

# Tyngdkraftsmodellering av Dellenstrukturen

Gravity modelling of the Dellen impact structure

---

Gustav Eriksson

# Referat

## **Tyngdkraftsmodellering av Dellenstrukturen**

*Gustav Eriksson*

Intresset för Dellenstrukturen har ökat i och med idén om att strukturens förhöjda porositet och därmed eventuellt förhöjda hydrauliska konduktivitet skulle kunna möjliggöra geotermisk energiutvinning i stor skala. Dellenstrukturen, som är belägen i Hudiksvalls kommun ca 300 km norr om Stockholm, är en ca 90 miljoner år gammal eroderad komplex kraterstruktur med en topografisk diameter på ca 19 km. Där finns förekomster av bland annat impaktsmälta (dellenit), suevit och breccia och det finns tydliga cirkulära anomalier i magnetfältet och tyngdkraftfältet över strukturen.

Tyngdkraftsmodelleringen i studien grundar sig på gravimetriska mätningar och bestämningar av Bougueranomalierna och petrofysiska data i området som tillhandahållits av SGU. Den lokala tyngdkraftsanomalin över strukturen uppgår till ca 10 mgal och är överlagrad av storskaliga regionala anomalier vilka domineras av en avtagande trend i sydväst-nordostlig riktning. Strukturen modellberäknades både med en enkel tredimensionell modell uppbyggd av rektangulära prismor och med två 2,5-dimensionella modeller längs två vinkelräta profiler tvärs igenom strukturen.

Den tredimensionella modellen anpassades mot det residualfält som erhöles genom separation av de regionala och lokala tyngdkraftsanomalierna. Modellen delar in markytan över strukturen i 2 x 2 km stora kvadrater vars djuputsträckning beräknades genom optimering med en icke-linjär minstakvadratmetod. I modellen användes två densitetskontraster en högre som representerade ytnära magnetiska impaktiter i den centrala delen av strukturen och en lägre som representerade breccierad/uppkrossad berggrund. Resultatet visar en volym chockpåverkad berggrund på knappt 500 km<sup>3</sup> med ett maximalt djup på drygt 4 km. Den 2,5-dimensionella modellen utformades något mer detaljerat men med fler antaganden som t.ex. antaganden om sfärisk symmetri, en radiellt avtagande densitetskontrast och en central upphöjning i strukturen. I dessa modellberäkningar inkluderades också den regionala strukturen i modellen.

Resultaten från de båda modellerna överensstämmer väl. De ger också bra indikationer på hur utbredningen av strukturen ser ut. De visar att tyngdkraftsanomalin över strukturen inte kan förklaras bara med magnetiska impaktiter med markant lägre densitet än omgivande berggrund utan att strukturen också innehåller omfattande volymer lågmagnetisk uppkrossad/breccierad berggrund ned till flera kilometers djup. Osäkerheten i modellernas resultat beror främst på otillräcklig information om den breccierade/uppkrossade berggrundens densitet och dess fördelning i strukturen.

Nyckelord: Impaktstruktur, Dellen, Tyngdkraftsmodellering, 3D, 2,5D

## **Abstract**

### ***Gravity modelling of the Dellen impact structure***

*Gustav Eriksson*

The growing interest in the Dellen impact structure is due to the idea that the high porosity in the structure might be accompanied by an increased hydraulic conductivity, and that in turn could allow geothermal energy extraction on a large scale. The Dellen structure, which is located in the municipality of Hudiksvall about 300 km north of Stockholm, is an approximately 90 million years old, eroded, complex crater structure with a topographic diameter of about 19 km. There are occurrences of, for example, impact melt (dellenite), suevite and breccia and there are clear, roughly circular anomalies in the magnetic field and gravity field above the structure.

The gravity modelling in this study is based on gravimetric measurements and determinations of Bouguer anomalies and petro-physical data in the area provided by SGU (Geological Survey of Sweden). The local gravity anomaly above the structure amounts to about 10 mgal, but is overlapped by large-scale regional anomalies, dominated by a declining trend in the southwest-northeast direction. Models of the structure were calculated using both a three-dimensional model built of rectangular prisms and two 2.5-dimensional models along two perpendicular profiles across the structure.

The three-dimensional model was adjusted to fit the residual field, obtained by the separation of local and regional gravity anomalies. The model divides the land surface above the structure in 2 x 2 km squares whose depth extents were calculated by optimization, using a non-linear least-squares method. In the model, two density contrasts were used, one higher which represented near-surface magnetic impactites in the central part of the structure and one lower representing crushed/brecciated bedrock. The results show an almost 500 km<sup>3</sup> large volume of shock-influenced rock with a maximum depth of more than 4 km.

The 2.5-dimensional model was designed to be more detailed but with more assumptions such as those of spherical symmetry, a radially decreasing density contrast and a central uplift of the structure. In these model calculations, also the regional Bouguer anomalies were included in the modelling.

The results of the 3-D and 2.5-D models are in fair agreement. They also provide good indications of the horizontal and vertical extent of the structure. They show that the gravity anomaly above the structure can not be explained only by the magnetic impactites with distinctly lower density than the surrounding rock, but that the structure also includes large volumes of the low-magnetic, crushed/brecciated bedrock down to several kilometers depth. The uncertainty of the results of the modelling is mainly due to insufficient information about the density of the crushed/brecciated bedrock and its distribution in the structure.

Keywords: Impact structure, Dellen, Gravity modelling, 3D, 2,5D

Department of Earth Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE 752 36 Uppsala  
ISSN 1401-5765

## Förord

Detta projektarbete är ett examensarbete på 20 poäng inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik på Uppsala universitet. Studien har sin upprinnelse i och med ett besök hos Göran Persson på Dellenova i Hudiksvall. Han berättade om Dellenstrukturen, och något om den forskning som gjorts i området och om eventuella möjligheter att utvinna geotermisk energi ur strukturen. Jag tyckte det hela lät intressant och kontaktade efter Göran Perssons förslag Herbert Henkel på KTH som bedrivit mycket av den forskning som finns om Dellenstrukturen. Han kom då med idén till detta projekt och genom senare rådfrågning av Laust B. Pedersen och Dan Dyrelius på Uppsala Universitet utformades det slutgiltiga projektförslag som resulterade i detta arbete.

Jag skulle vilja rikta ett stort tack till min handledare Dan Dyrelius och ämnesgranskare Laust B. Pedersen båda på Institutionen för geovetenskaper, Geofysik, Uppsala Universitet för all hjälp och vägledning under arbetets gång samt även till Herbert Henkel, Mark- och vattenteknik, Kungliga Tekniska Högskolan för tillhandahållandet av värdefull information och för vägledning i arbetet.

Jag vill också passa på att tacka SGU för tillhandahållandet av de gravimetriska och petrofysiska mätningar jag använt mig av, Göran Persson, Dellenova för hjälp och hans intresse och engagemang i att sprida kunskap om Dellenstrukturen, Sigurd Melin, Terra Firma för tillhandahållandet av djupkarta över Dellensjöarna, Lars Marklund för hjälp med programmeringen i Matlab, Sven Aaro och Hans Delin, SGU för hjälp och svar på frågor, Lantmäteriet för tillstånd att publicera kartbild, Jay Melosh, Bayerisches Geoinstitut för tillstånd att använda figur och sist men inte minst min familj för all hjälp och stöd.

Copyright © Gustav Eriksson och Institutionen för geovetenskaper, Geofysik, Uppsala universitet.

UPTEC W08 010, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2008.

# Innehållsförteckning

1 Inledning .....	5
2 Bakgrund.....	6
2.1 Bildandet av en meteoritkrater .....	6
2.2 Karaktäristiska geofysiska fenomen för impaktstrukturer .....	7
2.3 Beskrivning av Dellenstrukturen .....	7
2.4 Dellenstrukturens geologi .....	9
3 Metod.....	9
3.1 Metodbeskrivning .....	9
3.2 Beskrivning av mätdata.....	10
3.3 Tredimensionell modellering av strukturen .....	12
3.3.1 Separation av regional- och residualfält .....	12
3.3.2 Modellbeskrivning .....	15
3.4 2,5-dimensionell modellering av strukturen.....	19
4 Resultat .....	22
4.1 Tredimensionell modell av strukturen .....	22
4.2 2,5-dimensionell modell av strukturen .....	26
5 Diskussion och slutsatser .....	29
5.1 Allmän diskussion och slutsatser.....	29
5.2 Diskussion av felkällor och osäkerheter .....	29
5.2.1 Allmänt .....	29
5.2.1 Tredimensionella modellen .....	30
5.2.2 2,5-dimensionella modellen.....	30
6 Referenser .....	32

# 1 Inledning

För ca 90 miljoner år sedan, under den geologiska perioden Krita, slog en kilometerstor meteorit med en hastighet på tiotusentals m/s ned i nuvarande Dellenbygden och orsakade en naturkatastrof med globala konsekvenser. Explosionen som uppstod vid nedslaget var av en oerhörd kraft och den enorma rörelseenergin som omsattes vid nedslaget gjorde att meteoriten och delar av berggrunden förångades, flera kubikkilometer smälte och ännu större volymer av berggrunden krossades. Chockvågen som bildades när meteoriten träffade jordskorpan kastade också ut material i omgivningen så att en krater bildades på nedslagsplatsen. Mängder av stoft och aska kastades upp i atmosfären och spreds med vindarna över hela jordklotet vilket troligen påverkade klimatet världen över i flera år. De geologiska och topografiska förändringar som nedslaget gett upphov till har fortfarande stor betydelse lokalt trots att miljoner års erosion verkat på kratern. Vattensystemet som bildats i kratersänkan har haft och har fortfarande stor betydelse för bygden till exempel som transportled, för fiske och jordbruk. Den topografiska sänkan medför också ett mildare klimat lokalt sett. De lättvittrade bergarter som bildats vid meteoritnedslaget har antagligen också lett till att området fått bördigare jordar. Kort sagt skulle området ha sett helt annorlunda ut, haft andra förutsättningar och antagligen inte varit den kulturbygd som det är idag, om inte meteoriten slagit ned.

Dellenområdets säregna geologi intresserade vetenskapsmän redan i slutet på 1800-talet. Den första beskrivningen av strukturens typiska bergarter gjordes av Svenonius (1888) som då tolkade dessa som lämningar av en vulkan. Detta var också länge den mest accepterade förklaringen till strukturens uppkomst som till exempel i Redaelli (1956) och Lundegårdh (1967) även om Högbom redan 1910 föreslog att den kunde ha uppkommit genom ett meteoritnedslag (Högbom 1910). Det dröjde till 1968 innan några tydliga indikationer på ett meteoritnedslag, då i form av chockomvandlad kvarts, publicerades. Detta fenomen uppträder enbart vid de höga tryck som meteoritimpakter ger och visar att strukturen har uppstått just genom ett meteoritnedslag och inte var rester av en vulkan (Svensson, 1968).

Studiet av meteoritnedslag och de strukturer som de ger upphov till är en relativt ung vetenskap och en hel del är fortfarande outforskat beträffande denna geologiskt intressanta och i vissa hänseenden viktiga process. Dellenstrukturen är en av Europas tydligaste och största konstaterade impaktstrukturer. Områdets dramatiska geologiska historia har intresserat många. På senare år har ytterligare intresse väckts på grund av idéer om att det skulle vara möjligt att utvinna geotermisk energi ur dessa strukturer. Orsaken till detta är att impaktstrukturer ofta medför sprucken och uppkrossad berggrund på relativt stora djup vilket i sin tur eventuellt leder till förhöjd hydraulisk konduktivitet. Värme uppstår av processer i jordens inre, främst från radioaktivt sönderfall, och lagras i berget samt i det vatten som fyller håligheter i berget. I den skandinaviska berggrunden stiger temperaturen med ca 15-25°C per kilometer på djupet. Tanken är att en förhöjd hydraulisk konduktivitet, på grund av uppkrossning av berggrunden, skall göra det möjligt att genom djupa borrhål kunna pumpa upp stora mängder varmt vatten och på så sätt leda upp värme från stora volymer djupt nere i berggrunden. Värmeenergin kan sedan tas till vara i exempelvis ett fjärrvärmesystem.

Syftet med detta projektarbete är att genom tyngdkraftsmodellering ta fram en så bra modellbeskrivning som möjligt av Dellenstrukturen, främst utbredningen av chockpåverkad berggrund. Därigenom skall studien öka kunskapen om strukturen och dess uppkomst, bidra till att kunna bedöma om strukturen är lämplig för geotermisk energiutvinning samt att bidra till förståelsen av impaktstrukturer i allmänhet.



**Figur 1** Vy över meteoritnedslagsplatsen sett från kraterranden i nordost. I mitten på bilden ser man det näs som täcker kraterns centrala del och delar sjöarna Norra och Södra Dellen åt. Foto: Lars Gustavsson.

## 2 Bakgrund

### 2.1 Bildandet av en meteoritkrater

De flesta främmande kroppar som kolliderar med Jorden är små fragment som bromsas upp av atmosfären. Många brinner upp i atmosfären på grund av friktionen och ger upphov till så kallade stjärnfall. I väldigt sällsynta fall träffas vår planet av riktigt stora meteoriter vilka i stort sett inte bromsas upp alls utan träffar jordytan med hastigheter på tiotusentals m/s. Vid nedslaget uppkommer en enorm chockvåg som i jordskorpan sprider sig halvsfäriskt från centrum och utåt och skapar en kraterstruktur. Chockvågen påverkar alltså berggrunden olika mycket radiellt sett ut från explosionscentrum. Meteoriten förångas oftast helt och likaså en del av den berggrund som ligger allra närmast kollisionspunkten. I strukturens centrala delar smälter berggrunden och längre utåt från centrum erhålls en gradvis avtagande deformation och uppkrossning av berggrunden. Chockvågen accelererar också material som kastas upp i luften varvid kratern bildas. Det mesta av materialet kastas ut i omgivningen men en betydande del faller också tillbaka ned i kratern. Berggrundsmaterial trycks dessutom ut mot sidorna på kratern vilket gör att kraterranden höjer sig över omgivningen.

Viktigt i sammanhanget är att terrestra kratrar med en diameter större än ca 3-5 km, där spannet troligtvis beror på i vilken typ av berggrund nedslaget sker, bildar en komplex kraterstruktur till skillnad från en enkel (Melosh och Ivanov, 1999). Detta innebär att direkt efter bildandet kollapsar kratern på grund av gravitationen och den blir mycket vidare och grundare och formen blir mer ringformad till skillnad från den enkla kraterstrukturens mer skålförmade karaktär. I en komplex krater uppstår också en central upphöjning vilket innebär att material från djupare lager höjs upp i kraterns centrala del i en slags rekyleffekt.

## 2.2 Karaktäristiska geofysiska fenomen för impaktstrukturer

Det finns flera utmärkande geofysiskt mätbara avvikelser, så kallade anomalier, som är typiska för meteoritkratrar. Dessa är inte unika för impaktstrukturer men en struktur som uppvisar flera sådana geofysiska anomalier särskilt i kombination med andra typer av karakteristiska egenskaper indikerar ändå att det är en impaktstruktur man har att göra med (Henkel, 1992). Några av de viktigaste geofysiska anomalierna är som följer:

- *Tyngdkraftsanomalier.* En negativ anomali kan ofta skönjas i tyngdkraftsfältet över strukturen. Detta beror på att densiteten i den av nedslaget påverkade berggrunden såsom smälta, nedfallsbreccia och nedslagsbreccia blir lägre än den opåverkade berggrunden på grund av den relativt högre porositeten. I vissa kraterstrukturer kan dock dessa anomalier vara svåra att se till exempel på grund av att andra strukturer i berggrunden döljer effekterna orsakade av nedslaget. I komplexa kratrar med en central upphöjning ger upphöjningen ofta en positiv anomali på grund av att djupare liggande berggrund utan samma uppkrossning och ofta med högre ursprungsdensitet har höjts upp. Anomalin påverkas givetvis också av hur pass eroderad strukturen är och hur djupt erosionssnittet i strukturen är.
- *Magnetfältsanomalier.* Typiskt är att den uppkrossade berggrunden har något lägre magnetisk susceptibilitet än opåverkad berggrund. Däremot uppvisar bergarter som innehåller impaktsmältor ofta högre magnetisk susceptibilitet än övrig berggrund. Troligtvis kan också den mest chockade berggrunden uppvisa en relativt hög magnetisk susceptibilitet. Den förhöjda magnetiska susceptibiliteten beror på chockdissociering av Mg-Fe silikater så att magnetit har bildats.
- *Anomalier i den elektriska resistiviteten.* Uppkrossningen av berggrunden leder till en lägre elektrisk resistivitet än i opåverkad berggrund. Lägre elektrisk resistivitet, d.v.s. högre elektrisk ledningsförmåga, orsakas av att berggrunden i en impaktstruktur innehåller en större andel vattenfyllda sprickor än opåverkad berggrund.

## 2.3 Beskrivning av Dellenstrukturen

Dellenstrukturen är en kraftigt eroderad komplex kraterstruktur belägen i Hudiksvalls kommun ca 300 km NNV om Stockholm i Sverige (61°52'N, 16°40'E). Kraterns topografiska diameter är ca 19 km (Henkel 1992). Två sjöar, Norra och Södra Dellen, vilka bildats i den topografiska nedsänkningen täcker nu större delen av området. Sjöarnas ursprungligen mer cirkelformade utseende har förmodligen ändrats på grund av landhöjningen, som är mer omfattande i väster, och har därför tippat sjöarna österut in i två dalgångar. Detta syns också om man betraktar sjöarnas djupförhållanden där medeldjupet i sjöns västra delar är betydligt lägre, ca 20-30 m, än i de östra (Melin och Saleh, 1988). Även om kraterstrukturen med tiden har påverkats mycket av erosionen kan man ännu skönja den topografiska depressionen och en del av kraterväggen i nordöstra delen. Den centrala delen av strukturen täcks av ett näs som delar de två sjöarna.





**Figur 2** Karta över området för Dellenstrukturen. © Lantmäteriverket Gävle 2008. Medgivande I 2008/1082.

Tidpunkten för nedslaget har fastställts till  $89.0 \pm 2.7$  miljoner år sedan med Rb-Sr och Sm-Nd-datering på impactsmältan (Deutsch et al, 1992).

Dellenstrukturen uppvisar många för meteoritkratrar karakteristiska fenomen. Nedan följer en lista i punktform på egenskaper som iakttagits för strukturen.

- En något oregelbunden men huvudsakligen *cirkelformad topografisk sänka* med en nuvarande höjdskillnad på upp till ca 250 m i förhållande till omgivningen.
- Förekomster av *chockomvandlad kvarts* i impactsmälta från strukturen (Svensson, 1968). Med chockomvandlad kvarts menas kvarts med mikroskopiska deformationer i form av små parallella sprickor som kan relateras till mycket höga tryck. Trycket som skapar dessa deformationer övergår vida de tryck som till exempel skapas vid vulkanutbrott.
- Förekomster av *impactsmälta* (se förklaring nedan) (von Dalwigk & Lindström, 2002).
- Förekomster av *breccia* (se förklaring nedan) (von Dalwigk & Lindström, 2002).
- Förekomster av *suevit* (se förklaring nedan) (von Dalwigk & Lindström, 2002).
- En cirkelformad *negativ anomali i tyngdkraftsfältet* mitt över strukturen som uppgår till ca 10 mgal.

- *Magnetfältsanomalier* i strukturens centrala delar inom ett cirkelformat område med en diameter på ca 9 km (Delin, 1990).
- En *reducering av den elektriska resistiviteten* med en faktor på upp till ca  $10^2$  har uppmätts i strukturen (Henkel, 1992).

## 2.4 Dellenstrukturens geologi

Dellenstrukturen är trots sin relativt omfattande storlek belägen i en i det närmaste homogen berggrund. Den omgivande berggrunden består så gott som enbart av så kallad ljustalsgranit som bildades för ca 1,85 miljarder år sedan under den geologiska perioden Proterozoikum. Bergarten är en ögonförande gnejsig granit av olika metamorfisk grad. Det finns dock små inslag av metasediment på några platser i närheten av strukturen. (Delin, 1989).

Meteoritnedslaget har emellertid gett upphov till några impaktrelaterade bergarter (impaktiter) såsom impaktsmäta, suevit och breccia. Dessa bildas vid nedslaget, genom uppsmältning och krossning av den befintliga berggrunden. De har också visat sig ha huvudsakligen samma kemiska sammansättning som ljustalsgraniten (Lundegårdh, 1967). Dellenit är det lokala namnet på impaktsmätan i Dellenstrukturen vilken också benämns tagamit med ett internationellt mer gångbart namn. Breccia har bildats vid mekanisk uppkrossning och deformation under impakten. Den består av större kantiga fragment i en mellanmassa med finkornigare fragment av samma bergart. Porositeten i en impaktbreccia kan vara markant högre än i ursprungsbergarten. Man brukar skilja på nedslagsbreccia och nedfallsbreccia där nedslagsbreccia är breccia som bildats in situ och nedfallsbreccia är bergarter bildade av utkastade fragment som avlagrats i och kring kratern. Om dessa består av en blandning av breccia och smälta kallas de suevit.

De magnetiserade bergarterna såsom dellenit, suevit och chockdissocierad breccia förekommer främst, enligt tolkning av flygmagnetiska mätningar utförda av Sveriges Geologiska Undersökning, SGU, inom en cirkel med en diameter på ca 9 km i kraterstrukturens centrala del (Delin, 1989). Mitt i centrum finns ett område med en diameter på ca 2 km med en större magnetisk anomali. Den har tolkats ha sitt ursprung i förekomster av chockdissocierad berggrund, en dissociering av Mg-Fe silikater så att magnetit har bildats. Tjockleken av de magnetiserade bergarterna är beräknad med magnetisk modellering till ca 200-500 meter. (Henkel, 2006 pers komm.).

## 3 Metod

### 3.1 Metodbeskrivning

I denna studie har impaktstrukturens utbredning beräknats utifrån gravimetriska mätningar av tyngdkraftfältet på markytan i området samt petrofysiska mätningar på berggrunden i området såsom densitet och magnetisk susceptibilitet. Detta har gjorts med två metoder men med samma grundprincip. Utifrån mätningar och antaganden om strukturens densitetsfördelning har utbredningen av strukturen beräknats genom att anpassa modellkroppar med en på grund av meteoritnedslaget förmodad förminskad densitet till uppmätta Bouguer-anomalier i området, både i en 2,5-dimensionell modell och i en tredimensionell modell.

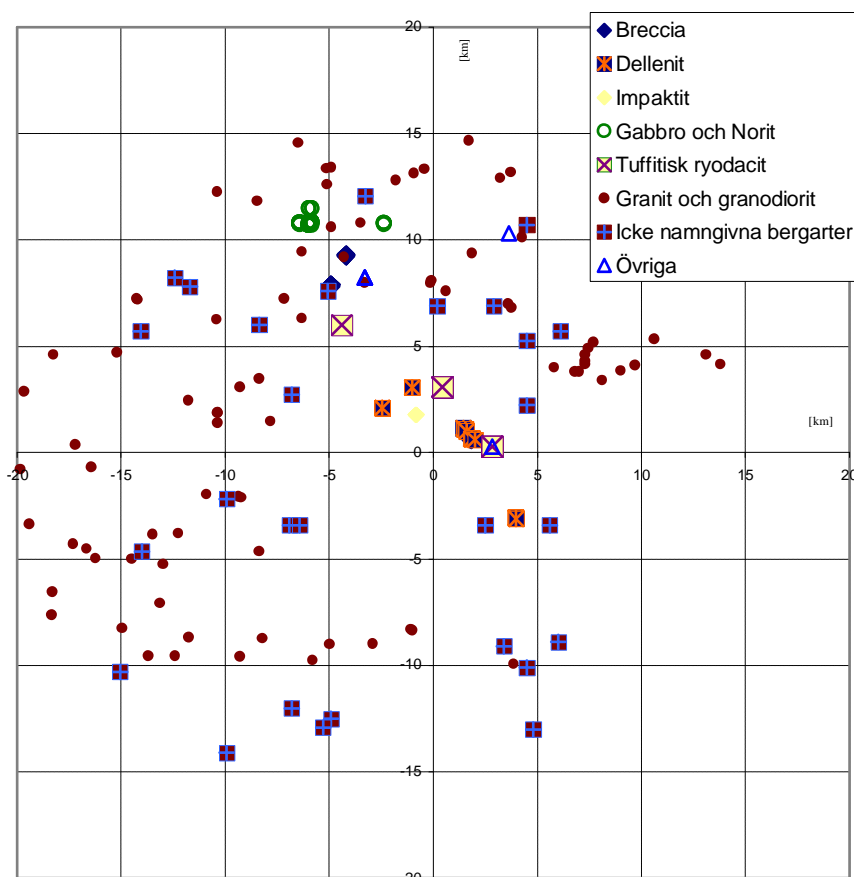
Den 2,5-dimensionella modellen, i två vinkelräta profiler genom strukturen, är utförd genom en grafisk ötrial and error-modellering, alltså manuell succesiv justering av modellkropparna utgående från tillgängliga mätvärden samt antaganden om strukturens utformning.

Den tredimensionella modellen är uppbyggd så att området delades in i rektangulära prismor och prismornas djuputsträckning beräknats genom optimering med minstakvadrat-metoden efter att det regionala och lokala tyngdkraftsfältet separerats.

### 3.2 Beskrivning av mätdata

Alla beräkningar i denna studie bygger på gravimetriska och petrofysiska mätningar som tillhandahållits av SGU. Som referenssystem för mätpunkter och andra punkter i denna studie används det nationella koordinatsystemet Rikets Triangelnät, RT 90 där x-axeln går i syd-nordlig riktning och y-axeln i väst-östlig riktning.

De petrofysiska mätpunkterna från området är berggrundsprover insamlade och mätta mellan år 1945 och 1992 och förutom densitet och magnetiska egenskaper har de flesta klassificerats som bergart och en mindre del beskrivits närmare om de är tagna från block eller håll. Till denna studie användes mätningar gjorda inom en radie på 20 km från impaktstrukturens mitt vilket uppgår till knappt 300 prover (se figur 3).



**Figur 3** Lokalisering av de petrofysiska mätningarna som använts i denna studie indelade efter typklassificering. Origo är placerad i Dellenstrukturens centrum, X 6860300 (m), Y 1545600 (m). *Basdata ur petrofysikdatabasen*. © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.

De gravimetriska mätpunkter som använts är uppmätta med gravimeter mellan år 1946 och 2006. Enheten som används på gravitationseffekten är mgal (milliGal). En mgal motsvarar ungefär en miljondel av Jordens tyngdacceleration.  $1 \text{ mgal} = 10 \mu\text{m/s}^2 = 10 \text{ gu}$  (gravity unit).

Noggrannheten på mätningarna är varierande där vissa är mycket noggranna och andra mindre noggranna. Det avgörande för noggrannheten på dessa mätningar är i huvudsak höjdbestämningen till varje mätpunkt, där medelfelet på de noggrannaste höjdbestämningarna bedöms ligga på ca 0,05 m och de minst noggranna på ca 3 m. Ungefär hälften av mätningarna har ett medelfel på höjdbestämningen på mindre än 0,5 m medan övriga mätningar har ett medelfel på ca 1-3 m. Tre meters fel på höjdbestämningen leder till ett fel i Bougueranomalin på ca 1 mgal. Avläsningsnoggrannheten på de använda gravimetrarna ligger, beroende på instrumenttyp, på mellan  $\pm 0,05$  och  $\pm 0,001$  mgal.

Tätheten på de gravimetriska mätningarna är i genomsnitt ungefär en mätpunkt per kvadratkilometer inom en radie på 10 km från strukturens centrum och 0,7 mätpunkter per kvadratkilometer i områdets övriga delar

Från ett område på  $70 \times 70$  km med kraterstrukturen i centrum har drygt 2000 gravimetriska mätpunkter använts. Det väl tilltagna området av mätpunkter övergår vida kraterstrukturen vilket ger en bra uppfattning av regionalfältet i området.

För att erhålla de tyngdkraftsanomalier som beror av densitetskontraster i berggrunden, så kallade Bougueranomali, görs en del korrektioner och reduceringar:

$$\hat{g}_B = g_{\text{obs}} + \text{tidv} + \text{drift} + g_0 + F + B + \text{terr} + (\text{vatten})$$

Där:

$$\hat{g}_B = \text{Bougueranomali}$$

$g_{\text{obs}} =$  observerat värde på tyngdkraftfältet i mätpunkten

$\text{tidv} =$  korrektionen för tidvattenaccelerationen. Solen och månens gravitationsfält påverkar tyngdkraften olika beroende på hur dessa himlakroppar står i förhållande till mätpunkten. Tyngdkraften i mätpunkten blir alltså tidsberoende eftersom jorden roterar och himlakropparna rör sig i förhållande till varandra.

$\text{drift} =$  korrektion för instrumentdrift. Alla gravimetrar har en viss instrumentdrift vilket det är nödvändigt att korrigera för. Detta kräver att mätningar upprepas på en eller flera så kallade baspunkter med jämna mellanrum.

$g_0 =$  tyngdkraftfältets teoretiska normalvärde på jordellipsoiden. Normalvärdet beskriver hur tyngdkraften varierar med latituden beroende på jordens elliptiska form och jordrotationen och erhålls med en internationellt överenskommen formel.

$F =$  friluftreduktionen. Friluftreduktionen är minskningen i jordens gravitationsfält vid flyttning i öfria luften från jordellipsoiden till mätpunkten.

$B$  = *Bouguerreduktionen*. Bouguerreduktionen är reduktionen för den gravitationseffekt som orsakas av de massor som ligger mellan jordellipsoiden och mätpunktsnivån. Massorna approximeras i enklaste fallet av en horisontell skiva med oändlig utsträckning och en densitet som motsvarar ett medelvärde på densiteten för granit ( $2670 \text{ kg/m}^3$ ).

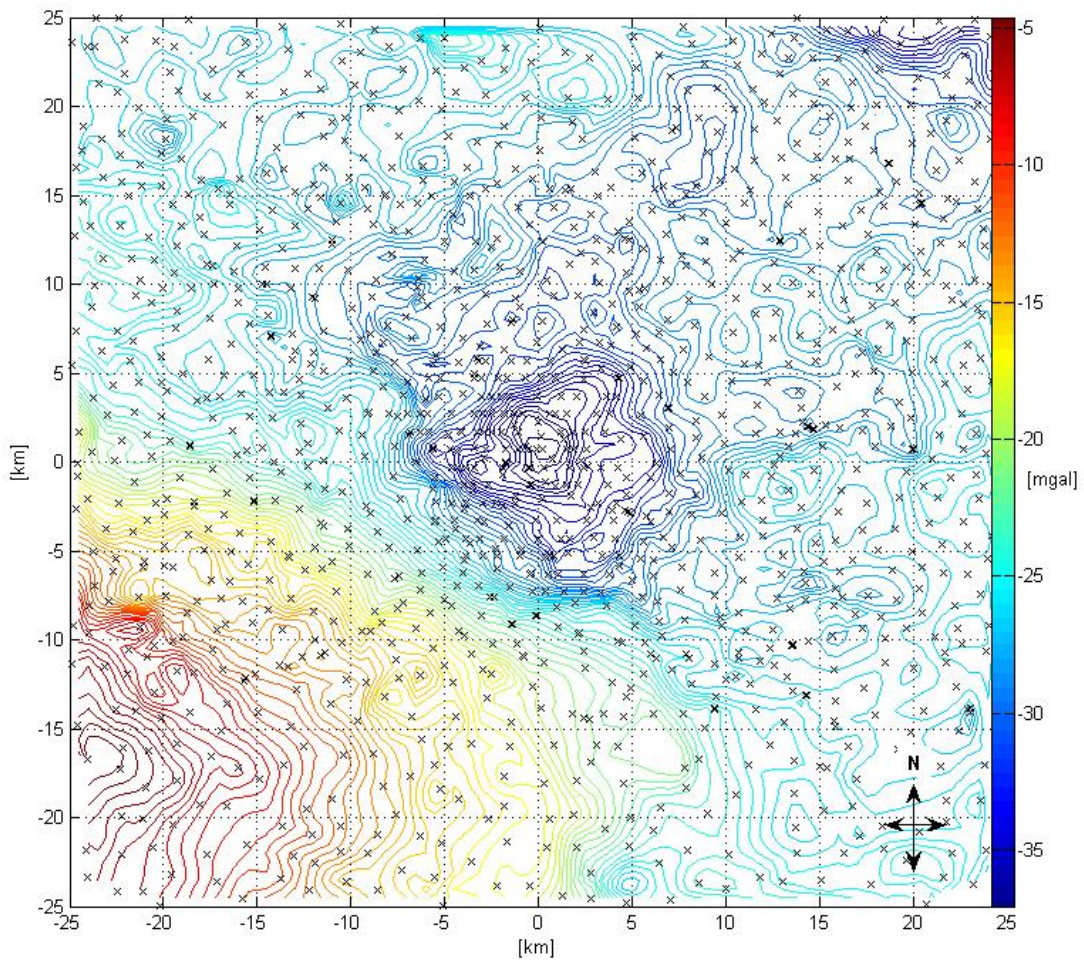
$terr$  = *terrängkorrektionen*. Terrängkorrektionen används för att korrigera för terrängens avvikelser från Bouguerskivan, vilket är särskilt viktigt vid starkt kuperad terräng eller höga krav på noggrannhet.

$vatten$  = *vattenkorrektionen*. För mätningar utförda över vatten (på is) har även en korrektion för vattenskiktets lägre (än berggrundens) bidrag till tyngdkraftsfältet gjorts.

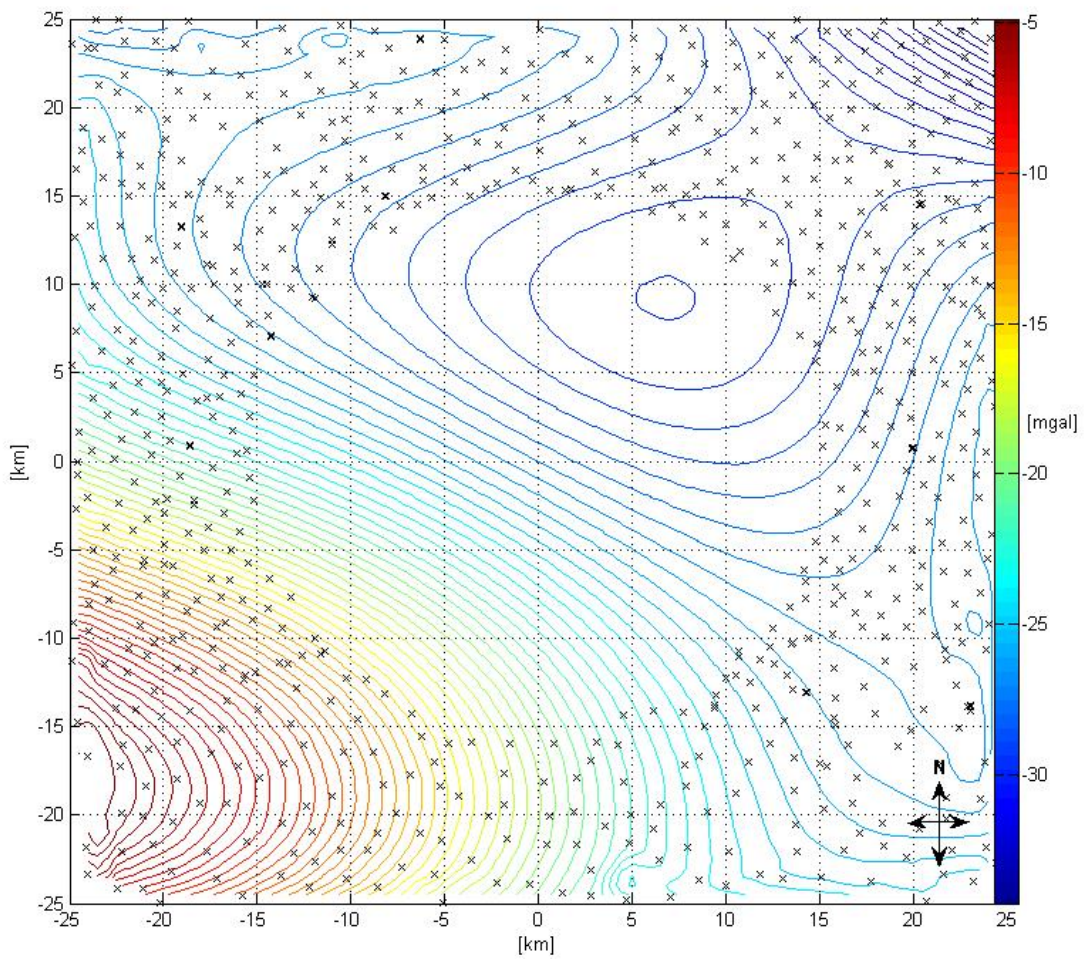
### 3.3 Tredimensionell modellering av strukturen

#### 3.3.1 Separation av regional- och residualfält

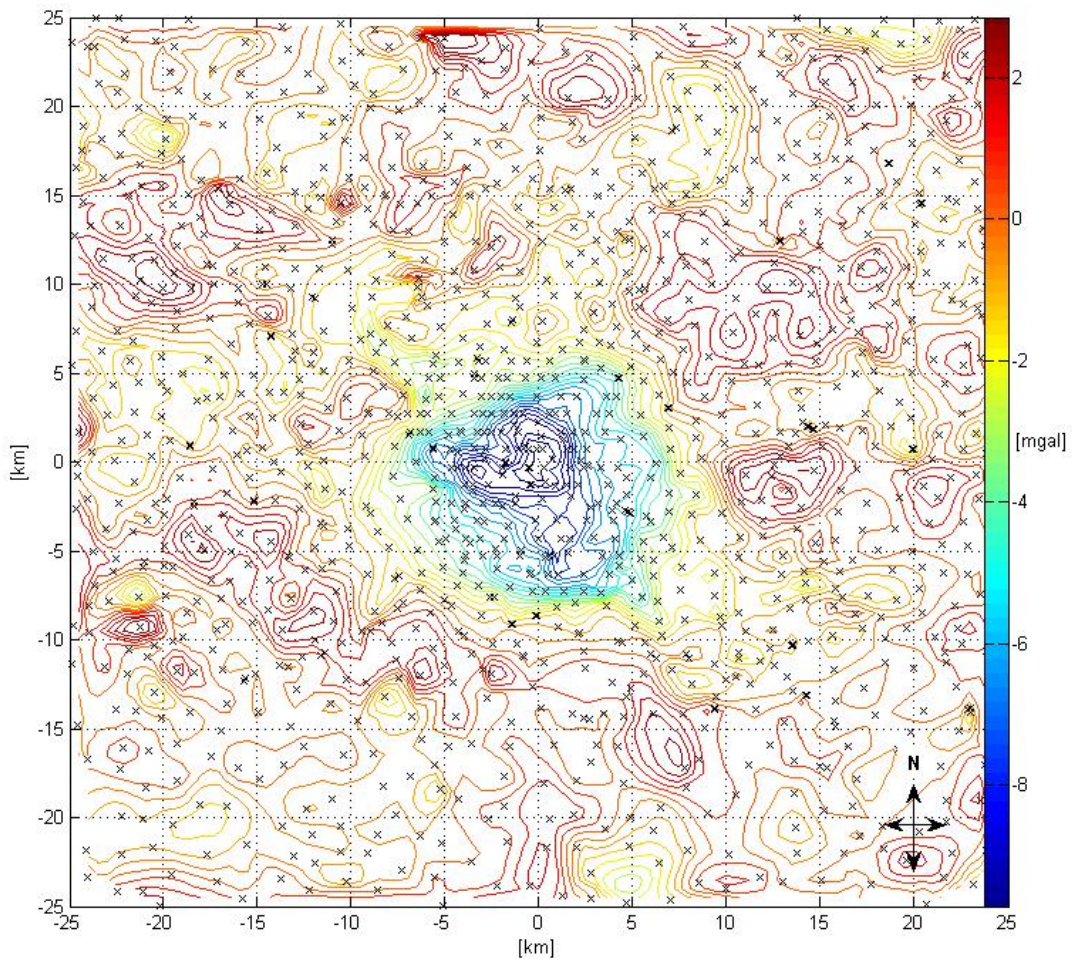
Den lokala tyngdkraftsanomalin från Dellenstrukturen framträder tydligt i den centrala delen av undersökningsområdet (se figur 4) men är uppenbarligen överlagrad av regionala, storskaliga anomalier. Regionalfältet i området visar främst en dominerande, avtagande trend från sydväst mot nordost, med en minskning på ungefär  $0,5 \text{ mgal/km}$ , men det innehåller också andra betydande icke-linjära komponenter. För att kunna bortse från de regionala strukturerna i den tredimensionella modelleringen gjordes en separation av regional- och residualfälten. Regionalfältet beräknades därvid genom att ett femtegradspolynom anpassades till observerade anomalier i ett  $50 \times 50 \text{ km}$  stort område kring strukturen där observerade anomalier inom en radie på  $15 \text{ km}$  från strukturens mitt exkluderats (se figur 5). En avvägning gjordes för att få en så bra anpassning av det regionala fältet som möjligt med en så liten förvanskning som möjligt av andra intilliggande lokala anomaliers gradienter. Ett femtegradspolynom bedömdes, efter tester med polynom av olika gradtal, ge den bästa approximationen. Med hjälp av ekvationen för detta polynom beräknades regionalfältet ( $\Delta g_{reg}$ ) i varje mätpunkt och residualfältet ( $\Delta g_{res}$ ) erhöles genom subtraktion från det observerade anomalivärdet ( $\Delta g_{obs}$ ), det vill säga  $\Delta g_{res} = \Delta g_{obs} - \Delta g_{reg}$  (se figur 6).



**Figur 4** Tyngdkraftfältet över Dellenstrukturen baserat på Bougueranomalierna i de mätpunkter som markerats med kryss. Konturlinjeintervallet är 0,5 mgal. Origo är placerat i Dellenstrukturens centrum, X 6860300 (m), Y 1545600 (m). *Basdata ur tyngdkraftsdatabasen.* © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.



**Figur 5** Regionalfältet över Dellenstrukturen framtaget genom anpassning av en femtegradsyta till Bougueranomalier i de mätpunkter utanför strukturen vilka markerats med kryss. Konturlinjeintervallet är 0,5 mgal. Origo är placerat i Dellenstrukturens centrum, X 6860300 (m), Y 1545600 (m). *Basdata ur tyngdkraftsdatabasen. © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.*



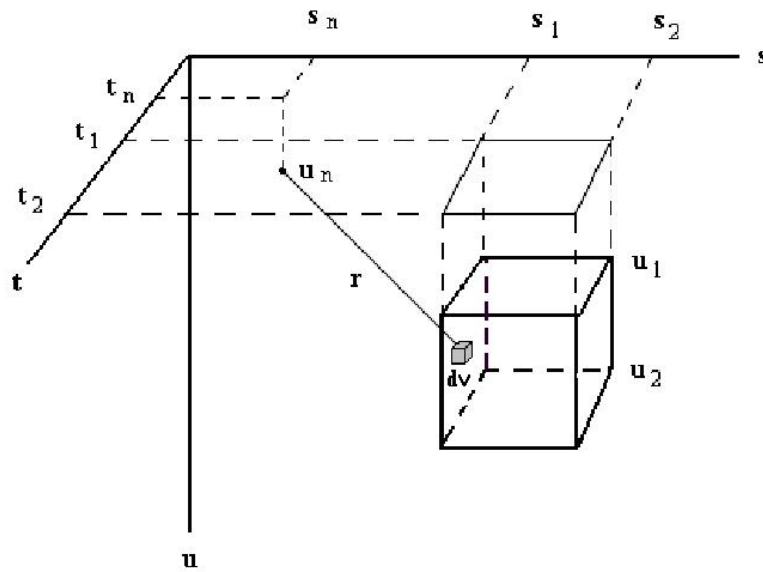
**Figur 6** Residualfältet över Dellenstrukturen baserat på skillnaden mellan observerad Bougueranomali och beräknat regionalfält i de mätpunkter som markerats med kryss. Konturlinjeintervallet är 0,5 mgal. Origo är placerat i Dellenstrukturens centrum, X 6860300 (m) Y 1545600 (m). Basdata ur tyngdkraftsdatabasen. © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.

### 3.3.2 Modellbeskrivning

Den tredimensionella modellen är sammansatt av rätvinkliga prismor som indelar markytan i  $2 \times 2$  km stora kvadratiska rutor i ett område inom ca 9 km från kraterns mitt (se figur 9) vilket var den maximala utsträckning av berggrund med minskad densitet som bedömdes förekomma efter undersökning av berggrundsdensiteten i förhållande till avståndet till kraterns mitt (se figur 8). Varje prismas utsträckning på djupet bestämdes genom optimering med en icke-linjär minstakvadratmetod.

För beräkningen av prismornas gravitationseffekt användes följande teoretiska uttryck (Dyrelius, 1972):





**Figur 7** Geometri för beräkning av gravitationseffekten för ett rektangulärt prisma.

$$d \Delta g = f \rho \frac{z}{r^3} dv \quad (1)$$

Där:

$g$  = gravitationseffekten (vertikala komponenten av gravitationsfältet)

$f$  = gravitationskonstanten

$\rho$  = densiteten (som antas vara konstant i hela prisman)

$x = s$  ó  $s_n$

$y = t$  ó  $t_n$

$z = u$  ó  $u_n$

$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

$dv = ds \times dt \times du$

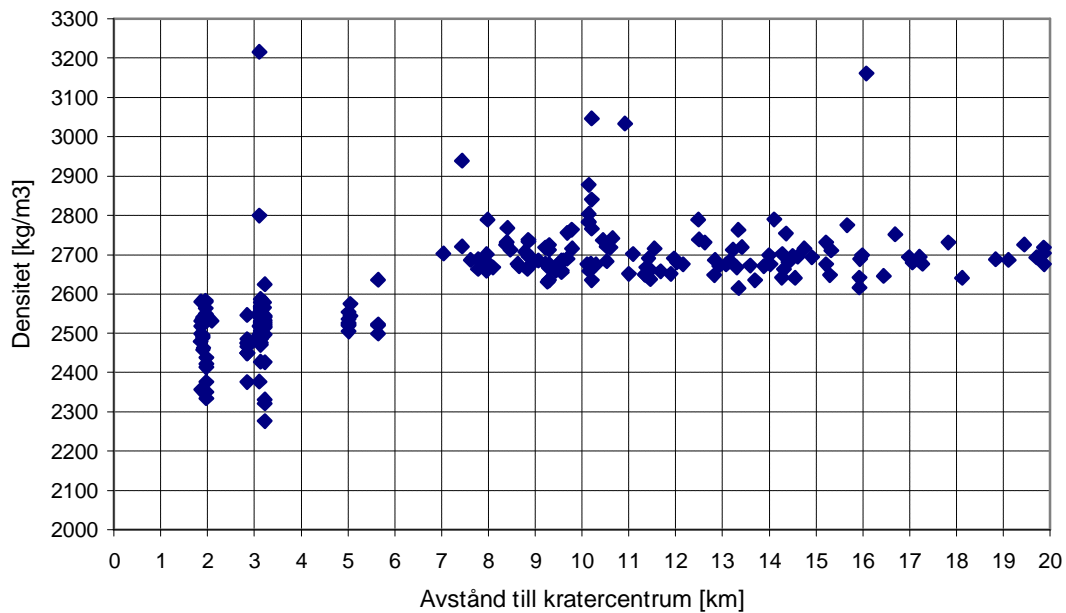
Integration av (1) ger:

$$\Delta g = f \rho \left[ \left[ \left[ z \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - x \ln(y + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) - y \ln(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) \right]_{-x_1}^{x_2} \right]_{y_1}^{y_2} \right]_{z_1}^{z_2} \quad (2)$$

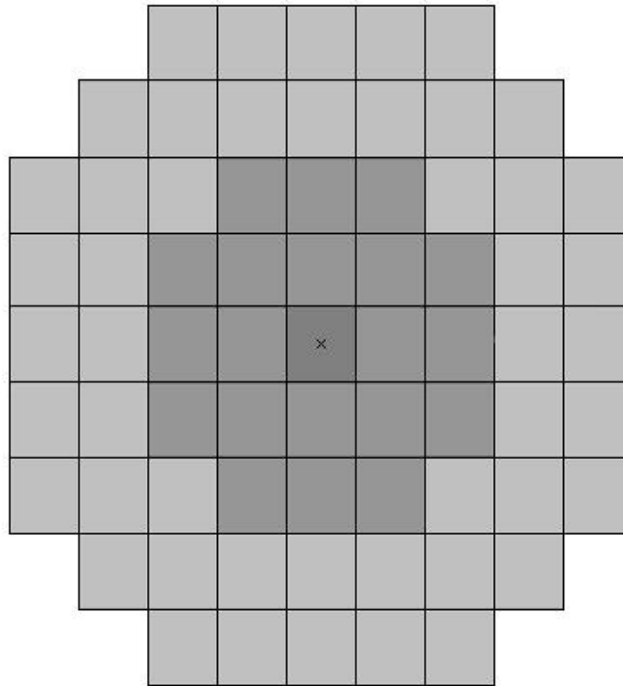
**Tabell 1** Komplettering av ekvation (2) när  $x$ ,  $y$  eller  $z$  är noll.

$x = 0$	$z \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 0$	$x \ln(y + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) = 0$
$y = 0$	$z \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 0$	$y \ln(x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}) = 0$
$z = 0$	$z \tan^{-1} \frac{xy}{z\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = 0$	

Modelleringen har genomförts med hjälp av mjukvaruprogrammet MATLAB 7.0. Optimeringen av modellens djuputsträckning (prismadjupen  $z_2$ ) utförs med minstakvadratmetoden, vilket innebär minimering av kvadratsumman över alla mätpunkter  $\sum (\Delta g_{res} - \Delta g_{ber})^2$  där varje term är den kvadrerade skillnaden i en mätpunkt mellan residualvärdet  $g_{res}$  och prismornas summerade, beräknade gravitationseffekt  $g_{ber}$  (i den aktuella mätpunkten). Antalet mätpunkter är fler än antalet okända parametrar så att ett överbestämt system erhålls. För optimeringen användes MATLABs funktion för minstakvadrat-optimering av icke-linjära funktioner, *lsqnonlin* och metoden som valdes kallas för *trust region reflective Newton* och är baserad på en metod närmare beskriven av Coleman och Li (1994, 1996). Metoden är en iterativ metod med möjlighet att sätta övre och undre gränsvärden på lösningsmatrisen.



**Figur 8** Densitet på berggrundsprover i förhållande till avståndet från kraterstrukturens mitt. Berggrundsprover som klassificerats som gabbro eller norit har uteslutits. *Basdata ur petrofysikdatabasen*. © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.



**Figur 9** Principskiss över den tredimensionella modellens elementindelning ovanifrån. Markytan indelades i rutor på 2x2 km vilka bildade överytor på de prismor vars djup beräknades genom optimering. De mörkare centrala prismorna visar det område där reduceringar för magnetiska impaktiter gjorts. Centrum (markerat med kryss) ligger mitt i Dellenstrukturen, X 6860300 (m) Y 1545600 (m).

Modelleringen utfördes i två steg, och med två olika densitetskontraster. Först gjordes en beräkning av bidraget i varje observationspunkt från impaktiter med hög magnetisk susceptibilitet såsom dellenit, suevit och den mest chockade breccian (se figur 10). Dessa representerades i modellen av en densitetskontrast på  $240 \text{ kg/m}^3$  i ett 200 m mäktigt lager i den centrala delen av strukturen. Det mest centrala prismat på 2x2 km (se figur 9) modellerades med ett djupgående på 500 m. Utbredningen av en 9 km vid cirkulär magnetisk anomali syns tydligt på den flygmagnetiska kartan producerad av SGU (Delin, 1990). De antagna mäktigheterna på impaktiter med förhöjd magnetisk susceptibilitet grundar sig på beräkningar gjorda med magnetisk modellering (Henkel, 2006, pers. komm.). De magnetiska impaktiternas beräknade bidrag i varje mätpunkt subtraherades varefter utbredningen av den berggrund som bedömdes ha relativt låg magnetisk susceptibilitet (breccia/uppkrossad berggrund) beräknades med optimering enligt beskrivning ovan. Densitetskontrasten mellan lågmagnetisk breccia/uppkrossad berggrund och omgivande berggrund (ljusdalsgranit) sattes till  $70 \text{ kg/m}^3$ .

Modellresultaten ger orealistiskt stora variationer mellan angränsade prismor, främst på grund av att de djupaste delarna av de relativt smala prismorna ger en svag gravimetrisk respons och små lokala variationer i tyngdkraftsfältet vid markytan kan orsaka orealistiskt stora utslag vilket modellberäkningarna inte tar hänsyn till. Därför, för att även kunna visa en mer realistisk utjämnad modell, gjordes en medelvärdesbildning av angränsande prismor. Varje prismas djuputsträckning sattes som medelvärdet av sin och alla angränsande prismors beräknade djup.

Markytans varierande höjd bortsågs från vid den tredimensionella modelleringen av strukturen, främst på grund av att modellens horisontella upplösning är för grov för att ge en

tillfredsställande approximation av höjdvariationen i terrängen genom att representera den med nivåskillnader mellan prismornas överytor. Istället sattes höjden för överytan av varje prisma samt höjden för varje mätpunkt till noll. Testräkningar har visat att denna förenkling i allmänhet ger mindre fel i det beräknade gravitationsfältet än den approximativa metoden med varierande prismahöjder samt att felet är så smått att de ligger väl under det slutliga, genomsnittliga felet i modellenpassningen.

### **3.4 2,5-dimensionell modellering av strukturen**

Med en 2,5-dimensionell modell menas en modell i två dimensioner, i det här fallet längs en profil rakt genom strukturen, med det tillägg att man har möjligheten att bestämma modellkropparnas utsträckning i den tredje dimensionen. Den 2,5-dimensionella modellen av strukturen gjordes med hjälp av mjukvaruprogrammet GM-SYS 4.7 genom att anpassa de olika modellkropparnas gravimetriska respons mot den uppmätta genom manuell justering av modellkropparna. Modelleringen utfördes på två korsande profiler som interpolerades fram utifrån de uppmätta Bougueranomalierna i tyngdkraftfältet över strukturen. Längden på vardera profil var 40 km med ett interpolerat mätvärde varje 500 m.

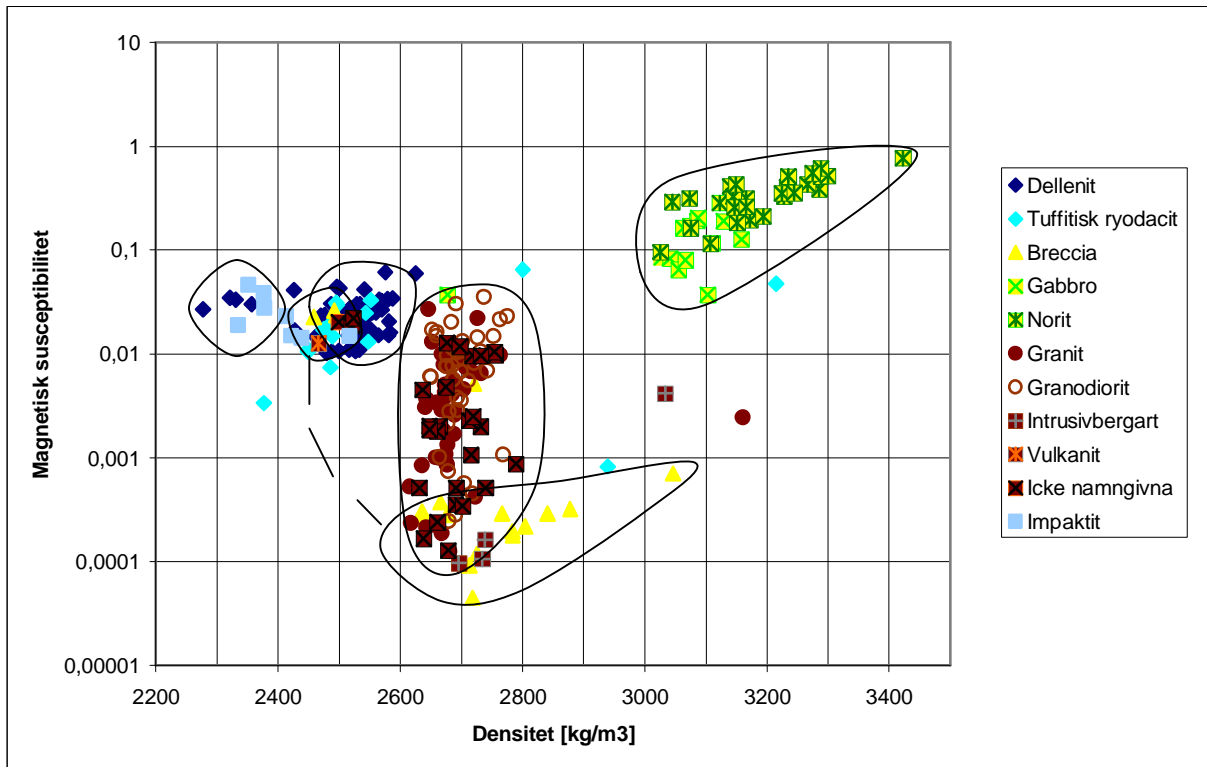
Till skillnad från den tredimensionella modellen subtraherades inte regionalfältet från mätningarna utan den regionala strukturen inkluderades i modellen. För att underlätta försöket att inkludera den regionala strukturen i modellen valdes profilerna så att den ena sträcker sig längs med gradienten på regionalfältet och den andra vinkelrätt emot så att de korsar varandra i kraterns centrum. Detta innebar att ena profilen sträcker sig från NV till SO rakt genom strukturen mellan punkterna X 6874442 (m) och Y 1531458 (m) till X 6846158 (m) och Y 1559742 (m) och den andra sträcker sig från SV till NO mellan punkterna X 6846158 (m) och Y 1531458 (m) till X 6874442 (m) och Y 1559742 (m). Profilerna korsar varandra i punkten X 6860300 (m) och Y 1545600 (m) vilken bedömdes vara kraterns mittpunkt efter undersökning av topografin och tyngdkraftsanomalins symmetri.

Höjden över havet på profilernas punkter bestämdes genom manuell avläsning av topografiska kartor över området, ritade i skalan 1:50 000 och med höjdkurvor var femte meter.

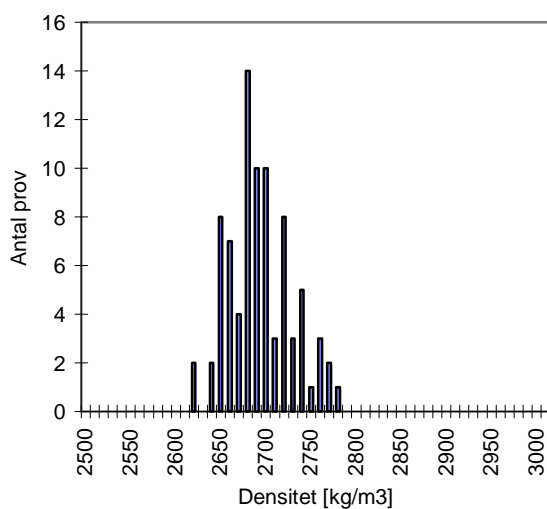
Indelningen och densitetsbestämningen av de olika modellkroppar som användes utfördes med hjälp av det diagram som visas i figur 10. Berggrunden delades in i följande element: dellenit (impaktsmälta), suevit (blandning av breccia och impaktsmälta) breccia/uppkrossad berggrund, gabbro/norit och opåverkad ljusdalsgranit. Densiteten på modellelementen bestämdes med hjälp av histogram över bergartsproverna för dellenit och opåverkad ljusdalsgranit (se figur 11 och 12). Histogrammen uttolkades så att toppen på en tänkt normalfördelning fick visa den densitet som representerade bergarten. För suevit, där antalet prover var för få för att skapa ett bra histogram användes ett vanligt medelvärde av proverna.

För breccia/uppkrossad berggrund antogs att densitetskontrasten är avtagande radiellt utåt från centrum. Dessutom gjordes antagandet att den mest centrala delen som borde utgöra övre delen av den centrala upphöjningen och den av nedslaget mest påverkade delen representeras av de berggrundsprover klassificerade som breccia med hög magnetisk susceptibilitet. Dessa magnetiska egenskaper antas ha uppkommit genom chockdissociering av Mg-Fe silikater så att magnetit har bildats (Henkel, 2006 pers komm.). Förekomsten av gabbro/norit bedömdes vara av så ringa omfattning och belägen så pass långt ifrån strukturen att den är försumbar i detta sammanhang. De lågmagnetiska berggrundsproverna klassificerade som breccia och

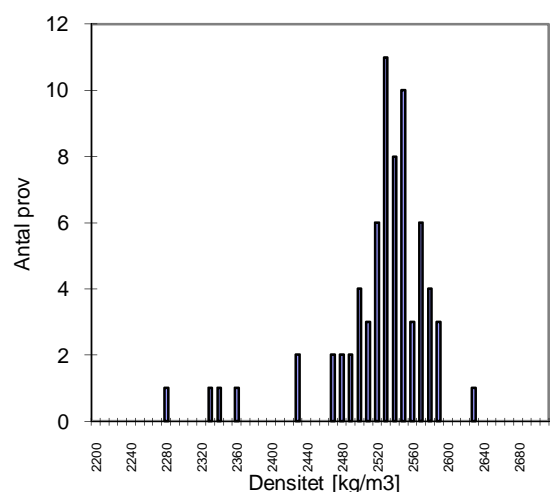
som indikerar en förhöjd densitet jämfört med den omgivande ljusdalsgraniten (se figur 10) har ignorerats i modelleringen. Dessa bedömdes inte vara representativa för den breccierade berggrunden i strukturen, eftersom en förhöjd densitet skulle alstra en positiv tyngdkraftsanomali över strukturen och inte en negativ, vilket är fallet.



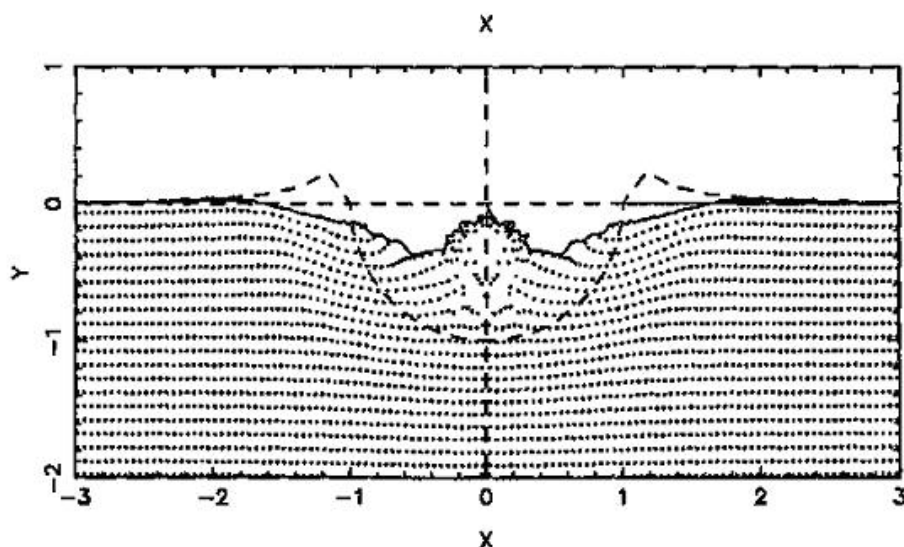
**Figur 10** Samband mellan magnetisk susceptibilitet och densitet hos de berggrundsprover inom 20 km från Dellenstrukturens mitt. De olika inringade mätpunkterna visar den elementgruppindelning som använts vid modelleringen. *Basdata ur petrofysikdatabasen*. © Sveriges geologiska undersökning (SGU) 2005. Dnr: 30-1508/2005.



**Figur 11** Densitet hos de berggrundsprover som representerar den omgivande ljusdalsgraniten.



**Figur 12** Densitet hos de berggrundsprover som klassificerats som dellenit.



**Figur 13** Den slutliga formen på en kollapsad krater med ~20 km diameter i det terrestra tyngdkraftfältet. Streckade linjer visar den initiala kratern innan kollaps. De ursprungligen horisontella prickade linjerna speglar i figuren impaktverkan på berggrundslagren enligt den numeriska modell för en kollapsad impaktkrater som utformats av Melosh och Ivanov 1999. Längdenheten är lika med den transienta kraterns maximala djup. Figuren är efter H.J. Melosh och B.A. Ivanovs rapport Impact crater collapse från 1999.

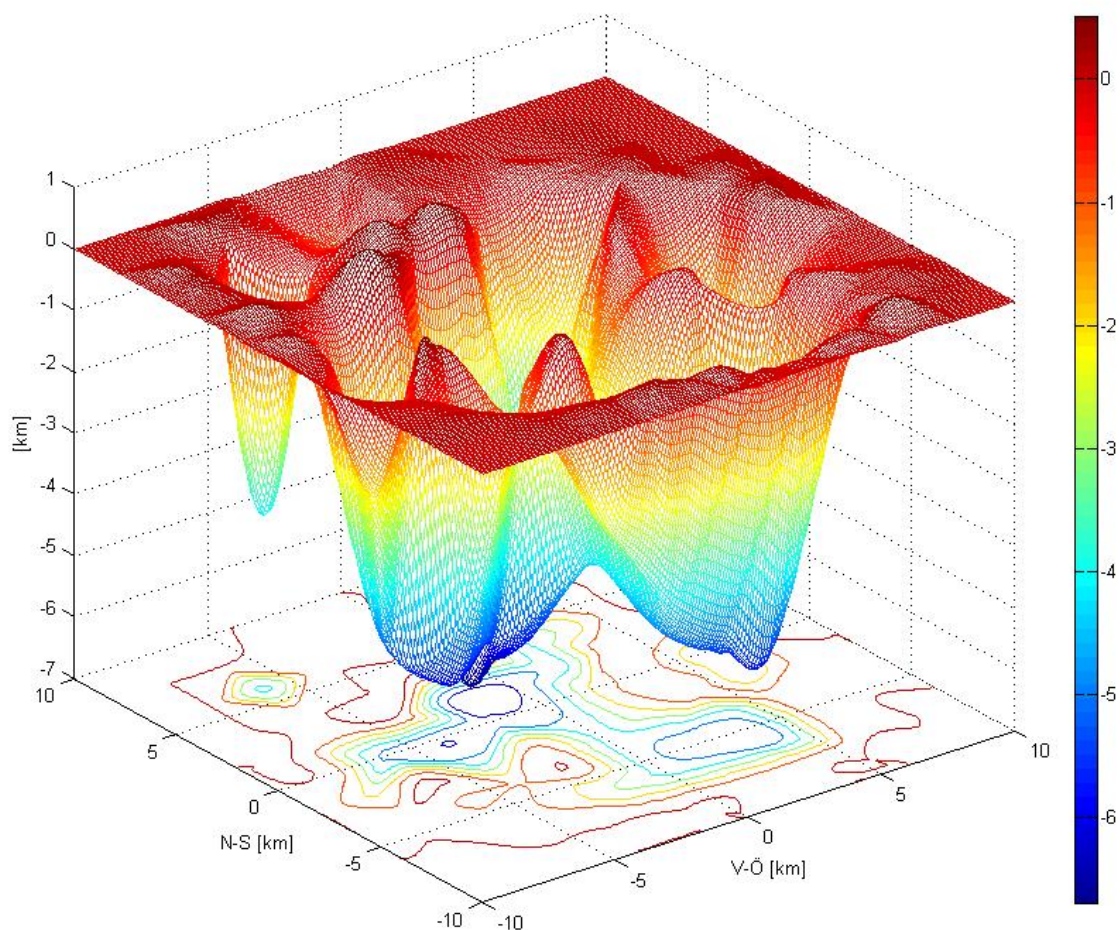
Vid den 2,5-dimensionella modelleringen av Dellenstrukturen gjordes en del antaganden om strukturen dels för att kunna begränsa utfallet, dels för att kunna ge en så detaljerad tolkning som möjligt. Ett av de viktigaste var att strukturen antas vara hemisfäriskt symmetrisk. Vidare antogs också att strukturens densitetsfördelning är påverkad av den centrala upphöjningen samt att den avtar radiellt utåt. Antagandet om den centrala upphöjningens struktur i denna undersökning bygger på de beräknade resultat som Melosh och Ivanov publicerat efter en numerisk modellering av bildandet av en 20 km vid nedslagskrater vilket visas i figur 13 (Melosh och Ivanov, 1999). Ett antagande om att suevit överlagrar impaktsmältan (dellenit) har också gjorts, som till exempel den relativt välbevarade Popigai-impaktstrukturen i Ryssland uppvisar. Utbredningen av berggrund som, på grund av nedslaget, har lägre densitet än omkringliggande berggrund har bedömts vara inom en radie på maximalt 9 km från strukturens mitt efter undersökning av berggrundsprovernas densitet och läge i förhållande till strukturen (se figur 8). Att profilernas tyngdkraftsanomalier har påverkats av kvartära avlagringar vid markytan med låg densitet har bedömts som mycket troligt, bland annat sträcker sig en rullstensås från dalgången för sjöarnas inlopp i nordväst rätt igenom mot öster. Därför har modellkroppar som representerar dessa också inkluderats i modellen. Då utförlig information om dessa avlagringars densitet och utsträckning saknats så har modellkropparnas densitet satts till ett uppskattat värde på  $2350 \text{ kg/m}^3$ . Modellkroppar som representerar kvartära avlagringar har använts där det utifrån kartstudier ansetts rimligt att de förekommer, samtidigt som man där kan iaktta stora avvikelser i tyngdkraftfältet från den förmodade kratersymmetrin.

## 4 Resultat

### 4.1 Tredimensionell modell av strukturen

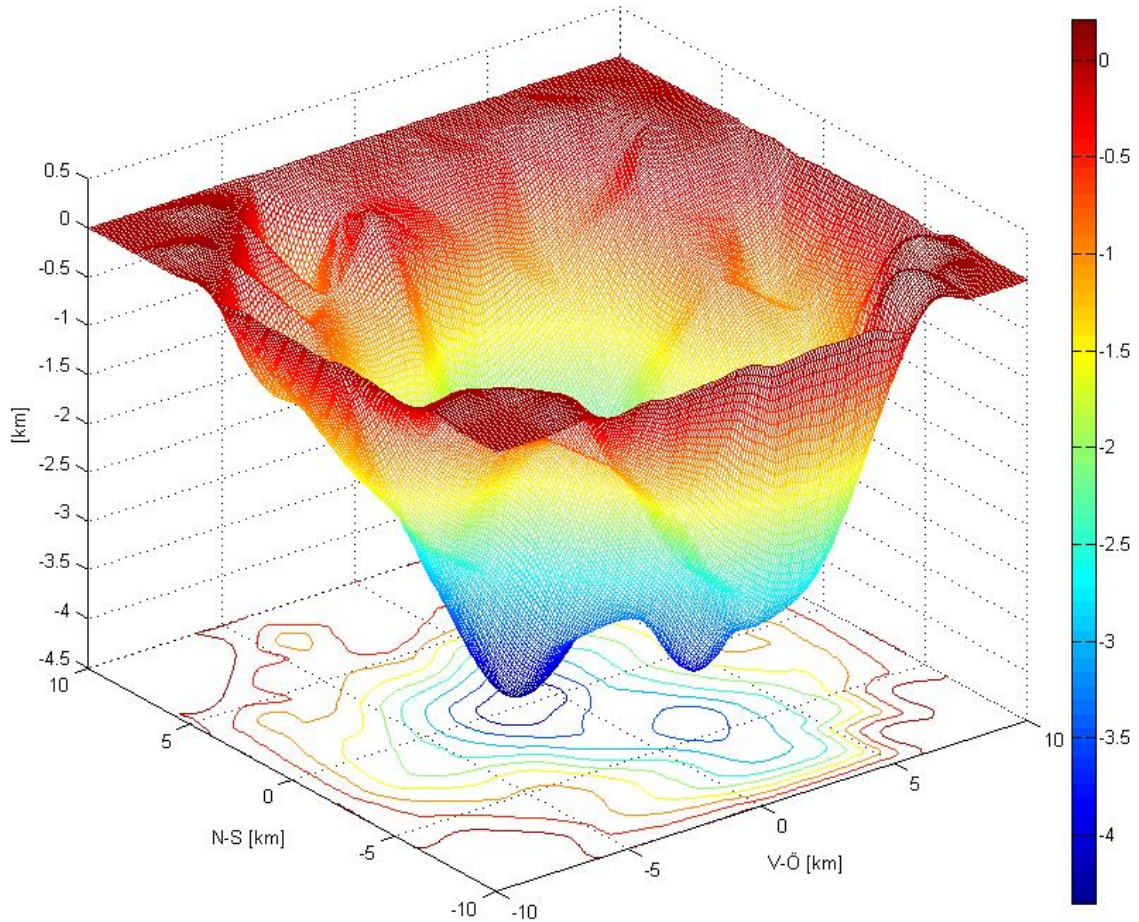
För den tredimensionella modellanpassningen har använts tyngdkraftsanomalierna (separerade residualfältet) i 522 observationspunkter inom 15 km radie från strukturens mitt. Densitetskontrasterna sattes till  $240 \text{ kg/m}^3$  för de magnetiska impaktiterna centralt vid ytan ned till 200-500 meters djup och  $70 \text{ kg/m}^3$  för övrig chockpåverkad berggrund. Den beräknade utbredningen av chockpåverkad berggrund enligt den optimerade modellen (se beskrivning i avsnitt 3.2) uppgår till en volym på knappt  $500 \text{ km}^3$  och ett maximalt djup på ca 6 km (se figur 14). För att presentera en utjämnad mer realistisk modell gjordes en medelvärdesbildning av prismornas djuputsträckning vilket gav ungefär samma volym men ett maximalt djup på drygt 4 km (se figur 15 och 16). Den totala underskottsmassan i strukturen uppgår till knappt 40 miljarder ton.

Avvikelsefält beräknat som skillnaden mellan observerad tyngdkraftsanomali och den beräknade gravitationseffekten från den optimerade, tredimensionella modellen före och efter medelvärdesbildning av modellprismorna har gjorts och visas i figur 17 respektive 18.



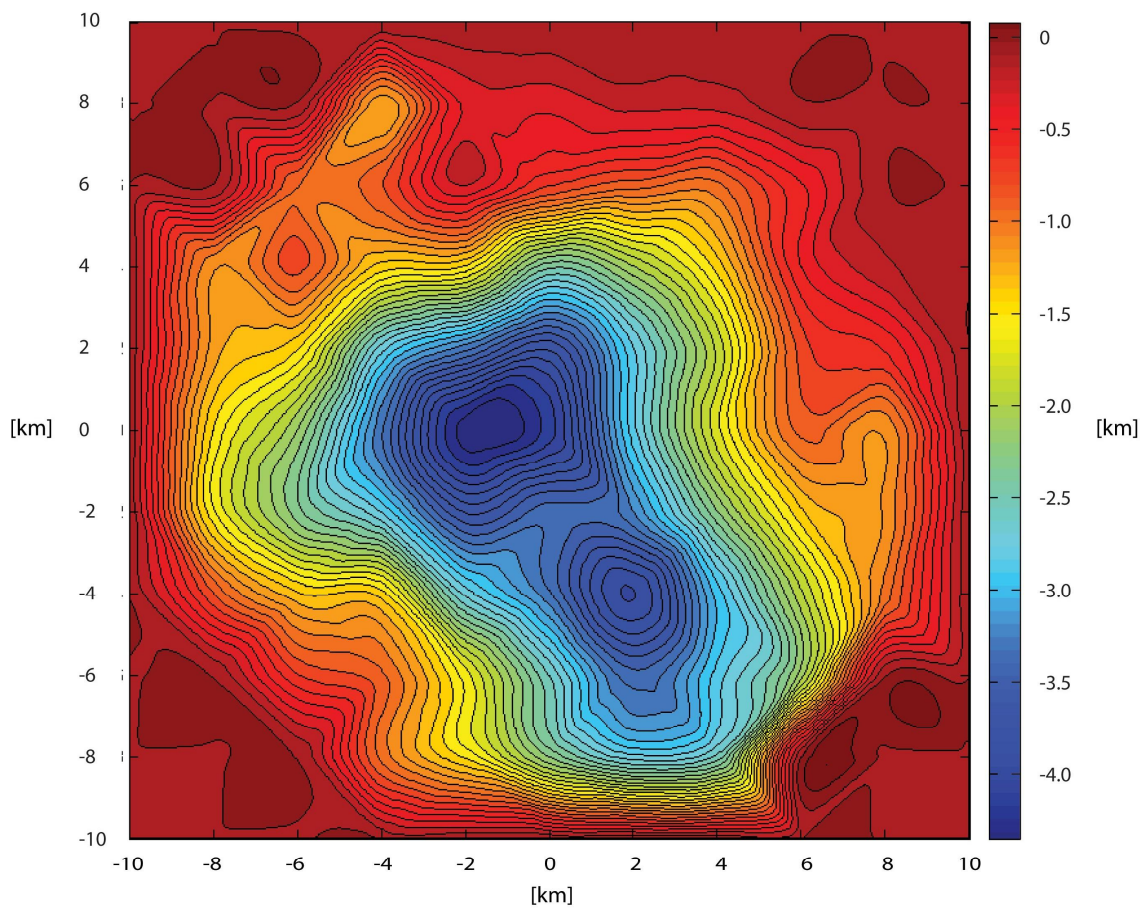
**Figur 14** Beräknad utbredning av chockpåverkad berggrund. Ingen medelvärdesbildning av modellprismorna har gjorts på den optimerade, tredimensionella modellen (se beskrivning i avsnitt 3.2). Volymen av den chockpåverkade berggrunden uppgår till knappt  $500 \text{ km}^3$  och

maximalt djup till ca 6 km. Den grafiska framställningen av figurytan har genererats genom interpolation av prismornas mittpunktsdjup.

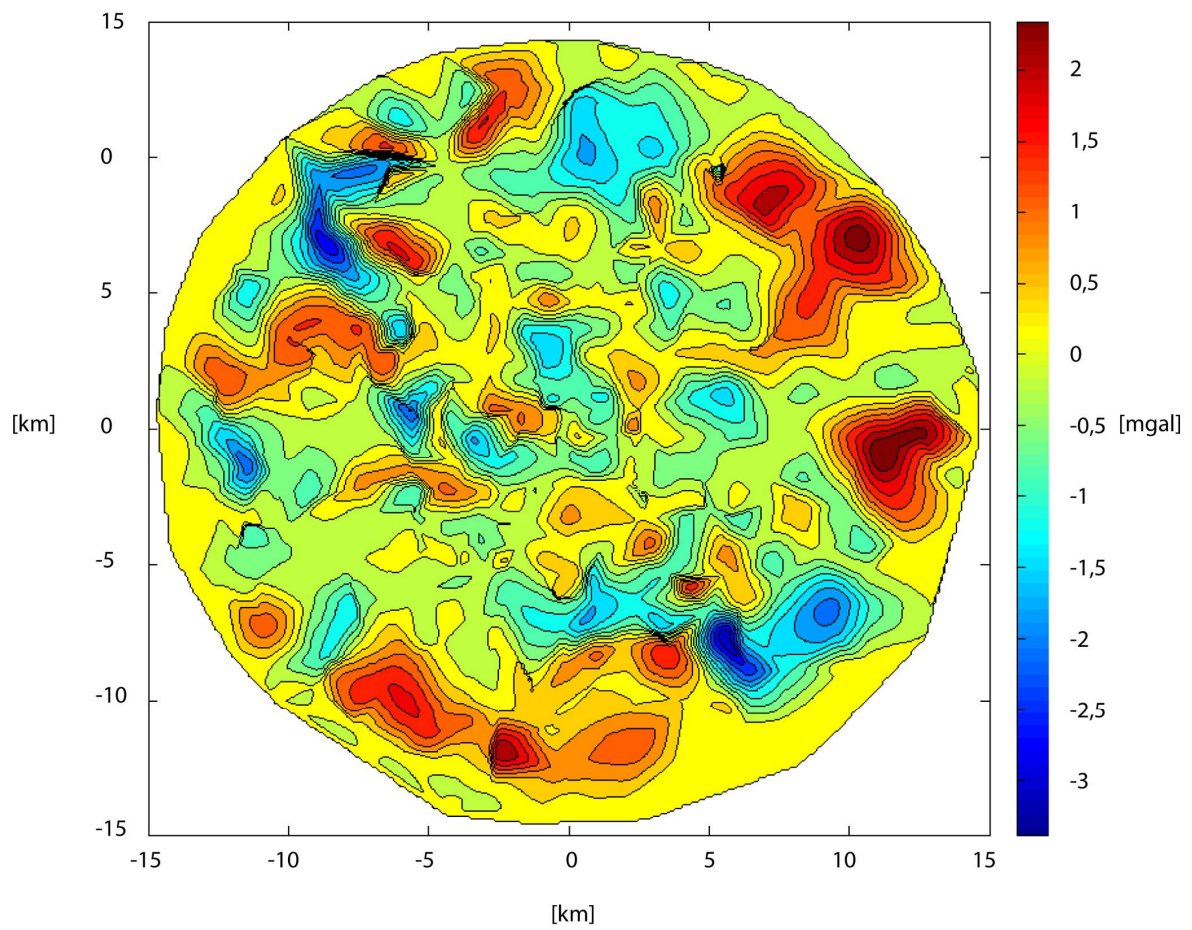


**Figur 15** Beräknad utbredning av chockpåverkad berggrund efter medelvärdesbildning av modellprismorna på den optimerade, tredimensionella modellen (se beskrivning i avsnitt 3.2). Volymen av den chockpåverkade berggrunden uppgår till knappt 500 km<sup>3</sup> och maximalt djup till drygt 4 km. Den grafiska framställningen av figurytan har genererats genom interpolation av prismornas mittpunktsdjup. Se även figur 16.

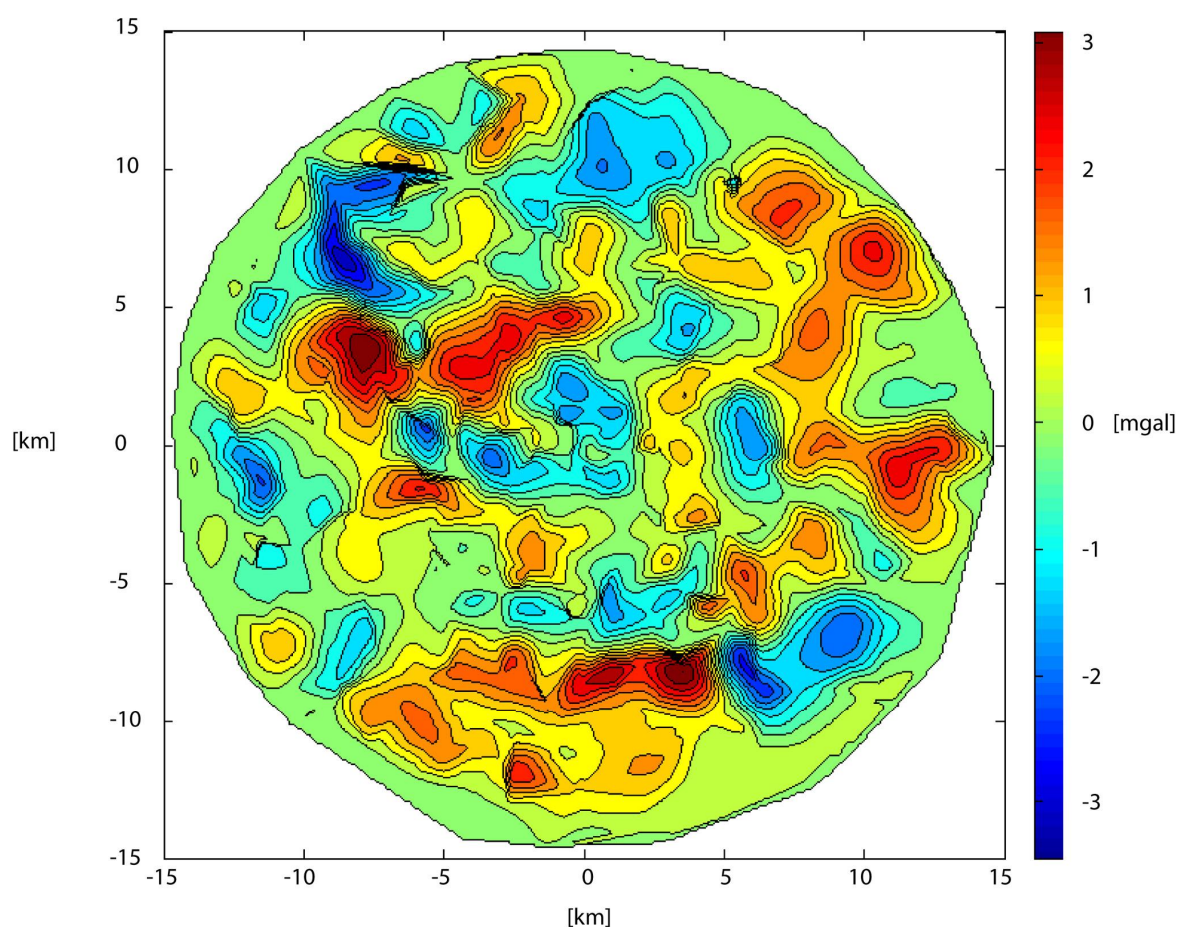




**Figur 16** Beräknad utbredning av chockpåverkad berggrund efter medelvärdesbildning av modellprismorna på den optimerade, tredimensionella modellen (se beskrivning i avsnitt 3.2). Volymen av den chockpåverkade berggrunden uppgår till knappt  $500 \text{ km}^3$  och maximalt djup till drygt 4 km. Den grafiska, tvådimensionella framställningen av figurytan har genererats genom interpolation av prismornas mittpunktsdjup. Se även föregående figur.



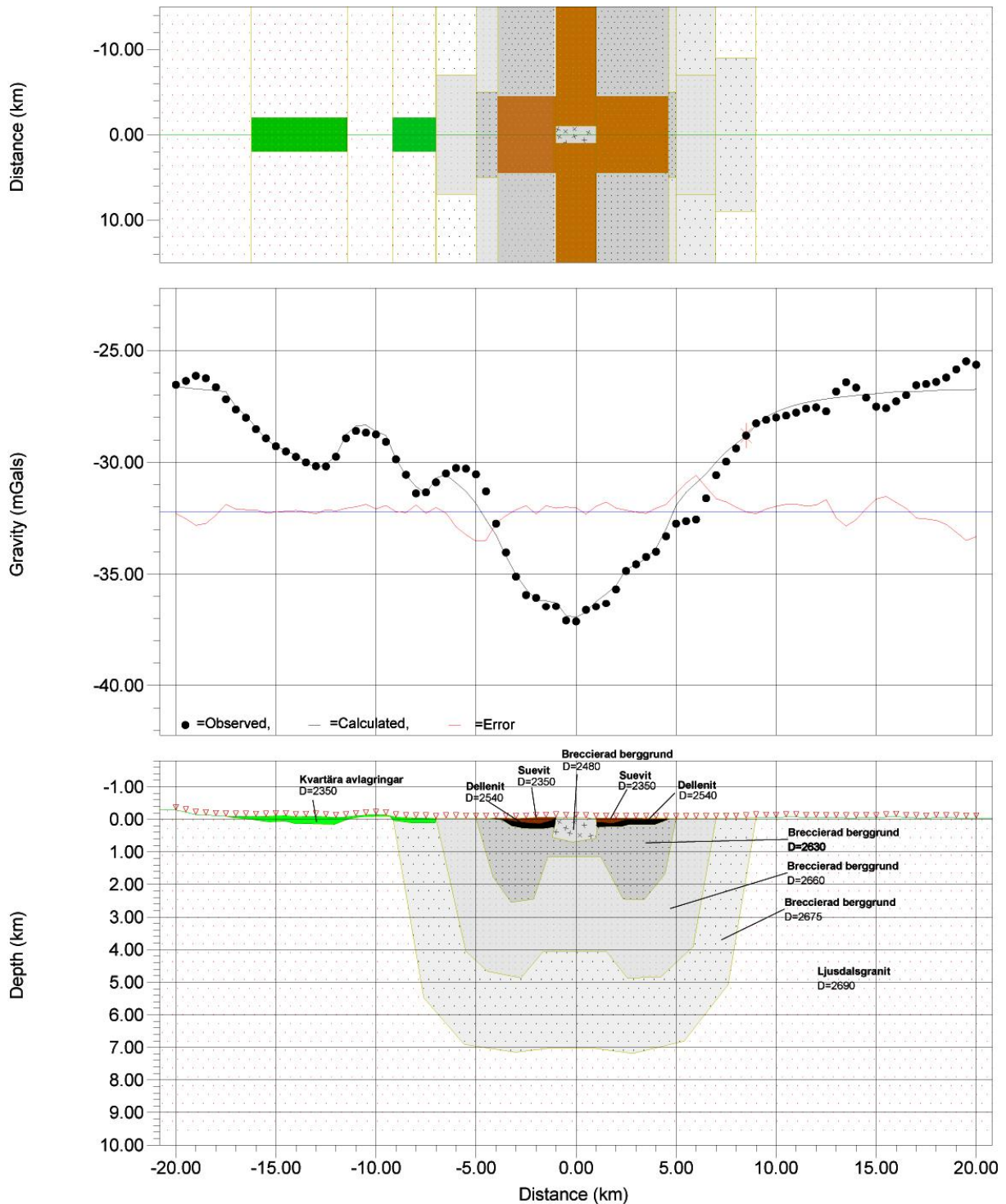
**Figur 17** Modellens avvikelsefält beräknat som skillnaden mellan observerad tyngdkraftsanomali och den beräknade gravitationseffekten från den optimerade, tredimensionella modellen. Ingen medelvärdesbildning av modellprismorna har gjorts.



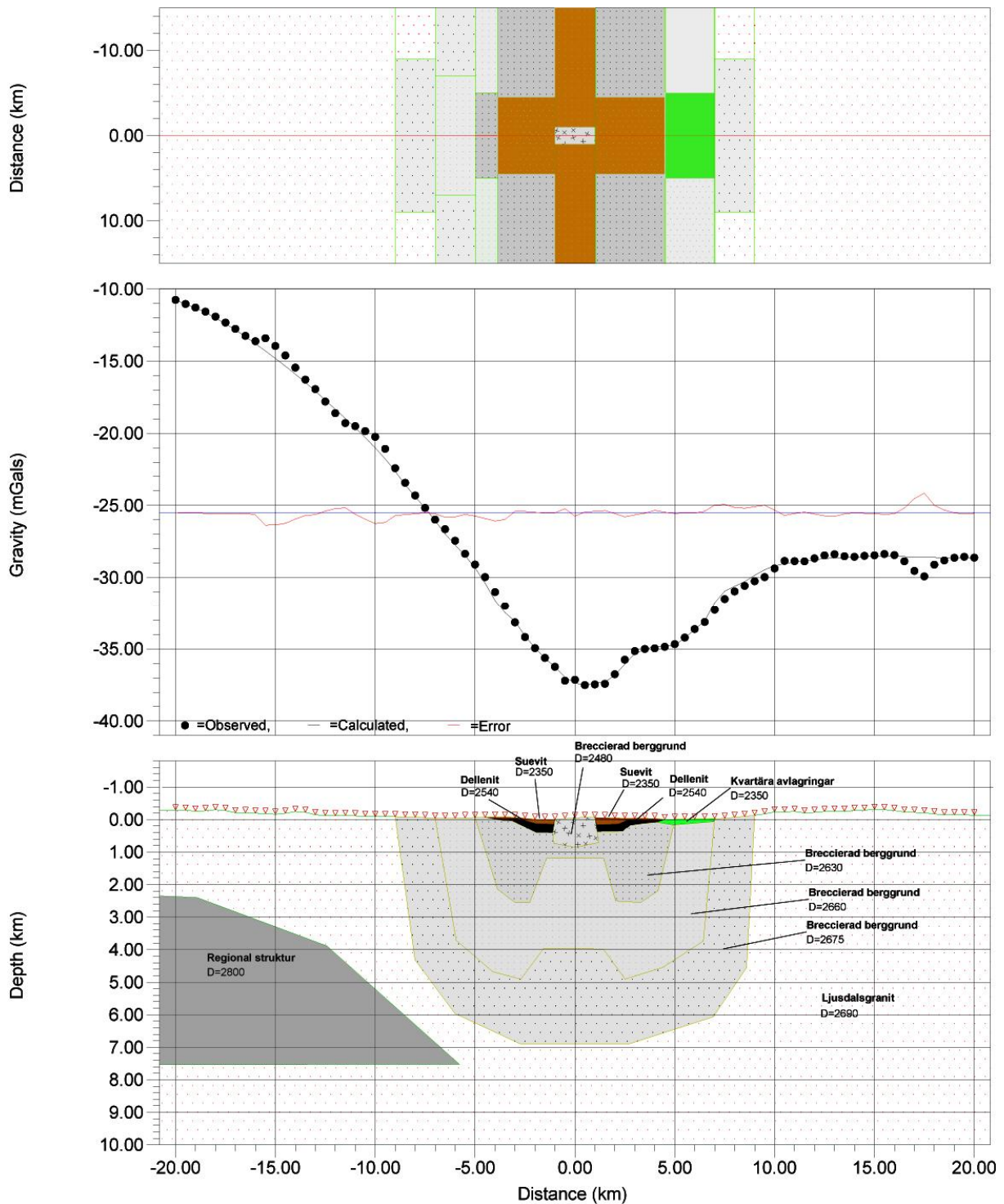
**Figur 18** Modellens avvikelsefält beräknat som skillnaden mellan observerad tyngdkraftsanomali och den beräknade gravitationseffekten från den optimerade, tredimensionella modellen efter medelvärdesbildning av modellprismornas djuputsträckning.

#### **4.2 2,5-dimensionell modell av strukturen**

Den 2,5-dimensionella modelleringen i två vinkelräta profiler, utförd med manuell, successiv justering av modellkropparna efter erhållna gravimetriska och petrofysiska mätningar uppvisar en ca 9 km vid och ca 7 km djup struktur (se figur 19 och 20). Modellen har förutom mätningarna baserats på antaganden om en halvfäriskt symmetrisk kraterstruktur, central upphöjning och radiellt avtagande densitetskontrast.



**Figur 19** Modellresultat vid 2,5-dimensionell tyngdkraftmodellering av Dellenstrukturen längs en 40 km lång profil i riktning från nordväst mot sydost med mittpunkten i strukturens mitt (X 6860300 Y 1545600). Nedre bilden visar modellkropparna i genomskärning med respektive densitet uttryckt i kg/m<sup>3</sup>. Röda trianglar visar läge och höjd för profilens modellpunkter. Bilden i mitten visar de värden som interpolerats fram längs profilen utifrån observerade Bougueranomali i tyngdkraftfältet över strukturen samt modellens beräknade anomali och skillnaden däremellan. Övre bilden visar modellkropparnas utbredning vinkelrätt mot profilen sett ovanifrån.



**Figur 20** Modellresultat vid 2,5-dimensionell tyngdkraftmodellering av Dellenstrukturen längs en 40 km lång profil i riktning från sydväst mot nordost med mittpunkten i strukturens mitt (X 6860300 Y 1545600). Nedre bilden visar modellkropparna i genomskärning med respektive densitet uttryckt i  $\text{kg/m}^3$ . Röda trianglar visar läge och höjd för profilens modellpunkter. Bilden i mitten visar de värden som interpolerats fram längs profilen utifrån observerade Bougueranomolier i tyngdkraftfältet över strukturen samt modellens beräknade anomali och skillnaden däremellan. Övre bilden visar modellkropparnas utbredning vinkelrätt mot profilen sett ovanifrån.

## **5 Diskussion och slutsatser**

### **5.1 Allmän diskussion och slutsatser**

Dellenstrukturen är en mycket tydlig meteoritkraterstruktur vilket denna studie ytterligare bekräftar. Tyngdkraftsanomalin över strukturen har en tydlig koppling till kraterstrukturen. Modellresultaten visar att anomalin i tyngdkraftfältet ovanför strukturen bara rimligt kan förklaras med en omfattande volym av uppkrossad/breccierad berggrund ned på flera kilometers djup. Effekterna av de magnetiska impaktiterna med låg densitet, såsom dellenit och suevit, som finns centralt i strukturen räcker inte till för att förklara hela tyngdkraftsanomalin utan strukturen har ett omfattande underskott på massa som med största sannolikhet beror på lågmagnetisk, uppkrossad/breccierad granit med upprinnelse i meteoritnedslaget.

Resultatet visar också att Dellenstrukturen mycket väl kan vara lämplig för utvinning av geotermisk energi med avseende på storlek och djup. Resultatet antyder också att strukturen har en förhöjd porositet som i sin tur bör leda till en förhöjd hydraulisk konduktivitet. Dock har undersökningar i exempelvis kraterstrukturen i Björkö visat mycket låg hydraulisk konduktivitet (Henkel et al, 2004) vilket har förklarats med att hydrotermala processer gör att sprickorna sätts igen av mineral. Om så är fallet även i Dellenstrukturen betyder det att dessa mineral måste ha en väsentligt lägre densitet än berggrunden i övrigt. Undersökningarna i Björkö gör även gällande att brecciastrukturen där har en markant förminskad hållfasthet, vilket man bör kunna anta även gäller för Dellenstrukturen. Detta är intressant ur geotermiskt perspektiv då tekniker för uppspräckning av berggrunden är under utveckling och bör med fördel kunna användas i denna typ av områden.

Den 2,5-dimensionella modellberäkningen är mer detaljerad i sin utformning än den tredimensionella men den innehåller också fler antaganden och detta tillsammans med tillvägagångssättet i modellberäkningarna gör att resultatet ger en mer subjektiv tolkning än den tredimensionella modellberäkningen. Den tredimensionella modellen innehåller å andra sidan något fler förenklingar i sin utformning och fungerar som en relativt grov kvantitativ analys av strukturen.

Överensstämmandet mellan de olika modellernas resultat är bra, vilket visar att strukturen mycket väl kan ha en komplex uppbyggnad med en central upphöjning och radiellt avtagande densitetskontrast även om detta inte tydligt kan uttolkas utifrån mätdata. Den 2,5-dimensionella modellberäkningen uppvisar i och för sig en större volym och utbredning av chockpåverkad berggrund men detta beror på att densitetskontrasterna som använts i de beräkningarna baseras på antagandet att densitetskontrasten avtar radiellt utåt. Densitetskontrasterna i de yttre delarna är därför mycket lägre än i den tredimensionella beräkningen av strukturens utbredning.

### **5.2 Diskussion av felkällor och osäkerheter**

#### **5.2.1 Allmänt**

Generellt kan sägas att modellering av meteoritkratrar medför en hel del svårigheter på grund av deras komplexa sammansättning och kräver god kännedom om strukturen ifråga. Saken försvåras ytterligare av att strukturerna med tiden påverkas av erosionen och andra geologiska och kemiska processer som förändrar strukturens grundförutsättningar.

Den största anledningen till att studien inte lett till en precisare bestämning av den uppkrossade berggrundens utbredning är osäkerheten i densiteterna på den lågmagnetiska uppkrossade berggrunden. För att få fram en säkrare fastställning av strukturens utformning krävs en mer detaljerad undersökning av berggrundens densitet och dess fördelning på djupet.

Ett annat problem med modellberäkningarna är att osäkerheten blir större med avståndet och blir därför stor på djupet speciellt när densitetskontrasten som i det här fallet är relativt liten.

### 5.2.1 Tredimensionella modellen

Det finns problem med att få en bra separation av det regionala och lokala tyngdkraftsfältet över strukturen. Det blir en avvägning mellan att få en bra anpassning av det regionala fältet och samtidigt få en så liten förvanskning som möjligt av lokala anomalier.

Modellberäkningarna har förmodligen påverkats av att det finns andra lokala anomalier i området som inte har sitt ursprung i meteoritnedslaget. Att det skulle finnas helt andra okända bergarter med andra egenskaper än impaktiter som skulle ha någon nämnvärd påverkan på modellen är mindre troligt. Däremot verkar det mycket troligt att residualfältet och den tredimensionella modellen har påverkats av kvartära avlagringar, främst från dalgångarna för Dellensjöarnas in- och utlopp i nordväst respektive sydost. Utseendet på residualfältet över strukturen ger ganska starka indikationer på att så är fallet och detta kan vara den största anledningen till att utfallet av modellberäkningarna ger en något oval struktur istället för den förmodade runda struktur som förväntats. Detta kan också ha påverkat det beräknade djupet på strukturen.

Medelvärdesbildningen av prismorna i modellen minskar överensstämmelsen mellan det tyngdkraftfält som den beräknade strukturen ger upphov till och det observerade men ger samtidigt en mer realistisk bild då medelvärdesbildningen används för att visa huvuddragen i modellen och ta bort en del förmodligen irrelevanta detaljer. Ett bättre sätt att komma åt problemet med stora variationer mellan angränsande prismor kunde ha varit att inkludera en begränsning av variationen mellan prismorna som ett villkor i modellen och på så sätt fått med det i optimeringen. Detta skulle dock förmodligen också ge en minskad överensstämmelse. Att sätta begränsningar på oscillationerna mellan angränsade prismor som villkor i modellberäkningarna hade dock varit att föredra men förhindrades av begränsningar i den mjukvara som användes.

Modellen är något känslig för variationer i densitetskontrasten speciellt med tanke på den osäkerhet som finns i den. Ökar man densitetskontrasten mellan breccierad/uppkrossad berggrund och opåverkad berggrund från  $70 \text{ kg/m}^3$  till  $80$  och  $90 \text{ kg/m}^3$  minskar volymen på strukturens beräknade chockpåverkade berggrund från ca  $480 \text{ km}^3$  till ca  $410$  respektive ca  $370 \text{ km}^3$ . Samtidigt minskades också maxdjupet från ca  $4,3 \text{ km}$  till  $3,4$  respektive  $3,3 \text{ km}$ . Den totala underskottsmassan på knappt 40 miljarder ton är dock ungefär lika i de tre fallen, som sig bör.

### 5.2.2 2,5-dimensionella modellen

I den 2,5-dimensionella modellen har uppfyllandet av den strukturella symmetrin varit viktigare än kravet att uppfylla total överensstämmelse mellan observerad anomali och modellkropparnas beräknade anomali. Därför har i vissa fall mindre avvikelser mellan dessa lämnats utan åtgärd för att symmetrin skall bestå samt också för att slippa använda modellkroppar som det inte finns skäligen belägg för.

Observationerna av tyngdkraftsanomalin över strukturen indikerar ingen central upphöjning av tyngre djupare liggande berggrundslager. En sådan har dock med stor sannolikhet skapats vid nedslaget och borde också fortfarande ha en framträdande roll i strukturens uppbyggnad. I denna studie motverkas effekterna på tyngdkraftsanomalin från den centrala upphöjningen av tyngre berggrundslager av att en betydande del av den mest chockade bergrunden med låg densitet är belägen centralt vid ytan. Hur densitetsfördelningen i strukturmodellen påverkats av detta fenomen är dock osäkert.

Begränsningar i den programvara som användes ger upphov till fel vad det gäller modellkropparnas utbredning vinkelrätt mot profilerna. Felen beror dels på att modellkropparna endast kan göras rektangulära, dels på att det endast går att använda sig av en begränsad modellkropp i vardera riktning. Det går alltså inte att använda sig av flera modellkroppar lagrade efter varandra vinkelrätt mot profilen. Detta leder till problem speciellt i centrum av strukturen där modellkropparna är just flera och lagrade efter varandra. Detta har dock efter undersökning visat sig ha mindre betydelse för modellen som helhet och leder ej till några större förvanskningar av resultatet.



## 6 Referenser

- Coleman, T. F. & Li, Y. (1994) On the Convergence of Reflective Newton Methods for Large-Scale Nonlinear Minimization Subject to Bounds, *Mathematical Programming*, Vol. 67, Number 2, pp 189-224
- Coleman, T. F. & Li, Y. (1996) An Interior, Trust Region Approach for Nonlinear Minimization Subject to Bounds, *SIAM Journal on Optimization*, Vol. 6, pp 418-445
- von Dalwigk I. & Lindström M. (2002). *Geological Guide to the Lockne and Dellen Impact Structures*. Vol. 47 Stockholms Universitet. Almqvist och Wiksell International, Stockholm.
- Delin, H. (1989) Berggrundskartorna 16G Ljusdal SO. 1:50 000. *Sveriges Geologiska Undersökning* Ai 36.
- Deutsch, A., Buhl, D. och Langenhorst, F. (1992). On the significance of crater ages: new ages for Dellen (Sweden) and Araguainha (Brazil). *Tectonophysics* 216 (1-2): 63-89.
- Dyrelius, D. (1972). *An iterative method for three-dimensional gravity interpretation*. Report No. 9, Department of Solid Earth Physics, University of Uppsala.
- Henkel, H. (1992). Geophysical aspects of meteorite impact craters in eroded shield environment, with special emphasis on electric resistivity. *Tectonophysics* 216 (1-2): 63-89.
- Henkel, H., Bergman, B., Stephansson, O., Lindström, M. (2004): Björkö energiprojekt. Slutrapport avseende geovetenskapliga undersökningar 2000-2004. KTH TRITA-LWR.REPORT 3010, 61 pp
- Högbom, A.G. (1910). Mötet den tredje mars. Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 32:482.
- Ivanov, B.A. & Melosh, H.J. (1999) Impact crater collapse. *Earth Planet Sci* 27: 385-415.
- Lundegårdh, P.H. (1967) Berggrunden i Gävleborgs Län. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Ser. Ba (22): 125-134.
- Melin S. (1988). Karta över Dellen. Sjöarna och bygden. *Hudiksvalls turistbyrå*.
- Melosh, H.J. (1989). *Impact cratering. A Geological Process*. 245pp. Oxford University Press, New York..
- Redaelli, L.L. (1956). *A petrological investigation in Lake Norra Dellen by means of frog-man equipment*. Sveriges geologiska undersökning C 548: 1-22.
- Svenonius, F. (1888). *Andesit från Norra Dellen I Helsingland*. Geologiska Föreningens I Stockholm Förhandlingar 116 (Bd. X, Häft. 4): 262-285.
- Svensson, N.B. (1968). *The Dellen Lakes, a probable meteorite impact in Central Sweden*. GFF 90, Part 2(533): 314-316.