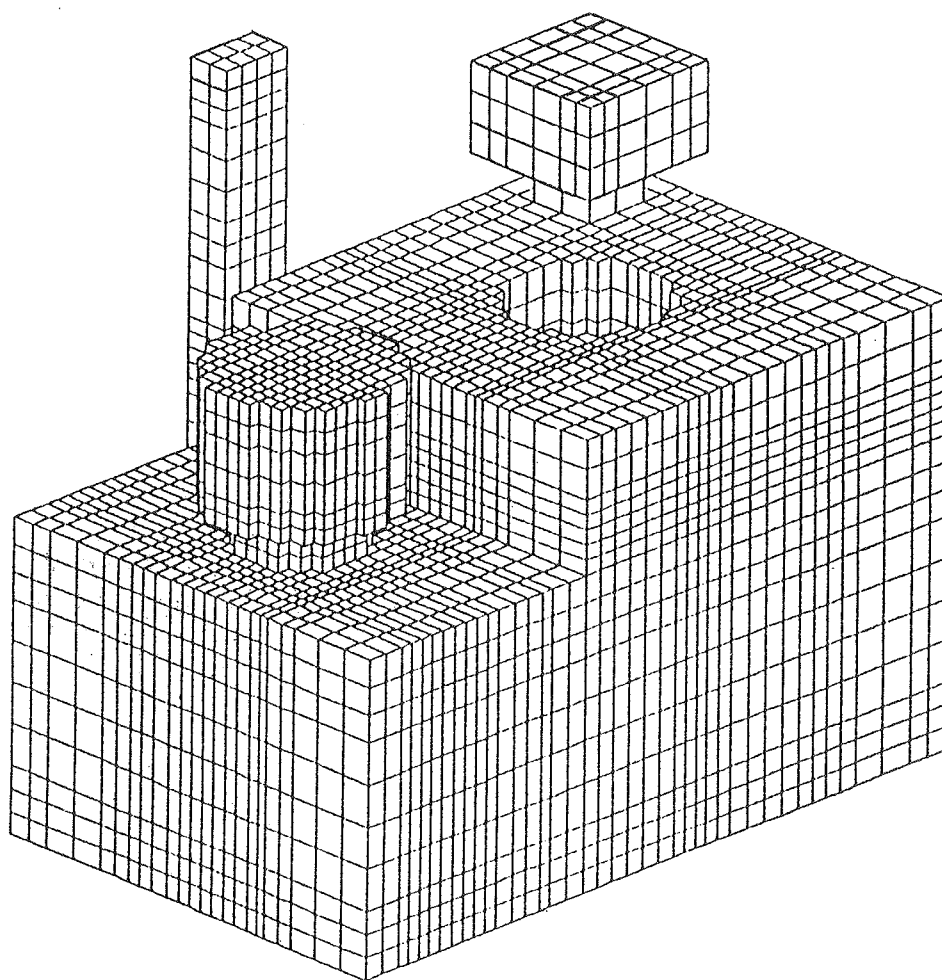


GEOmesh

en automatisk netgenerator for 3D kartesiske net

Jan Michael Thomsen



Laboratoriet for Varmeisolering
Danmarks Tekniske Højskole
Meddelelse nr. 227

GEOmesh

en automatisk netgenerator for 3D kartesiske net

Jan Michael Thomsen

FTU/STVF J. nr. 5.17.2.6.25

støttet af Statens Teknisk-Videnskabelige Forskningsråd

Laboratoriet for Varmerisoleri
Danmarks Tekniske Højskole

Forord

Denne rapport udgør en del af afrapporteringen i forbindelse med mit licentiatprojekt.

Arbejdet beskrevet heri udgør en del af arbejdet udført under et studieophold fra 5/2 1990 til 28/2 1991 hos professor Dr. Ing. Peter R. Sahm, direktør på Giesserei - Institut der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH), Aachen, Tyskland.

Studieopholdet er blevet realiseret ved, at DTH har støttet projektet med en forlængelse på 6 måneder via et kandidatstipendium, og Forskerakademiet har bevilget dækning af studieopholdets ekstraudgifter.

Min vejleder docent, lic. techn. Preben N. Hansen takkes for sin store støtte igennem hele projektforsløbet. Også en tak til Heidi Jensen for renskrivning af rapporten.

September 1991

Jan Michael Thomsen

Resumé

I denne rapport er beskrevet det arbejde, som er blevet udført med henblik på at udvikle og forbedre den i februar 1990 bestående version af den automatiske netgenerator for generelle 3D kartesiske net, GEOMesh. Denne er en del af en programpakke til simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser.

Den "gamle" versions virkemåde og de nødvendige inddata er angivet. Desuden er beskrevet videreudviklingen, som er koncentreret om at forbedre kvaliteten af de genererede net, bl.a. med hensyn til emnebeskrivelse og "glathed". Ved et "glat" net forstås her et net, hvor volumenerne af de genererede elementer ikke varierer for kraftigt fra element til element.

Dernæst gives en oversigt over de nu nødvendige inputparametre, og for en simpel geometri vises, hvordan disse påvirker de genererede net. Til sidst vises nogle eksempler på genererede net for forskellige geometrier.

Det vises, at det med den nye version er muligt at generere et bedre net, ofte med brug af færre elementer.

Indholdsfortegnelse

Forord	i
Resumé	ii
1. Indledning	1
2. Inddata til netgeneratoren	3
3. Beskrivelse af arbejdets udgangspunkt, den "gamle" netgenerator	4
4. Beskrivelse af videreudviklingen	9
4.1 Bedre tilnærmelse af selve støbedelen i nettet	9
4.2 Bedre gengivelse af objekterne i nettet	10
4.3 Indførelse af mere fleksible input-parametre	12
4.4 Udvikling af glatheds-algoritme	12
4.5 Udvikling af en algoritme til at forhindre aflange elementer	14
4.6 Mulighed for udnyttelse af eventuel symmetri	14
5. Sammenfatning og eksempler	15
5.1 Sammenfatning	15
5.2 Eksempel på parametrene indvirkning på nettet for en simpel geometri	17
5.3 Eksempler	21
6. Konklusion	34
Litteraturliste	35

1. Indledning

Den store udvikling, der har været indenfor computerteknologi, har betydet, at det nu er blevet muligt at simulere meget komplekse problemstillinger. Som et resultat af dette er der sket en stor udvikling indenfor mange områder. Bl.a. i metalstøberifaget er der sket en stor udvikling indenfor simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser.

Formålet med dette arbejde har været at deltage i et igangværende udviklingsarbejde af en programpakke til netop simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser.

Dette udviklingsarbejde foregår som et samarbejde mellem Giesserei - Institut der Rheinisch Westfälische Technische Hochschule og firmaet MAGMA. Den kommercielle del, salget af programpakken, tager MAGMA sig af. Indtil nu er programpakken installeret i firmaer i flere forskellige lande, bl.a. USA, England, Østrig, Belgien, Frankrig, Finland og Tyskland. Programpakken, som er nærmere beskrevet i [1], indeholder i sin nuværende udformning følgende dele:

1. Preprocessor (til beskrivelse af de forskellige emne-geometrier)
2. Automatisk netgenerator, GEOmesh
3. Fyldnings - simuleringsprogram
4. Størknings - simuleringsprogram
5. Postprocessor (til grafisk præsentation af resultaterne)
6. Databaseprogram (indeholdende materialedata)

Af disse dele er dette arbejde koncentreret om del 2, den automatiske netgenerator, GEOmesh. Denne genererer et 3D kartesisk net. Det genererede net bruges så i del 3 og 4 til de egentlige simuleringer, der udføres med brug af FDM (Finite Difference Method). Som input benyttes data genereret af preprocessoren. Dette er nærmere beskrevet i kapitel 2. Det anvendte programmeringssprog for netgeneratoren er Fortran.

Som nævnt er valgt et traditionelt ortogonalt net. Dette er gjort på trods af den store popularitet de kurvelineære net har opnået. I denne metode benyttes et randtilpasset koordinatsystem, som har koordinatlinier, der er sammenfaldende med de fysiske rande. Det fysiske område knyttes så til et rektangulært "beregningsområde" v.h.a. en koordinattransformation. (Se f.eks [2] eller [3]). Alle beregninger kan så, efter at de styrende ligninger er transformeret, så de kurvelineære koordinater erstatter de kartesiske koordinater som de uafhængige variable, udføres i et rektangulært, ækvivalent net. Dette har den fordel, at randbetingelserne kan udtrykkes præcist, da der er koordinatlinier sammenfaldende med randen. Selv om det principielt er muligt at transformere et hvilket som helst 3D fysisk område over i en enkelt rektangulær blok, vil dette for komplicerede geometrier resultere i et skævt og irregulært net. I stedet kom området indeles i flere beregningsområder kaldet blokke. Problemet er, at denne inddeling må foretages af brugeren og er meget tidskrævende.

Desuden kræver det, at brugeren er i besiddelse af en vis portion viden om netgenerering. Dette er i konflikt med målgruppen for programpakken. Det er meningen, at både store og små støberier skal kunne benytte programmet, og her kan man ikke forvente, at brugerne er i besiddelse af denne viden.

Endvidere er disse problemer for interne strømningsproblemer, som der er tale om ved formfyldning, mere udprægede end for eksterne strømningsproblemer, som f.eks strømmingen rundt om et fly eller en bil. Ved støbeprocesser optræder flere forskellige materialeområder og meget komplicerede geometrier.

Alle disse forhold gør, at de kurvelineære net på nuværende tidspunkt bliver uacceptable for den aktuelle problemstilling. Her er det heller ikke så kritisk, at randbetingelserne for formfyldningen ikke bliver helt rigtigt beskrevet, da denne først og fremmest tjener til at frembringe begyndelses-temperaturfordelingen til størkningssimuleringen.

En anden mulighed for at opnå en bedre geometribeskrivelse er at benytte et FEM net (Finite Element Method, elementmetoden). Udviklingen af en FEM netgenerator vil blive udført på et senere tidspunkt, efter at den her beskrevne netgenerator GEOMesh er blevet udviklet til også at kunne behandle CAD-data fra andre programmer.

Arbejdet har taget sit udgangspunkt i den ved studieopholdets begyndelse bestående version af netgeneratoren, og er koncentreret om at forbedre kvaliteten af de genererede net, bl.a. med hensyn til emnebeskrivelse og "glathed". Med et "glat" net forstås her et net, hvor volumenerne af de genererede elementer ikke varierer for kraftigt fra element til element. For et kartesisk net vil det i praksis sige, at forholdet mellem længderne på to på hinanden følgende elementer ikke må være for stort. Dette arbejde med videreudviklingen er beskrevet i kapitel 4.

I kapitel 5 er så foretaget en sammenfatning af de udførte forbedringer, og der er for et simpelt eksempel udførligt vist, hvorledes den nye udgave af netgeneratoren benyttes. Til sidst vises eksempler på genererede net for forskellige mere komplicerede geometrier.

2. Inddata til netgeneratoren

Til beskrivelse af den aktuelle geometri, som ønskes analyseret v.h.a. programpakken, benyttes preprocessoren. Data fra denne benyttes som input til netgeneratoren.

Geometrien opbygges af med mus og/eller tastatur konstruerede objekter (solids) som så tilsammen danner hele geometrien. Brugeren specificerer, hvilket materiale de enkelte objekter består af; om det er metal, kernesand, formsand, isolering, varmedræn, indløb, efterføder eller et andet af brugeren specificeret materiale. Det hele omslutes så af en formbox.

Objekterne konstrueres ved, at to plane flader specificeres. Disse behøver ikke være parallelle med nogen af koordinatplanerne. Dermed er der i realiteten tale om, at GEOMesh er en udvidet $2\frac{1}{2}$ D netgenerator. Der arbejdes i øjeblikket på en udvidelse til 3D i forbindelse med videreudviklingen af netgeneratoren, således at denne kan behandle CAD-data fra andre programmer. De enkelte flader kan udgøre et rektangel, en cirkel eller et vilkårligt polygon. Disse to flader bestemmer så sammen med forbindelserne mellem disse det enkelte objekt.

Som input til netgeneratoren benyttes knudepunkterne i de konstruerede flader. Disse knudepunkter forbindes så med rette linier. I preprocessoren beskrives cirklen som et polygon med et knudepunkt pr. 30° .

For de mere komplicerede geometrier kan der være tale om, at de udgøres af flere hundrede objekter. Princippet i preprocessoren er, at når flere objekter med forskelligt materiale er konstrueret, så de har fælles volumen, er det det senest angivne objekt, der angiver materialet i det fælles volumen.

Ønskes f.eks. at konstruere en kubus med et cirkulært hul igennem, konstrueres først en boks bestående af metal og derefter inden i en cylinder, der hvor hullet ønskes, bestående af kernesand.

I figur 2.1 er vist et eksempel på, hvordan opbygningen af en meget simpel geometri ser ud i preprocessoren. Den er opbygget af 10 solids.

I figur 2.2 er angivet et eksempel på en lidt mere kompliceret geometri, som er konstrueret med brug af 46 solids.

Selv om det kun er muligt at angive plane flader, er det i princippet muligt at konstruere en god tilnærmelse til et hvilket som helst 3D objekt

3. Beskrivelse af arbejdets udgangspunkt, den "gamle" netgenerator

Arbejdet har taget sit udgangspunkt i den ved studieopholdets begyndelse bestående version af netgeneratoren. Virkemåden af denne og de nødvendige input-parametre er beskrevet i dette kapitel.

I den oprindelige netgenerator er det nødvendigt med angivelse af to parametre, en filterstørrelse, FILTER (real), og en nøjagtighedsværdi, ACCURACY (integer). FILTER angiver den mindst tilladelige lagtykkelse i nettet, og ACCURACY angiver hvor fint nettet underinddeles.

Fremgangsmåden er, at begge flader for alle objekterne, som er indlæst i preprocessoren,

gennemgås. Når $\frac{\partial x}{\partial s}$, $\frac{\partial y}{\partial s}$ eller $\frac{\partial z}{\partial s}$ ændrer fortegn eller bliver 0, sættes en afmærkning i den

respektive retning, se figur 3.1 (s angiver buelængden). Efter begge flader fra alle objekterne er gennemgået, haves da i alle tre retninger en masse afmærkninger, som angiver, hvor de geometriske ændringer foregår. I fig. 3.2 er afmærkningerne vist for et simpelt 2D-eksempel. I alle tre retninger undersøges så fra en ende af, om afstanden mellem to afmærkninger er mindre end FILTER. Er dette tilfældet, erstattes de to afmærkninger af en afmærkning i midten af disse. Er dette ikke tilfældet, beholdes afmærkningerne ganske enkelt. Der foretages med andre ord en filtrering. Alle de nu bestående afmærkninger angiver så afgrænsningerne af nettets "indledende" lag.

Dernæst underinddeles de indledende lag så mange gange, som ACCURACY -faktoren angiver, dog således at ingen lag bliver mindre end FILTER. Ville nogle af lagene ved underinddelingen af et "indledende" lag blive mindre end FILTER, underinddeles dette "indledende" lag kun det antal gange, der sikrer, at dette ikke bliver tilfældet.

I figur 3.3 er vist, hvordan netlinerne ser ud for eksemplet fra figur 3.2. Geometrien består af 4 objekter. Det ses, at det i både x og y - retningen er nødvendigt at filtrere et sted.

Nu er selve nettet så genereret. Tilbage er kun at bestemme, hvilket materiale, der er i de enkelte elementer. Dertil er udviklet en procedure, som gennemgår de i preprocessoren indgivne objekter i den rækkefølge, de er indgivet. Det er således det senest indgivne objekt, der er afgørende i tilfælde af, at nogle af objekterne "overlapper". D.v.s. at netgeneratoren sparer preprocessoren for at udføre en masse Bool'ske operationer. Det er det materiale, der ligger i elementets tyngdepunkt, der er bestemmende for hele elementet.

I fig. 3.4 er vist et net for geometrien fra fig. 2.1. Nettet er kun vist for selve delen, der ønskes støbt, indløb, efterføderhals og efterføder. Udenom er en formboks, eventuelle kølekanaler o.s.v., hvor der naturligvis også er genereret elementer. Det er de enkelte elementer, som er angivet. Selve knudepunkterne ligger så i elementernes tyngdepunkt.

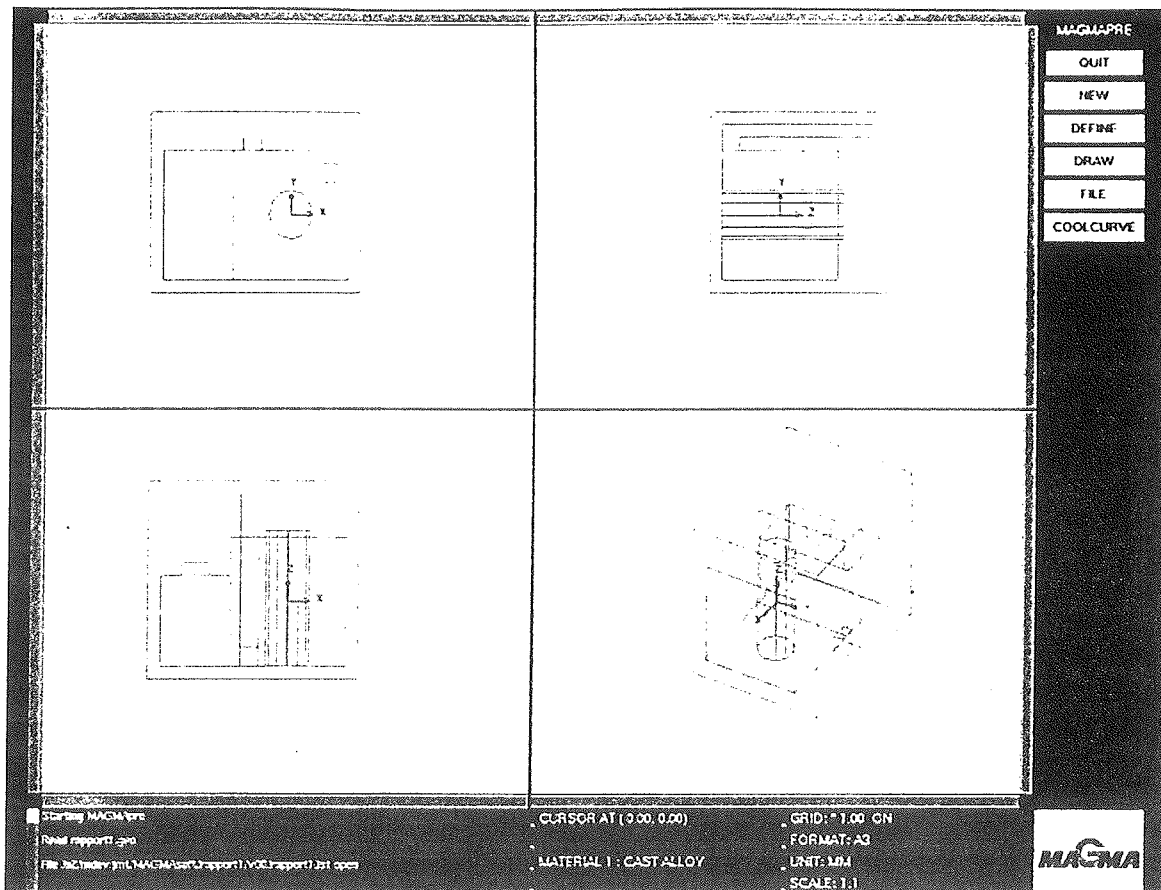


Fig.2.1 Eksempel på en simpel geometri opbygget i preprocessoren.

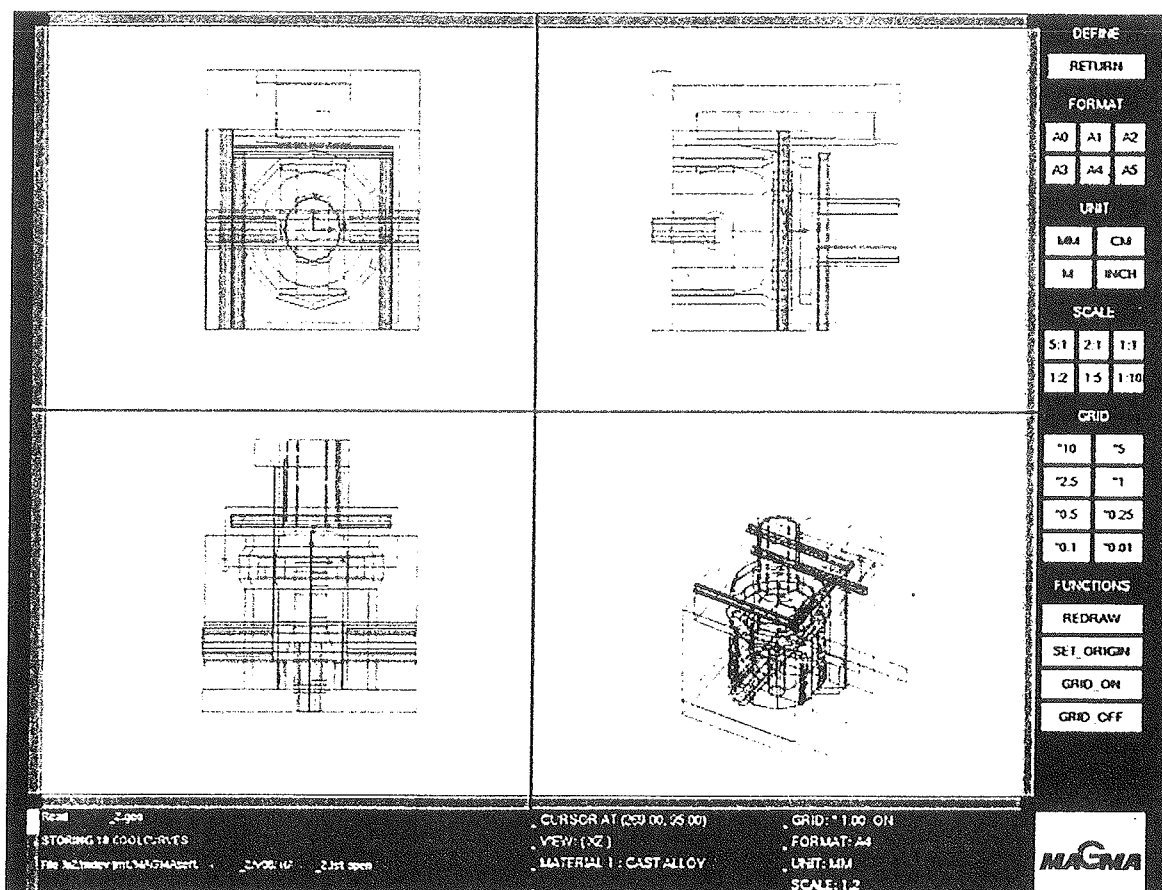


Fig.2.2 Eksempel på en mere kompliceret geometri opbygget i preprocessoren.

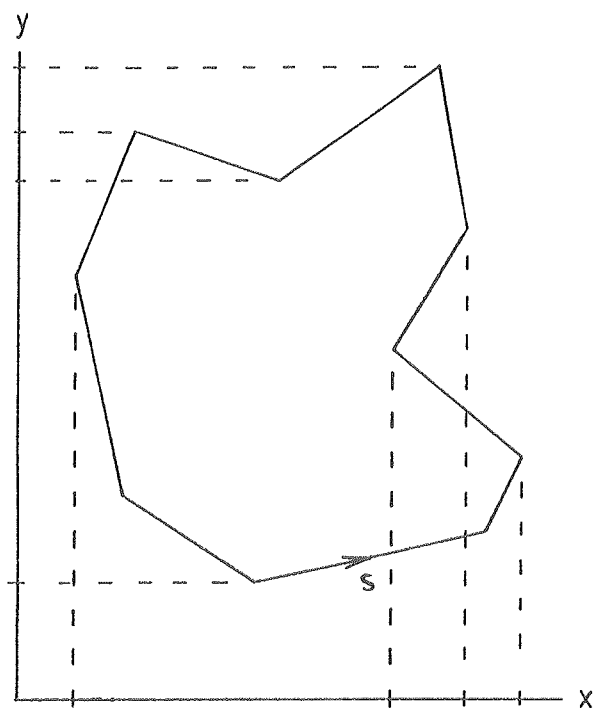


Fig. 3.1 Eksempel på afmærkningerne for den ene flade fra et objekt.

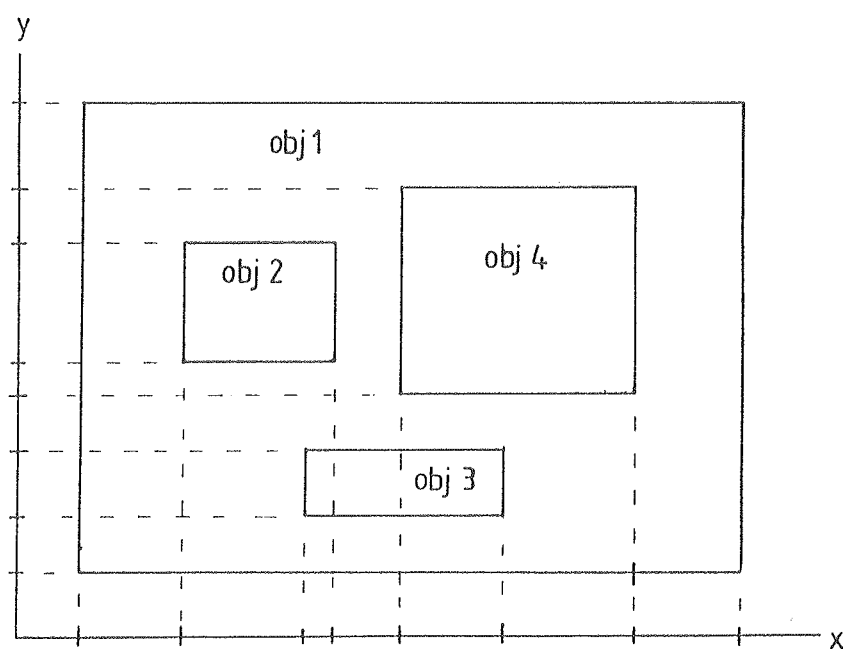


Fig. 3.2 Eksempel på afmærkningerne for en simpel geometri (angivet i 2D for overskuelighedens skyld)

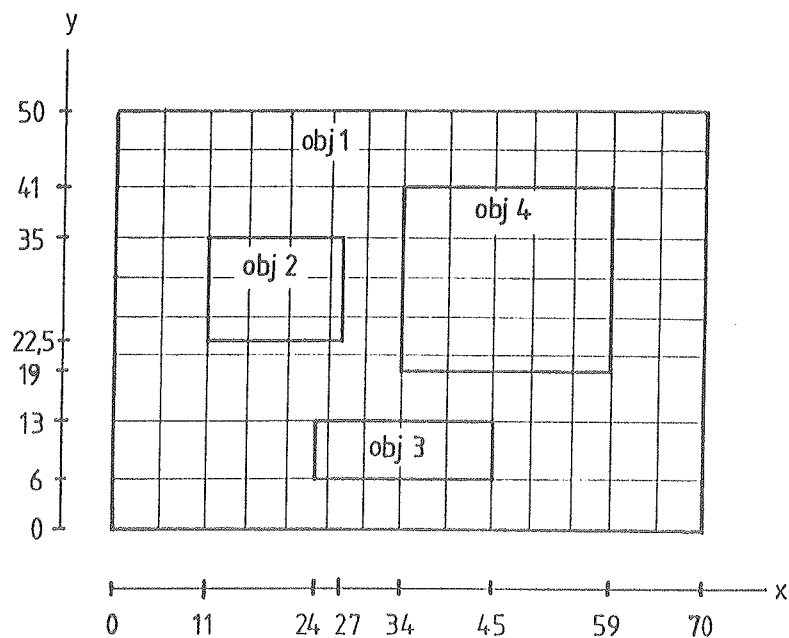


Fig. 3.3 Angivelse af netlinierne for eksempel fra fig. 3.2.
 FILTER = 4,0 ACCURACY = 3

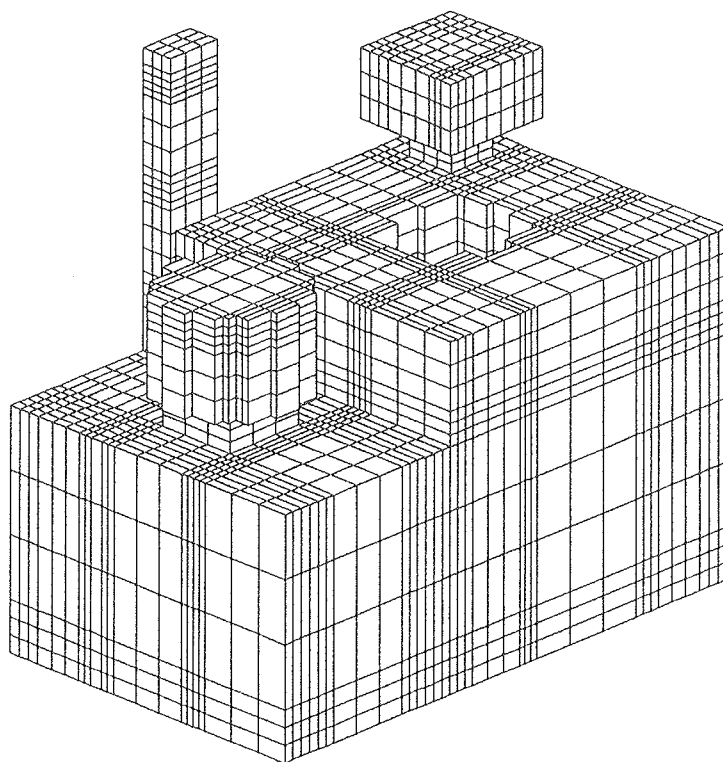


Fig. 3.4 Nettet for geometrien angivet i fig 2.1, kun angivet for selve støbeemnet med indløb, efterføderhals og efterføder.
 FILTER = 2,0 ACCURACY = 3
 Antal elementer: $42 \times 33 \times 27 = 37422$

4. Beskrivelse af videreudviklingen

I dette kapitel er beskrevet den videreudvikling, der er udført med det formål at forbedre kvaliteten af de genererede net.

I den forbindelse skal her defineres, hvad et "godt" net er. Der er to ting at tage hensyn til. Geometrien skal beskrives så godt som muligt, uden at det giver anledning til alt for mange elementer, og nettet skal være egnet til de numeriske beregninger.

Med hensyn til det første har den "gamle" version et par mangler. Med kun to parametre er der ikke den store mulighed for at yde indflydelse på nettet. Hvis der i en af koordinatretningerne ønskes et fint net, eller haves et sted, hvor der foregår store geometriske ændringer, som det er vigtigt at få beskrevet helt korrekt, resulterer dette i, at nettet overalt bliver fint inddelt.

Derfor er der nu åbnet mulighed for at specificere forskellige parameter-værdier i de tre koordinatretninger. Desuden er FILTER-parameteren opsplittet i to parametre. Den første benyttes ved filtrering af afmærkninger, og den anden benyttes ved den videre inddeling, således at ingen af de underinddelte lag bliver mindre end denne.

En anden mangel er, at polynomier og specielt cirkler ikke bliver særlig godt afmærket. En procedure til afhjælpning af dette er udviklet, og desuden er sørget for en bedre gengivelse af selve støbeemnet i nettet.

Med hensyn til det andet, egnethed for de numeriske beregninger, er der også et par mangler. Der er ingen kontrol med om nettet bliver tilstrækkeligt "glat", d.v.s. at forholdet mellem to på hinanden følgende lag ikke bliver for stort, og at der ikke optræder "aflange" elementer. Disse to forhold er meget vigtige for nettets egnethed for de numeriske beregninger.

I den nye version er derfor indført to nye parametre, som må specificeres af brugeren. Det maksimalt tilladelige forhold mellem to på hinanden følgende lag og det maksimalt tilladelige længde - bredde forhold for elementerne.

Derudover er indbygget en mulighed for at udnytte en eventuel symmetri i geometrien, så det kun er nødvendigt at regne på en del af denne.

4.1 Bedre tilnærmelse af selve støbedelen i nettet

Ved benyttelse af et kartesisk net bliver geometrien som oftest ikke helt korrekt gengivet i selve nettet. Dette skyldes at "skrå" overflader bliver gengivet "trappeformet" i nettet. Dette er ulempen ved brug af kartesiske, ortogonale net. I den "gamle" version af GEOMesh optræder imidlertid endnu en ulempe. I tilfælde af at afstanden mellem to afmærkninger er mindre end FILTER, erstattes disse af en afmærkning i midten. Dette vil undertiden resultere i, at nogle objekter bliver gengivet lidt større eller mindre i nettet, end de egentlig er, da der ikke går en koordinatflade gennem deres overflader. Se fig. 3.3. Dette er særlig uheldigt, hvis der er tale om et objekt bestående af støbemetall.

Dette problem vil selvfølgelig altid opstå ved benyttelse af en filtreringsteknik, i tilfælde af at flere objekter ligger tæt på hinanden. Da interessen ved simulering af fyldnings- og størkningsprocesser naturligvis koncentrerer sig om selve støbeemnet, er det vigtigt, at dette gengives så godt som muligt i nettet. Derfor er fremgangsmåden ved filtrering ændret således, at afmærkninger

fra et objekt bestående af støbemetall opprioriteres. D.v.s., hvis afstanden mellem en afmærkning fra et objekt bestående af støbemetall og en fra et objekt bestående af et andet materiale er mindre end FILTER, beholdes afmærkningen fra støbemetallet, mens den anden afmærkning slettes. Dette resulterer i en bedre gengivelse af støbeemnet i nettet.

I tilfælde af at afmærkningerne kommer fra samme materiale, opprioriteres afmærkningen fra det mindste objekt.

4.2 Bedre gengivelse af objekterne i nettet

Som beskrevet i kapitel 3 blev der før kun afmærket i en retning, hvis koordinatens afledede med hensyn til en buelængdeparameter ændrede fortegn eller blev 0 (se fig. 3.1). En cirkel, der beskrives som et polygon med et knudepunkt pr. 30° , ville således kun have givet anledning til to markeringer i hver af de tre retninger (ligger cirklen i et plan parallelt med et af koordinatplanerne fås naturligvis kun en afmærkning i retningen vinkelret på denne), hvilket kunne resultere i en dårlig gengivelse i nettet. Den her beskrevne forbedring har da også først og fremmest til formål at forbedre gengivelsen af cirklerne (og dermed cylindrerne, som konstrueres v.h.a. to cirkler) i nettet.

Der er derfor udviklet en procedure, der som input behøver en angivelse af en vinkel ANGLE. For alle de angivne planer tages der udgangspunkt i det første punkt angivet af preprocessoren. Derefter gennemgås de resterende punkter i rækkefølge. Bliver vinklen mellem punkternes forbindelseslinier β så større end ANGLE, sættes en ekstra afmærkning udover de i forvejen generede. Er dette ikke tilfældet, beholdes den oprindelige forbindelseslinie, og denne sammenlignes så med den næste o.s.v. o.s.v., indtil vinklen bliver større end ANGLE, hvorefter der så sættes en afmærkning. Se fig. 4.1.

Denne nyudviklede procedure giver brugeren mulighed for en bedre gengivelse af objekterne i nettet, hvis dette er ønsket. Specielt for cirklerne (d.v.s. cylindrerne) er der tale om en forbedring.

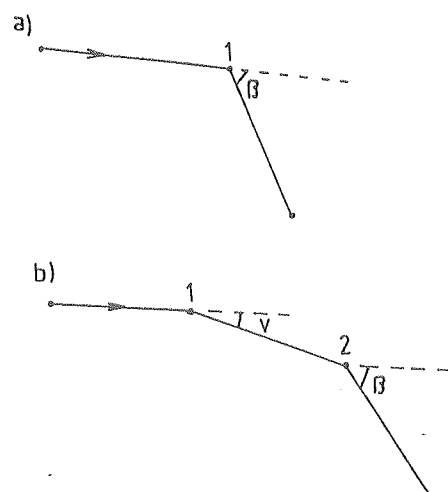


Fig. 4.1 a) Med f.eks. $\text{ANGLE} = 30^\circ$ er vinklen β større end ANGLE , og i dette tilfælde ville punkt 1 resultere i afmærkninger i alle tre koordinatretninger.

b) Her er vinklen v mindre end ANGLE , mens β er større end ANGLE . Derfor resulterer kun punkt 2 i afmærkninger.

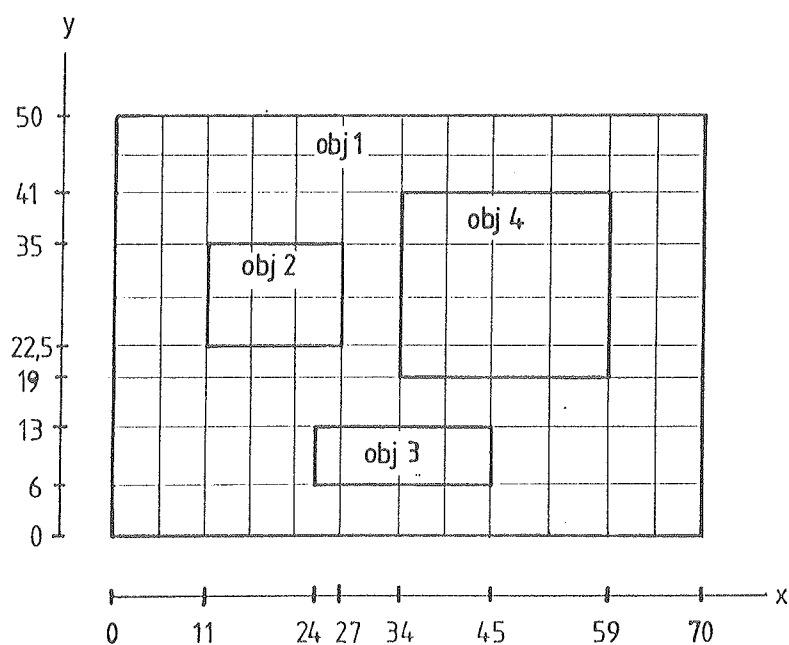


Fig.4.2 Netlinierne angivet for eksemplet fra fig 3.2 (under forudsætning af objekt 2,3 og 4 består af samme materiale).

$\text{FILTER1x} = 4,0$ $\text{FILTER2x} = 5,0$ $\text{ACCURACYx} = 3$
 $\text{FILTER1y} = 3,0$ $\text{FILTER2y} = 4,0$ $\text{ACCURACYy} = 2$

4.3 Indførelse af mere fleksible input-parametre

Med den gamle version af GEOMesh havde brugeren meget begrænsede muligheder for at yde indflydelse på, hvorledes nettet kom til at se ud. Med kun to parametre var der ikke meget at "spille med".

For at øge brugerens mulighed for at påvirke netgenereringen er derfor lavet to afgørende ændringer. For det første er FILTER-parameteren opsplittet i to parametre. For det andet er disse to plus ACCURACY-parameteren gjort afhængige af retningen. D.v.s., det nu er muligt at specificere forskellige værdier for parametrene i de tre retninger x, y og z. Der skal altså specificeres 9 værdier mod før 2.

Før blev der brugt den samme FILTER-værdi både for filtreringen af afmærkningerne og ved den videre inddeling, hvor ACCURACY-værdien blev benyttet. Nu er dette ændret, således at den første FILTER-parameter: minimal wallthickness (FILTER1) kun benyttes ved filtrering af afmærkningerne. D.v.s., den er et mål for hvor fint geometrien gengives. Den anden FILTER-parameter: minimal subdivision elementsize (FILTER2) benyttes ved den videre inddeling, således at ingen af de underinddelte lag bliver mindre end denne. Se fig. 4.2.

Dette giver øgede muligheder for at generere et fornuftigt net. Haves f.eks. et sted, hvor der sker store geometriske ændringer, er det nu muligt at beskrive dette godt, og samtidig forhindre, at nettet overalt bliver meget fint, hvilket vil resultere i mange elementer. Som oftest vil det give det bedste resultat at vælge FILTER2 større end eller lig med FILTER1, men i princippet er det muligt at gøre det omvendt. I nogle tilfælde kan dette resultere i et bedre net.

Muligheden for at specificere forskellige parameter-værdier i de tre koordinatretninger giver også bedre muligheder for at generere gode net. Specielt, hvis der er tale om aflange støbeemner, er det vigtigt at have denne mulighed. Ellers ville den nødvendige fine inddeling i den "korte retning" medføre en unødvendig fin inddeling i de to andre retninger.

4.4 Udvikling af glatheds-algoritme

Ved numeriske beregninger af konvektion og varmeledning er det af stor vigtighed, at nettet er "glat", d.v.s., at forholdet mellem to på hinanden følgende lag ikke bliver for stort. Derfor er udviklet en procedure, som giver brugeren mulighed for selv at specificere det maksimalt tilladelige forhold.

Denne procedure benytter som udgangspunkt de lag, som allerede er genereret ved benyttelse af den i afsnit 4.1 til 4.3 beskrevne fremgangsmåde.

Med det af brugeren specificerede maksimale forhold, SMOOTH (SMOOTH > 1), opnås i x - retningen, at der for alle lagene gælder:

$$\frac{1}{SMOOTH} \leq \frac{\Delta x_{i+1}}{\Delta x_i} \leq SMOOTH \quad (4.1)$$

hvor Δx_i er lagtykkelsen i x-retningen for det i'te lag. Tilsvarende er selvfølgelig gældende for de to andre koordinatretninger.

I fig. 4.3 er angivet et eksempel på, hvordan algoritmen virker. Problemet er, at hvis der kommer et mindre lag efter et større, således at (4.1) ikke er opfyldt, er det nødvendigt at underindele det store lag og dette kan resultere i at (4.1) ikke er opfyldt for lag i og $i-1$. D.v.s. ændringerne forplanter sig tilbage i systemet. For at undgå dette er proceduren opdelt i to dele. Først gås fra højre mod venstre mens det undersøges, om et lille lag efterfølges af et større, således at (4.1) ikke er opfyldt. D.v.s. den venstre del af (4.1) kontrolleres. I tilfælde af at den ikke er opfyldt, underinddeles det store lag et antal gange. For at spare på lagene er proceduren programmeret således, at hvis smooth f.eks. er lig 2, og forholdet mellem to på hinanden følgende lag er 14, underinddeles ikke 7 gange. Derimod underinddeles kun i 3 nye lag, da det første lag må være 2 gange større, det næste 4 gange og det sidste 8 gange større end lag i , for at (4.1) er opfyldt også for de nye lag.

Dernæst gås så fra venstre mod højre, og højre del af (4.1) kontrolleres. Da dette ikke ødelægger det, vi allerede har opnået (at venstre del af (4.1) opfyldes), er (4.1) nu opfyldt.

Principielt er det selvfølgelig underordnet, om der først gås fra højre mod venstre eller omvendt. Valget af SMOOTH er mere kritisk for konvektionsproblemer end for varmeledningsproblemer. Den bør under ingen omstændigheder vælges større end 3 og helst mindre end 2, hvis det er foreneligt med det dermed opnåede elementantal.

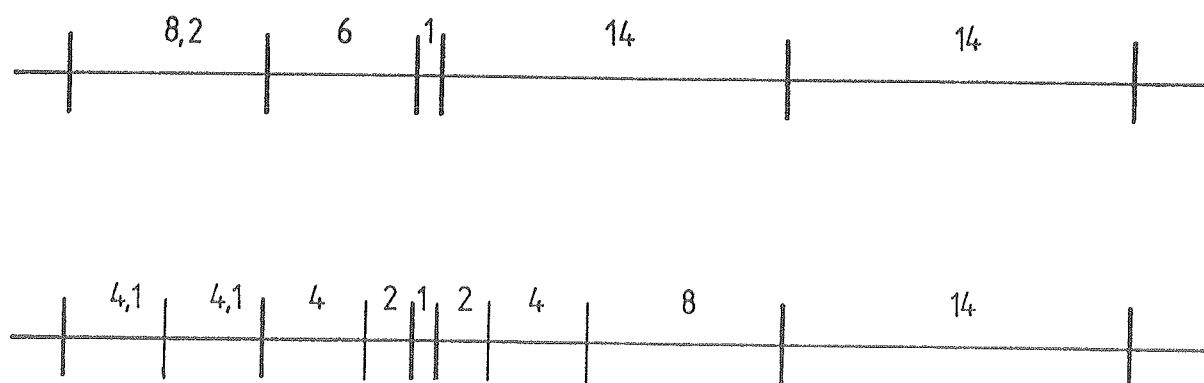


Fig. 4.3 Virkemåde for "glatheds-algoritmen". Øverst er angivet lagene i en vilkårlig koordinatretning, som er genereret ved benyttelse af den i afsnit 4.1 til 4.3 beskrevne fremgangsmåde. Nederst er angivet lagene efter benyttelse af algoritmen. Der er benyttet SMOOTH = 2. Tallene angiver lagtykkelserne.

4.5 Udvikling af en algoritme til at forhindre aflange elementer

Ved numeriske beregninger af konvektion og varmeledning er det også af stor vigtighed at elementerne ikke bliver for aflange, d.v.s., at længde-bredde forholdet ikke bliver for stort i nogle af elementerne. Derfor er udviklet en procedure, som giver brugeren mulighed for at specificere det maksimalt tilladelige længde-bredde forhold, *RATIO*.

Denne procedure benytter som udgangspunkt de elementer som allerede er genereret ved benyttelse af den i afsnit 4.1 til 4.4 beskrevne fremgangsmåde.

Med det af brugeren specificerede maksimale længde-bredde forhold, *RATIO*, opnås, at der for alle elementerne gælder:

$$\frac{\text{længste side i elementet}}{\text{korteste side i elementet}} \leq \text{RATIO} \quad (4.2)$$

Proceduren undersøger først i hvilken retning den mindste lagtykkelse findes og størrelsen af denne. I de to andre retninger undersøges lagene så, og hvis (4.2) (hvor den korteste side er lig den ovennævnte mindste lagtykkelse) for nogle af elementerne ikke er opfyldt, udføres en videre lagdeling, således at (4.2) bliver opfyldt.

Nu mangles kun at sikre at (4.2) også er opfyldt "i den retning", hvor den mindste lagtykkelse forekommer. Dertil findes størrelsen af den mindste lagtykkelse i de to andre retninger, og denne benyttes til at undersøge om (4.2) er opfyldt "i denne sidste retning", og om nødvendigt udføres en videre lagdeling.

Også valget af *RATIO* er mere kritisk for konvektionsberegninger end for varmeledningsberegninger. Et typisk interval for *RATIO* vil være mellem 4 og 8.

Procedurerne beskrevet i afsnit 4.4 og 4.5 resulterer som oftest i flere elementer. Til gengæld er det med udviklingen af mere fleksible input-parametre, beskrevet i afsnit 4.3, muligt at spare på elementantallet i forhold til den "gamle" version.

4.6 Mulighed for udnyttelse af eventuel symmetri

Regnetiden ved numeriske simuleringer er naturligvis stærkt afhængig af antallet af elementer. Derfor er det i den nye version af GEOMesh gjort muligt at udnytte en eventuel symmetri i geometrien, således at der kun regnes på en del af geometrien. De kunstigt skabte rande får som randbetingelse angivet symmetri.

Hvis brugeren ønsker at benytte muligheden for "segmentering", skal dette angives i preprocessoren. Det sker ganske simpelt ved at en cut-boks specificeres af brugeren. Denne cut-boks angiver så udstrækningen af delen, der ønskes regnet. Der genereres så kun net på denne del.

5. Sammenfatning og eksempler

Efter at nyudviklingen er beskrevet i kapitel 4, gives her en oversigt over de nu nødvendige input-parametre. Dernæst vises for eksemplet fra figur 2.1, hvordan de forskellige parametre påvirker de genererede net. Til sidst vises eksempler på genererede net for forskellige geometrier. For nogle af disse geometrier sammenlignes net genereret med den nye version af GEOmesh med net genereret af den oprindelige version.

5.1 Sammenfatning

Det er nødvendigt med angivelse af 6 parametre. Da 3 af disse skal angives i alle 3 koordinatretninger, resulterer det samlet i angivelse af 12 størrelser. I fig. 5.1 er vist hvorledes input-vinduet ser ud. V.h.a. *next* og *prev* er det muligt at "blade" frem og tilbage i input-vinduet.

De 6 parametre er:

1) MIN. WALLTHICKNESS (FILTER1)

som benyttes ved filtrering af afmærkningerne. Forekommer i den aktuelle geometri f.eks. en tynd væg på 2 mm, bør FILTER1 i den pågældende retning vælges lidt mindre end 2 mm, for at være sikker på, at væggen ikke "forsvinder" ved netgenereringen. FILTER1 skal angives i alle tre koordinatretninger.

2) MIN. SUBDIVISION ELEMENTSIZE (FILTER2)

som benyttes ved den videre underinddeling. Skal angives i alle tre koordinatretninger.

3) ACCURACY

som angiver det maksimale antal gange der underinddeles ved den videre inddeling. Skal angives i alle tre koordinatretninger. ACCURACY og FILTER2 angiver hvor fint nettet underinddeles.

4) ANGLE

som angiver fra hvilken størrelse af vinkelændringen, der skal sættes ekstra afmærkninger.

5) SMOOTH

som angiver det maksimalt tilladelige forhold mellem to på hinanden følgende lag.

6) RATIO

som angiver det maksimalt tilladelige længde-bredde forhold i elementerne.

MAGMAmesh

Min. Wallthickness

X-direction: 2.00 [mm]

Y-direction: 2.00 [mm]

Z-direction: 2.00 [mm]

Min. Subdivision Elementsize

X-direction: 3.00 [mm]

Y-direction: 3.00 [mm]

Z-direction: 2.60 [mm]

Mesh Accuracy

X-direction: 2

Y-direction: 2

Z-direction: 3

Mesh Options

Angle: 30.00 [°]

Smoothing: 2.00 [1]

Ratio: 5.00 [1]

Buttons: Return, Accept, Reset, Next, Prev, Calculate

Fig. 5.1 Input-vindue

Netgenereringen er opdelt i to dele. Først bestemmes selve nettet og derefter bestemmes hvilket materiale, der er i de enkelte elementer. Ønskes kun 1. del udført, trykkes på Calculate (se fig. 5.1). Så angives på skærmen for alle tre retninger hvor mange lag, de benyttede parametre har resulteret i. På en gennemsnitlig workstation tager disse beregninger et par sekunder.

Denne opdeling er specielt praktisk i den indledende fase af netgenereringen. Når brugeren har samlet lidt erfaring i at arbejde med GEOMesh, opnås hurtigt en fornemmelse for hvor mange elementer, der kræves for at generere et godt net for den aktuelle geometri. Med brug af "Calculate" kan brugeren så finde nogle passende parametre. Med brug af disse genereres så et net ved at trykke på "Accept", hvorefter materialebestemmelsen føjes til.

På en RISC-workstation (MIPS R3000 Processor, 25 MHZ, 4 MFLOPS) bruges til netgenereringen af størrelsesordenen et sekund pr. 10.000 elementer. Når nettet er genereret, kom det præsenteres grafisk ved brug af Postprocessoren. Er brugeren så ikke tilfreds med resultatet, ændres lidt på parametrene, og proceduren gentages. Som oftest vil det være tilstrækkeligt at gøre dette 1-2 gange. Dette betyder, at i de fleste tilfælde kan netgenereringen foretages på under en time. Dette skal ses i sammenhæng med, at indgivelsen af selve geometrien ofte tager flere dage.

5.2 Eksempel på parametrene indvirkning på nettet for en simpel geometri

For eksemplet fra fig. 2.1 vises nettets "udvikling" ved brug af flere og flere af parametrene. Det skal understreges, at dette eksempel kun tjener til at illustrere netgeneratorens virkemåde. Geometrien er konstrueret til formålet, og nettet er ikke søgt optimeret.

I fig. 5.2 er angivet et meget groft net, som fremkommer ved brug af kun de "indledende" afmærkninger. Dette opnås ved brug af meget små FILTER1-værdier (f.eks. 0,01); ACCURACY sættes til 1, således at der ikke underinddeles; ANGLE sættes til 180°, således at der ikke kommer ekstra afmærkninger fra denne procedure; SMOOTH og RATIO tildeles begge meget store værdier, således at disse procedurer ikke bliver virksomme. Dette resulterer i $15 \times 14 \times 11 = 2310$ elementer for hele geometrien d.v.s. hele formboksen. Selve støbeemnet består typisk af 10-35% af det samlede elementantal. I figuren er kun vist nettet for selve emnet med indløb og efterføder.

I fig. 5.3 er så tilføjet $ANGLE = 30^\circ$, d.v.s. nu opnås en bedre beskrivelse af de tre cylindre. Dette resulterer i $29 \times 27 \times 11 = 8613$ elementer.

Derefter filtreres nettet. I dette tilfælde benyttes den samme FILTER1-værdi i alle tre retninger nemlig 2 mm. Nettet er angivet i fig. 5.4. Elementantal: $23 \times 18 \times 10 = 4140$. Hele geometrien incl. formbox er 180 mm x 140 mm x 153 mm.

Efter filtreringen er udført, foretages en videre inddeling ved at specificere FILTER2- og ACCURACY-værdier i de tre koordinatretninger. I fig. 5.5 er vist nettet, som fremkommer ved brug af $FILTER2x = FILTER2y = 3$ mm, $FILTER2z = 2,6$ mm, $ACCURACYx = ACCURACYy = 2$ og $ACCURACYz = 3$. Elementantal: $41 \times 28 \times 22 = 25256$.

Som det ses i fig. 5.5 er det opnåede net nogle steder uglat. For at råde bod på dette benyttes $SMOOTH = 2$. Det hermed fremkomne net er vist i fig. 5.6. Elementantal: $44 \times 31 \times 25 = 34100$. Som det sidste sørges nu for at aflange elementer undgås. I fig. 5.7 er det endelige net vist ved benyttelse af $RATIO = 5$. Elementantal: $44 \times 31 \times 27 = 36828$, hvoraf 12813 er af metal, d.v.s. emnet plus indløb og efterføder. Dette genererede net har nogenlunde det samme samlede antal elementer som nettet vist i fig. 3.4, der er genereret med den oprindelige version. Dog har det flere metal-elementer. Det ses, at kvaliteten af nettet er kraftigt forbedret.

I alle ovennævnte figurer er kun vist nettet for selve støbeemnet med indløb og efterføder, da dette naturligvis er det vigtigste. I fig. 5.8 er så for helhedens skyld vist nettet i formen, hvor der er foretaget et snit ca. midt i y-retningen.

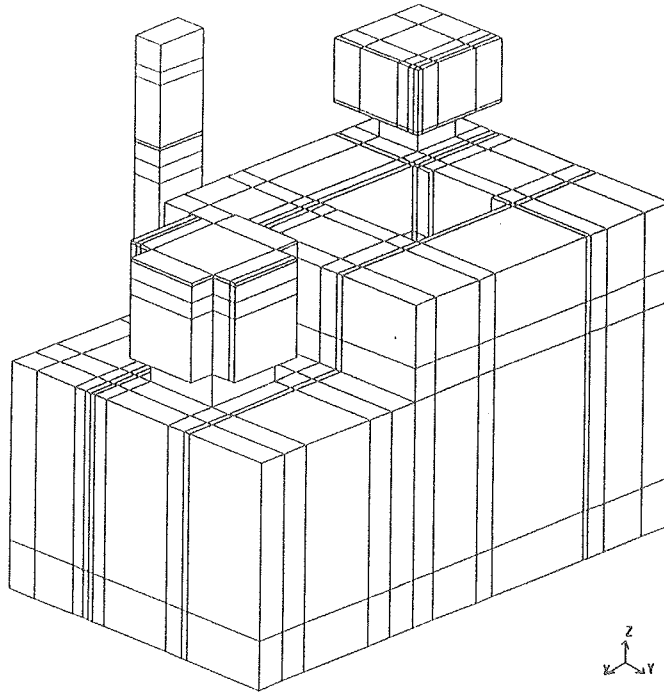


Fig. 5.2 Net genereret for geometrien fra fig. 2.1 ved brug af kun de indledende afmærkninger. Nettet kun angivet for selve støbeemnet med indløb og efterføder.
Elementantal: $15 \times 14 \times 11 = 2310$

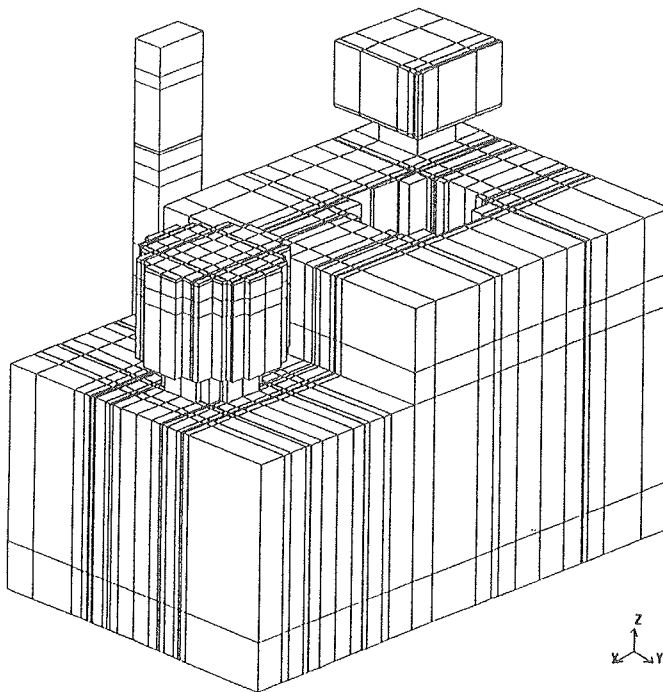


Fig. 5.3 Net genereret ved brug af de indledende afmærkninger og vinkelændringsprocedure med $\text{ANGLE} = 30^\circ$.
Elementantal: $29 \times 27 \times 11 = 8613$

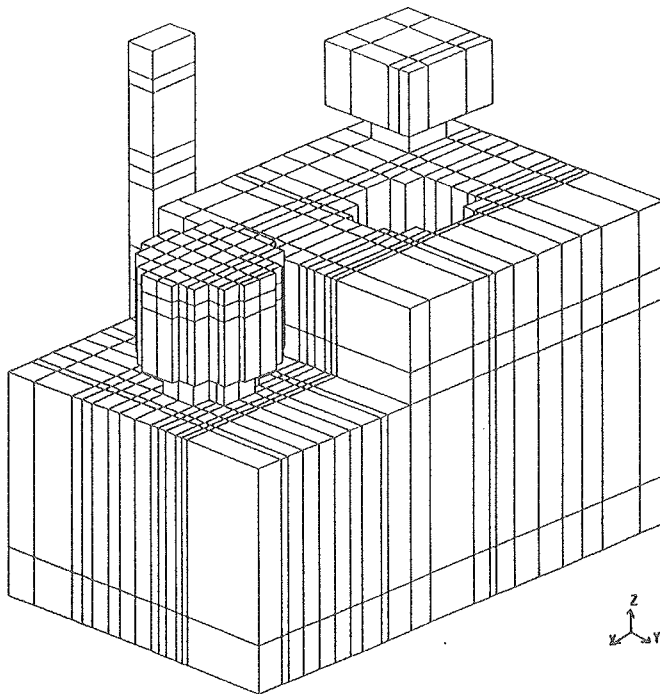


Fig. 5.4 $\text{FILTER1x} = \text{FILTER1y} = \text{FILTER1z} = 2,0$
 $\text{ANGLE} = 30^\circ$
 Elementantal: $23 \times 18 \times 10 = 4140$

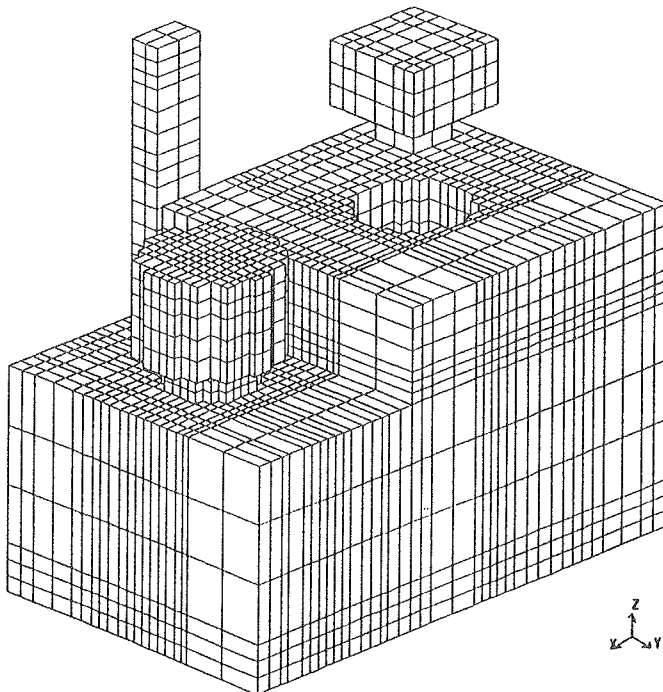


Fig.5.5 Parametre som fig. 5.4 plus
 $\text{FILTER2x} = \text{FILTER2y} = 3,0$
 $\text{ACCURACYx} = \text{ACCURACYy} = 2$
 Elementantal: $41 \times 28 \times 22 = 25256$
 $\text{FILTER2z} = 2,6$
 $\text{ACCURACYz} = 3$

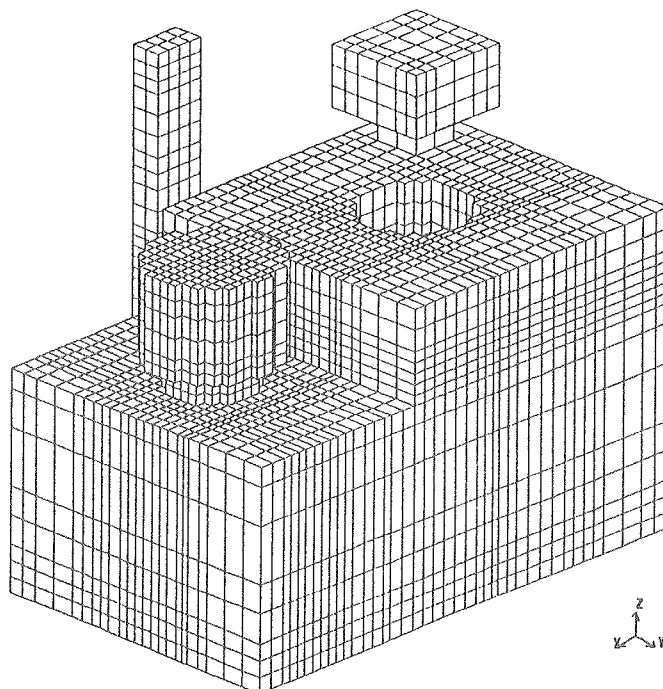


Fig. 5.6 Parametre som i fig. 5.5 plus SMOOTH = 2,0
Elementantal: $44 \times 31 \times 25 = 34100$

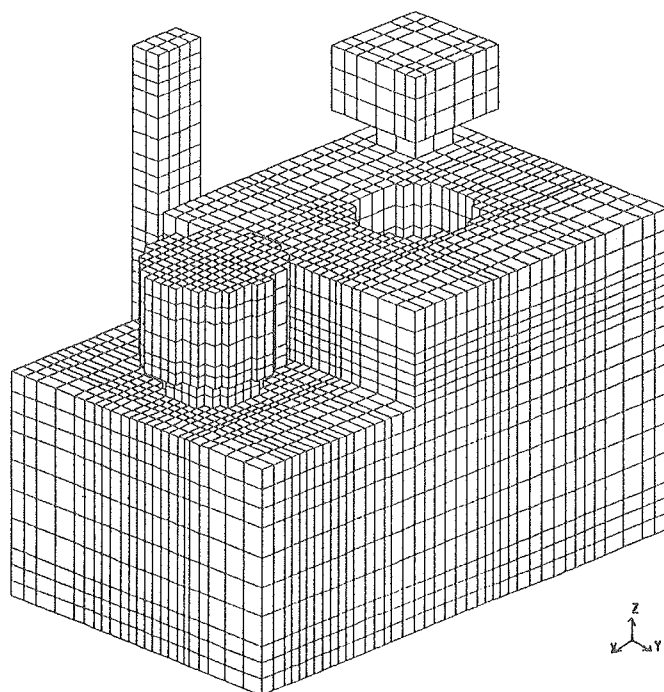


Fig. 5.7 Parametre som i fig. 5.6 plus RATIO = 5,0
Elementantal: $44 \times 31 \times 27 = 36828$

5.3 Eksempler

I dette afsnit er angivet eksempler på genererede net for forskellige geometrier.

I fig. 5.9 - 5.11 er for en simpel geometri vist nogle genererede net med brug af forskellige parametre. I fig. 5.9 er angivet nettet genereret med den oprindelige version af netgeneratoren. Det samlede antal elementer: $47 \times 35 \times 28 = 46060$, heraf 6848 metalceller. I fig. 5.10 og 5.11 er så angivet to forskellige net med henholdsvis 43648 og 48825 elementer, heraf 7260 henholdsvis 7073 metalceller. Parametrene er angivet i figurteksterne. Det ses, at netkvaliteten i begge tilfælde er forbedret. Netlinierne er bedre fordelt, der optræder ikke mere så aflange elementer, og nettet er blevet mere "glat". Desuden er cirklerne bedre gengivet. Disse forhold er særlig tydelige for nettet i fig. 5.10, hvor der er tale om en kraftig forbedring af netkvaliteten.

De resterende eksempler er alle komplicerede geometrier, som er blevet støbt og i forbindelse hermed også er blevet simuleret.

I fig. 5.12 - 5.15 er vist nogle genererede net for en geometri bestående bl.a. af nogle 3 mm tynde plader, nogle steder forskudt en halv pladetykkelse, en konisk cylinder og en efterføder med et hul øverst formet som en keglespids. I fig. 5.12 er vist et net, som er genereret med den oprindelige version. Det samlede elementantal er $140 \times 59 \times 119 = 982940$, heraf 167321 metalceller. I fig. 5.13 er vist et net genereret med den nye version. Samlet elementantal: $133 \times 42 \times 111 = 620046$, heraf 84322 metalceller. I fig. 5.14 og 5.15 er vist to forskellige udsnit af nettet fra fig. 5.13.

Som det fremgår af figurerne er netkvaliteten kraftigt forbedret. Med benyttelse af en tredjedel færre samlet antal elementer og kun halvt så mange metalelementer er der opnået et kraftigt forbedret net. Netlinierne er mere jævnt fordelt, nettet er ikke så "uglat", der optræder ikke så aflange elementer, og geometrien er bedre beskrevet.

I fig. 5.16 er for en tyndvægget geometri vist et net genereret med den nye version. Her er muligheden for at specificere forskellige parameter-værdier i de tre koordinatretninger udnyttet fuldt ud. Derimod er det her for at opnå et godt net ikke nødvendigt at benytte SMOOTH og RATIO.

I fig. 5.17-5.20 er et net angivet for geometrien fra fig. 2.2. I fig. 5.18-5.20 er vist forskellige snit i delen. I fig. 5.21 er angivet to forskellige net for en simplificeret motorblok. Ved indgivelse af geometrien er der benyttet 134 solids. De benyttede elementantal er 500.000 og 7,8 millioner. Der også blevet genereret et net på 25 millioner elementer. Desværre var opgaven for stor for postprocessoren, så det er umuligt at præsentere nettet visuelt. Desuden kræver det utrolig meget af computeren, hvis fyldning- og størkningssimuleringen skal kunne gennemføres for et så stort net. Dette illustrerer, at det ikke længere er netgenereringen, som udgør "flaskehalsen" indenfor området simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser og beslægtede fagområder.

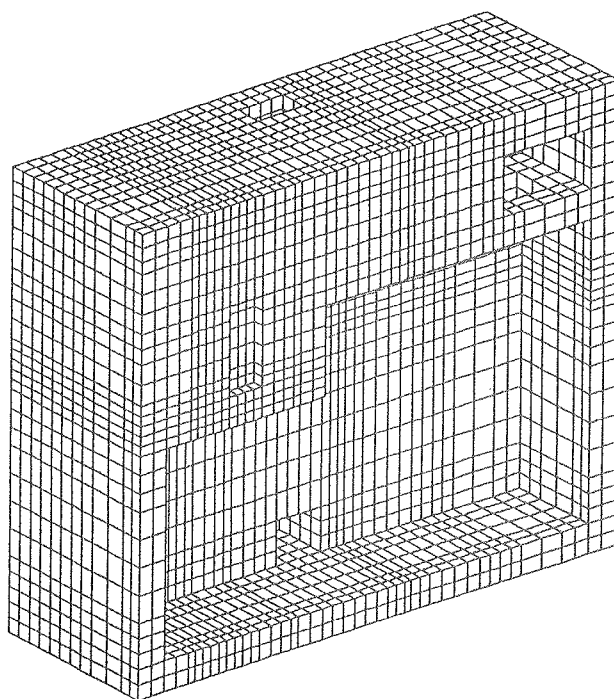


Fig. 5.8 Nettet i formen genereret med de samme parametre som i fig. 5.7. Der er foretaget et snit ca. midt i y retningen.

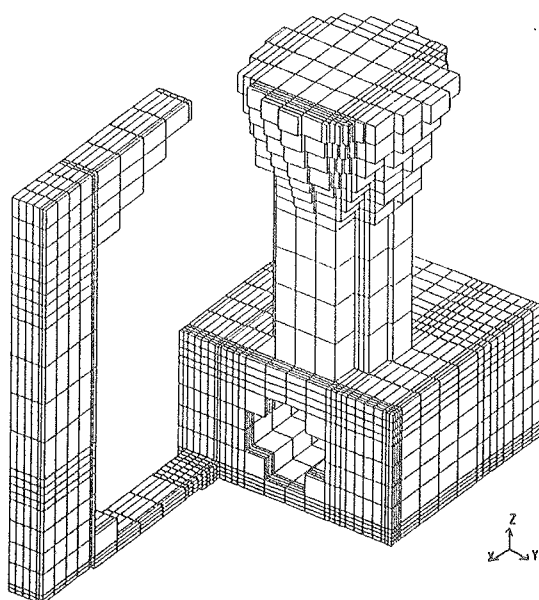


Fig. 5.9 Net genereret med den oprindelige version for en simpel geometri.
 FILTER = 1,0 ACCURACY = 4
 Elementantal: $47 \times 35 \times 28 = 46060$

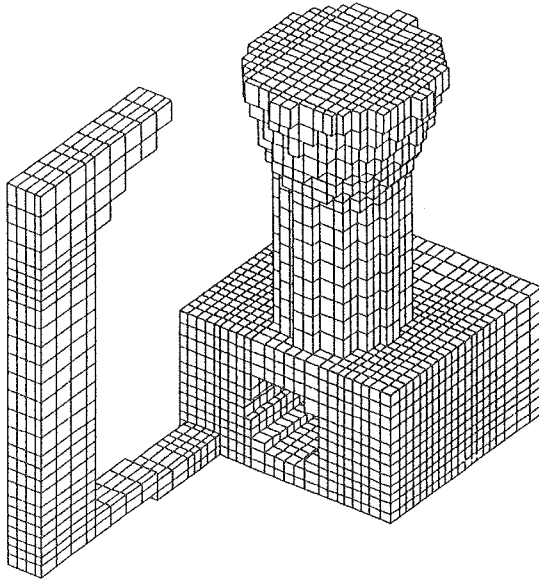


Fig. 5.10 Net genereret med den nye version for samme geometri som i fig. 5.9
 FILTER1x = FILTER1y = FILTER1z = 2,0
 FILTER2x = 2,7 FILTER2y = 3,0 FILTER2z = 3,5
 ACCURACYx = ACCURACYy = 3 ACCURACYz = 4
 ANGLE = 30° SMOOTH = 3,0 RATIO = 6,0
 Elementantal: 44 x 31 x 32 = 43648

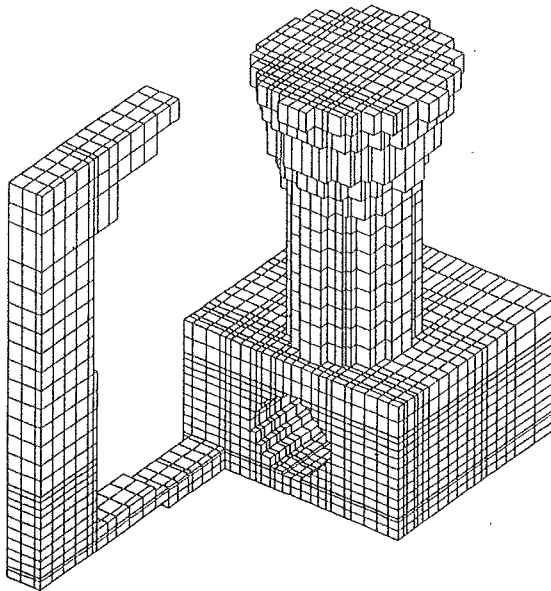


fig 5.11 FILTER1x = FILTER1y = FILTER1z = 1,0
 FILTER2x = FILTER2y = FILTER2z = 2,5
 ANGLE = 30° SMOOTH = 3,0 RATIO = 8,0
 ACCURACYx = ACCURACYy = ACCURACYz = 2
 Elementantal: 45 x 35 x 31 = 48825

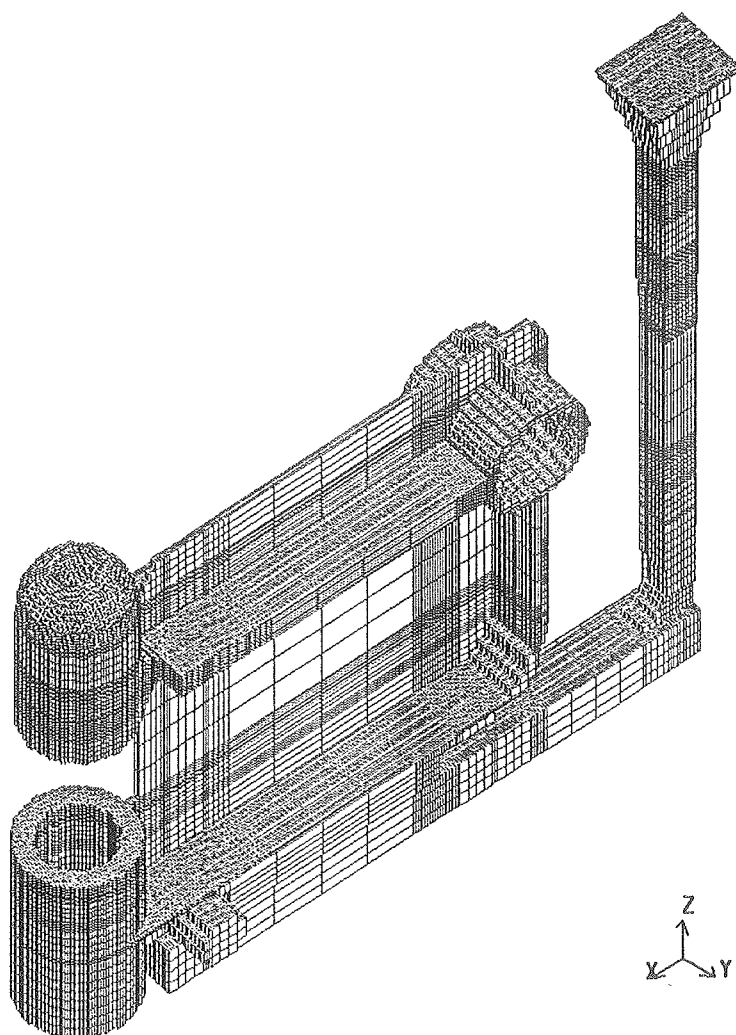


Fig. 5.12 Net genereret med den oprindelige version
FILTER = 1,0 ACCURACY = 4
Elementantal: $140 \times 59 \times 119 = 982940$

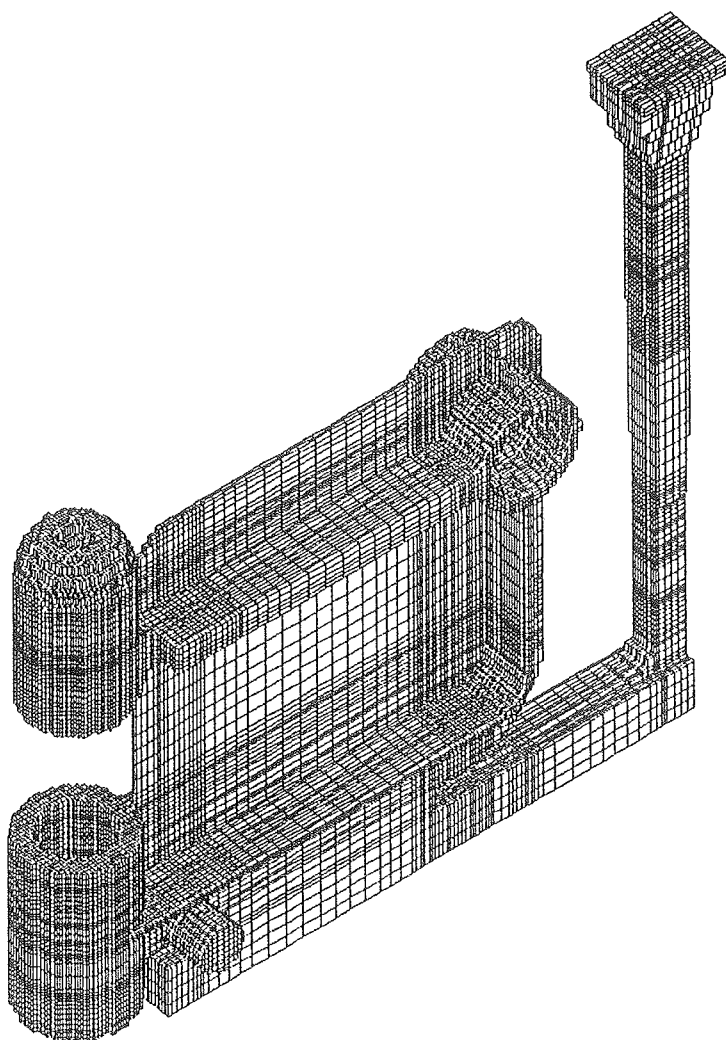


Fig. 5.13 Net genereret med den nye version for samme geometri som i fig. 5.12

FILTER1x = FILTER1y = FILTER1z = 1,4

FILTER2x = FILTER2y = FILTER2z = 1,4

ACCURACYx = ACCURACYz = 2 ACCURACY y = 3

ANGLE = 30° SMOOTH = 3,0 RATIO = 8,0

Elementantal: 133 x 42 x 111 = 620046

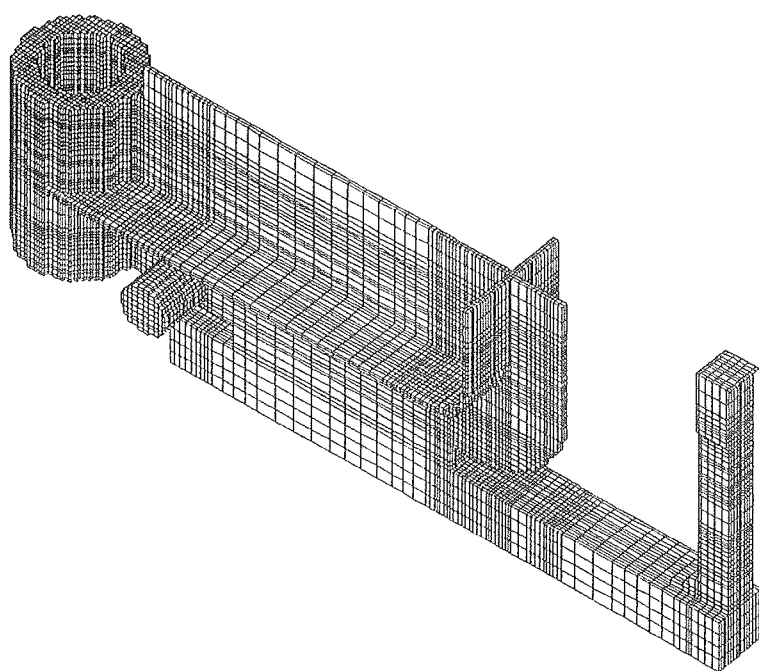


Fig. 5.14 Udsnit af nettet i fig. 5.13

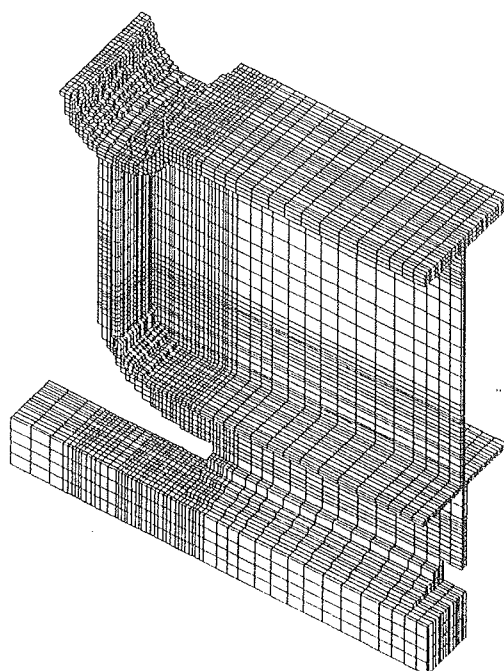


Fig. 5.15 Udsnit af nettet i fig. 5.13

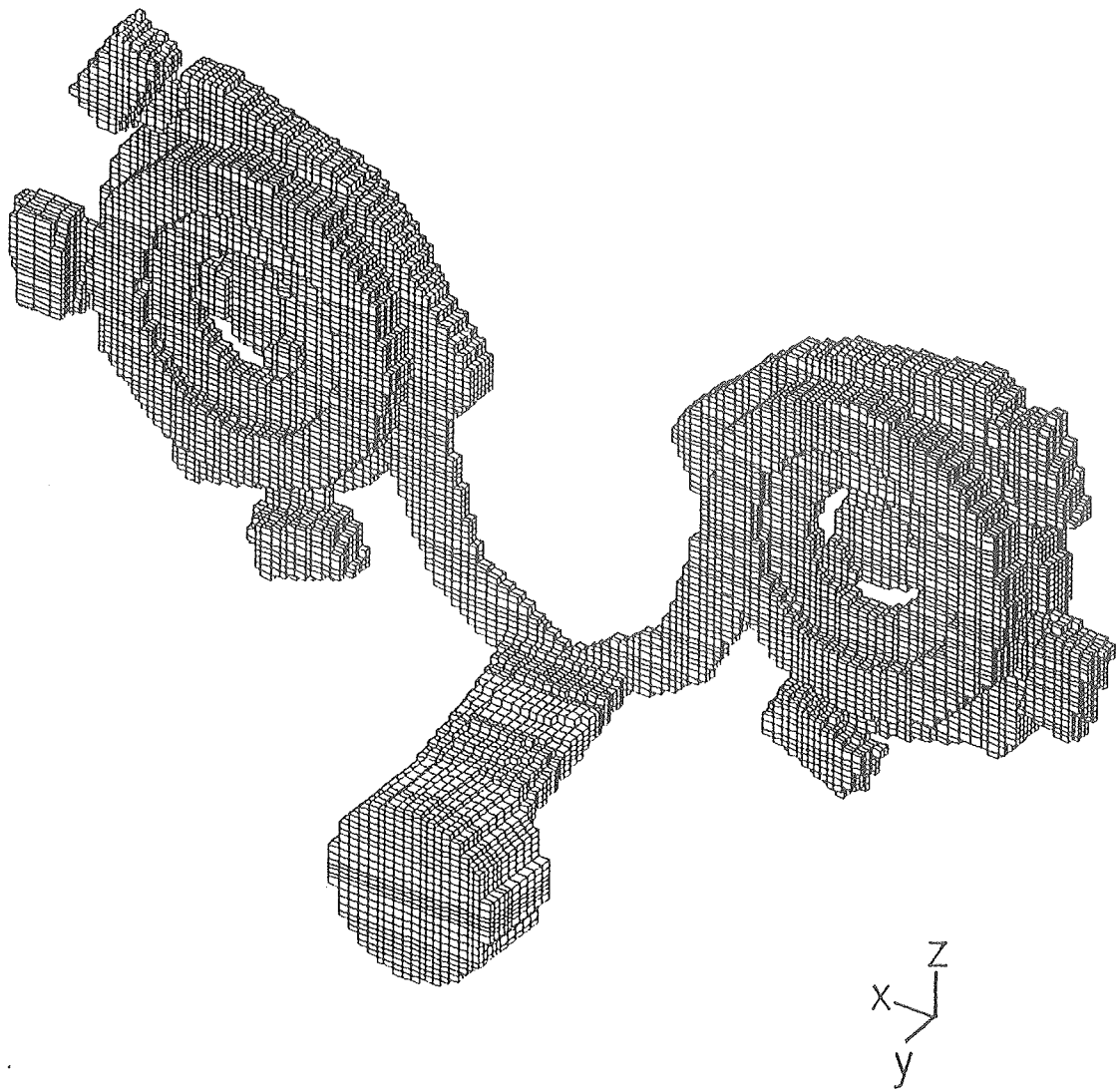


Fig. 5.16 Tyndvægget geometri

FILTER1x = FILTER2x = 2,0
 FILTER1y = FILTER2y = 1,4
 FILTER1z = FILTER2z = 1,5
 ACCURACYx = 2 ACCURACYy = 5 ACCURACYz = 4
 ANGLE = 30° SMOOTH = ∞ RATIO = ∞

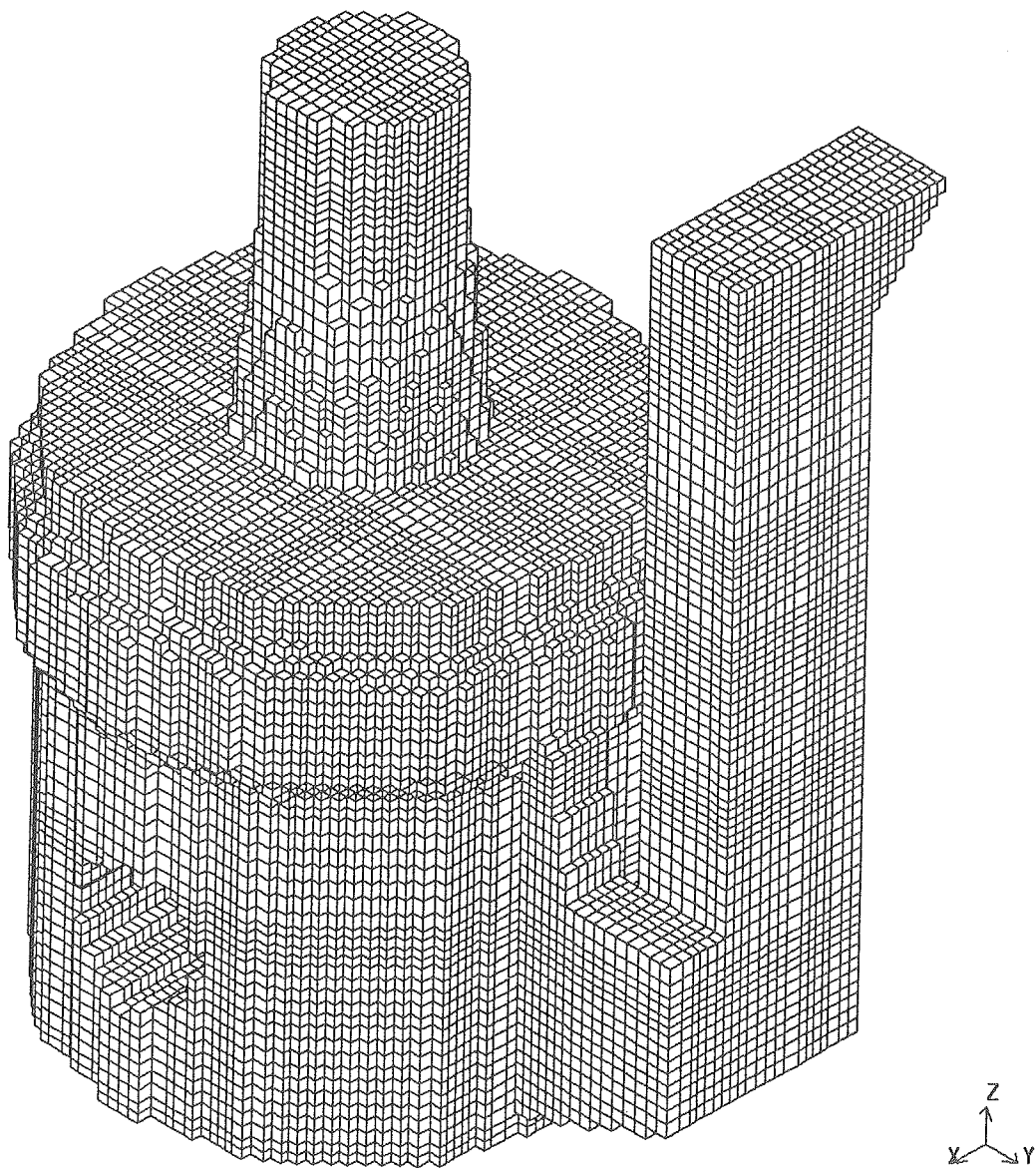


Fig. 5.17 Geometrien fra fig. 2.2. Nettet kun angivet for selve støbeemnet med indløb og efterføder.

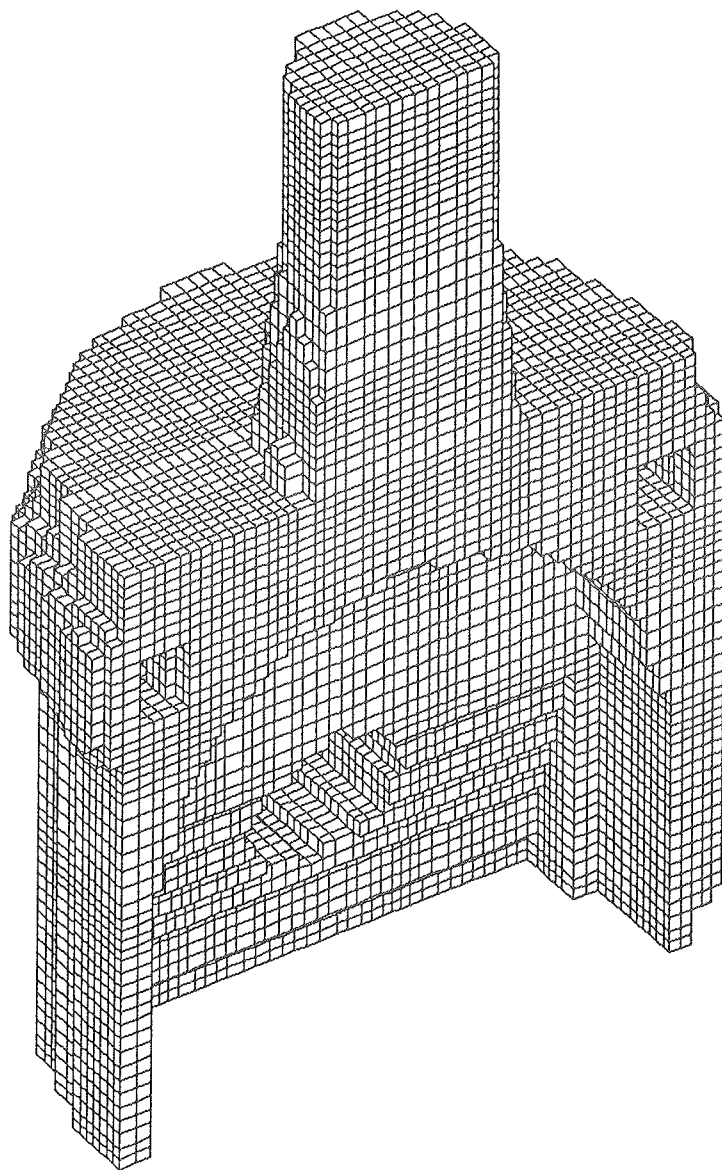


Fig. 5.18 Som i fig. 5.17 plus snittet i selve emnet.

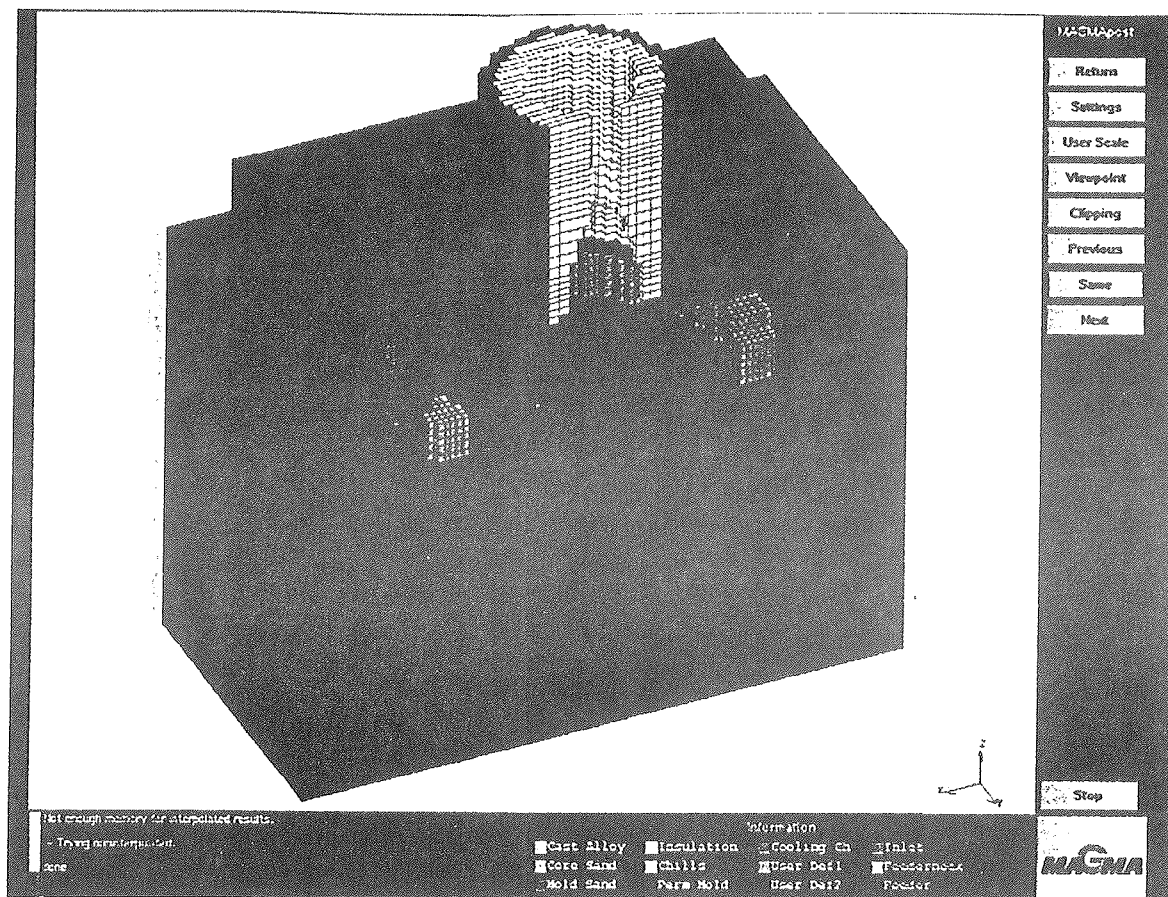


Fig.5.19 Angivelse af nettet, bl.a i formen.

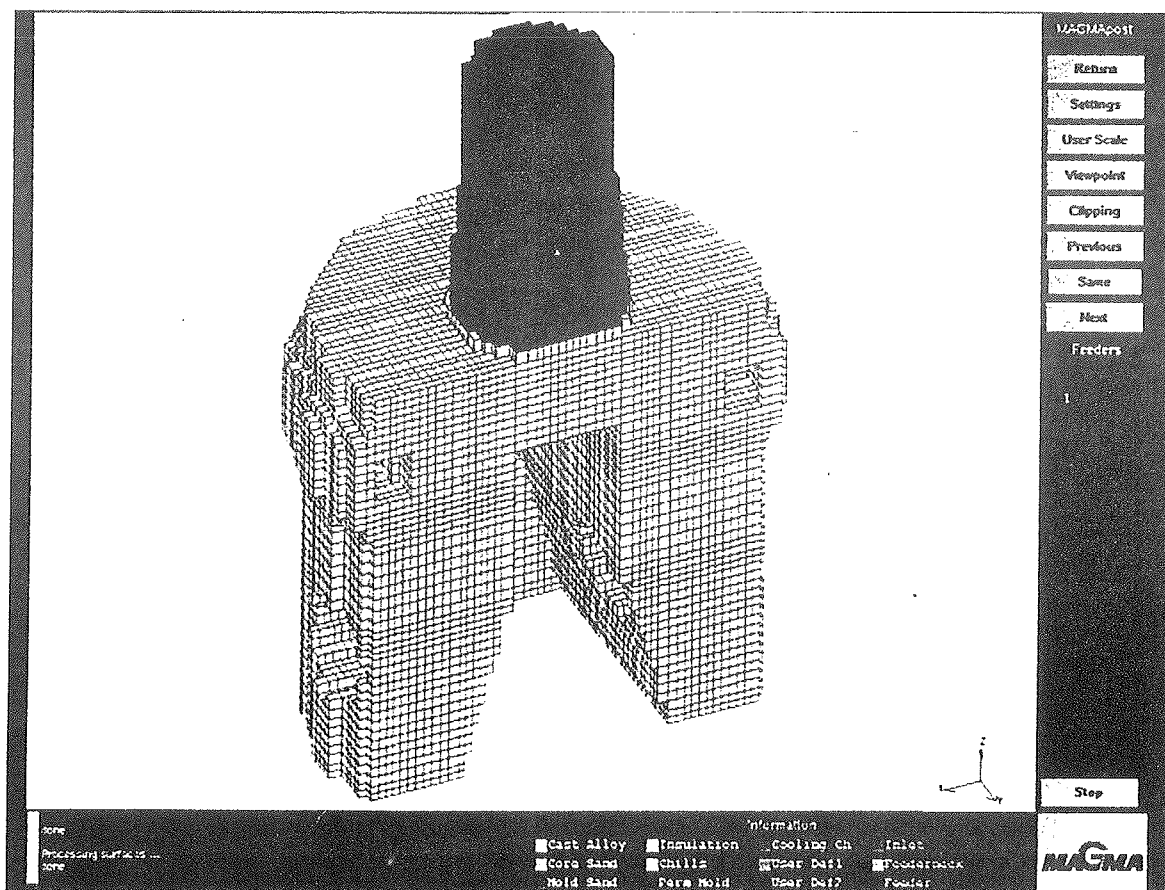


Fig.5.20 Snit i selve delen

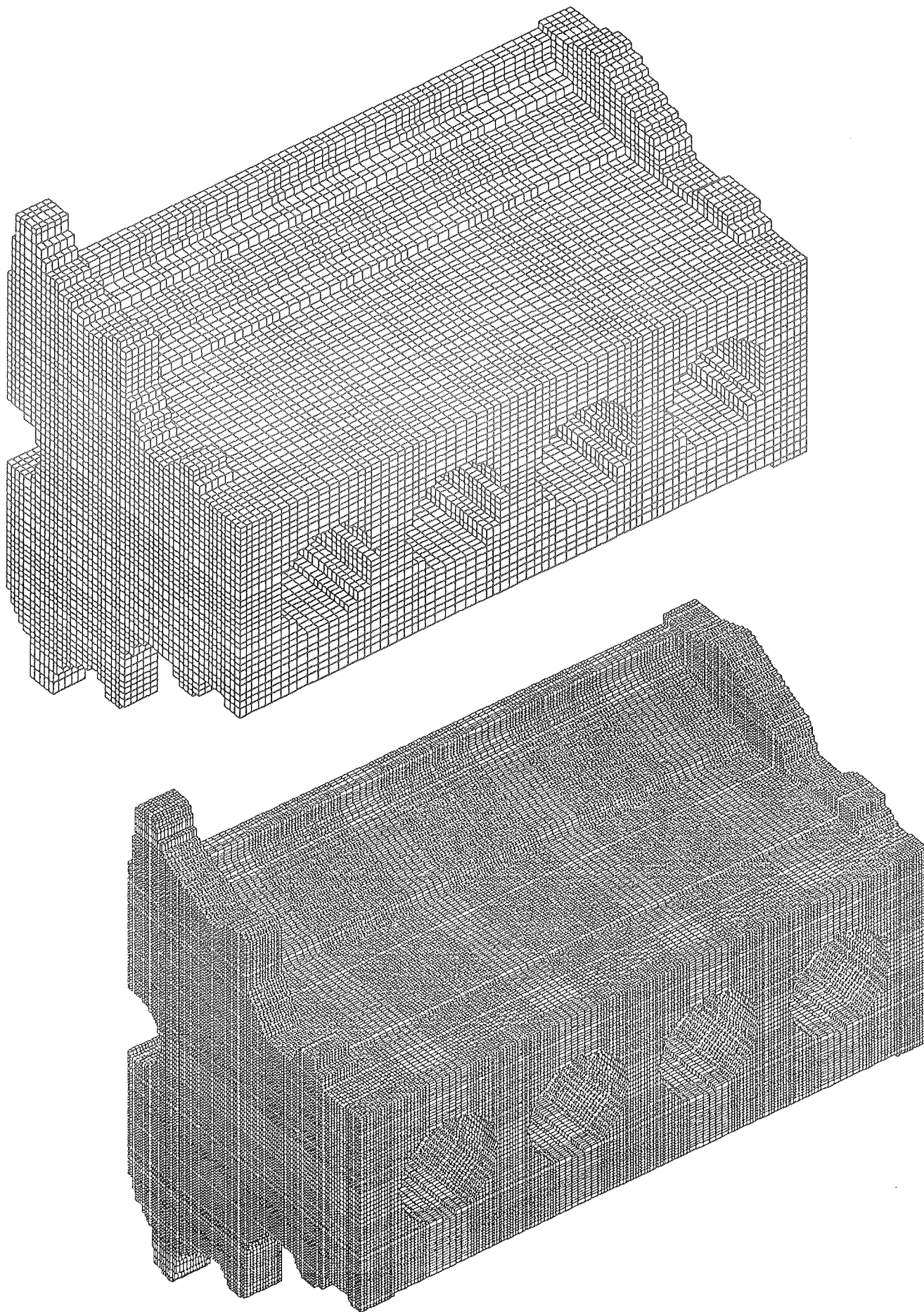


Fig. 5.21 Simplificeret motorblok, øverst samlet elementantal 500.000, nederst 7,8 millioner.

6. Konklusion

Det arbejde, som er udført for at udvikle og forbedre den i februar 1990 bestående automatiske netgenerator, GEOMesh, er beskrevet i det foregående.

Følgende forbedringer er udført:

- a) Bedre beskrivelse af selve støbeemnet i nettet
- b) Bedre netinddeling af geometrier med mange cirkulære objekter
- c) Indførelse af mere fleksible input-parametre, således at mere komplekse geometrier kan behandles
- d) Udvikling af en smoothing-procedure, som giver et "glattere" net. Denne procedure søger for, at forholdet mellem to nabolag ikke overstiger en af brugeren specificeret størrelse
- e) Udvikling af en procedure, der sikrer, at ingen elementer har et længde-bredde-forhold større end en af brugeren specificeret størrelse. D.v.s. at for aflange elementer undgås
- f) I tilfælde af en symmetrisk geometri er der åbnet mulighed for kun at lave net på en del af geometrien og derved udnytte symmetrien til et lavere elementantal.

Den største forbedring af kvaliteten for de genererede net opnås for tyndvæggede, komplicerede geometrier. Her opnås klart bedre net med brug af et mindre antal elementer.

Også for mere "massive" geometrier opnås en kvalitetsforbedring, dog ikke i samme grad som for tyndvæggede geometrier.

Som det ses af figurerne i kapitel 5, er de opnåede net i høj grad velegnede til benyttelse indenfor fagområdet simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser og indenfor beslægtede fagområder. Kvaliteten af de genererede net må betegnes som god, hvilket vil resultere i bedre beregningsnøjagtighed ved simuleringerne.

Selve netgeneratoren er nem at benytte. Det er kun nødvendigt at angive 6 parametre, hvoraf 3 skal angives i alle 3 koordinatretninger. I de fleste tilfælde kan netgenereringen foretages på under en time, hvilket i høj grad må siges at være acceptabelt.

Desuden har netgeneratoren vist sig at være meget robust. Som nævnt i indledningen er hele programpakken, og dermed som en del af denne også netgeneratoren, installeret i flere forskellige firmaer, og endnu er der ikke kommet nogen tilbagemelding angående eventuelle fejl. Desuden har den været benyttet til projektarbejde både på Giesserei-Institut og i firmaet MAGMA, og indtil nu har den klaret alle de opgaver, den er blevet udsat for.

Som beskrevet i 5.3 er der for en geometri blevet genereret et net på 25 millioner elementer. Dette plus ovennævnte forhold tydeliggør, at det ikke længere er netgenereringen, som udgør "flaskehalsen" indenfor området simulering af formfyldnings- og størkningsprocesser og indenfor beslægtede fagområder.

Litteraturliste

- [1] MAGMASOFT Benutzerhandbuch, MAGMA,
Werner-Heisenberg-str. 14, Alsdorf, Germany
- [2] Jan Michael Thomsen, Netgenerering -
et litteraturstudie, LFV, DTH (1992)
- [3] Joe F. Thompson, Z.U.A. Warsi, C. Wayne Mastin,
Numerical Grid Generation, Foundations and
applications, North-Holland (1985)

