

# Ontwerpen van dunne plaat producten en de Eindige Elementen Methode

Deze publicatie is binnen het project 'nieuwe materialen' ontwikkeld en geeft informatie over het ontwerpen van dunne metaalplaat producten met diktes van 0,3 t/m ca. 3 mm, uitgaande van de Eindige Elementen Methode. In het kader van dit project zijn tevens uitgegeven: TI.04.18 'Hoge Sterkte Staal in dunne plaat en buis', TI.04.19 'Roestvast staal in dunne plaat en buis', TI.04.20 'Scheidings-technieken voor dunne plaat en buis' en TI.04.21 'Aluminium in dunne plaat en buis'.

## Inhoud

1	Inleiding	1
1.1	Het ontwerpproces en de rol van de eindige elementen methode	1
2	De eindige elementen methode	1
2.1	Wat is de eindige elementen methode (EEM)?	1
2.2	Wanneer worden berekeningen met de eindige elementen methode uitgevoerd?	2
2.3	Wat is de toegevoegde waarde van de eindige elementen methode?	2
2.4	Wat is de zeggingskracht van berekeningen met de eindige elementen methode?	2
3	De eindige elementen methode en dunne plaat	3
3.1	Waarom is EEM belangrijk bij de verwerking van dunne plaat?	3
3.2	Wat kan de eindige elementen methode wel en niet?	3
4	Wanneer is toepassing van de eindige elementen methode zinvol?	4
5	Hoe kan men van de eindige elementen methode profiteren?	4
6	Welke materiaalgegevens zijn er nodig?	4
7	Wat kan er nog meer worden gesimuleerd?	5
8	Voorbeelden van berekeningen aan dunne plaat producten	8
8.1	Ontwerp van een houder	8
8.1.1	Inleiding	8
8.1.2	Uitgangspunten bij het ontwerp	8
8.1.3	Het concept	9
8.1.4	Mesh-generatie	9
8.1.5	EEM-berekeningen	10
8.1.6	Conclusie en opmerkingen	14
8.2	Herontwerp van een motorkap	14
8.3	Dieptreksimulatie carterpan	15
9	Literatuur	17
	Bijlage I: Basisprincipes EEM	19
	Bijlage II: Keuze van EEM-software	22

## 1 Inleiding

### 1.1 Het ontwerpproces en de rol van de eindige elementen methode

Ontwerpen is bij voortduring een proces van kiezen. Steeds weer moeten vragen worden beantwoord, zoals:

- Van welk materiaal moet het product worden gemaakt?
- Is het product maakbaar?
- Welk productieproces is het beste?
- Wat zijn de kosten?
- Wat is de vereiste kwaliteit (oppervlaktegesteldheid, toleranties)?

In figuur 1 is een overzicht gegeven van een aantal aspecten waarmee een ontwerper rekening moet houden.

Ontwerpen is dus eigenlijk een complex proces en er is kennis van vele zaken nodig. Deze kennis zou voor een groot deel bij de ontwerpers bekend moeten zijn. Het is echter onmogelijk dat één persoon van elk aspect de adequate kennis heeft. Vandaar dat tegenwoordig in grote bedrijven het ontwerp vaak tot stand komt door samenwerking van meerdere partijen, bijvoorbeeld in de vorm van design-build teams. Hierin zitten, naast de ontwerpers, vertegenwoordigers van werkvoorbereiding, productie, assemblage, inkoop en logistiek. Ook is veel kennis beschikbaar in handboeken, brochures, normbladen en op het internet.



figuur 1 Overzicht van een aantal aspecten, waarmee een ontwerper rekening moet houden

Ontwikkelingen van de laatste tijd zijn, dat kennis- en expertisesystemen worden gekoppeld aan of deel uitmaken van CAD systemen. Tijdens het ontwerpproces kan hier dan direct gebruik van worden gemaakt. Een ander ontwerpsysteem dat een steeds belangrijker plaats inneemt, is de Eindige Elementen Methode (afgekort EEM).

Dit systeem is enerzijds een hulpmiddel voor sterkte- en stijfheidsberekeningen aan het product en anderzijds een gereedschap ten behoeve van maakbaarheidanalyses bij omvormbewerkingen van plaat. Het gebruik van EEM door de ontwerper vergt weliswaar extra inspanningen in een vroeg stadium van het productontwikkelingstraject, maar deze inspanning wordt ruimschoots goedgemaakt door de fors lagere inspanningen die in een latere fase van het traject nodig zijn. Met meer zekerheid worden bepaalde eigenschappen van het product (zoals sterkte en stijfheid) bepaald, zodat bepaalde testen niet of nauwelijks meer nodig zijn. In geval van maakbaarheidanalyse worden de productiemogelijkheden beter voorspelbaar en zullen er minder of geen experimenten nodig zijn om een eerste product te maken, mede ook omdat EEM belangrijke informatie over de procesparameters oplevert.

Deze voorlichtingspublicatie beschrijft het gebruik van EEM bij het ontwerpen van dunne plaat producten.

## 2 De eindige elementen methode

### 2.1 Wat is de eindige elementen methode (EEM)?

EEM is een hulpmiddel voor de engineering van producten en processen. Met EEM kan men inzicht krijgen in wat er in een proces gebeurt, of hoe een product zich gedraagt. In de meeste gevallen gaat het hierbij om het mechanisch of het thermisch gedrag. Dit hangt mede af van de omgeving.

EEM kent de meest uiteenlopende toepassingen. Voorbeelden zijn de werking van een kunstmatige hartklep, de temperatuurverdeling in een koelkast, de sterkte van vangrails, de stijfheid van een fietsframe en het hydrovormen van een dunne plaat product.

Om EEM te gebruiken, heeft men een computer en een EEM-softwarepakket nodig. Hiermee kan een model van het product of proces worden gemaakt. In dit model wordt ook de invloed van de omgeving verwerkt. Met het model worden vervolgens berekeningen gedaan om de werking van het product of proces na te bootsen. De resultaten worden beoordeeld door de engineer.

Het begrip "eindige elementen" slaat op de stukjes waaruit het model is opgebouwd. Op een afbeelding ziet het er uit als een soort raster of netwerk. In bijlage I is hierover meer te vinden.

## **2.2 Wanneer worden berekeningen met de eindige elementen methode uitgevoerd?**

In het productontwikkelingstraject moeten vaak berekeningen worden uitgevoerd. Bekend is dat de constructie op sterkte en stijfheid wordt doorgerekend. Hierdoor kunnen zaken zoals materiaalsoort en plaatdikte worden bepaald. Wanneer het rekenen moeilijk wordt door een complexe constructie en/of belastingspatroon, kunnen EEM-berekeningen een oplossing bieden.

Naast sterkte en stijfheid kunnen ook andere prestaties van het te ontwikkelen product door middel van EEM worden afgeschat. Te denken valt hierbij aan levensduurbepaling (vermoeiing), botsbestendigheid, akoestische emissies en warmtehuishouding.

Een ander gebied waarbij EEM nuttig kan zijn, is het simuleren van productieprocessen. Dit geldt met name voor plastische bewerkingen, zoals dieptrekken, buigen, hydrovormen en rubberpersen. Zo kunnen voor deze processen uitspraken worden gedaan over maakbaarheid en worden er richtlijnen gegenereerd ten behoeve van het instellen van de procesparameters (kracht, druk, slag, smering, enz.). Voorts kunnen zaken in kaart worden gebracht die te maken hebben met wrijving en slijtage, hetgeen belangrijk is voor de materiaalkeuze van gereedschappen en de toe te passen coating. EEM is dus in het vakgebied van dunne plaat verwerken een geweldig goed hulpmiddel in het kader van voorspelbaarheid.

Hierdoor hoeven er minder of geen experimenten te worden uitgevoerd, waardoor de doorlooptijd korter en de kosten lager zullen zijn in het productontwikkelingstraject.

Behalve bij het ontwerp van nieuwe producten en productieprocessen kan EEM ook nuttig zijn bij het verbeteren van bestaande productieprocessen. Het gaat dan bijvoorbeeld om processen waarbij het erg veel moeite kost om de juiste afstellingen van de gereedschappen te vinden, of om processen die een hoge uitval kennen. Simulatie van het proces met EEM kan dan bijdragen tot een beter begrip van het proces. Met dit inzicht kunnen vervolgens verbeteringen in het proces worden doorgevoerd.

## **2.3 Wat is de toegevoegde waarde van de eindige elementen methode?**

*Veruit het belangrijkste voordeel van EEM is de mogelijkheid om financieel voordeel te behalen door verlaging van de kosten en verhoging van de opbrengsten.*

Dit kan onder andere via:

- ▶ een korter ontwikkelingstraject van producten, zodat producten sneller op de markt kunnen worden gebracht;
- ▶ optimalisatie van het ontwerp- en productieproces, zodat de kosten lager worden;
- ▶ een verhoging van de productkwaliteit.

*Hoe eerder in de ontwerpcyclus men EEM-software toepast, hoe beter in het algemeen het resultaat.*

In sommige takken van de metaalindustrie leunt men bij de productontwikkeling sterk op ervaring, traditie en experiment. Hoewel dit soms de voordeligste aanpak kan zijn, is het gevolg vaak dat men te werk gaat volgens de methode van 'trial and error'. Dit betekent dat er mislukkingen zijn en dat het proces met vallen en opstaan

verloopt. Door selectieve toepassing van EEM-berekeningen en het inzicht dat deze opleveren, kan het aantal experimenten en prototypen behoorlijk worden beperkt.

Als specifieke voordelen die simulatie met EEM biedt, kunnen worden genoemd:

- ▶ De methode kent een enorme flexibiliteit met betrekking tot de vorm en afmetingen van een ontwerp.
- ▶ Vanuit een bestaand model kunnen snel verschillende varianten worden bekeken, die gebruikmaken van bijv. een andere bevestigingswijze of een ander materiaal.
- ▶ De methode gaat verder waar klassieke rekenregels, wegens geometrische complexiteit of niet-lineariteit, ophouden.
- ▶ In vergelijking met ontwerpnormen, die vaak vrij conservatief zijn, is de methode nauwkeuriger, zodat bijvoorbeeld lagere veiligheidsfactoren kunnen worden gebruikt.
- ▶ Een verbeterd inzicht in de werking van producten en processen. Via EEM-berekeningen kunnen variabelen als functie van tijd of plaats worden bepaald, die niet of nauwelijks meetbaar zijn. Voorbeelden hiervan zijn de temperatuur of de spanning in een smeedstuk, een gietstuk of een las.
- ▶ Een hiermee samenhangend voordeel is dat een betere overeenkomst tussen berekeningen en metingen kan worden verkregen. Hierdoor kunnen experimenten doelgerichter worden opgezet.
- ▶ De methode biedt uitkomst in die gevallen waar experimenten onmogelijk, te duur, of maatschappelijk onverantwoord zijn. Het gaat dan vooral om situaties waarin de veiligheid of het milieu in het geding zijn. Te denken valt aan de botsbestendigheid van auto's en schepen, het effect van branden op offshore platforms of de weerstand van gebouwen tegen aardbevingen of explosies. Met EEM kan vaak een kwantitatieve uitspraak worden gedaan over het gedrag in deze zeer extreme situaties, ondanks de ruime foutenmarges die hier dienen te worden gehanteerd.
- ▶ De mogelijkheid om ongelukken door falende constructies achteraf te analyseren. EEM-simulatie kan hier een goed hulpmiddel zijn om een beter inzicht in de oorzaken te krijgen.

Voorwaarde voor het behalen van deze voordelen is een zorgvuldige en weloverwogen aanpak. Zo niet, dan bestaat de kans op:

- ▶ hogere kosten dan opbrengsten;
- ▶ onjuiste of onnauwkeurige resultaten;
- ▶ een foutieve interpretatie van de resultaten.

## **2.4 Wat is de zeggingskracht van berekeningen met de eindige elementen methode?**

Er zijn geen algemene regels te geven die de juistheid van de antwoorden van EEM berekeningen kunnen garanderen, aangezien het inzicht van de gebruiker in het te modelleren proces vaak doorslaggevend is. In dit licht wordt wel eens gezegd dat de uitkomsten van een EEM-berekening even betrouwbaar zijn als de persoon die de software bedient. Toch kunnen de hieronder genoemde richtlijnen mogelijk enige houvast bieden.

Op de eerste plaats dient de nodige zorg te worden besteed aan het selecteren van de juiste invoergegevens. Wanneer deze niet kloppen, zijn de uitkomsten ook niet goed. Als er ontbrekende gegevens zijn, kan hiervoor soms een schatting worden gebruikt, maar het is dan wel zaak om de berekening te herhalen voor meerdere waarden van de bewuste parameter, zodat de invloed ervan duidelijk is. Overigens dient de nauwkeurigheid van de invoerparameters vergelijkbaar te zijn. Zo heeft het weinig zin om de dikte van een plaat in drie decimalen achter de komma uit te drukken, terwijl de vloei-spanning een afwijking van 5% kan hebben.

Een ander aspect van de invoergegevens is, dat er voor gezorgd dient te worden dat de gebruikte eenheden overeenkomen. Bij dynamicaproblemen wordt door beginners

nog wel eens de fout gemaakt dat de lengte in mm, de kracht in N en de massadichtheid in  $\text{kgm}^{-3}$  wordt uitgedrukt. De juiste eenheid voor de massadichtheid is hier:  $\text{kgmm}^{-3}$ .

Een vaak voorkomende situatie is, dat van een constructie slechts een gedeelte wordt gemodelleerd. De samenhang van dit deel met de rest wordt dan met geschikt gekozen randvoorwaarden voorgesteld. Deze randvoorwaarden kunnen een grote invloed hebben. Om de juiste randvoorwaarden te kiezen kan het daarom handig zijn om hun invloed via proefberekeningen eerst goed in kaart te brengen.

Als de constructie symmetrisch is, hoeft maar een beperkt deel van het totaal te worden gemodelleerd. Voorwaarde is wel, dat de juiste symmetriecondities worden aangebracht. De oplossing dient daarom zorgvuldig op symmetrie te worden gecontroleerd.

Bij complexe berekeningen kan het handig zijn eerst een zo eenvoudig mogelijk model te bouwen, dat in grote lijnen het gedrag beschrijft. In de praktijk ziet men nog wel eens het tegendeel. Vanwege tijdsdruk probeert men het hele probleem in één keer op te lossen en begint men met het aanmaken van een zeer fijne elementverdeling, terwijl het materiaalgedrag of de invloed van de randvoorwaarden nog niet goed worden begrepen. Het vinden van de eindoplossing kan dan erg veel rekentijd kosten. Het gericht werken met een aantal simpele testmodellen is daarom in het algemeen beter.

De uitleg en toepassing van de resultaten is een niet te onderschatten aspect. Dit is vooral een taak van de engineer, die over voldoende 'engineering judgement' moet beschikken. Vrij vertaald wil dit zeggen, dat hij of zij een juiste verwachting van de mogelijke uitkomsten heeft en deze verwachting ook controleert. Op de eerste plaats dienen alle uitvoergrootheden zorgvuldig te worden bekeken en gecontroleerd op hun onderlinge samenhang (bijvoorbeeld krachtevenwicht). Een vergelijking met de invoerparameters is ook belangrijk. Om te controleren of de grootte orde van de antwoorden klopt, kan een vergelijking met (handmatige) afschattingen, analytische referentieoplossingen, praktijkinformatie, soortgelijke simulaties of alternatieve bronnen plaatsvinden. Waar mogelijk is het aan te bevelen de uitkomsten aan de hand van metingen te valideren.

Voorbeelden van analytische rekenregels op het gebied van dunne plaat zijn onder andere te vinden in de voorlichtingspublicaties VM110 "Dieptrekken", VM113 "Buigen" en VM114 "Scheidingstechnieken". Deze zijn beschikbaar via de vereniging FME-CWM.

Het is in het algemeen af te raden om blindelings te vertrouwen op de informatie die het scherm weergeeft. De beste engineer is een kritische engineer.

### 3 De eindige elementen methode en dunne plaat

#### 3.1 Waarom is EEM belangrijk bij de verwerking van dunne plaat?

Net als andere producten vraagt de ontwikkeling van dunne plaat producten om engineering. In de eerste plaats gaat het hierbij om de specificaties en eigenschappen van het product zelf. Deze kunnen met EEM-software worden bepaald of geoptimaliseerd, wanneer analytische en praktische methoden ontoereikend zijn. Vragen die beantwoord kunnen worden zijn:

- ▶ Is het product stijf genoeg?
- ▶ Kan het product lichter worden gemaakt?
- ▶ Is het product sterk genoeg?
- ▶ Wat gebeurt er bij overbelasting of beschadiging?
- ▶ Hoe veranderen vorm en sterkte bij verhitting?
- ▶ Welke spanningsveranderingen treden op bij thermische uitzetting?

- ▶ Wat is het effect van bevestigingstechnieken die worden toegepast?

Een kenmerk van producten uit dunne plaat is, dat ze via omvormende bewerkingen tot stand komen. De meeste van die bewerkingen kunnen met EEM-software worden gesimuleerd. Dit levert antwoord op vragen als:

- ▶ Kan het product worden gemaakt?
- ▶ Welke moeilijkheden kunnen worden verwacht?
- ▶ Voldoet het product aan de specificaties?
- ▶ Wat zijn de gereedschapskrachten?
- ▶ Hoeveel en welke bewerkingsstappen (bijvoorbeeld tussengloeien) zijn er nodig?
- ▶ Hoe beïnvloedt de bewerking de productkwaliteit?
- ▶ Wat gebeurt er als er een ander materiaal wordt gebruikt?
- ▶ Wat verandert er als een andere materiaaldikte wordt gebruikt (optimalisatie)?
- ▶ Wat is de beste vorm van de gereedschappen?
- ▶ Waar is het productieproces gevoelig voor?

#### 3.2 Wat kan de eindige elementen methode wel en niet?

Zoals gezegd kan er veel met EEM, maar niet alles. In tabel 1 is voor een aantal zaken uit de dunne plaat wereld aangegeven of ze wel (+), niet (-) of min of meer (-/+ ) te behandelen zijn met EEM. Min of meer wil zeggen dat de software voor de toepassing nog in de kinderschoenen staat (tabelaanduiding K), dat de software niet gebruiksvriendelijk is (tabelaanduiding G), dat de berekeningen veel extra inspanning, tijd en kosten vergen (tabelaanduiding T) of dat de gevraagde nauwkeurigheid moeilijk kan worden bereikt (tabelaanduiding N).

tabel 1 Overzicht van een aantal onderwerpen welke te behandelen zijn met EEM (situatie begin 2004)

engineering/productie activiteit	toepas- baarheid EEM	moei- lijk- heid
productstijfheid optimaliseren	+	
invloed van materiaal- en maattoleranties op eindproduct bepalen	+	
eigenfrequenties van product bepalen	+	
gereedschapskrachten bij omvormen bepalen	+	
terugvering na omvormen voorspellen	-/+	N
lasprocessen analyseren en laskwaliteit voorspellen	-/+	G,T
juiste afstelling en uitlijning gereedschappen kiezen	-	
scheidingstechniek analyseren voor precisietoepassingen	-/+	K,T
verspanende bewerkingen analyseren	-/+	K,T
gereedschapsslijtage/noodzaak coatings vaststellen	-/+	T
oppervlaktekwaliteit van product voorspellen	-	
rubberpersen	-/+	G
kraagtrekken	+	
omvormen van metaal-kunststof laminaten	-/+	G,K
explosief omvormen	-/+	G,T
dieptrekken, doorzetten, hydrovormen, strekvormen	+	
plaatbuigen	-/+	G *
rolvormen	-/+	T *
val- en botsingsbestendigheid bepalen	+	
walsen en massiefomvormbewerkingen	+	
3D-buigen van buizen en profielen (eventueel met doorn)	+	
hulsextrusie	+	
wandstrekken	+	

\* Hiervoor bestaat alternatieve software die makkelijker te gebruiken en goedkoper is

#### 4 **Wanneer is toepassing van de eindige elementen methode zinvol?**

Deze vraag is belangrijk voor bedrijven die er over denken EEM te gaan toepassen. Gezien de mogelijkheden van EEM zal de vraag het eerst worden gesteld door bedrijven die zelf veel aan ontwikkeling of engineering van producten doen, of die complexe omvormbewerkingen toepassen.

Het antwoord is afhankelijk van het bedrijfseconomisch voordeel dat men denkt te kunnen behalen. EEM kan op twee manieren bijdragen tot een hogere winstmarge. Ten eerste kan productoptimalisatie via EEM leiden tot een kwalitatief hoogwaardiger product, dat afhankelijk van de marktomstandigheden een hogere opbrengst geeft. Ten tweede kan EEM bijdragen tot een verlaging van productiekosten door vermindering van de hoeveelheid ulti- val of een efficiënter gebruik van materiaal en machines.

Een voordeel van EEM voor de wat langere termijn is, dat men een beter inzicht krijgt in het productieproces en in de werking van het product. Als met deze kennis (in de toekomst) productieproblemen kunnen worden vermeden of het product kan worden verbeterd, zal dit de concurrentiepositie versterken.

Een algemene regel om het directe voordeel van EEM te berekenen is er niet. Het beste wat men kan doen, is een afschatting maken van het voordeel dat realistisch gezien mogelijk is op basis van bestaande gegevens over marges, seriegroottes en de gemiddelde tijd dat machines wegens problemen buiten bedrijf zijn. De afschatting zal per bedrijf en per product verschillend zijn.

Als hulpmiddel wordt hieronder een aantal factoren genoemd, waar het te behalen voordeel van afhankelijk kan zijn:

- ▶ de grootte van het product;
- ▶ de (geometrische) complexiteit van het product;
- ▶ de economische waarde van het product;
- ▶ de kwaliteits- en veiligheidseisen die aan het product worden gesteld;
- ▶ de seriegrootte.

Naast het verwachte voordeel zijn ook de extra kosten die voor EEM worden gemaakt belangrijk om te bepalen of toepassing zinvol is. Pas bij een positieve balans wordt EEM interessant.

De kosten van EEM zijn onder andere afhankelijk van de hoeveelheid rekenwerk en het berekeningstype. Om een indicatie te geven: voor een eenvoudige berekening aan een product of de simulatie van een enkele bewerkings- stap betaalt men (bij uitbesteding) al gauw een paar duizend euro. Bij een seriegrootte van 1000 en een marge van 1 euro per product is een EEM-berekening dus niet haalbaar.

#### 5 **Hoe kan men van de eindige elementen methode profiteren?**

Zodra is vastgesteld dat EEM zinvol is, komt de vraag hoe men er van kan profiteren. Er zijn ruwweg twee mogelijkheden. Men besteedt het EEM-werk uit aan een extern bedrijf, of men gaat zelf investeren in de beno- digde software, de kennis en de mensen. Dit laatste is alleen zinvol als men voldoende werk verwacht om deze systemen en mensen bezig te houden. Zo niet, dan kun- nen op den duur de kosten te hoog worden.

Voor een onderneming uit het MKB ligt de eerste optie (uitbesteding) het meest voor de hand. Zeker in de beginfase, als nog niet duidelijk is of men incidenteel of structureel behoefte heeft aan EEM-berekeningen. Voor het uitbesteden kan men onder andere terecht bij NIMR ([www.nimr.nl](http://www.nimr.nl)), Corus ([www.corusresearch.com](http://www.corusresearch.com)), TNO Industrie ([www.ind.tno.nl](http://www.ind.tno.nl)), softwareleveranciers en ge- specialiseerde adviesbureaus. Hulp bij het vinden van de

juiste adressen wordt onder meer geboden door Syntens ([www.syntens.nl](http://www.syntens.nl)). Belangrijke voordelen van uitbeste- ding zijn, dat men EEM kan inzetten op het moment dat het voor het bedrijf zin heeft, dat men toegang heeft tot goed ingewerkte engineers en dat er geen grote investe- ringen in hardware en software hoeven te worden ge- daan. De kosten bij uitbesteding bedragen in de regel ca. € 1000 per dag. Veelal zijn voor een project mini- maal een aantal dagen nodig.

Als men voor de tweede optie kiest (EEM-werk zelf doen), dient men er rekening mee te houden dat er een zekere opstartfase nodig is voor de selectie van hard- en soft- ware, het aantrekken van personeel, het volgen van cursussen en het opdoen van de nodige ervaring. Een termijn van een half jaar is zeker niet ongebruikelijk. Gelet op het technische niveau van de mensen (minimaal hbo-niveau) en de vereiste zorgvuldigheid bij het maken en het inter- preteren van de modellen, is het aan te bevelen om ge- specialiseerde medewerkers te hebben. Bij voorkeur mini- maal twee, omdat men anders te zeer afhankelijk wordt van één persoon. Om de nodige routine op te bouwen (en te behouden!) is het noodzakelijk dat de hoeveelheid EEM-werk voldoende is. Wat hun rol binnen het bedrijf betreft, kunnen de EEM-specialisten het best tot de ont- werp- of engineeringafdeling worden gerekend. Hierbij dient wel te worden opgemerkt, dat er bij berekeningen aan productieprocessen veel contact met het personeel op de werkvloer nodig zal zijn voor validatie en het uit- wisselen van ervaring. De keuze van de EEM-software is ook een belangrijk aspect. Meer hierover is te vinden in bijlage II.

#### 6 **Welke materiaalgegevens zijn er nodig?**

Dit is afhankelijk van het type berekening. Hieronder is een globaal overzicht van de benodigde gegevens per soort berekening gegeven.

Voor de berekening van de stijfheid van een product kan men in de regel volstaan met de volgende twee para- meters:

- ▶ de elasticiteitsmodulus;
- ▶ de dwarscontractiecoëfficiënt.

Om te bepalen of een product door een belasting al dan niet blijvend van vorm verandert, heeft men bovendien nodig:

- ▶ de rekgrens  $R_p$ .

Voor berekeningen aan massiefomvormbewerkingen wordt meestal een isotroop materiaal model gebruikt. In dat geval heeft men, behalve de bovengenoemde gegevens, ook informatie over het verstevigingsgedrag nodig. Dit kan op verschillende manier worden beschreven. Een populaire beschrijving is het Nadai model, bestaande uit een verstevigingsexponent  $n$  en een constante  $K$ . Zijn deze niet direct beschikbaar, dan kunnen deze worden afgeleid uit de treksterkte  $R_m$  en de gelijkmatige rek  $A_g$ , die hoort bij  $R_m$ . Het tweetal benodigde parameters luidt daarom als volgt:

$$\begin{aligned} & n \text{ of } A_g \\ \text{en: } & K \text{ of } R_m \end{aligned}$$

Voor een uitleg van de hier genoemde parameters, zie de beschrijving van de trekproef in bijlage B3.1 van het Tech-Info-blad TI.04.18 "Hoge Sterkte Staal in dunne plaat en buis".

Als men beschikt over de gegevens van een trekproef op het materiaal, is een benadering met de bovengenoemde parameters niet nodig en kan de volledige trekkromme als invoer voor de berekeningen worden gebruikt.

Bij omvormbewerkingen van dunne plaat speelt ook vaak de richtingsafhankelijkheid van het materiaal (anisotropie) een belangrijke rol. Voor de beschrijving van deze rich- tingsafhankelijkheid heeft men daarom hier als extra parameters de  $r$ -waarden nodig:

$$r_0 \quad r_{45} \quad r_{90}$$



Voor de versteviging wordt meestal een gemiddelde genomen van de waarden in de drie anisotropierichtingen.

Voor het beoordelen van de maakbaarheid van plaatproducten is een grensvormingskromme nodig. Deze geeft aan bij welke combinaties van rekwaarden in het vlak van de plaat het materiaal scheurt.

Voor meer informatie over materiaalparameters en hun definitie, zie VM111 "Materialen" en de andere Tech-Info-bladen uit dit project (zie pagina 1).

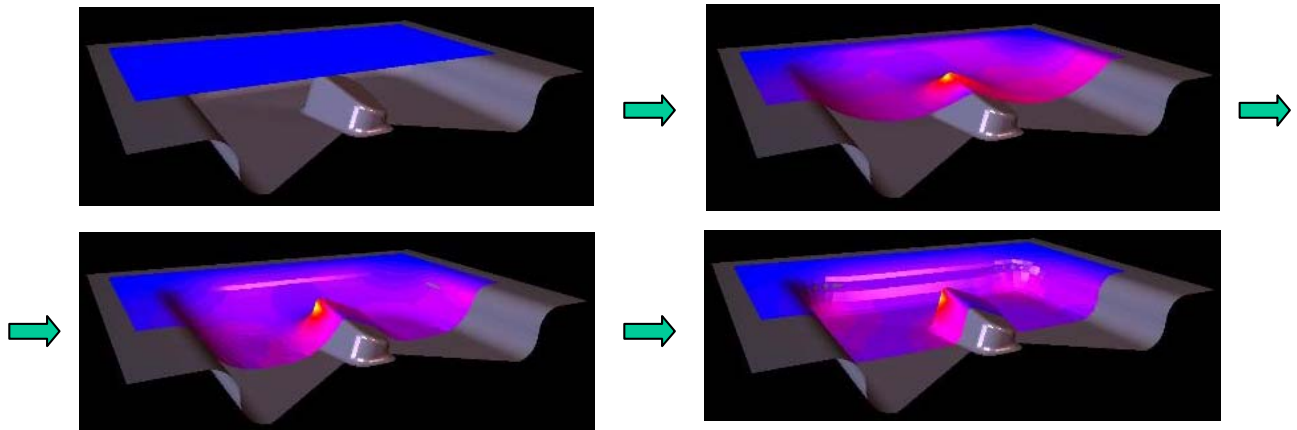
Een alternatieve manier om de juiste materiaalgegevens te verkrijgen is via de EEM-software zelf. Sommige softwarepakketten zijn standaard voorzien van een database met de gegevens van vaak gebruikte materialen.

## 7 Wat kan er nog meer worden gesimuleerd?

Met EEM kan nog veel meer dan het simuleren van (de productie van) dunne plaat producten. Om een indruk te geven volgt hieronder een aantal voorbeelden, waar mogelijk voorzien van een illustratie:

### Voorbeeld 1

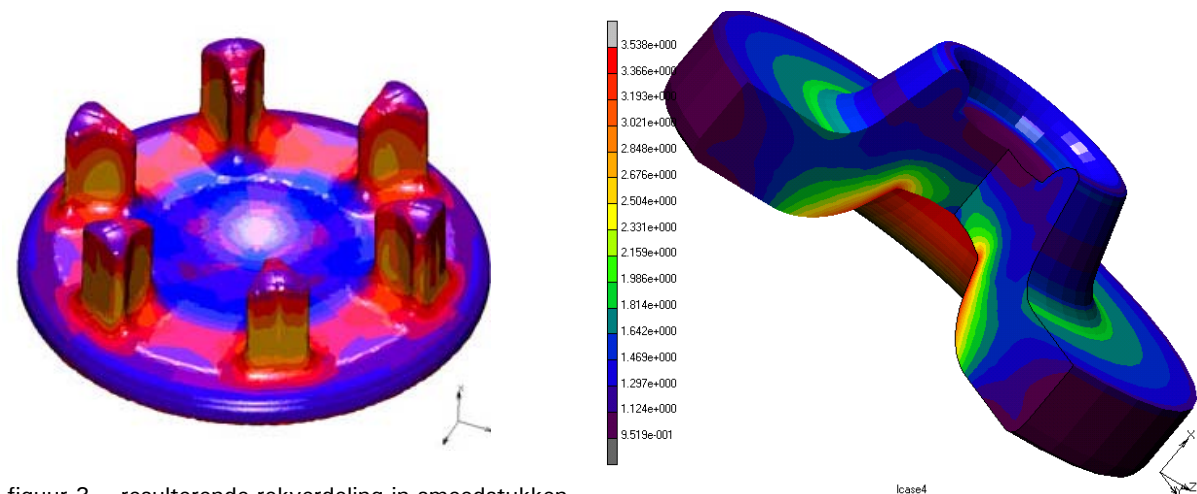
Simulatie van superplastische omvormbewerkingen (figuur 2)



figuur 2 Stadia tijdens het vormen van een vliegtuigonderdeel

### Voorbeeld 2

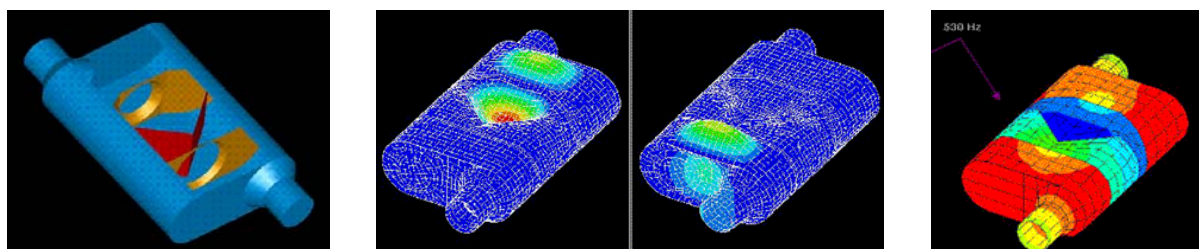
Simulatie van precisiesmeden (figuur 3)



figuur 3 resulterende rekverdeling in smeedstukken

### Voorbeeld 3

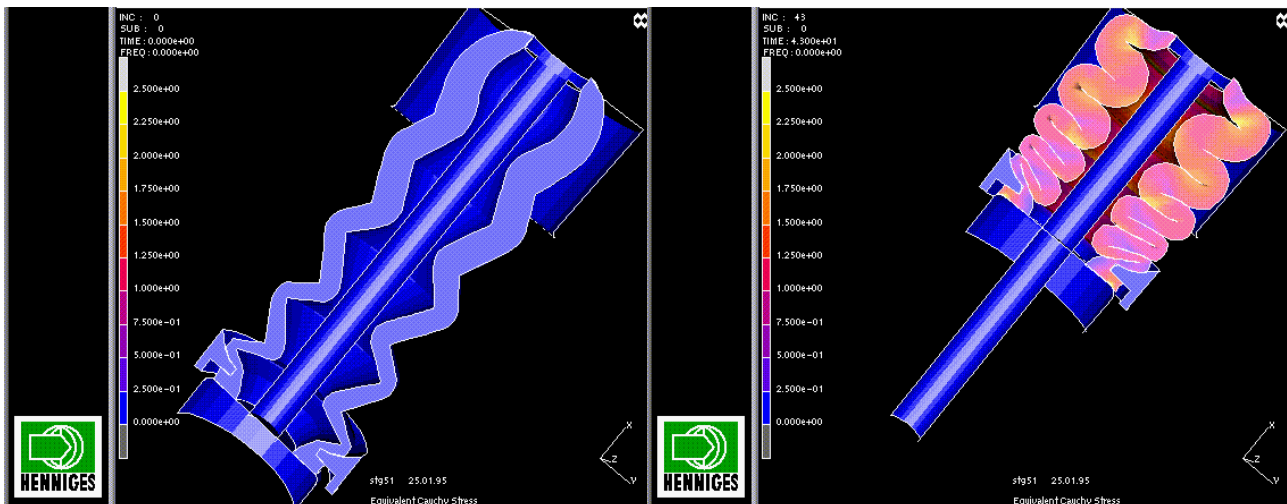
Simulatie van akoestische eigenschappen (figuur 4)



figuur 4 Uitlaatdemper, configuratie, eigenmodes en drukverdeling

## Voorbeeld 4

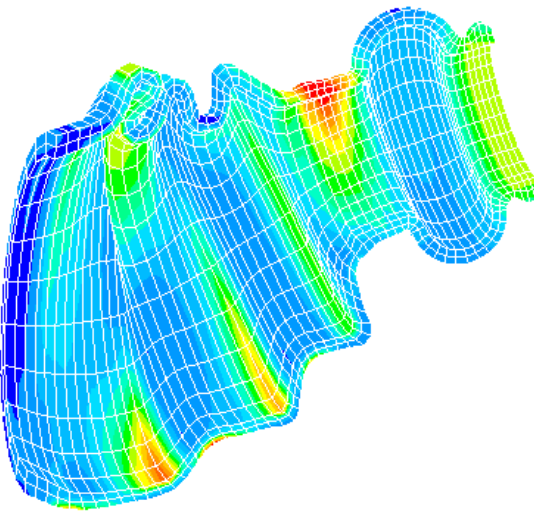
Simulatie van rubbercomponenten in verband met afdichting, demping, enz. (figuren 5 en 6)



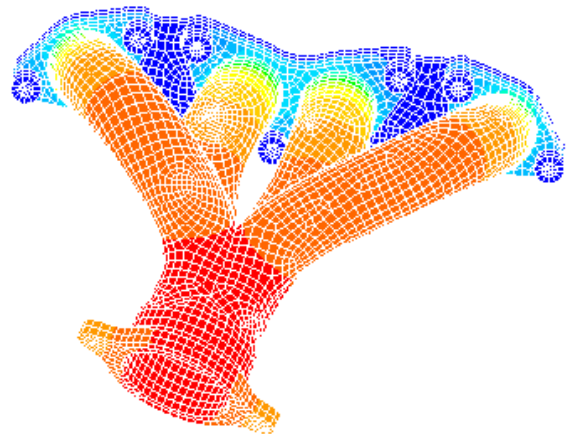
figuur 5 aanslagrubber van een schokbreker

## Voorbeeld 5

Berekenen van temperatuurverdelingen en de daarvoor optredende spanningen (figuur 7)



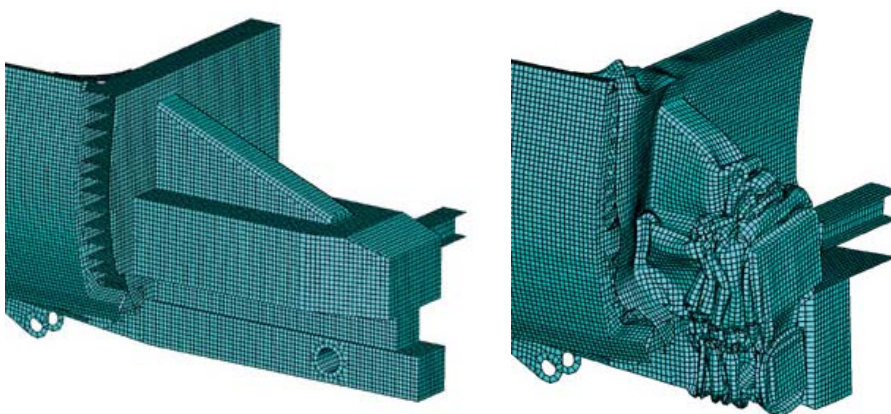
figuur 6 spanning in de stofhoes bij verdraaiing van het wiel



figuur 7 Temperatuurverdeling in een uitlaatspruitstuk

## Voorbeeld 6

Simulatie van botsproeven (figuur 8)

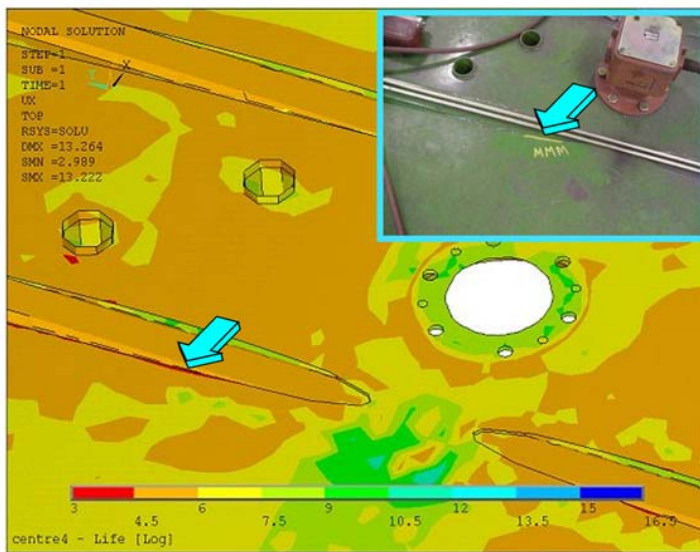


figuur 8 Beproeving van de kreukelzone van een treinwagon



### Voorbeeld 7

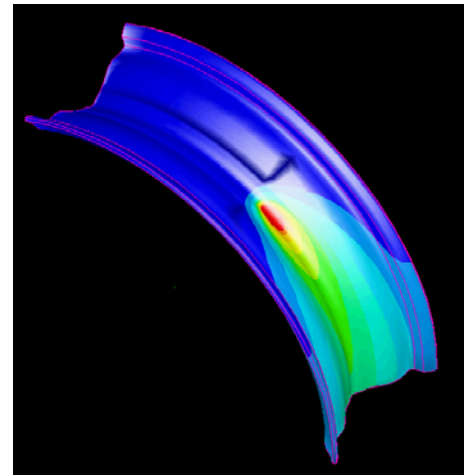
Levensduurbepaling van cyclisch belaste componenten (vermoeiing) (figuur 9)



figuur 9 Kritische plek in een landbouwvoertuig

### Voorbeeld 8

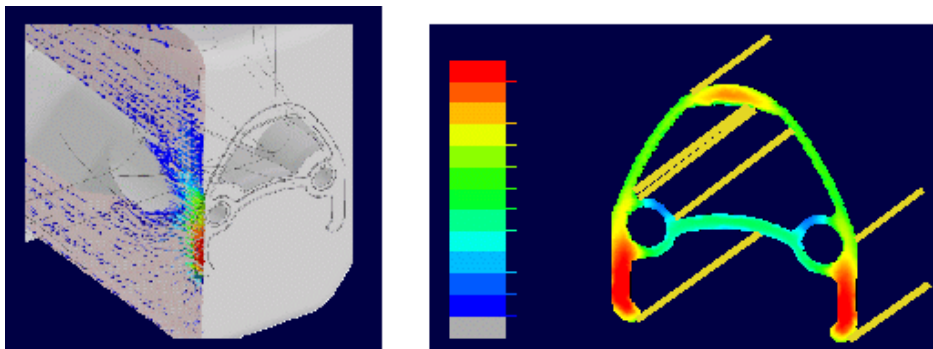
Simulatie van lasprocessen (figuur 10)



figuur 10 Temperatuur tijdens het lassen van een autovelg

### Voorbeeld 9

Simulatie van extrusie van aluminiumprofielen (figuur 11)



figuur 11 Snelheidsverdeling bij de uitstroomopening

### Voorbeeld 10

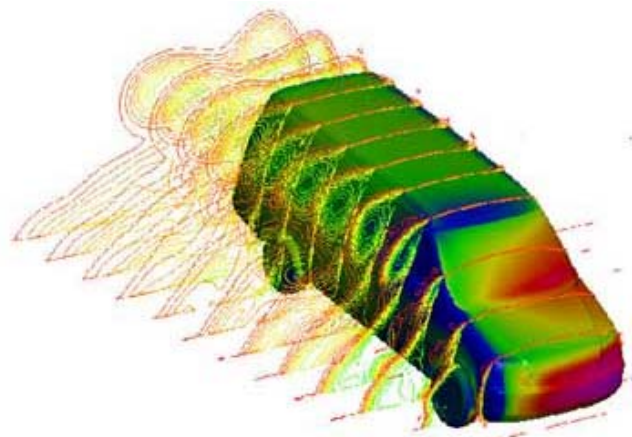
Lichter construeren met composieten (figuur 12)



figuur 12 Arm van het landingsgestel van een F16 ontwikkeld door SP Aerospace

### Voorbeeld 11

Stromingsberekeningen (figuur 13)

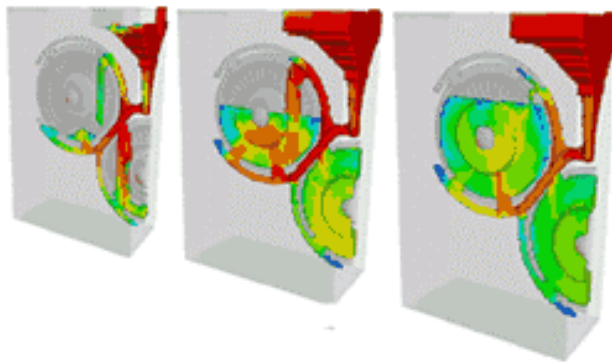


figuur 13 Een bus dwars in de windtunnel om de zijwindgevoeligheid te bepalen



## Voorbeeld 12

Het berekenen van de vulling, interne spanningen en stolsnelheid bij gietprocessen (figuur 14)



figuur 14 Gietsimulatie

## 8 Voorbeelden van berekeningen aan dunne plaat producten

### 8.1 Ontwerp van een houder

#### 8.1.1 Inleiding

Een producent van trucks is van plan deze standaard uit te rusten met een poederbrandblusser, die vanaf buiten makkelijk toegankelijk is. Op die manier kunnen in noodgevallen ook anderen dan de chauffeur er gebruik van maken. Denk hierbij bijvoorbeeld aan aanrijdingen, waarbij de truck niet zelf in brand staat, maar een personenauto, die bij het ongeval betrokken is. Daarom wordt er aan gedacht de brandblusser niet verticaal, zoals gebruikelijk, maar horizontaal te monteren. Iemand die op de grond staat (en niet al te groot is) kan er dan gemakkelijk bij en hoeft niet op de truck te klimmen.

De brandblusser kan niet zomaar op de buitenkant van de cabine worden geschroefd. Om de brandblusser tegen de ergste weersinvloeden te beschermen, dient deze in een afgesloten houder te worden geplaatst. De houder hoeft niet perfect waterdicht te zijn. Spatwaterdicht is voldoende. De onderkant van de houder mag zelfs gaten bevatten. Deze worden toch bedekt met een kunststof folie, dat op de bodem wordt gelegd.

Vanwege toegankelijkheid is wettelijk vereist, dat de brandblusser goed zichtbaar is. De houder moet daarom voor een groot deel doorzichtig zijn. Een volledig doorzichtige houder van kunststof is waarschijnlijk niet sterk genoeg en te duur.

Na het openen van de houder moet de brandblusser direct uit de houder kunnen worden genomen, zonder dat er eerst bevestigingsriemen en dergelijke losgemaakt hoeven te worden. Hoewel in het ontwerpproces aan de bevestiging ook de nodige aandacht zal worden besteed, is een direct gevolg van deze keuze dat er rekening mee moet worden gehouden, dat in extreme gevallen de brandblusser mogelijk uit zichzelf (gedeeltelijk) los kan schieten. In dat geval moet de houder voldoende stevig zijn om te voorkomen dat de brandblusser op straat belandt. De houder moet dus zeker het totale gewicht van de brandblusser kunnen dragen.

Voor het achteraf uitrusten van trucks zijn er standaard houders op de markt. Een aantal bestaat uit een diepgetrokken metalen bak met een doorzichtige perspex kap. Een probleem is dat de standaard houders alleen geschikt zijn voor verticale montage. Ook zijn de houders voor de nieuwe toepassing te groot. Bovendien voldoen ze niet aan de eis van makkelijke toegankelijkheid. Er zal daarom een nieuwe houder moeten worden ontworpen en gemaakt.

Omdat verwacht wordt dat de nieuwe houder in betrekkelijk kleine aantallen zal worden gemaakt, wordt gevraagd het ontwerp zo simpel mogelijk te houden, het

aantal onderdelen te beperken en in de productie dure bewerkingen en gereedschappen te vermijden. Overigens vereist de horizontale montage ook wat aanpassingen van de brandblusser zelf. Dit gebeurt in nauwe samenwerking met de leverancier.

Voor toepassing van de extern gemonteerde brandblusser in Europa dient de aan te brengen externe installatie te worden goedgekeurd door een daartoe bevoegde keuringsinstantie. Deze keuring zal worden uitgevoerd door de afdeling transportveiligheid van de Duitse TÜV. Omdat de houder vooral op stijfheid wordt ontworpen, is een keuringsvoorwaarde, dat de vervormingen van de gevulde houder in speciale belastingsgevallen via EEM worden berekend. Mede daarom zal EEM al vanaf het begin in het ontwerpproces worden ingezet. Een tweede reden voor het gebruik van EEM is, dat met een nauwkeurige bepaling van de stijfheid het gewicht van de houder, en dus ook de materiaalkosten, kan worden geminimaliseerd. Een laatste reden is dat met EEM vrij snel de haalbaarheid van verschillende concepten kan worden bepaald. In het vervolg wordt als voorbeeld een concept doorgerekend.

#### 8.1.2 Uitgangspunten bij het ontwerp

In kwalitatieve zin dient het ontwerp aan de volgende eisen te voldoen:

- ▶ De houder moet spatwaterdicht zijn voor de bescherming tegen regen en vuil.
- ▶ De brandblusser moet van buitenaf zichtbaar zijn en gemakkelijk los te maken. Ook moet de houder gemakkelijk te openen zijn.
- ▶ De houder met deksel dient zelfs bij extreme belasting (zie vervolg) gesloten te blijven, zodat de brandblusser nooit kan worden 'verloren'.
- ▶ Om het aantal nabewerkingen te beperken, dient de houder te worden gemaakt van voorgelakte plaat. Lasverbindingen zijn daarom niet toegestaan.
- ▶ De metalen houder is uit één stuk plaat te maken via de bewerkingen ponsen en buigen.

Een aantal eigenschappen van de houder is als volgt voorgeschreven:

- ▶ afmetingen (l x b x h): 650 x 300 x 300 mm
- ▶ tussenafstand bevestigingspunten brandblusser aan houder: ca. 450 mm.
- ▶ draagvermogen: 10 kg (maximaal gewicht brandblusser)
- ▶ materiaalhouder: St14
- ▶ minimale plaatdikte: 1,0 mm

De belangrijkste ontwerpeis is, dat de geladen constructie een tweetal extreme belastingsgevallen kan weerstaan. Dit wil zeggen dat:

- ▶ de maximale uitwijking van de zijwanden 0,5 mm bedraagt en
- ▶ de spanning nergens groter is dan 56 N/mm<sup>2</sup> (MPa) (ca. 40% van initiële vloeispanning).

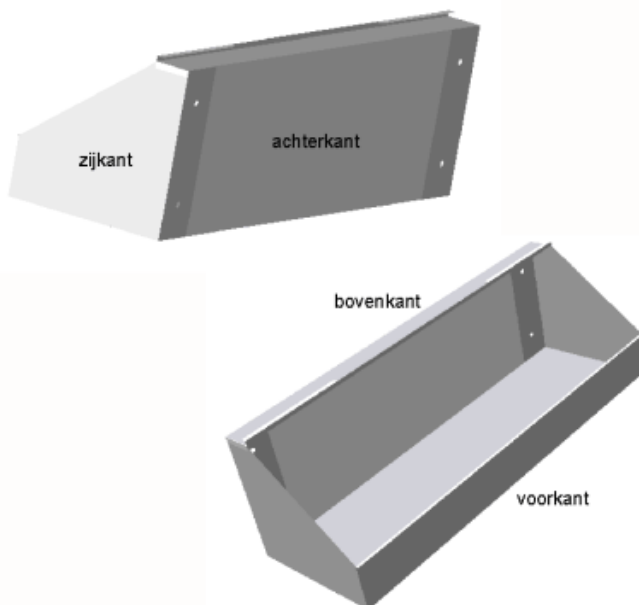


De extreme belastingen, die statisch van aard zijn, zijn als volgt gespecificeerd:

- belasting I: Een kracht op de brandblusser evenredig met 3 maal de zwaartekrachtsversnelling in neerwaartse richting, en 1 maal de zwaartekrachtsversnelling in langsrichting.
- belasting II: Een kracht op de brandblusser evenredig met 2 maal de zwaartekrachtsversnelling in opwaartse richting, en 1 maal de zwaartekrachtsversnelling in langsrichting.

### 8.1.3 Het concept

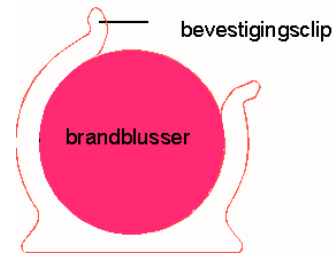
Om aan de genoemde voorwaarden te voldoen, wordt (voorlopig) gekozen voor een combinatie van een houder uit plaatstaal, die wordt afgesloten met een scharnierend deksel uit doorzichtige kunststof. Het concept van de metalen houder is te zien in figuur 16. Het deksel is gekromd in dwarsrichting. Aangezien het geen dragende functie heeft en maar zeer beperkt tot de stijfheid bijdraagt, wordt er in de berekeningen geen aandacht aan besteed en is het niet getekend. Wel te zien zijn de bevestigingsgaten en de rand aan de bovenkant voor de bevestiging van het deksel. Het deksel sluit via een 'klikverbinding' aan de voorkant. De details hiervan moeten nog worden uitgewerkt. De voorwand is al wel voorzien van een omgevouwen randje. Vanwege de afdichting valt het deksel over de zijwanden van de houder. De uiteindelijke vorm van het deksel zal worden aangepast aan die van de houder.



figuur 16 Eerste ontwerp van de houder uit plaatstaal voor de montage van een brandblusser op een truck

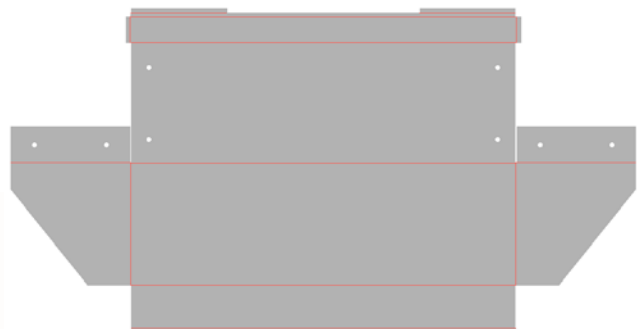
Omdat de houder toch het totale gewicht van de brandblusser moet kunnen dragen, is er in het concept gekozen voor een bevestiging van de brandblusser via kunststof clips op de bodem van de houder. Een schematische doorsnede hiervan is getekend in figuur 17. De clips dienen stevig genoeg te zijn om de brandblusser bij extreme belasting goed vast te houden. Aan de andere kant moeten ze flexibel genoeg zijn om de blusser zonder veel kracht los te kunnen halen. Dit vraagt om een ontwerpproces op zich, inclusief EEM-berekeningen. In vergelijking met plaatsing op het achtervlak heeft plaatsing van de clips op de bodem als voordeel, dat een enkele arm van de clip niet het halve gewicht hoeft te dragen en dat het risico van afbreken kleiner is.

In figuur 16 is niet goed te zien hoe de houder wordt gemaakt. Met kleurverschillen is geprobeerd aan te geven aan te geven hoe sommige stukken elkaar overlappen.



figuur 17 Bevestiging van de brandblusser (schematisch) via clips op de bodem van de metalen houder

pen. De opzet is dat de houder uit één stuk plaat wordt gemaakt via de bewerkingen ponsen en buigen. Vanwege de ontwerpeisen zijn lasverbindingen niet voorzien. Ter illustratie is in figuur 18 de voor het buigen voorbereide uitslag te zien.

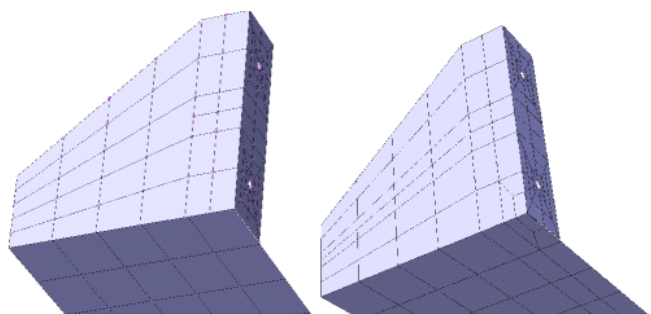


figuur 18 Uitslag vóór het buigen (buiglijnen rood gekleurd)

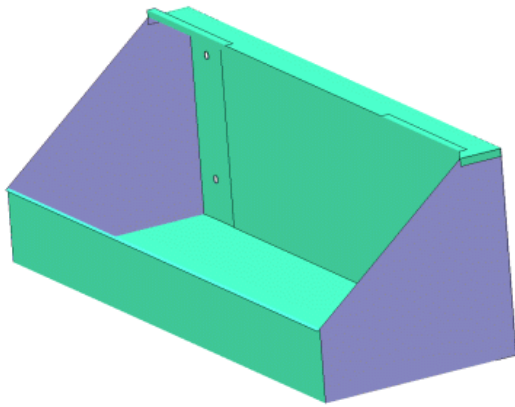
### 8.1.4 Mesh-generatie

Voor de EEM-berekening dient de houder in elementen te worden opgedeeld. Dit noemt men ook wel mesh-generatie. Hiervoor wordt een stapsgewijze aanpak gekozen. Dit wil zeggen dat de wanden van de houder stuk voor stuk worden omgezet in elementen (bijvoorbeeld eerst de bodem dan de achterkant, enz.) Het voordeel hiervan is, dat de ontwerper zo een betere controle houdt en dat een regelmatige verdeling ontstaat. Bovendien is het risico kleiner dat overlappende delen van de constructie per ongeluk aan elkaar worden vastgemaakt. In dat geval kan de stijfheid van de constructie behoorlijk worden overschat, doordat schijnbaar een verbinding wordt gemaakt, die er in werkelijkheid niet is. Ook is het aantal benodigde elementen i.h.a. kleiner, dan wanneer de elementverdeling op een automatische manier wordt gemaakt.

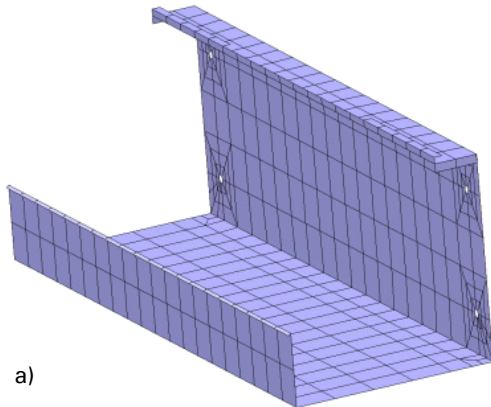
De deelstappen van de mesh-generatie en een paar specifieke aandachtspunten zijn weergegeven in de figuren 19, 20, en 21. Het eindresultaat is te zien in figuur 22.



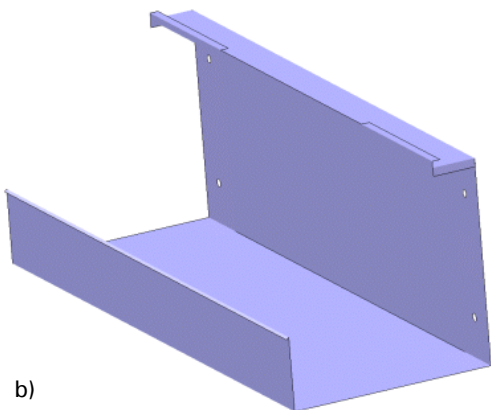
figuur 19 Elementenverdeling op de onder- en bovenkant, die niet op elkaar aansluiten (links) en de manier waarop dit is opgelost (rechts)



figuur 20 Verdeling van de houder in twee groepen om de mesh-generatie overzichtelijk te maken

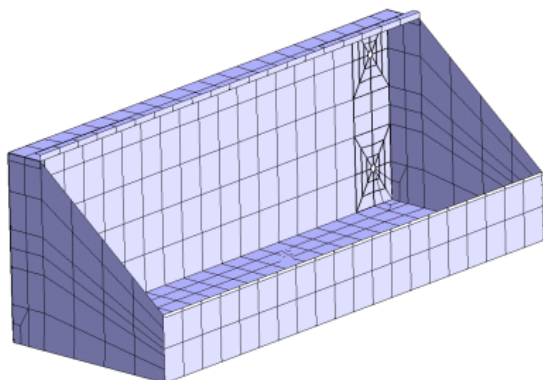


a)



b)

figuur 21 Mesh van het middenstuk (a) en outline plot ter controle (b)



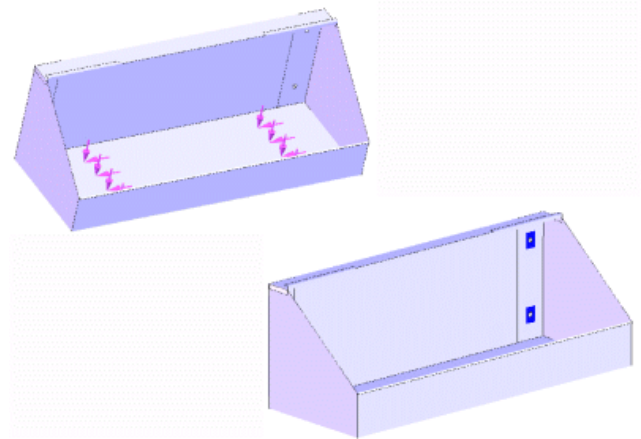
figuur 22 De gehele mesh

### 8.1.5 EEM-berekeningen

Nu de elementverdeling of mesh gereed is, kunnen de extreme belastingsgevallen (zie uitgangspunten) worden

berekend. Voor de zekerheid richten de berekeningen zich op de slechtst denkbare situatie voor de houder. De stijfheid van het deksel, de clips en de brandblusser worden daarom bewust verwaarloosd. Als de resultaten niet aan de eisen voldoen, zal de constructie worden aangepast. De resultaten van elke verandering zijn hierna als gevallen A t/m D gegeven.

In figuur 23 zijn de gebruikte randvoorwaarden te zien. De groepjes elementen die zijn gefixeerd, komen ongeveer overeen met de ringen die bij de montage worden gebruikt. Het vastzetten van de elementen gebeurt door voor te schrijven dat de verplaatsing en rotatie gelijk aan nul blijven.



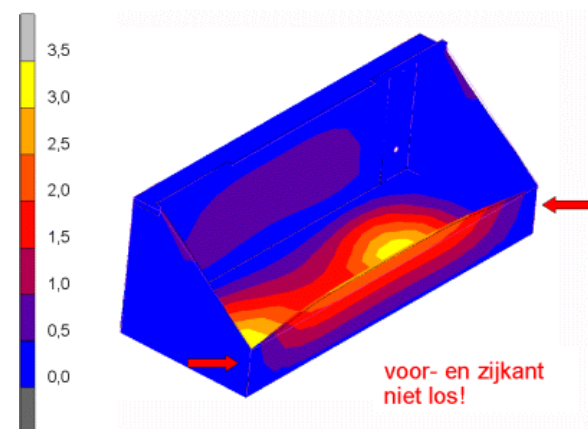
figuur 23 Overzicht randvoorwaarden, met belasting boven en gefixeerde elementen (blauw) onder

In de berekeningen zijn de volgende eigenschappen van het plaatmateriaal gebruikt:

E-modulus:  $2,1 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$   
 dwarscontractiecoëfficiënt: 0,3  
 plaatdikte: 1,0 mm

### Geval A

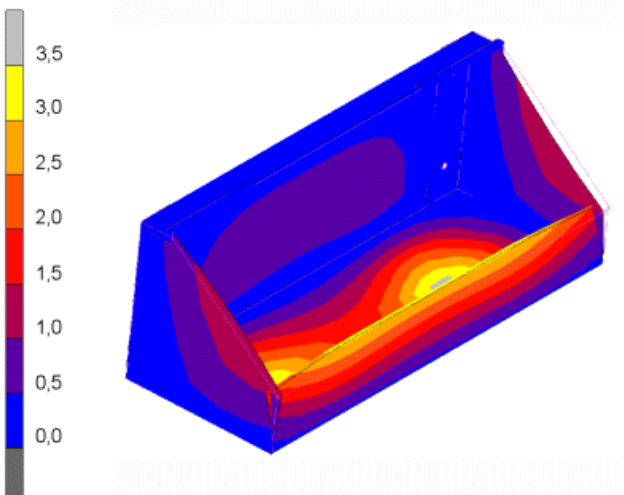
Om te beginnen zijn de berekeningen uitgevoerd voor de mesh uit figuur 22. Om beter te zien hoe de wanden vervormen, is de getekende vervorming met een factor 10 vergroot. Ditzelfde geldt voor de figuren die volgen, tenzij anders vermeld. De totale verplaatsingen uit figuur 24 laten zien dat er iets niet klopt. De voorkant zit vast aan de zijkanten, wat niet de bedoeling was. Een nauwkeurige controle van de mesh laat vervolgens zien dat er toch een fout is gemaakt bij de mesh-generatie. De rode pijlen geven aan waar er een onterechte verbinding is. Verder is te zien dat de voorwand maximaal ca. 2,5 mm vervormt. Dit komt met name doordat de bodem erg slap is.



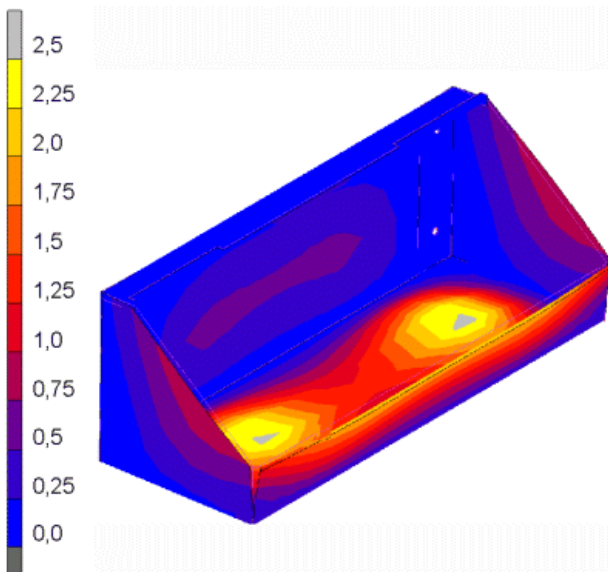
figuur 24 Totale verplaatsing van het oorspronkelijke model, belasting I (zie § 8.1.2). Pijlen geven verdachte plaatsen aan. Eenheid: mm

## Geval B

Na correctie verandert het beeld behoorlijk, zie figuur 25 en 26. Doordat de vervorming is uitvergroot, is nu goed te zien dat de voor- en zijwanden niet langer zijn gekoppeld. Daardoor verplaatst de bovenkant van de voorwand nu veel meer. Ook lijken de wanden door elkaar heen te steken. Let wel dat door de uitvergroting van de vervorming, dit veel erger lijkt dan het in werkelijkheid is. Het probleem wordt veroorzaakt, doordat er nog geen rekening mee is gehouden dat de wanden met elkaar in contact kunnen komen. Dit vraagt direct om een ingewikkelder berekening en wordt daarom nu nog even uitgesteld. Eerst zal geprobeerd worden in grote lijnen de stijfheid te verhogen.



figuur 25 Totale verplaatsing (belasting I, zie § 8.1.2) na correctie van de fout uit figuur 24. Eenheid: mm

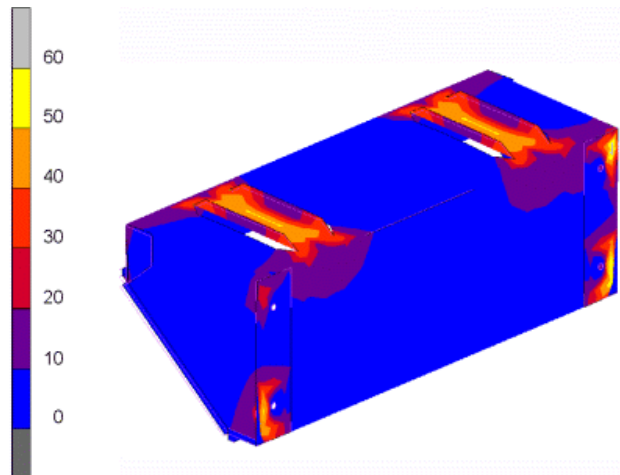


figuur 26 Totale verplaatsing voor belasting II (zie § 8.1.2). Eenheid: mm

## Geval C

De grote verplaatsing van de voorwand in geval B komt mede door de sterke vervorming van de bodem. Wanneer dat laatste wordt tegengegaan, zal de voorwand waarschijnlijk ook minder uitwijken. Daarom zal de bodem worden verstevigd. Enkele mogelijkheden hiervoor zijn het persen van rillen in de bodem, of het monteren van externe verstijvers. Door de opdrachtgever is hier bepaald dat de verstijvers via extra snij- en buigbewerkingen uit de bodem gehaald dienen te worden. figuur 27 toont een opzet die aan deze eis voldoet. Elke verstijver

bestaat uit een verticaal omgezet stuk bodemplaat. Een plaatsing aan weerszijden van elke belastingszone blijkt het meest effectief. De lineair oplopende hoogte van de verstijvers is bedoeld om een minder plotselinge verandering van de buigstijfheid op de overgang tussen verstijver en bodem te krijgen. Hiermee kan een te grote spanningsconcentratie op deze plaats worden tegengegaan. De spanningsverdeling uit figuur 27 laat zien dat dit inderdaad werkt.



figuur 27 Spanning in de buitenste laag (belasting I, zie § 8.1.2). Eenheid: N/mm<sup>2</sup>

De oplettende lezer zal hebben opgemerkt, dat behalve de verstijvers nog enkele veranderingen zijn doorgevoerd. Dit is goed te zien in figuur 28. De zijwand heeft een loodrecht omgezet rand gekregen. De rand bovenaan de voorwand is sterk verbreed en ook nog een keer naar beneden omgezet. Verder is de voorwand aan de uiteinden voorzien van zijflenzen die op de bodem rusten. Figuur 28 geeft de verdeling weer van elke verplaatsingscomponent. Te zien is dat de zijwanden al aan de ontwerpeisen voldoen, maar de voorwand nog niet. De maximale doorzakking van de bodem bedraagt nu ca. 1 mm, maar een grens is hiervoor niet gegeven.

Het spanningsniveau (figuur 27) voldoet ook nog niet aan de eisen. Opvallend is de hoge spanning vlakbij de schroefgaten. De indruk wordt gewekt dat de achterwand gebogen wordt om de montageingen. In de praktijk wordt deze buiging beperkt door het vlak waarop de houder geschroefd is en het feit dat de wand ter plaatse de dubbele dikte heeft.

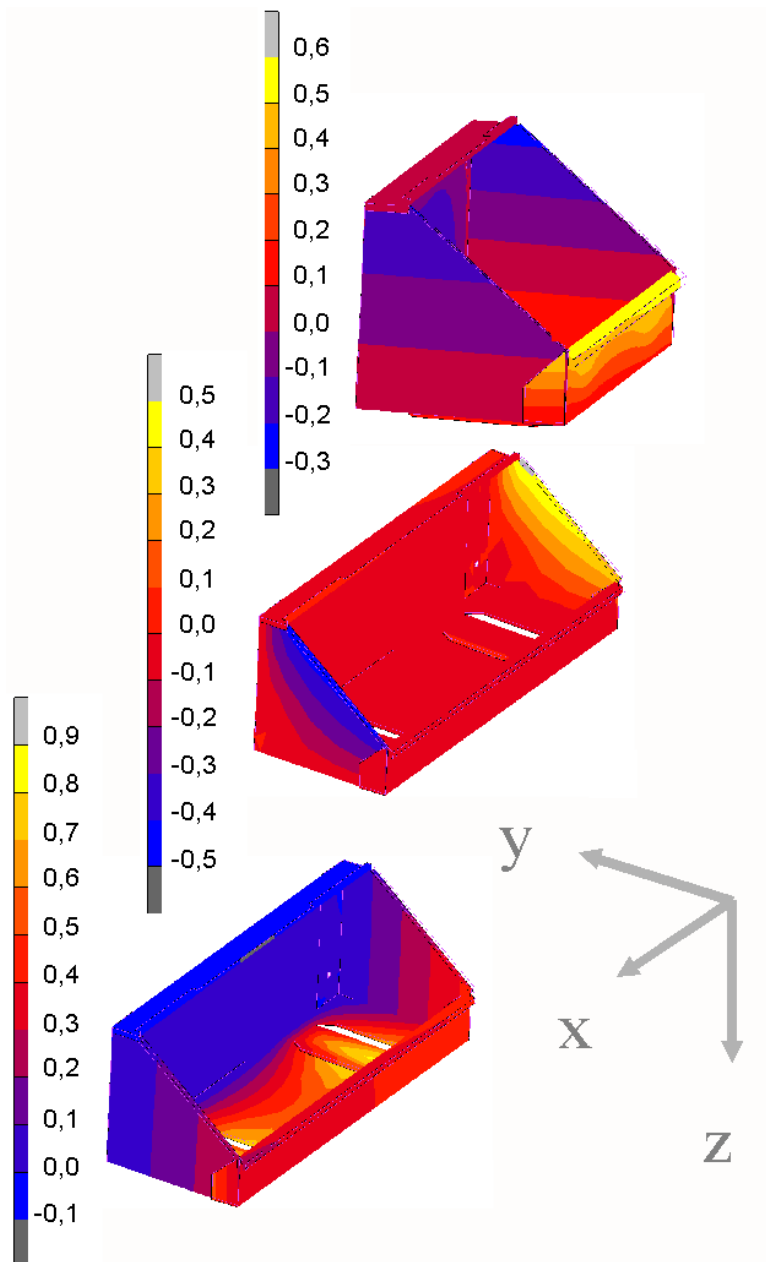
Een inspectie ter plaatse, zoals in figuur 29, laat zien dat de vervorming van de beide lagen niet klopt: de bovenplaat dringt de onderplaat binnen. Om een goed contact tussen beiden te waarborgen, moet het model daarom worden aangepast.

Het contact tussen de voorwand en de zijwanden is ook nog steeds niet realistisch. Mogelijk verbetert de stijfheid als dit wel het geval is. Een herziene berekening wordt daarom gepresenteerd in geval D.

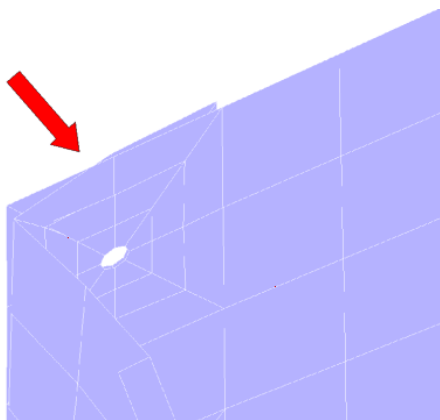
## Geval D

In de laatste variant wordt het contact tussen de plaatdelen wel goed meegenomen, evenals het contact van de achterwand van de houder met het montagevlak.

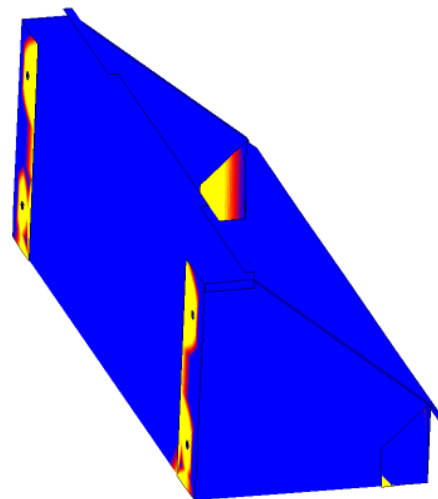
Hoewel het materiaal alleen elastisch vervormt en de verplaatsingen klein blijven, betekent dit dat toch een niet-lineaire berekening moet worden gedaan (zie bijlage I voor meer uitleg over dit begrip). Voor belasting I (zie § 8.1.2) laat figuur 30 zien welke delen van de houder contact maken.



figuur 28 Van boven naar beneden: Verplaatsingen in breedte-, langs- en hoogterichting (y, x, z) voor belasting I (zie § 8.1.2). Eenheid: mm



figuur 29 Opengewerkte detailtekening van de bovenhoek van de achterwand. De plaatdelen die op elkaar horen te liggen doordringen elkaar, omdat geen rekening wordt gehouden met contact. Voor de duidelijkheid is de vervorming overdreven weergegeven

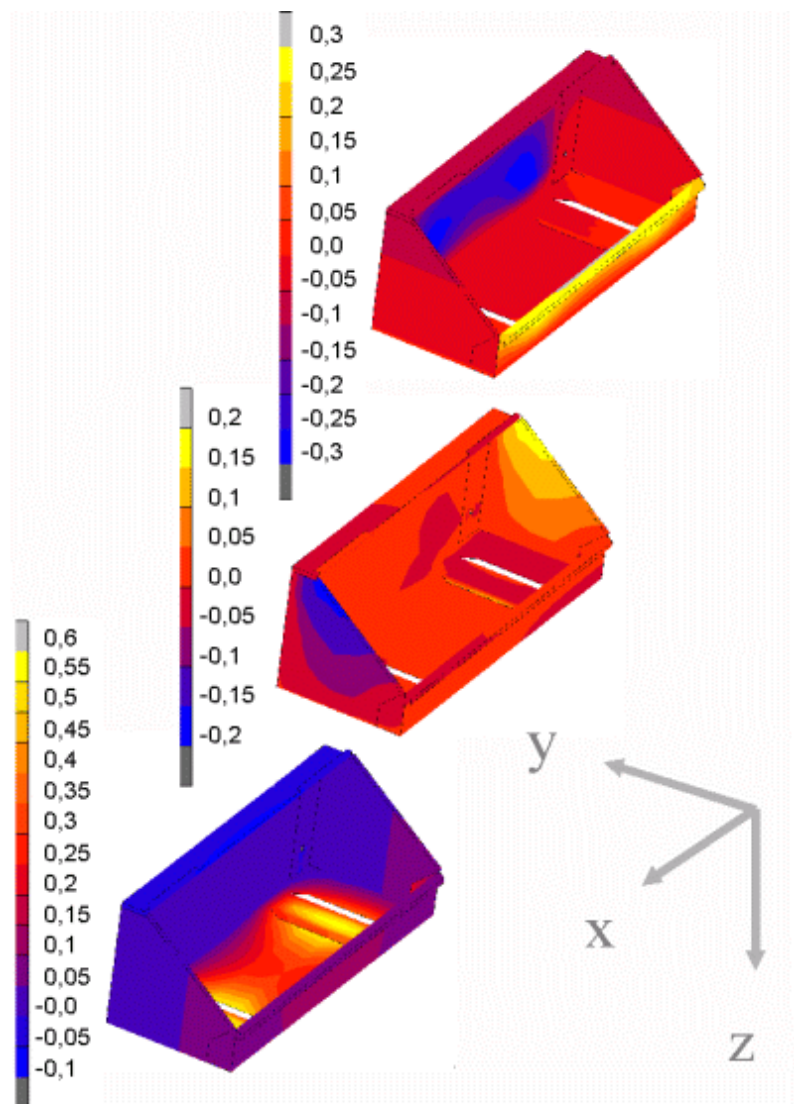


figuur 30 Plaatsen (licht gekleurd) die in contact zijn bij belasting I (zie § 8.1.2)

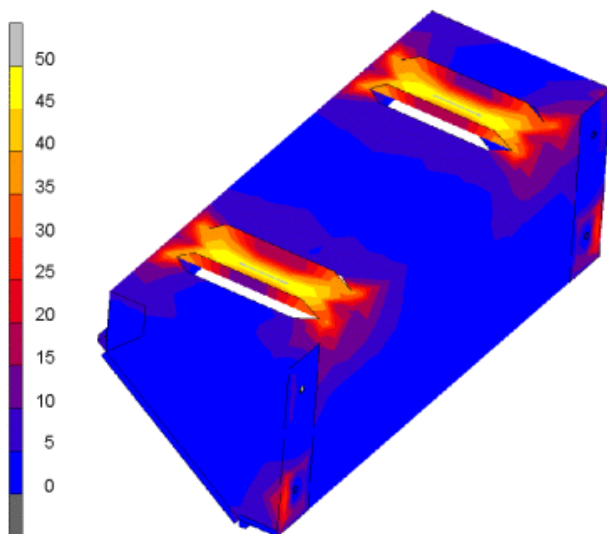


Het resultaat van de berekeningen is te zien in de figuren 31, 32 en 33. Let op: De vervormingen zijn niet langer met een factor 10 vergroot, zodat het op het eerste gezicht kan lijken dat de vervormingen veel kleiner zijn

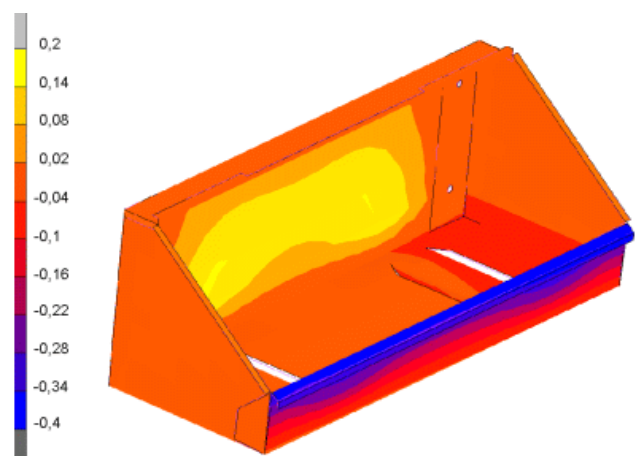
dan eerst. Duidelijk is dat door het meenemen van het contact de berekende stijfheid is verhoogd en dat daardoor de verplaatsingen in alle richtingen aan de ontwerp-eisen (maximale grootte 0,5 mm) voldoen.



figuur 31 Van boven naar beneden: Verplaatsingen in breedte-, langs- en hoogterichting (y, x, z) voor belasting I (zie § 8.1.2). Let op: Het bereik van de kleuren verschilt per plaatje! Eenheid: mm. Bereik boven: -0,3 tot +0,3, midden: -0,2 tot +0,2 en onder van -0,1 tot +0,6



figuur 32 Spanning in de buitenste laag (belasting I, zie § 8.1.2). Eenheid:  $\text{N/mm}^2$



figuur 33 Verplaatsing in de breedterichting voor belasting II, zie § 8.1.2 (opwaartse kracht). Eenheid: mm

De spanning rondom de bovenste montagegaten (zie figuur 30) is dankzij het contact behoorlijk kleiner geworden. Het maximale spanningniveau wordt daarom niet langer in de achterwand bereikt, maar in de bodem midden tussen de verstijvers. Het niveau is iets hoger dan 50 N/mm<sup>2</sup> en voldoet daarmee ook aan de ontwerpeisen.

Ook voor belasting II (zie § 8.1.2) wordt aan de ontwerpeisen voldaan. figuur 33 geeft aan dat de voorwand slechts 0,4 mm naar voren komt.

### 8.1.6 Conclusie en opmerkingen

Zoals het voorbeeld aangeeft is EEM een effectief hulpmiddel om in een vroeg stadium te bepalen of een concept aan de mechanische ontwerpeisen voldoet.

De berekeningen aan de houder zijn zeer gevoelig voor fouten in de elementverdeling.

Voor eenvoudige vormen, zoals hier besproken, is de EEM-software flexibel genoeg om direct veranderingen door te voeren, zonder dat eerst een nieuwe CAD-file wordt gemaakt.

Het verwaarlozen van contact tussen plaatdelen kan leiden tot afwijkingen van meer dan 10% (zie verschil tussen geval C en D). Zelfs voor deze betrekkelijk eenvoudige constructie is daarom toch een niet-lineaire berekening nodig.

*Opmerking: Voor het definitief ontwerp dient de berekening eigenlijk nog herhaald te worden met een fijnere elementverdeling om een eventueel effect hiervan op de resultaten vast te stellen.*

De vorm van de gaten in de bodem verdient wellicht nog wat extra aandacht. Door bijvoorbeeld de randen voldoende af te ronden, kan worden voorkomen dat lokaal een te hoge spanning ontstaat. Ook hierbij kunnen EEM berekeningen uitkomst bieden.

Als indicatie wordt vermeld, dat voor deze berekeningen in totaal ca. 20 manuren zijn gebruikt. Deze tijd lijkt zonder meer gerechtvaardigd, gezien de mogelijke tijdsbesparing in het keuringstraject en de tijd die een alternatieve aanpak via trial and error zou vergen.

## 8.2 Herontwerp van een motorkap

Gewichtsbesparing is een belangrijk thema in de automobiellindustrie. Door het aanbrengen van allerlei veiligheidsvoorzieningen, zoals airbags en verstevigingsbalken aan de ene kant en comfort verhogende zaken als airco en elektronica aan de andere kant, neemt het gemiddelde gewicht van auto's de laatste jaren toe. Vanuit een oogpunt van brandstofverbruik, milieu en rijprestaties is deze groei ongunstig. Daarom streeft men bij het ontwerp van auto-onderdelen naar een zo klein mogelijk gewicht, zonder afbreuk te doen aan de overige eisen.

Een mogelijkheid om lichter te construeren, is om materiaal met een lager soortelijk gewicht toe te passen. Om die reden worden steeds meer onderdelen uit bijvoorbeeld aluminium gemaakt. Afgezien van de kosten, kan een materiaal niet zo maar worden vervangen door een ander. Een voorwaarde is dat de eigenschappen, zoals de stijfheid en sterkte, niet te veel veranderen. Vaak is daarom een herontwerp nodig. Als voorbeeld wordt hier een motorkap besproken die uit aluminium in plaats van uit staal gemaakt gaat worden. Dit voorbeeld is beschikbaar gesteld door Corus Research & Development.

Voor de duidelijkheid eerst het volgende. Een motorkap is opgebouwd uit 2 delen: een gladde buitenplaat die het uiterlijk bepaalt en een raamwerk aan de onderzijde dat voor de stevigheid zorgt. De 2 delen worden meestal aan elkaar gefelst en met kit verlijmd.

De eisen die aan het herontwerp van de motorkap worden gesteld zijn:

- ▶ een vermindering van de totale massa met ca. 50%;

- ▶ een ongewijzigde torsie- en buigstijfheid;
- ▶ een identieke buitenzijde;
- ▶ een ongewijzigde randcontour van het binnendeel (aansluiting op carrosserie);
- ▶ zelfde deukweerstand.

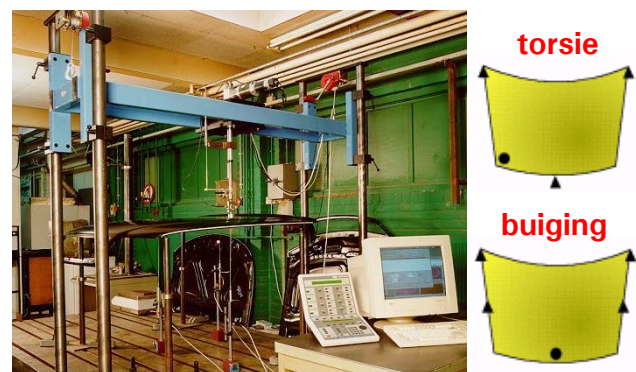
De laatste eis hangt niet zo zeer samen met de constructie, als wel met de eigenschappen van het te gebruiken plaatmateriaal. Dit aspect zal hier daarom verder onbesproken blijven. De aandacht wordt verder vooral gericht op de stijfheid van de constructie en de simulatie daarvan met behulp van EEM.

Om te beginnen worden de buig- en torsiestijfheid van het oorspronkelijke ontwerp uit staal via EEM berekend. Uit een vergelijking met metingen kan dan blijken of het EEM-model correct is en voldoende nauwkeurig. Bij voldoende vertrouwen en na eventuele aanpassingen, kunnen dan vervolgens andere ontwerpen worden gesimuleerd.

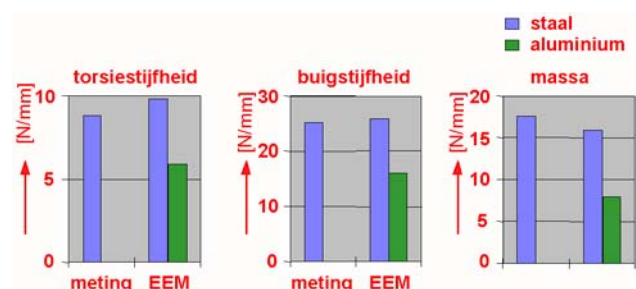
Op het eerste gezicht kan het simuleren van een bestaand ontwerp of product overbodig lijken. Toch is dit in veel praktijkgevallen een zinvolle eerste stap om de bruikbaarheid van een EEM-model te toetsen en fouten uit te sluiten. Wat hierbij helpt, is dat van een bestaand product vaak veel informatie beschikbaar is, die ter controle kan worden gebruikt.

De gebruikte meetopstelling is te zien in figuur 34. Een vergelijking tussen de resultaten van de metingen en de EEM-berekeningen is te vinden in figuur 35. De overeenkomst is goed te noemen, tenminste als een foutenmarge van ca. 10% wordt toegepast, wat niet ongebruikelijk is in dit type werk.

De definitie van de buig- en torsiestijfheid van de motorkap is weergegeven in figuur 34. De driehoekjes geven de punten aan, waar de constructie wordt ondersteund, de cirkeltjes de plaatsen waar de motorkap wordt ingedrukt. De kracht die hiervoor nodig is, gedeeld door de verplaatsing levert de stijfheid (in N/mm).



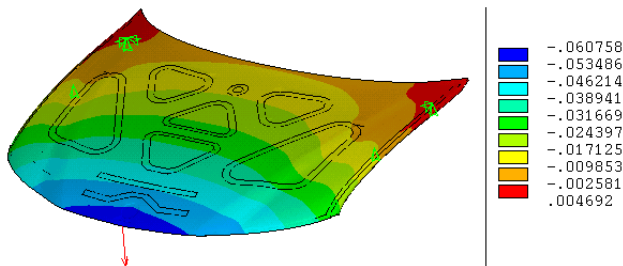
figuur 34 Meetopstelling (links) en definitie van de torsie- en buigstijfheid van de motorkap (rechts)



figuur 35 Gemeten en gesimuleerde eigenschappen van een bestaande motorkap uit staal (blauw) en simulatieresultaten (groen) voor het eerste ontwerp uit aluminium

Als eerste en meest eenvoudige ontwerp van de aluminium motorkap is gekozen voor de bestaande constructie met een grotere plaatdikte. De diktes van het buiten- en binnendeel bedragen resp. 1,2 en 1,0 mm. tegen 0,8 en 0,7 mm in de bestaande versie. Van dit eerste ontwerp zijn de buig- en torsiestijfheid berekend. De uitkomsten zijn weergegeven in figuur 35. Het blijkt dat de stijfheid duidelijk tekortschiet. Het ontwerp dient daarom te worden herzien.

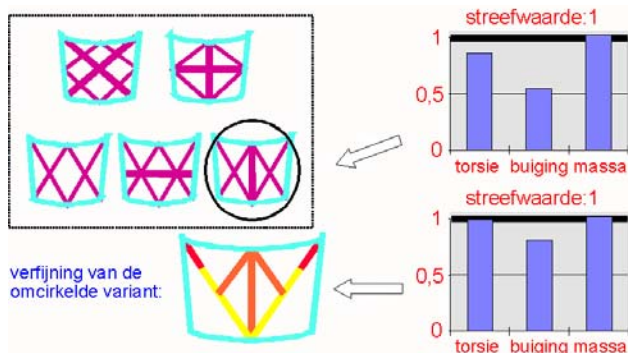
Voor de berekening zijn schaalementen gebruikt. Deze leveren het nauwkeurigste resultaat en zijn het efficiëntst voor een dunwandige constructie als deze (zie ook de uitleg in bijlage I). Het model is afgebeeld in figuur 36, de berekende verplaatsing in cm. Ook de ondersteuningspunten (groen) en de belasting (met een pijl) zijn getekend.



figuur 36 Verplaatsing in cm tijdens de buigtest gesimuleerd met EEM

Om het ontwerp te verbeteren, is vooral gekeken naar het binnendeel, omdat verhoging van de stijfheid van dit deel in vergelijking met het buitendeel minder gewicht kost. Omdat het binnendeel een raamwerk is, kan de stijfheid worden afgeschat met een balkenmodel. Dit werkt sneller en gemakkelijker dan een model met schaalementen.

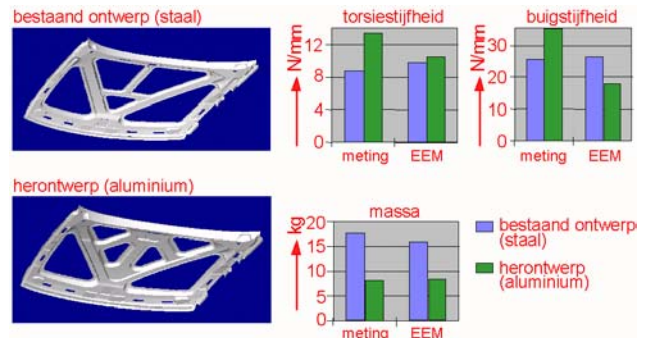
Er zijn verschillende varianten voor het ribpatroon van het raamwerk geprobeerd. Deze zijn linksboven te zien in figuur 22. Van deze varianten gaf het omcirkelde patroon het beste resultaat. Dit resultaat is rechts in de figuur aangegeven als percentage van de streefwaarden, die de grootte 1 hebben. Omdat het resultaat nog onvoldoende was, is het patroon verder bewerkt en verfijnd tot het patroon onder in figuur 37. De kleurvariatie van de ribben geeft hier een variatie in hoogte van de ribben weer. Dit patroon is gekozen als uitgangspunt voor het definitieve herontwerp.



figuur 37 Bepaling van het optimale ribpatroon voor het binnendeel

Het uiteindelijk herontwerp van het binnendeel is afgebeeld in figuur 38. Wat opvalt zijn de extra brede ribben in het midden, die dienen om het gebrek aan stijfheid door de verwisseling van staal door aluminium te compenseren. Van het herontwerp zijn de eigenschappen

zowel gemeten als gesimuleerd. Voor de simulatie zijn hier weer schaalementen gebruikt. De resultaten zijn te zien in figuur 38. De berekende buigstijfheid van het herontwerp is duidelijk nog te laag. De berekende torsiestijfheid volstaat wel. Vanwege de kosten is er voor gekozen om dit probleem niet op te lossen via verdere berekeningen, maar door toepassing van een andere kit in het prototype. De aan het prototype gemeten waarden in figuur 38 laten zien, dat dit duidelijk effect heeft, waardoor het nieuwe ontwerp nu ruimschoots aan de gestelde eisen voldoet. Het lijkt er zelfs op dat er nog beperkt ruimte is om de massa nog wat verder te verlagen. Voor de duidelijkheid: de berekende waarden zijn te laag, omdat ze betrekking hebben op het oude kitsysteem.



figuur 38 Oorspronkelijk en nieuw ontworpen binnendeel met gemeten en berekende eigenschappen

De massa van het uiteindelijke herontwerp is gelijk aan 7,6 kg. Vergeleken met het allereerste herontwerp bedraagt de toename in massa slechts 0,3 kg, terwijl de buig- en torsiestijfheid behoorlijk zijn toegenomen. Dit resultaat is met name te danken aan het gebruik van EEM-berekeningen.

De bovenstaande berekeningen hebben in totaal ca. een week in beslag genomen. Vooral door de optimalisatie van het ribpatroon is men vrij snel tot een goed herontwerp gekomen.

### 8.3 Dieptreksimulatie carterpan

In de automobielsector, waar grote aantallen halfproducten, vaak met een ingewikkelde vorm, uit dunne plaat worden vervaardigd, is dieptrekken een veelgebruikte techniek. Om de beheersbaarheid van dit proces te vergroten en in een zo vroeg mogelijk stadium de maakbaarheid van een deel te kunnen afschatten, wordt veelvuldig gebruikgemaakt van simulatie op basis van EEM. Een bijkomend voordeel is, dat gemakkelijk variaties kunnen worden toegepast, zodat optimalisatie mogelijk is. Het meest wordt speciaal voor dit doel ontwikkelde software gebruikt, die voorzien is van tal van proces-specifieke opties en een gebruiksvriendelijke interface. Deze software ondersteunt o.a. meerstapsprocessen, trekrillen, spacers, tailored blanks en verschillende ondersteuningswijzen van de plooihouder. Als mogelijke processtappen worden genoemd:

- positionering van de blenk met effect zwaartekracht;
- het sluiten van plooihouder en matrijs;
- dieptrekken;
- in- of afsnijden;
- wegnemen van gereedschap met eventuele terugvering.

Dieptrekken is een vrij ingewikkeld proces om te simuleren, aangezien er met diverse niet-lineaire effecten zoals anisotrope plasticiteit, grote vervormingen, contact en wrijving rekening moet worden gehouden.

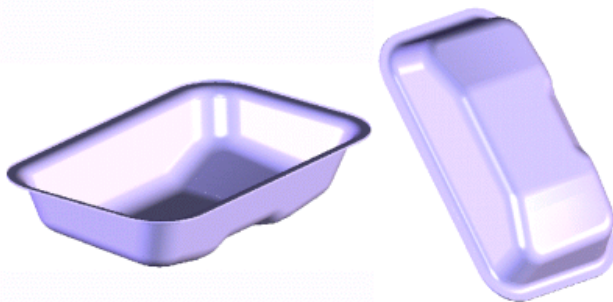
Voor een betrouwbare voorspelling dient enerzijds een geometrische beschrijving van de gereedschappen, bijvoorbeeld via een CAD-file, voor handen te zijn. Anderzijds dient men gegevens te hebben omtrent het mate-



riaalgedrag (verstevinging, anisotropie e.d.) en de sme-  
ringscondities. De meeste software wordt overigens  
standaard geleverd met een uitgebreide materiaaldatab-  
base, die de meest gangbare materiaaltypen bevat.  
Soms is alleen de geometrie van het product bekend.  
Sommige pakketten hebben de mogelijkheid om, via een  
extra module, gereedschappen te construeren op basis  
van de productgeometrie. Deze optie is meestal alleen  
zinnig voor een 1-stapsproces of om snel de maakbaar-  
heid af te schatten. De gereedschapsgeneratie verloopt  
veelal volgens de volgende stappen:

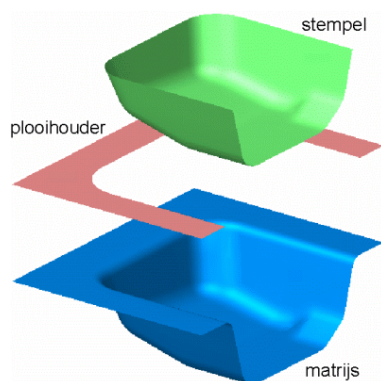
- het dichtn van eventuele gaten in het CAD-model van  
het product (de gereedschappen dienen glad te zijn);
- het construeren van de omtrek van het dieptrekstempel;
- het genereren van een basisoppervlak voor de plooi-  
houder;
- constructie van de matrijs door verbinden van het  
plooihoudevlak met de omtrek van het dieptrekstempel;
- het afronden van eventuele scherpe hoeken en vormen;
- definitie van stempel en plooihouder als subset van  
het matrijsoppervlak.

In dit voorbeeld beschouwen we het dieptrekken van de  
basisvorm van een carterpan zoals afgebeeld in figuur 39.  
Na het dieptrekken moet de flens nog gedeeltelijk wor-  
den omgezet om een opstaande rand te maken. Dit is  
een omvormingsoperatie die door de meeste software  
ook wordt ondersteund. Nabewerkingen worden hier  
verder niet besproken.

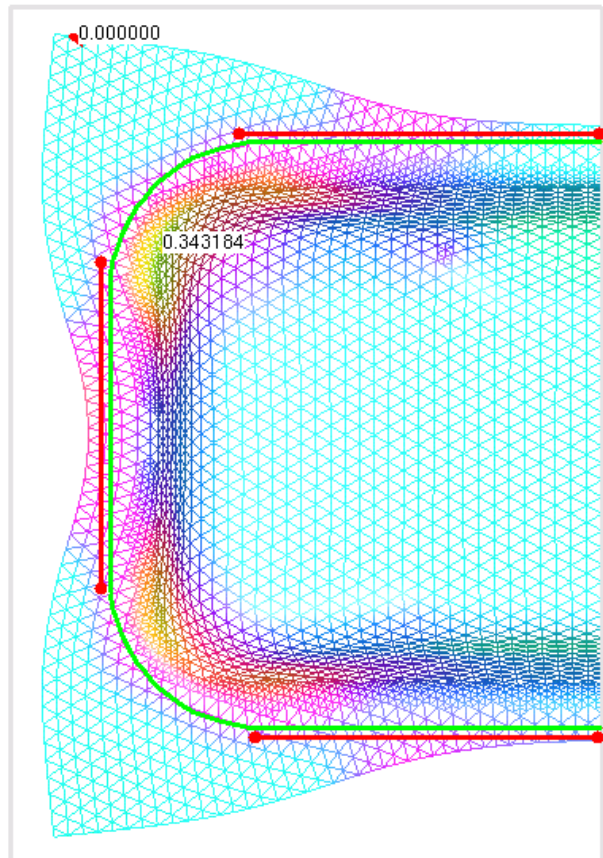


figuur 39 Vorm van de carterpan gebruikt in de dieptrek-  
simulatie

De gereedschappen die na het plat leggen van de omge-  
vouwen flens en met gebruikmaking van symmetrie zijn  
gegenereerd, zijn afgebeeld in figuur 40. Omdat uit de  
eerste simulatieresultaten bleek dat het werkstuk te wei-  
nig werd gestrekt, zijn trekkrillen toegevoegd. Zoals ge-  
bruikelijk worden deze niet in detail gemodelleerd, maar  
gerepresenteerd door smalle zones, waarin het materiaal  
bij verplaatsing extra weerstand ondervindt. Deze zones  
zijn schematisch weergegeven in de plot van het werk-  
stuk aan het einde van de dieptrekslag in figuur 41.



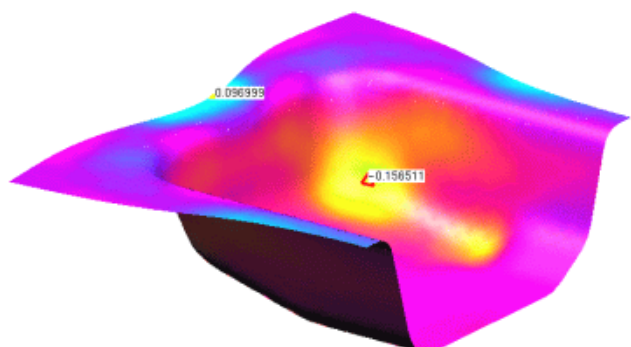
figuur 40 Gereedschappen gebruikt in de dieptreksimulatie



figuur 41 Mesh van het diepgetrokken product met de  
plastische rekverdeling en trekkrillen (rood)

In deze figuur is goed het effect van de automatische  
meshverfijning te zien, waardoor elementen in kleinere  
elementen worden onderverdeeld. Deze onderverdeling  
gebeurt met name bij de rand van de stempel en daar  
waar het materiaal over de matrijsrand glijdt, omdat daar  
de sterkste buiging optreedt en de contactcondities het  
meest veranderen.

Een belangrijk kwaliteitsaspect van een diepgetrokken  
product is de resterende wanddikte. Figuur 42 laat zien  
hoe de wanddikte van het product verandert. Op plaat-  
sen waar het materiaal wordt gestrekt, vooral bij de  
hoeken van de stempel en in de wand, neemt de dikte  
af. Door de toestroom van materiaal in de flens treedt  
stuik op, wat een verdikking geeft.

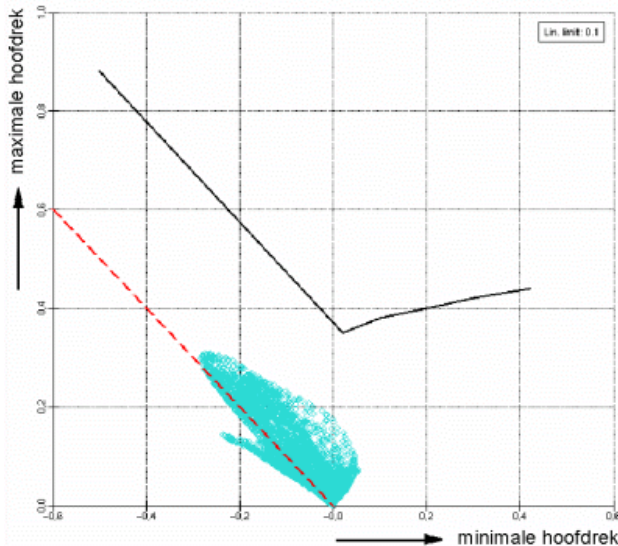


figuur 42 Totale dikteverandering na omvorming

De maakbaarheid wordt in belangrijke mate bepaald  
door de vraag of het materiaal al dan niet scheurt. Het  
antwoord hierop kan worden gevonden met behulp van  
de grensvormingskromme. In figuur 43 is dit de ge-  
trokken lijn. Langs de horizontale en verticale as in deze  
figuur staan achtereenvolgens de kleinste en grootste



van de twee hoofdrekken in het vlak van de plaat uitgezet. De grensvormingskromme, die overigens wordt bepaald uit metingen, geeft de uiterste waarden van de beide hoofdrekken aan. Voor punten die boven de kromme liggen zal scheurvorming optreden. Voor punten die er voldoende ver onder liggen, gebeurt dit niet. Voldoende wil zeggen dat een marge van zeker 10% van de hoofdrekken gehanteerd dient te worden. De reden hiervoor is de onnauwkeurigheid van de metingen waarop de kromme is gebaseerd.



figuur 43 Indicatie scheurvorming volgens het forming limit diagram

De puntenwolk in figuur 43 geeft de combinaties van hoofdrekken aan het einde van de dieptreksimulatie weer, voor alle elementen uit de mesh. Het is duidelijk dat alle punten ruim onder de grensvormingskromme blijven. Er is in het voorbeeld daarom geen risico dat het werkstuk scheurt.

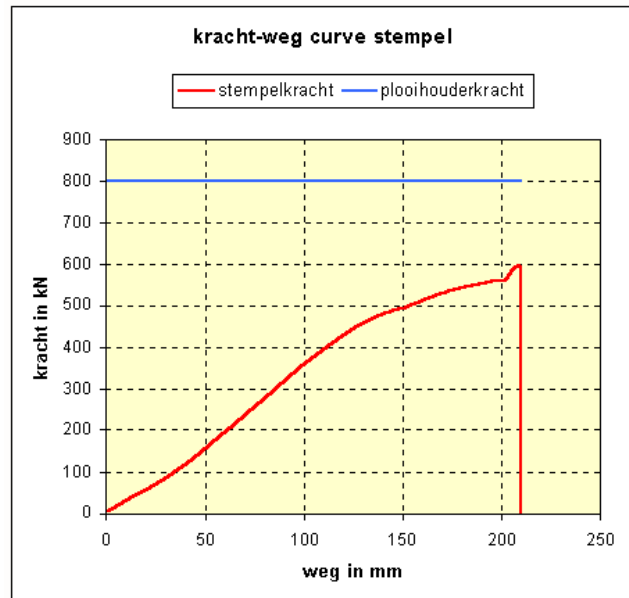
Naast scheurvorming kan ook plooivorming het dieptrekproces verstoren. De kans op plooivorming is onder andere afhankelijk van de spanningstoestand en kromming van het materiaal. Als indicatie voor de kans op plooivorming wordt wel gekeken naar de hoofdrekken in het vlak van de plaat. Is de som van beiden negatief, dan wordt het sein op rood gezet. In figuur 43 correspondeert deze eis met de rode gestippelde lijn. Voor punten links onder deze lijn wordt plooivorming voorspeld. Op het eerste gezicht lijkt figuur 43 aan te geven dat er sprake is van behoorlijke plooivorming. Op het tweede gezicht valt dit mee, aangezien punten linksonder overeenkomen met elementen die onder de plooihouder liggen. Bij voldoende plooihouderdruk, zal de werkelijke kans op plooivorming hier beperkt zijn.

De kracht nodig voor het dieptrekken volgt uit de kracht-wegkromme van de stempel, zoals weergegeven in figuur 44. Hier is tevens het niveau van de (constante) plooihouderkracht gegeven.

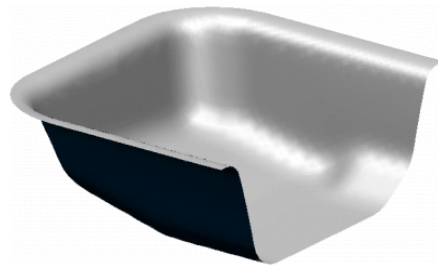
Het effect van het op maat snijden van het werkstuk na het dieptrekken is te zien in figuur 45.

Aangezien op grond van de vorm van het product hier geen belangrijke terugveringseffecten te verwachten zijn, is de terugvering niet gesimuleerd.

Tenslotte de opmerking dat de simulatie een benadering blijft. Vanwege mogelijke afwijkingen is er daarom geen garantie dat met de gegevens die de simulatie heeft opgeleverd het echte dieptrekproces probleemloos verloopt.



figuur 44 Stempelkracht in kN als functie van de stempelverplaatsing in mm



figuur 45 Helft van het werkstuk na het afsnijden van de rand

Een niet-perfekte uitlijning van het gereedschap kan bijvoorbeeld in de praktijk grote gevolgen hebben, terwijl dit in de simulatie niet wordt meegenomen. Ondanks mogelijke afwijkingen tussen simulatie en praktijk is het wel zo dat de simulaties goede richtlijnen bieden bij het ontwikkelen van een proces. Het definitief afregelen en bijstellen van het proces blijft altijd een taak van de mensen op de werkvloer.

De simulatie zoals beschreven, inclusief het bewerken van de aangeleverde CAD-data kost circa 20 manuren. Vergeleken met de kosten voor het maken van de gereedschappen of voor het herhaaldelijk proefpersen, betekent dit een beperkt bedrag. Simulatie is dus al snel rendabel.

## 9 Literatuur

- [1] D.Baguley, D.R.Hose, "Why do Finite Element Analysis?"; NAFEMS, 1994
- [2] D.Baguley, D.R.Hose, "How to Get Started with Finite Elements"; NAFEMS, 1994
- [3] D.Baguley, D.R.Hose, "How to Choose a Finite Element Analysis System?"; NAFEMS, 1994
- [4] "A Finite Element Primer"; NAFEMS, 1992
- [5] A.M. Prior, "Why do Nonlinear Finite Element Analysis?"; NAFEMS, 1998
- [6] M.J.Fagan, "Finite Element Analysis"; Prentice Hall, 1992
- [7] T.J.R. Hughes, "The Finite Element Method"; Dover Publications, 2000
- [8] O.C.Zienkiewicz, "The Finite Element Method"; McGraw-Hill, 1977

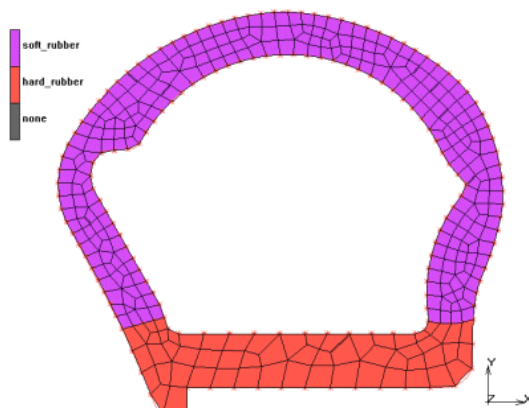
- [9] VM110: Dieptrekken (vormgeving van dunne metaalplaat); Vereniging FME-CWM, Zoetermeer
- [10] VM111: Materialen (vormgeving van dunne metaalplaat); Vereniging FME-CWM, Zoetermeer
- [11] VM113: Buigen (vormgeving van dunne metaalplaat); Vereniging FME-CWM, Zoetermeer
- [12] VM114: Scheidingstechnieken voor metalen; Vereniging FME-CWM, Zoetermeer

## Basisprincipes EEM

Kort gezegd is de eindige elementen methode (EEM) een numerieke benaderingsmethode voor een fysisch probleem. Voorbeelden van een mechanisch probleem zijn bijvoorbeeld de doorbuiging van een balk in een draagconstructie of het bepalen van het kracht-wegverloop van een veer. Een voorbeeld van een gekoppeld thermisch-mechanisch probleem is het temperatuurverloop en de contactdruk bij het activeren van een remsysteem.

Het probleem kan worden beschreven als een wiskundige vergelijking met rand- en/of beginvoorwaarden. Bij mechanische problemen gaat het hier veelal om bevestigings- en ophangpunten, externe krachten, beginsnelheden en dergelijke.

De term "eindige elementen" slaat op de stukjes waarin het oppervlak of volume van het betrokken onderdeel of proces wordt onderverdeeld. Als voorbeeld laat figuur B-1 een verdeling zien in vierhoekjes van een doorsnede behorend bij een 2-dimensionaal probleem.

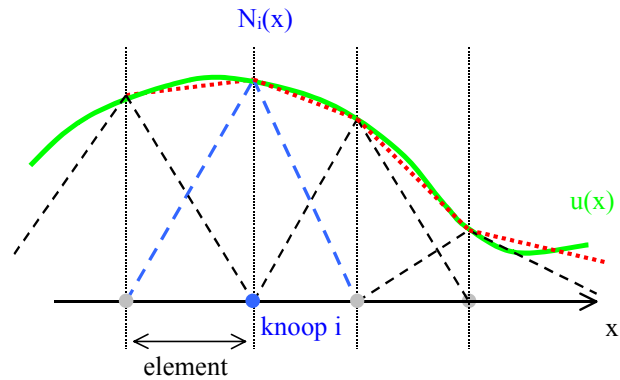


figuur B-1 Onderverdeling in "eindige elementen" van de doorsnede van een rubber afdichting

Bij dit type probleem kunnen soms naast vierhoekjes ook andere elementvormen zoals driehoekjes worden toegepast. Omdat de drie- en vierhoekjes niet precies gelijkzijdig respectievelijk rechthoekig hoeven te zijn, is er zelfs voor ingewikkeld gevormde domeinen altijd wel een onderverdeling te vinden. Deze flexibiliteit met betrekking tot de te beschrijven geometrie, zeker in vergelijking met andere numerieke benaderingsmethoden, is kenmerkend voor de EEM.

Het onderverdelen van een domein in elementen, ook wel "mesh generatie" genoemd, gebeurt meestal automatisch via speciale hulpmiddelen in een grafische gebruikersinterface (afgekort: GUI).

Een element is de kleinste eenheid waarmee het fysisch gedrag in de EEM wordt beschreven. Binnen een element wordt het verloop van de primaire variabelen (bijvoorbeeld verplaatsing of temperatuur) benaderd met interpolatiefuncties bestaande uit lagere orde polynomen. In Figuur B-2 is een schematische voorstelling van een dergelijke benadering gegeven voor een 1-dimensionaal probleem. Door de functies  $N_i(x)$  op een juiste manier te schalen ontstaat de continue benadering (zonder sprongen) gegeven door de rode stippellijn. De schalingsparameters  $u_i$  worden gewoonlijk toegekend aan de zogeheten knopen, die hier op de elementgrenzen (dunne verticale stippellijnen) liggen. Knopen liggen meestal op de hoeken, de randen of het centrum van een element (zijde). Fysisch gezien stellen de parameters  $u_i$  (ook wel knooppuntwaarden genoemd) de waarden van de te benaderen functie ter plaatse van de knopen voor.



figuur B-2 Benadering van de grootte  $u(x)$  via lineaire interpolatie functies  $N_i(x)$

Samen met de elementverdeling (mesh) vormen de knooppuntwaarden een complete benadering van de oplossing. Anders gezegd, bij een gekozen mesh vergt oplossing van een probleem niets anders dan het vinden van de juiste knooppuntwaarden. De nauwkeurigheid van de oplossing neemt in het algemeen toe als de elementen talrijker, dus kleiner worden.

Naast onafhankelijke variabelen als verplaatsing of temperatuur, worden vaak ook afhankelijke grootheden als rek of spanning gevraagd. Aangezien de rek samenhangt met de ruimtelijke variatie van de verplaatsingen, zijn de benaderde rek- en spanningsverdeling niet continu op de elementgrenzen. Om het effect van deze stapsgewijze variaties te onderdrukken, worden verschillende extrapolatie- en middelingsmethoden gebruikt. Bij de interpretatie van de resultaten dient men hier goed op te letten.

Om de knooppuntwaarden te bepalen voor een lineair statisch probleem, bijvoorbeeld de doorbuiging van een plaat ten gevolge van de zwaartekracht, dient een gekoppeld stelsel vergelijkingen te worden opgelost van de volgende vorm:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & \dots & K_{2N} \\ K_{31} & K_{32} & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & K_{N2} & \dots & \dots & \dots & K_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ \dots \\ u_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \dots \\ F_N \end{bmatrix} = \mathbf{f}_{\text{ext}}$$

met  $N$  het (resterend) aantal vrijheidsgraden in het model,  $\mathbf{K}$  de stijfheidmatrix en  $\mathbf{f}_{\text{ext}}$  de vector met equivalente externe knooppuntkrachten. Het woord equivalent slaat hier op het feit dat verdeelde belastingen, bijvoorbeeld die ten gevolge van de zwaartekracht, worden vertaald in discrete krachten, die aangrijpen op de knopen, op een zodanige manier, dat de totale kracht en de krachtverdeling optimaal worden benaderd.

De componenten  $K_{ij}$  van de stijfheidmatrix (die niet allemaal ongelijk aan nul hoeven te zijn) volgen uit de eigenschappen van de elementen. Voor lineaire problemen zijn deze constant, zodat het stelsel in 1 keer kan worden opgelost. De knooppuntwaarden van een element zijn aan elkaar gekoppeld via de elementstijfheidsmatrix. Een andere bijdrage tot de koppeling van bovenstaande vergelijkingen wordt geleverd door het feit, dat knopen worden gedeeld met naburige elementen.

Elementen zijn er in vele verschillende vormen en typen. In figuur B-3 en figuur B-4 is een selectie gegeven voor achtereenvolgens 2- en 3-dimensionale problemen. In deze figuren stellen  $u$ ,  $v$ , en  $w$  de knooppuntverplaatsingen voor en  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  en  $\theta_z$  de knooppuntrotaties. Het verschil tussen een staaf- en een balkelement is, dat

alleen de laatste, buiging kan beschrijven. Vandaar de extra rotatievrijheidsgraden. Het is zeker niet ongebruikelijk om in een EEM-pakket een honderdtal verschillende elementtypen aan te treffen. Een indeling is onder andere mogelijk naar:

- ▶ de uiterlijke vorm: lijn/driehoek/vierhoek/tetraëder/hexaëder, enz.;
- ▶ de dimensie: 2D of 3D;
- ▶ de aard van het op te lossen probleem: mechanisch/thermisch/multifysisch;
- ▶ de orde van de interpolatiepolynomen: 1<sup>e</sup> orde, 2<sup>e</sup> orde, enz.;
- ▶ het onderscheid tussen bulkelementen en staaf-, balk- of schaalementen.

staafelement	$u, v$	
balkelement	$u, v, \theta_z$	
bulkelement	$u, v$	

figuur B-3 Enkele mechanische 2D-elementtypen met de vrijheidsgraden per knoop (midden)

axisym. element	$u, v, \theta_z$	
staafelement	$u, v, w$	
balkelement	$u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$	
bulkelement	$u, v, w$	
schaalelement	$u, v, w, \theta_x, \theta_y, \theta_z$	

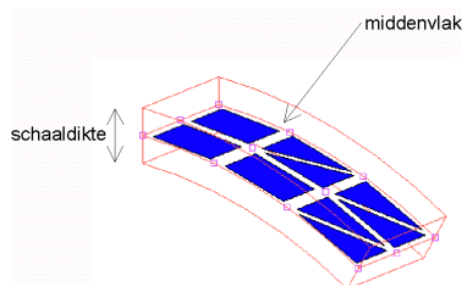
figuur B-4 Enkele mechanische 3D-elementtypen met de vrijheidsgraden per knoop (midden)

Hoe hoger de graad van (de interpolatiefuncties van) een element, hoe hoger het aantal knopen, vanwege het groter aantal coëfficiënten in de interpolatiefuncties. Zij worden veelvuldig toegepast bij lineaire problemen, omdat zo met minder knopen toch een nauwkeuriger antwoord kan worden verkregen. Voor niet-lineaire toepassingen worden meestal lagere orde elementen gebruikt.

Voorbeelden van niet-bulkelementen zijn staaf-, balk- en schaalementen. Het verschil met bulkelementen is, dat ze het ruimtelijk domein niet geheel opvullen. Dit is niet nodig, omdat er wordt uitgegaan van een vereenvoudigd deformatiepatroon. Om bijvoorbeeld de buiging of torsie van een balk te beschrijven, is het vaak voldoende om aan te geven wat de verplaatsing van de (symmetrie) as is en hoe de doorsneden loodrecht op de as roteren. Balken elementen zijn daarom lijnvormig met knopen op de (symmetrie)as die verplaatsings- en/of rotatievrijheidsgraden bezitten. De werkelijke doorsnede van de balk wordt vastgelegd met extra (geometrische) parameters.

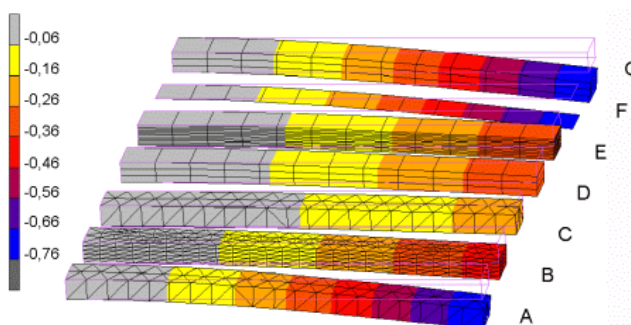
Iets dergelijks vindt men bij schaalementen die worden gebruikt voor berekeningen aan dunwandige constructies. Men kan hier de deformatie opgesplitst denken in buiging, vervorming in het vlak en afschuiving van onderen bovenkant ten opzichte van elkaar. Het is hier voldoende om alleen het middenvlak te bedekken met elementen, zoals geschetst in figuur B-5. De vervorming

van dit middenvlak wordt beschreven door de knooppuntverplaatsingen  $u, v$  en  $w$ , de overige vervormingen door de knooppuntrotaties  $\theta_x, \theta_y$  en  $\theta_z$ . Een gevolg is, dat men een schaalement in dikterichting niet kan samendrukken. De dikte kan alleen veranderen door het oprekken van het middenvlak.



figuur B-5 Stukje uit een dunwandige constructie gemodelleerd met schaalementen

Om de effectiviteit van schaalementen te illustreren, is de doorbuiging van een eenzijdig ingeklemd balkje, belast door een verticale kracht op het vrije uiteinde, berekend voor verschillende elementtypen en elementverdelingen. Zoals figuur B-6 en tabel B-1 laten zien, zijn er bij gebruik van lagere orde bulkelementen behoorlijke afwijkingen (50-70%) mogelijk. Zonder aanpassingen is het gebruik van deze elementen hier daarom af te raden. Schaalementen zijn duidelijk het efficiëntst, omdat ze met minder vrijheidsgraden en dus in kortere tijd, het nauwkeurigste resultaat geven. *In het algemeen verdienen schaalementen voor berekeningen aan dunwandige componenten daarom de voorkeur.*



figuur B-6 Vervorming van een ingeklemde balk door een puntkracht op het uiteinde, voor verschillende (aantallen) elementen (zie ook tabel B-1). De getekende vervorming is geschaald met een factor 2

tabel B-1 Doorbuiging voor balkmodellen uit figuur B-6, met analytische referentie-oplossing

aanduiding in figuur	oplossing of element-type	vrijheidsgraden	doorbuiging [mm]
A	10-knoops tetraëder	1518	-0,75
B	4-knoops tetraëder	1446	-0,42
C	4-knoops tetraëder	384	-0,21
D	8-knoops hexaëder	312	-0,35
E	8-knoops hexaëder	1014	-0,36
F	4-knoops schaal	156	-0,76
G	20-knoops hexaëder	924	-0,75
	analytisch		-0,76

De in de berekening gebruikte gegevens zijn:  
 afmetingen balk ( $l \times b \times h$ ): 20 x 2 x 1 mm.  
 materiaal: staal  
 transversale kracht uiteinde: 10 N  
 berekeningstype: lineair



Het op bladzijde 19 genoemde stelsel vergelijkingen  $Ku = f_{\text{ext}}$  heeft betrekking op een probleem, dat verondersteld wordt statisch te zijn. Dit is een veel gebruikte benadering, aangezien massa-traagheidseffecten vaak verwaarloosbaar zijn. Een kenmerk van deze aanpak is evenwel, dat oplossing van het stelsel alleen mogelijk is als de constructie statisch bepaald is via randvoorwaarden. Praktisch gesproken betekent dit dat de knooppuntverplaatsingen op een voldoende aantal plaatsen moeten worden onderdrukt of voorgeschreven. Gebeurt dit niet, denk hierbij aan een 'zwevende' constructie waarop een kracht wordt uitgeoefend, dan zal normaal gesproken de berekening worden afgebroken met een melding, dat de systeemmatrix singulier is, dat er een star-lichaamsbeweging aanwezig is, of dat er een niet onderdrukt mechanisme is. Het minimum aantal randvoorwaarden voor voorwerpen in een 2D- en 3D-ruimte is gelijk aan het aantal te onderdrukken star-lichaamsbewegingen en bedraagt respectievelijk 3 en 6.

Een teveel aan randvoorwaarden kan ook tot negatieve effecten leiden, zoals het ontstaan van onrealistische spanningsconcentraties of een overschatting van de stijfheid. De keuze van de randvoorwaarden dient daarom zorgvuldig te gebeuren, teneinde het resultaat zo dicht mogelijk op de realiteit te laten aansluiten.

Naast statische zijn ook dynamische berekeningen mogelijk voor gevallen waarin de massa-traagheid niet verwaarloosbaar is. Het stelsel vergelijkingen wordt dan als volgt uitgebreid:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f_{\text{ext}}$$

met  $M$  de massamatrix,  $\ddot{u}$  de vector met knooppuntversnellingen,  $C$  de dempingsmatrix en  $\dot{u}$  de vector met knooppuntsnelheden. De knooppuntgrootheden zijn hier nog een continue functie van de tijd. In de numerieke behandeling van het stelsel wordt alleen een oplossing gezocht voor een beperkt aantal punten op de tijd, zodat de tijd sprongsgewijs varieert. De oplossing ligt vast als per tijdstap  $\Delta t$  de verandering van  $u$ ,  $\Delta u$ , bekend is. De manier waarop variabelen  $u$  en  $\dot{u}$  in  $\Delta u$  en  $\Delta t$  worden uitgedrukt, bepaalt of een impliciet of expliciet oplossingsschema resulteert. Het eerste geval geeft een gekoppeld stelsel vergelijkingen voor  $\Delta u$ , het tweede een ontkoppeld stelsel. Dit laatste betekent dat de oplossing relatief zeer snel kan worden bepaald. De grootte van de tijdstap is evenwel beperkt door de volgende bovengrens:

$$\Delta t_{\text{max}} = I_{\text{min}} \sqrt{E / \rho}$$

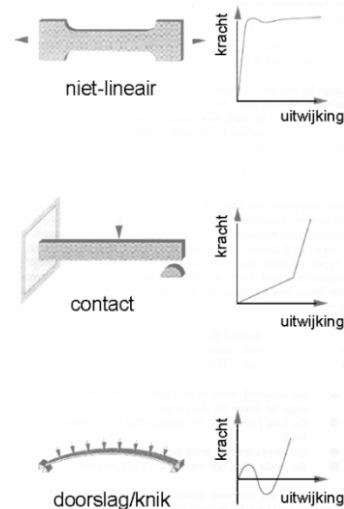
met  $I_{\text{min}}$  de kortste elementzijde in het model,  $E$  de elasticiteitsmodulus en  $\rho$  de massa-dichtheid. In de praktijk ligt  $\Delta t_{\text{max}}$  meestal tussen de 0,1 en 10  $\mu\text{s}$ . De toepassing van deze techniek, welke de basis vormt voor een aparte klasse van EEM-software, betreft dan ook dikwijls dynamische verschijnselen van korte duur met een soms destructief karakter zoals in figuur B-7.



figuur B-7 Typische toepassing van expliciete EEM-software

In vergelijking met een statische benadering, is bij dynamische berekeningen de kans op een singulier systeem door een tekort aan randvoorwaarden aanzienlijk kleiner, omdat de oplossing als 'vanzelf' volgt uit de gegeven beginvoorwaarden voor snelheid en versnelling.

Tot nu toe is steeds verondersteld dat de stijfheidmatrix  $K$  een lineair probleem beschrijft en dus constant is. Indien er sprake is van kleine vervormingen, d.w.z. verplaatsingen kleiner dan ca. 5% van de maximale afmeting van het ruimtelijk domein, een materiaalgedrag dat constant is en er geen interactie is met andere componenten, is dit een goede (eerste) benadering. In de praktijk komt men veelvuldig situaties tegen die hier van afwijken. In die gevallen is een niet-lineair EEM-model aan te bevelen. Voorbeelden hiervan zijn schematisch weergegeven in figuur B-8. In het eerste geval, een trekproef uitgevoerd op een metaal, is de verandering van het materiaalgedrag door plastische vervorming de oorzaak van de niet-lineariteit. In het tweede geval ontstaat deze door contact met een ander voorwerp. In het laatste geval is de oorzaak gelegen in het feit dat de optredende verplaatsing en rotatie van de dunwandige constructie zodanig groot zijn, dat de stijfheid hiervan verandert gedurende de deformatie. Aan de eis van kleine verplaatsingen is hier duidelijk niet meer voldaan.



figuur B-8 Voorbeelden van de belangrijkste klassen van niet-lineaire problemen

Een andere manier om hier tegenaan te kijken is, dat de meeste verschijnselen in de natuur niet-lineair zijn en dat de lineaire EEM-benadering een versimpeling van de werkelijkheid is, die alleen van toepassing is op een uitzonderlijke klasse van problemen.

Het betreft wel een belangrijke klasse, aangezien de meeste producten worden ontworpen voor lineair gedrag. Voor toepassingen buiten deze klasse is de kans op fouten met een lineaire aanpak echter levensgroot.

Een niet-lineaire EEM-benadering verschilt in een aantal opzichten van een lineaire:

- ▶ De resultaten kunnen afhankelijk zijn van de manier waarop en de volgorde waarin de belastingen worden aangebracht.
- ▶ Een incrementele berekening is noodzakelijk. Dat wil zeggen dat de gewenste eindsituatie door stapsgewijze variatie van de belasting wordt benaderd. In elke stap dient een volledig stelsel vergelijkingen te worden opgelost.
- ▶ Per stap kan het nodig zijn de oplossing meermaals te corrigeren om de nauwkeurigheid te waarborgen.
- ▶ Gezien het voorgaande kost een niet-lineaire berekening vaak meer (reken)tijd.
- ▶ Niet iedere poging tot berekening is succesvol.
- ▶ Er zijn vaak meer materiaalgegevens vereist.

Vanwege het grotere aantal (numerieke) parameters vragen de interpretatie en de controle van de resultaten in het algemeen meer aandacht. Gevoeligheidsanalyse is hierbij een bruikbaar hulpmiddel.

### Keuze van EEM-software

Voor eenvoudig toepassingen kan de EEM-module van een CAD-pakket voldoende zijn. Zo'n module is vaak alleen tegen meerprijs verkrijgbaar. De mogelijkheden ervan zijn beperkt, maar de bediening is simpel, vooral vanwege de uitstekende toegang tot de modelgeometrie. De beperkingen hebben betrekking op de beschikbare materiaal- en elementtypen, de toe te passen randvoorwaarden, de grootte van de modellen en het management van samenstelsels van constructies. Bij de wat kleinere CAD-pakketten is er soms alleen keuze uit bulk-elementen en niet uit schaal- of balkelementen, wat voor het rekenen aan dunne plaat constructies verre van ideaal is. De vergelijking tussen schaal- en bulkelementen in bijlage I illustreert dit. Overigens beschikken niet alle CAD-pakketten over een EEM-module.

Hoewel voor eenvoudig lineair rekenwerk een CAD-pakket voldoende kan zijn, is men voor verdergaande toepassingen toch al snel aangewezen op een zelfstandig EEM-pakket.

Anders gezegd: daar waar een CAD-pakket ophoudt, gaat een zelfstandig EEM-pakket verder. Om deze reden bieden de EEM-modules van de meeste CAD-pakketten ook de mogelijkheid om invoerfiles voor externe EEM-software uit te schrijven. Ter verduidelijking worden de twee in tabel B-2 op een aantal aspecten vergeleken. Voor uitleg van de begrippen lineair en niet-lineair: zie bijlage I.

tabel B-2 Vergelijking tussen EEM-module van een CAD-pakket en een zelfstandig EEM-pakket

	EEM-module CAD-software	zelfstandige EEM-software
toegang tot modelgeometrie	+	~
lineaire berekeningen	+	+
niet-lineaire berekeningen	-	+
simulatie van contact	-	+
omvormsimulaties	-	+
functionaliteit	~	+
- slecht of zeer beperkt ~ redelijk + goed mogelijk of uitgebreid		

Een gemeenschappelijk kenmerk van zelfstandige EEM-software is, dat er sprake is van 2 componenten: een solver of kernel en een gebruikersinterface. De eerste voert het echte rekenwerk uit op basis van een gegeven invoerfile en schrijft de resultaten naar een aparte file, die wel aangeduid wordt als post file of output database. De gebruikersinterface wordt ook wel GUI genoemd wat staat voor graphical user interface. De werking ervan is namelijk sterk grafisch georiënteerd, zodat grote modellen gemakkelijk kunnen worden geïnspecteerd en gemanipuleerd. Naast het woord GUI komt men ook wel de klassiekere term Pre- & Postprocessor tegen, waarmee hetzelfde wordt bedoeld. De functie van de GUI is zowel het voorbereiden van de invoerdata (Preprocessing) als het representeren van de resultaten in vooral grafische vorm (Postprocessing). Een andere belangrijke functie is de gegevensuitwisseling met de buitenwereld, bijvoorbeeld het inlezen van CAD-files. De solver is voor de gebruiker veelal nauwelijks herkenbaar, aangezien deze door de GUI automatisch wordt aangestuurd. Alleen de geroutineerde gebruiker zal soms de behoefte hebben om de solver direct beïnvloeden, via bijvoorbeeld de invoer file of de inbouw van eigen software modules.

De meeste EEM-programma's zijn beschikbaar voor verschillende computersystemen, vanaf een PC tot en met multiprocessor UNIX servers.

EEM-software kan ruwweg in 2 klassen worden ingedeeld: gespecialiseerde software en algemene software. De eerste wordt ook wel aangeduid als verticale applicatie, omdat deze software specifiek is toegesneden op 1 type toepassing. Vaak gaat het hier om het rekenen aan de omvorming van materialen, ook wel processimulatie genoemd. Vanwege hun specialisatie zijn gespecialiseerde pakketten in het algemeen efficiënter, gebruiksvriendelijker en robuuster. Daar staat tegenover, dat ze de gebruiker weinig of geen mogelijkheid bieden voor alternatieve toepassingen. De algemene software kan gezien worden als een multifunctionele bouwdoos met talloze mogelijkheden, wat de gebruiker wel dwingt om meer zaken zelf te regelen.

Gespecialiseerde software is beschikbaar voor o.a. de volgende toepassingen:

- ▶ dieptrekken en hydrovormen;
- ▶ akoestiek;
- ▶ botsproeven;
- ▶ gieten van metalen;
- ▶ lassen;
- ▶ spuitgieten.

Bij het selecteren van een EEM-programma draait het in hoofdzaak om de gevraagde functionaliteit. Om zeker te stellen dat een programma geschikt is voor een bepaalde toepassing, laat men de softwareleverancier vaak een exact gedefinieerd voorbeeld, ook wel benchmark genoemd, uitvoeren. De geschiktheid kan ook blijken uit voorbeelden van de leverancier zelf, uit een lijst met referenties of uit het feit dat de software een soort van erkende industriestandaard vormt. Een verzameling standaard benchmarks is verkrijgbaar via NAFEMS (zie onderstaand webadres).

Overige aspecten die bij de softwarekeuze een rol kunnen spelen zijn:

- ▶ De gebruiksvriendelijkheid.
- ▶ De robuustheid.
- ▶ De kwaliteitsstandaard waaraan de leverancier wel of niet voldoet.
- ▶ De snelheid (te bepalen via benchmarks).
- ▶ De mogelijkheden tot automatisering van modellen.
- ▶ De compleetheit wat betreft element-, materiaal- of analysetypen.
- ▶ De faciliteiten voor support en training.
- ▶ De kostprijs (deze is sterk afhankelijk van de overeen te komen condities).

Informatie over EEM-software kan behalve van de leveranciers ook worden verkregen via NAFEMS. Dit is een onafhankelijke organisatie, gevestigd in het Verenigd Koninkrijk, mede gefinancierd uit contributie van de leden. Onder deze leden bevinden zich talloze bedrijven uit Europa en de Verenigde Staten. NAFEMS houdt zich onder andere bezig met de kwaliteit en het gebruik van EEM-software. Zie de website (adres onder) voor een lijst met publicaties. Verder geeft NAFEMS een tijdschrift uit getiteld "Benchmark", waarin de laatste ontwikkelingen, achtergrondinformatie en ervaringen van gebruikers aan de orde komen.

Voor het verkrijgen van meer informatie over EEM-software, volgt hieronder een aantal nuttige adressen:

- ▶ Voor onafhankelijke informatie m.b.t. EEM-software:
  - [www.nafems.org](http://www.nafems.org)
- ▶ Voor informatie van leveranciers van EEM-software:
  - [www.abaqus.com](http://www.abaqus.com)
  - [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
  - [www.autoform.com](http://www.autoform.com)
  - [www.dyna3d.com](http://www.dyna3d.com)
  - [www.eds.com](http://www.eds.com) - kijk bij plm solutions
  - [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com)
  - [www.mssoftware.com](http://www.mssoftware.com)

Tenslotte geven we in tabel B-3 een overzicht van enkele software-pakketten, hun leverancier, en hun toepassingsgebied.

tabel B-3 Overzicht softwarepakketten

softwarepakket	leverancier	toepassing
Abaqus/Standard/Explicit/CAE	HKS/abacus	algemeen/niet-lineair
Ansys	Ansys	algemeen
AutoForm	AutoForm	plaatvormen
LS-Dyna	LS-Dyna	botsingen
msc.nastran	MSC	algemeen/lineair
msc.marc&mentat	MSC	algemeen/niet-lineair
msc.superform	MSC	massievormen
msc.patran	MSC	universele GUI
NX Nastran	EDS	algemeen
PAM-Stamp	ESI-Group	plaatvormen
PAM-Crash	ESI-Group	botsingen
Sysweld	ESI-Group	lasprocessen

## Auteurs

Dit Tech-Info-blad is samengesteld door E. Meijers (NIMR) op basis van informatie die onder meer beschikbaar is gesteld door het NIMR en Corus. De samensteller werd ondersteund door een klankbordgroep bestaande uit: P. Boers (FME-CWM), H. de Kruijk (TNO Industrie), P.D. Marchal (Corus RD&T), J. van de Put (Syntens), H.L.M. Raaijmakers (Federatie Dunne Plaat) en G. Vaessen (NIMR).

## Technische informatie

Voor technisch inhoudelijke informatie over de in deze voorlichtingspublicatie behandelde onderwerpen kunt u zich richten tot de Federatie Dunne Plaat.

Het adres luidt:

**Federatie Dunne Plaat**  
Einsteinbaan 1  
Postbus 2600  
3430 GA Nieuwegein  
tel.: 030 - 600 00 05

## Informatie over, en bestelling van VM-publicaties

### Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Bezoekadres: Boerhaavelaan 40,  
2713 HX ZOETERMEER  
Correspondentie-adres: Postbus 190,  
2700 AD ZOETERMEER  
Telefoon: (079) 353 11 00/353 13 41  
Fax: (079) 353 13 65  
E-mail: pbo@fme.nl  
Internet: <http://www.fme-cwm.nl>

### Nederlands Instituut voor Lastechniek (NIL)

Adres: Krimkade 20,  
2251 KA VOORSCHOTEN  
Telefoon: (071) 560 10 70  
Fax: (071) 561 14 26  
E-mail: [info@nil.nl](mailto:info@nil.nl)  
Internet: <http://www.nil.nl>

© Vereniging FME-CWM/maart 2004

Niets uit deze uitgave mag worden vervaelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM  
afdeling Technische Bedrijfskunde  
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer  
telefoon 079 - 353 11 00  
telefax 079 - 353 13 65  
e-mail: [pbo@fme.nl](mailto:pbo@fme.nl)  
internet: <http://www.fme-cwm.nl>



Netherlands Institute  
for Metals Research

