totaal	24,8		

LITERATUURVERWYSINGS

1. Verskeie outeurs (1977). ASKA UM 202 Part 1, Linear static analysis user's reference manual, *ISD Report No. 73*, Revision D, Stuttgart.
2. Du Preez, R.J., Strasheim, B. & Vos, J. (1982). ASKA STATAPC user's manual, *ISE Report 82/03*, Stellenbosch.
3. Strasheim, B. & Du Preez, R.J. (1981). An overview of the implementation of the finite element method for large scale static and dynamic structural analysis, *FEMSA 81 Conference Proceedings*, CSIR, Pretoria.
4. Strasheim, B. & Vos, J. (1980). CORDI node point digitizing program for finite element meshes. *ISE Report 80/01*, Stellenbosch.
5. Vos, J. & Strasheim, B. (1977). TOPAS user's manual, *ISE Report 77/02*, Stellenbosch.
6. Vos, J. & Strasheim, B. (1979). FEMRES finite element result processor user's and programmer's manual, *ISE Report 79/11*, Stellenbosch.
7. Strasheim, B. & Vermeulen, C.B.F. (1982). PRECON - A preprocessor for the SACLANTCEN package, *ISE Report 82/01*, Stellenbosch.
8. Van Dyk, D. (1977). Analysis of the main magnets of a cyclotron with ASKA, *ISE Report 77/05*, Stellenbosch.
9. Van Dyk, D. (1977). Analysis of the main magnet vacuum chamber of a cyclotron with ASKA, *ISE Report 77/06*, Stellenbosch.
10. Van Dyk, D., Dunaiski, P.E., Theron, W.F.D. (1979). Analysis of the resonator of a cyclotron with ASKA, *ISE Report 79/01*, Stellenbosch.
11. Strasheim, B., Franzsen, A. (1980). Structural analysis of the vacuum chamber of the resonator of a cyclotron, *ISE Report 80/05*, Stellenbosch.
12. Strasheim, B., Vermeulen, F. (1981). Structural analysis of the vacuum chamber of the resonator of a cyclotron, *ISE Report 81/17*, Stellenbosch.
13. Strasheim, B., Vermeulen, F. (1982). Structural analysis of the valley vacuum chamber of a cyclotron, *ISE Report 82/06*, Stellenbosch.