

Rapport

R39:1982

Fotogrammetrisk mätning av digitala höjdmodeller

En internationell överblick

Anders Östman

INSTITUTET FÖR BYGGDOKUMENTATION	
Accnr	
Plac	<i>See</i>

*K
BN*

Byggeforskningsrådet

R39:1982

FOTOGRAMMETRISK MÄTNING AV DIGITALA HÖJDMODELLER
- en internationell överblick

Anders Östman

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
801101-6 från Statens råd för byggnadsforskning
till institutionen för fotogrammetri, KTH, Stockholm

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R39:1982

ISBN 91-540-3680-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

LiberTryck Stockholm 1982

INNEHÅLL

SAMMANFATTNING	5
1. INLEDNING	7
2. ALLMÄNT OM DIGITALA HÖJDMODELLER	9
3. FOTOGRAMMETRISK MÄTNING AV DIGITALA HÖJDMODELLER	11
4. DATABEARBETNING	17
5. PRESENTATION OCH APPLIKATIONER AV DIGITALA HÖJDMODELLER	23
6. NOGGRANNHET I DIGITALA HÖJDMODELLER	27
7. DATASTRUKTUR FÖR DIGITALA HÖJDMODELLER	31
8. SAMMANFATTNING AV UTVECKLINGS- TENDENSERNA OCH SLUTSATSER	35
9. BIBLIOGRAFI	39

SAMMANFATTNING

Digitala höjdm modeller består av data om terrängens höjdvariationer över ett begränsat område. Vanligen lagras dessa på datorläsbara medier och hanteras av datorer. Insamlingen av data till en digital höjdmmodell kan ske genom geodetisk mätning, fotogrammetrisk mätning och genom digitalisering av befintliga kartor.

Det existerar i dag ett stort antal programsystem för hantering och beräkning av digitala höjdm modeller. Ur indatafiler beräknas här en höjdmmodell som vanligen är formad som ett regelbundet rutnät. Vid institutionen för fotogrammetri, KTH, har det under de senaste åren utvecklats ett system för fotogrammetrisk insamling av mätdata för plankartering, (SHAFK). Som ett komplement till detta system och som ett komplement till befintliga programsystem för digitala höjdm modeller har institutionen för fotogrammetri föreslagit utvecklande av ett system för insamling av mätdata till en digital höjdmmodell med interaktiv grafisk kontroll. Som en första etapp i detta projekt föreligger denna litteraturstudie.

Studien behandlar de olika moment som ingår i arbete med digitala höjdm modeller som datainsamling, databearbetning, presentation och applikationer. Dessutom behandlas ytterligare frågeställningar som terrängklassificering, noggrannhet, filstrukturer och databanker. Studien är en teknisk genomgång av status hos de modernare programsystemen och den behandlar även de viktigare utvecklingstendenserna som kan skönjas inom området digitala höjdm modeller.

1 INLEDNING

Sedan 1975 har institutionen för fotogrammetri vid KTH bedrivit forskning rörande digital fotogrammetrisk kartering. Detta har, med stöd från Bygghforskningsrådet (BFR), lett till att ett system för storskalig halvautomatisk fotogrammetrisk kartering (SHAFK) har utvecklats vid institutionen. Detta system, som närmare är att betrakta som en prototyp, har för närvarande levererats till sex företag i form av källkod på magnetband, lista eller pappersremsa. Ett ytterligare antal organisationer har visat intresse för systemet och implementering pågår för närvarande hos VIAK AB och VBB. Dessutom pågår vid institutionen för fotogrammetri utveckling av en mikrodatorbaserad version av SHAFK, med stöd från BFR och Styrelsen för teknisk utveckling (STU).

Programsystemet SHAFK är ett system för insamling av digitala data rörande plankartering och kännetecknas bl a av en hög grad av interaktivitet mellan operatören och datorn. På en grafisk skärm presenteras den aktuella databanken som operatören sedan kan komplettera, göra ändringar i m m. På så sätt erhålles en kontroll av att datainsamlingen är komplett och riktig. Redan från projektets start 1977 har en klar avgränsning gjorts mot kartering av höjder. SHAFK omfattar endast plankartering. Detta är beroende av de speciella problem och de speciella möjligheter som digital kartering av höjder medför jämfört med konventionell kartering och digital plankartering. Det är i och för sig möjligt att i SHAFK-systemet kartera höjdkurvor i form av polygoner men då fransäger man sig vissa möjligheter som den digitala tekniken medför såsom extra stora noggrannhetsvinster och ett effektivare mätförfarande.

Ett mer generellt angreppssätt på problemställningen är att utveckla ett system för digitala höjdmodeller. Ur dessa höjdmodeller är det sedan möjligt att konstruera höjdkurvor med önskad ekvidistans.

För behandling av höjdmätningar finns det i dag ett stort antal system. Dessa programsystem används rutinemässigt av ett flertal organisationer runt om i landet. De är ofta väl utbyggda för olika typer av indata och utprodukter och bearbetningen av indatafilerna sker ofta satsvis (batch). Eventuella dialoger kan förekomma vid uppläggning och manipulation av indatafilerna. Liksom fallet var för plankarteringen så är man här i stort behov av ökade kontrollmöjligheter vid själva datafångsten.

Som ett komplement till SHAFK och som ett komplement till existerande programsystem för digitala höjdmodeller har institutionen för fotogrammetri föreslagit att ett system för interaktiv datafångst för digitala höjdmodeller skall utvecklas. Denna studie är en första etapp i detta projekt och omfattar en internationell överblick över befintliga system för digitala höjdmodeller, med speciellt intresse riktat mot olika tekniker för datainsamling.

Studien består av en teknisk genomgång av de olika momenten vid framställning av digitala höjdmodeller med fotogrammetrisk teknik samt en litteraturförteckning. Arbetet har

bedrivits i form av litteratursökning och studiebesök. Litteratursökning har skett via referenser i kända uppsatser, via referattidskrifter samt genom såväl retrospektiv sökning samt kontinuerlig bevakning av datorbaserade informations-system vid tekniska högskolans bibliotek (IDC) och Byggdokumentation. Trots detta kan man ej betrakta litteraturlistan som komplett. Syftet med studien är dock att ge en överblick över digitala höjdmodeller och dess utvecklingstendenser, speciellt med avseende på fotogrammetrisk datainsamling.

Begreppet "digital terrängmodell" är väl spritt och används i många olika sammanhang. Numera är det dock ovanligt att begreppet används för system som ej är datorbaserade. Förvånande nog så används dock begreppet för andra objekt än själva terrängen. Exempelvis så har begreppet använts vid nivåkurvekartering av kor (Ghosh och Ayeeni, 1977). Detta hör dock till undantagen och vanligen så avses speciella företeelser i terrängen när begreppet används.

Gemensamt för de flesta användningsområdena är alltså att terrängen generaliseras (modelleras), lagras och bearbetas i en dator. Beroende på applikation kan terrängen generaliseras på skilda sätt och med skilda mål. De parametrar som skall studeras kan vara markvärde, jordart, jordtäckets mäktighet, markanvändning, markhöjd, vegetation eller dylikt. Ur de lagrade data kan sedan produkter genereras som förhoppningsvis tillfredsställer de behov man har med avseende på en viss applikation.

En digital höjdmmodell ingår som delmängd i begreppet "digital terrängmodell" och behandlar endast markens höjdvariationer. Denna studie avser endast digitala höjdm modeller och problemställningarna hos de övriga typerna av digitala terrängmodellerna skiljer sig delvis från problemställningen hos digitala höjdm modeller, speciellt i fråga om metoder för datainsamling.

Ett system för digitala höjdm modeller består av tre steg, nämligen datainsamling, databearbetningsamt presentation och applikation.

2.1 Datainsamling

Datainsamlingen till digitala höjdm modeller sker i dag främst på tre sätt.

2.1.1 Digitalisering av befintliga kartor

Stora mängder av höjdinformation finns lagrade i grafisk form på kartor som nivåkurvor, profiler m m. För att infoga dessa data i ett digitalt system krävs digitalisering av den önskade informationen. Man kan urskilja tre huvudtyper av digitaliseringsinstrument, nämligen:

- Instrument för manuell mätning, s k digitaliseringsbord. Här placerar operatören sitt mätdon (lupp, penna e d) på kartan och registrerar koordinaterna för de punkter som skall vidarebehandlas. Utdata erhålles i form av hålremsa, magnetband e d
- Halvautomatiska instrument. Detta är automatiska linjeföljare som exempelvis Fastrak från Laser-Scan Ltd. Operatören ställer in startpunkt för en linje och instrumentet följer sedan linjen automatiskt under kontinuerlig registrering
- Automatiska instrument. Med hjälp av scanningteknik kan en karta digitaliseras

helt automatiskt. Kartan överförs här till en binär bild i rasterform. Sedan krävs en omfattande databehandling för att vektorisera denna binära rasterbild.

Noggrannheten i denna typ av mätning är förhållandevis dålig. Det kan diskuteras om detta mätförfarande är ekonomiskt lönsamt i förhållande till fotogrammetrisk nykartering.

2.1.2 Geodetisk mätning

Det finns ett antal geodetiska mätmetoder för att bestämma koordinaterna i plan och höjd för en godtyckligt vald markpunkt. Nyutvecklingen inom detta område består här främst i utveckling på instrumentsidan. Den snabba utvecklingen inom elektroniken har resulterat i de s k totalstationerna (digitaltakymetrarna). Här avläses avstånd, horisontal- och vertikalvinklarna elektroniskt och de mätta vinklarna och avstånden lagras sedan i ett dataminne, eventuellt tillsammans med punktnummer och objektкод. Innehållet i dessa dataminen kan sedan tömmas i en större dator.

2.1.3 Fotogrammetrisk mätning

Mätning sker här företrädesvis i flygbilder och i speciella instrument. Metoder och instrument kommer att beröras i kapitel 3.

2.2 Databearbetning

Databearbetningen av de insamlade mätdata är vanligen väldigt omfattande. Här sker sortering, filtrering, datareduktion, approximering (interpolering) m m. Allt detta arbete görs huvudsakligen för att genereringen av de önskade slutprodukterna skall gå snabbt och enkelt och förfarandet finns noggrannare beskrivet i kapitel 4.

2.3 Presentation och applikationer

Höjddata kan presenteras på olika sätt. De vanligaste är genom nivåkurveritning och profilritning. Dessa ritningar framställs här på automatiska ritmaskiner och styrdata till dessa kan erhållas ur den digitala höjddmodellen.

Även andra typer av applikationer är vanliga. Här märks främst massberäkning vid projektering samt generering av styrinformation till en ortofotoprojektor. Vid projektering är det vanligt att den digitala terrängmodellen innehåller fler parametrar än markhöjden, exempelvis förekomst av jordarter ned till berggrunden o d. Olika former av applikationer beskrivs i kapitel 5.

Det ovan sagda är en kort beskrivning av en digital höjddmodell. De tre huvudfaserna är datainsamling, databearbetning samt presentation och applikation. Dessa huvudfaser kommer här att beskrivas närmare i de närmast följande kapitlen. Tonvikt har här lagts på de fotogrammetriska problemställningarna, främst vid datainsamlingen och presentationen.

3 FOTOGRAMMETRISK MÄTNING AV DIGITALA HÖJDMODELLER

3.1 Fotogrammetriska instrument

Detta är ett område där utvecklingen går snabbt. Under de senaste decennierna har nya instrumentkonstruktioner framkommit nästan ständigt. Detta avspeglas bl a vid de vart fjärde år återkommande internationella kongresserna för fotogrammetri och fjärranalys, där instrumentutställningen innebär en koncentrerad översikt över utvecklingen under den senaste fyraårsperioden. Den nuvarande trenden inom instrumentutvecklingen går helt naturligt mot en ökad användning av datorstöd samt en ökad automatisering. Anskaffning i Sverige av de nyare instrumenttyperna är förhållandevis blygsam och den svenska utvecklingen har i stället bestått i att modifiera de äldre instrument genom påmontering av elektroniska givare som är inkopplade till registreringsverk och datorer. Detta är ingen specifik svensk utveckling utan en liknande utveckling har skett i våra grannländer. Generellt sett kan man dock säga att anskaffningen av de nyare instrumenttyperna är vanligare nere på kontinenten. I en översikt över de fotogrammetriska instrumenten för mätning av digitala höjdm modeller kan man urskilja följande tre huvudtyper.

3.1.1 Manuella instrument

Dessa instrument kännetecknas av att operatören styr datainsamlingen, eventuellt med användande av datorstöd och i denna grupp återfinns de traditionella stereoinstrumenten. Ursprunget till dessa instrument anses utgöras av den av Pulfrich konstruerade stereokomparatorn (1901). Man kan här skilja mellan två huvudtyper av instrument nämligen

- komparatorer, mono eller stereo, för mätning av bildkoordinater och eventuellt koordinatdifferenser (parallaxer)
- analoga stereoinstrument för framställning och upp-mätning av optiska modeller, som är analoga med terrängen. Mätning sker av modellkoordinater.

För mätning av digitala höjdm modeller används här främst den sistnämnda typen. Denna instrumenttyp är helt dominerande i Sverige och genom elektronisk registrering överförs mätdata till en dator för vidarebehandling. Det finns dock många instrument i Sverige som saknar denna möjlighet till dataregistrering och data redovisas i stället på ett till instrumentet anslutet mekaniskt ritbord i form av en ritad karta i konceptform.

3.1.2 Halvautomatiska instrument

Detta är en vidareutveckling av de manuella instrumenten. Det har skett genom att montera motorer på instrumentet som rör mätmärket systematiskt över stereomodellen.

För de analoga stereoinstrumenten innebär detta att motorerna rör mätmärket längs profiler över stereomodellen.

Operatören behöver här endast styra mätmärkets rörelse i höjddled och registrering sker numera vanligen på datorläsbara medier. Dessa instrument används främst för framställning av styrinformation till ortofotoprojektorer. Det är dock inte ovanligt att man även framställer en digital höjdmmodell ur dessa profilmätningar. Instrument av denna typ finns endast i ett fåtal exemplar i Sverige och utvecklingen av nya instrument av denna typ är rätt begränsad.

En större uppmärksamhet har då de s k analytiska stereoinstrumenten (analytical plotters) rönt. De ursprungliga idéerna till denna instrumenttyp lanserades av Helava, 1957 och instrumentet är grovt förenklat en stereokomparator försedd med motorer för bildhållarna. Motorerna styrs av operatören och en dator. Med detta instrument har man kombinerat stereokomparatorns fördelar med hög noggrannhet och de analoga instrumentens fördelar med betraktning av parallaxfri modell. Man har dessutom vunnit en rad andra fördelar som exempelvis snabb relativorientering och numerisk styrning av mätförfarandet. Dessa instrument är vanligen förhållandevis dyra och används mest vid punktförtätning (triangulering). Priset varierar mellan 1 och 2,5 Mkr. För närvarande finns endast ett sådant instrument i Sverige och ett andra är under upphandling.

Instrumentet lämpar sig väldigt väl för mätning av digitala höjdm modeller och standardprogram finns som styr mätningen i ett regelbundet rutnät eller t ex profiler. Tidsvinsterna är här väldigt stora i mätförfarandet men trots det är produktionen av digitala höjdm modeller i dessa instrument relativt blygsam. Detta beror troligen på dess höga inköpspris. Det sker dock en kraftig vidareutveckling för denna instrumenttyp och man kan förutse en produktion av andra ordningens analytiska stereoinstrument, dvs analytiska stereoinstrument som är billigare men ej har samma höga noggrannhet. Dessa instrument skulle i så fall vara speciellt anpassade för karteringsändamål och mätning av digitala höjdm modeller.

3.1.3 Automatiska instrument

Dessa instrument arbetar i princip utan operatör genom att göra en korrelationsanalys av bildernas svärtningsfördelningar. Den första beskrivning gjordes av Hoborough, 1959, som konstruerade instrumentet Stereomat. Principen här är att modellen rekonstrueras optiskt i instrumentet med en dubbelprojektor och genom att använda ett flyttbart katodstrålrör och fotoceller samordnas de båda bilderna och en elektronisk korrelationsanalys genomförs. Katodstrålröret flyttas sedan så att maximal korrelation erhålls. Detta instrument mäter alltså tredimensionella modellkoordinater.

En annan möjlighet är att i stället för att flytta katodstrålröret i tre riktningar kan man förflytta de båda bilderna i vardera två riktningar. Efter denna s k komparatorprincip arbetar Gestalt Photomapper som är det instrument av denna typ som har nått störst spridning. Utvecklingen inom elektronikområdet medför att t ex katodstrålrören undan för undan ersätts av andra scanners som laserscanners, solid-state scanners m m.

En tredje metod för korrelationsanalys är att göra den numeriskt. I detta fall scannas bilderna i ett raster och bildernas gråtoner lagras på magnetband eller skivminne. Det numeriska arbetet blir sedan omfattande men en stadig utveckling av snabbare algoritmer sker. Det finns ett fåtal raster-scannern i Sverige som kan användas för numerisk korrelation, men denna teknik har ej hittills använts för mätning av digitala höjdmodeller i Sverige. Några instrument med elektronisk korrelation finns ej i Sverige.

Metoden att ur bilderna automatiskt rekonstruera terrängen genom användandet av korrelationsanalys, förutsätter att bilderna är kontrastrika, dvs en avsaknad av stora homogena områden vad avser gråtoner som exempelvis skogar och sjöar. I sådana fall måste som regel en operatör ingripa.

Utvecklingsarbetet för denna instrumenttyp är rätt betydande men instrumenten har ännu ej fått någon större spridning i Europa. Instrumenten lämpar sig än så länge endast för småskalig kartframställning.

Sammanfattningsvis kan nämnas att den vanligaste instrumenttypen för fotogrammetrisk mätning av digitala höjdmodeller är de traditionella analoga stereoinstrumenten. Utvecklingen är dock mest markant bland de numeriska stereoinstrumenten (analytical plotters) samt till viss del även bland de automatiska korrelatorerna. En utveckling med andra ordningens numeriska stereoinstrument skulle med största säkerhet innebära ett ordentligt fall framåt för fotogrammetrisk mätning av digitala höjdmodeller jämfört med geodetisk mätning och digitalisering av befintliga kartor. Dessa instrument skulle bli väldigt attraktiva investeringsobjekt jämfört med de dyrare första ordningens numeriska stereoinstrument. Med detta menas ej att de nuvarande numeriska stereoinstrumenten ej skulle vara attraktiva investeringsobjekt, snarare tvärtom.

Vad beträffar de automatiska korrelatorerna är den framtida utvecklingen mer osäker. Instrumentens funktion är ej helt problemfri och detta kombinerat med det höga priset på utrustningen samt den begränsade användningen (endast småskaliga digitala höjdmodeller) gör att eventuella svenska investeringar bland dessa instrument lär dröja.

3.2 Metoder för val av mätpunkter vid fotogrammetrisk datainsamling

Valet av mätpunkter (primärpunkter) är bl a beroende av önskad noggrannhet i slutprodukten, mätinstrument samt egenskaper i den efterföljande databearbetningen. Eftersom själva mätprocessen är relativt dyrbar är det mycket angeläget att välja sina mätpunkter på ett ekonomiskt optimalt sätt. Detta är ett område som just nu står i centrum för forskningen i fotogrammetriskt mätta digitala höjdmodeller. De metoder för val av mätpunkter som används kan i korthet indelas i följande grupper.

3.2.1 Selektiv mätning

Karakteristiskt för denna typ av punktval är att operatören

har full frihet att välja de punkter som skall mätas. Vanligen väljs karakteristiska punkter i terrängen och mätpunkterna kan vara grupperade som enkelpunkter eller i polygoner. Det senare är vanligt vid mätning av sk brytlinjer i terrängen.

3.2.2 Mätning i regelbundna nät

Ett mycket vanligt val av mätpunkter är punkter i ett regelbundet nät. Dessa nät är vanligen kvadratiska, rektangulära eller trekantiga. Punkturvalet är speciellt anpassat till den datortekniska lagringen av mätdata och den lämpar sig mycket bra vid mätning i halvautomatiska instrument. Instrumentets motorer styr då mätningen till förprogrammerade lägen. Det är även vanligt att detta val av mätpunkter används vid mätning i manuella instrument.

3.2.3 Mätning längs profiler och längs höjdkurvor

Vid mätning enligt denna urvalsprincip kan registrering ske antingen kontinuerligt (sk streamdigitizing) eller punktvis. Profilerna kan vara orienterade längs någon av koordinataxlarna eller godtyckligt orienterade i planet. Höjdkurvor mäts i sin tur med en viss ekvidistans, dvs längs jämna intervall i höjddled. Vid kontinuerlig mätning försämras noggrannheten avsevärt (Ackermann 1978, Ebner 1981, Marckwardt 1976, Thompson 1981), något som ej är allmänt känt. Se vidare kapitlet om noggrannhet.

Vid kontinuerlig digital mätning erhålles vanligen så stora datamängder att datareduktion, eventuellt kombinerat med filtrering, är nödvändig. Denna datareduktion sker antingen on-line vid stereoinstrumentet eller senare vid beräkningssteget.

3.2.4 Progressiv mätning

En stor nackdel vid mätning i regelbundna rutnät är att punktavståndet är konstant mellan de mätta punkterna oberoende av terrängens lokala variationer. Önskvärt vore om man kunde mäta tätare i partier med bruten terräng och glesare i flackare terräng. Denna metod med variabelt rutnät har påtalats av Boehm, 1967 och har sedan vidareutvecklats för fotogrammetriska sammanhang av B Makarovic och K Tempfli i Holland. De benämner metoden "progressiv mätning" (progressive sampling). Metoden innebär att en dator kontrollerar datainsamlingen i ett regelbundet rutnät. I de områden där terrängens lutning varierar mer än ett tillåtet gränsvärde, indikerar datorn att ytterligare förtätning är nödvändigt. Härmed anpassas det variabla rutnätet till terrängens variationer.

Metoden är speciellt anpassad till halvautomatiska stereoinstrument av typen analytical plotters. Eftersom datorn styr bildhållarnas motorer så ställer instrumentet automatiskt in sig själv i de punkter som skall mätas. Metoden är väldigt ny, men den lär finnas i en operativ version vid ITC i Holland.

3.2.5 Sammansatt mätning

Ett annat sätt att komma till rätta med problemet med det regelbundna rutnätets okänslighet för lokala variationer i terrängformen är sammansatt mätning. Detta innebär att man kombinerar ett antal av ovanstående metoder, exempelvis mätning av regelbundna rutnät kombinerat med selektiv mätning av brytlinjer. Troligen består den ekonomiskt och noggrannhetsmässigt mest optimala metoden i just väl valda kombinationer av urvalsmetoder eller eventuellt av progressiv mätning. Ett internationellt försök, lett av professor Kennert Torlegård vid institutionen för fotogrammetri i Stockholm, syftar bl a till att ta fram underlag för jämförelser mellan olika principer för val av mätpunkter. Detta försök ingår i en arbetsgrupp inom ISPRS kommission III och beräknas vara slutfört under 1984.

4 DATABEARBETNING

När data väl är insamlade vidtar en omfattande databearbetning. Man kan dela in bearbetningen i tre olika steg, nämligen förbearbetning, generering av höjdmodellen och generering av utdata. Arbetsgången är vanligen den att man efter en viss förbearbetning lägger upp sina mätdata på filer. Viss felkontroll kan här göras. Dessa filer utgör sedan indata till programmet för generering av själva höjdmodellen, som vanligen är ett regelbundet rutnät. Hos en del system utgöres dock höjdmodellen av de mätta primärpunkterna, dvs filerna med mätdata. När höjdmodellen är genererad sker en felsökning, vanligen med hjälp av ett enkelt uppritningsprogram samt eventuellt andra kontroller. Om fel upptäcks rättas indatafilerna och proceduren upprepas tills inga fler felaktigheter upptäcks. Efter detta genereras utdata beroende på önskad applikation. De olika stegen beskrivs nedan mer detaljerat.

4.1 Förbearbetning

Förbearbetningens funktion är att sammanställa och ordna mätdata till datafiler som är direkt läsbara av programmet som genererar själva höjdmodellen. Beroende på instrument, för punkturval och krav på indatafiler varierar omfattningen hos förbearbetningen väldigt mycket.

Man kan urskilja följande eventuella moment i förbearbetningen

- Formattering av data, dvs utskrift av data på fil enligt ett specificerat format
- Transformation av mätdata till markens koordinatsystem
- Detektering av grova fel
- Korrektion för kända systematiska fel, exempelvis genom användning av kalibreringsdata
- Filtrering av exempelvis kontinuerlig (dynamisk) registrering eller korrelatormätningar
- Datareduktion av kontinuerligt registrerade data. Dessa datafiler består vanligen av en stor mängd registreringar av vilka flertalet är överflödiga. En reduktion av denna mängd är därför vanligen nödvändig
- Sortering av data, exempelvis efter kartblad e d.

4.2 Generering av höjdmodellen

När indatafilerna har blivit iordningställda vidtar så genereringen av höjdmodellen. Vanligen sker en förtätning av mätpunkter till ett regelbundet rutnät. I vissa fall utgör primärpunkterna den digitala höjdmodellen och i vissa fall, speciellt vid korrelatormätningar, sker en utglesning (datareduktion) av punktmängden. I de fall då ett regelbundet nät ej skapas utgöres det huvudsakliga

arbetet av att skapa indexfiler för sökning i datamängden. Detta kan vara ett omfattande arbete, speciellt i de fall trianglar skall skapas ur mätta punkter med godtyckliga lägen.

Det finns alltid en algoritm för att ur de mätta primärpunkterna beräkna höjden hos en godtycklig punkt. För detta krävs någon form av approximationsmetod. Vanligen sker denna approximation genom interpolering men i vissa fall sker även en utjämning och/eller filterning, varför man ej generellt sett kan benämna förfarandet för "interpolation". Följande sammanställning över approximationsmetoder är hämtad från Schut, 1976.

4.2.1 Approximering via rörliga ytor

För varje punkt vars höjd skall beräknas anpassas en yta som punkten skall vara belägen på. Denna yta anpassas så bra som möjligt till de omkringliggande mätta primärpunkterna. För närliggande approximerade punkter kommer ytan att ändra orientering och eventuellt även form. Därför kallas denna approximationsmetod för "approximering via rörliga ytor". Ytan som är karakteristisk för approximeringen kan vara ett horisontellt plan, ett lutande plan eller yta av högre ordning, exempelvis ett polynom av andra ordningen. Vid inpassningen av ytan till de omkringliggande mätpunkterna kan vikter ansättas som funktion av avståndet mellan approximerad punkt och mätt punkt. Vid inpassningen kan även utjämningsberäkningar göras i de fall antalet mätpunkter överstiger antalet koefficienter som definierar ytan.

En vanlig form av approximation är genom inpassning av horisontella plan och de omkringliggande punkterna viktas omvänt proportionellt mot avstånden i kubik.

4.2.2 Addering av ytor

I denna grupp av approximationsmetoder hänföres främst minsta-kvadrat-prediktering, även kallad linjär minsta-kvadrat-interpolering, kollokation, kringning, multikvadratisk interpolation m m. Benämningen "addering av ytor" hänför sig till en geometrisk tolkning av metodernas arbets-sätt, men metoderna har även en statistisk bakgrund.

Denna statistiska bakgrund förutsätter att man från de mätta höjderna subtraherar en s_k trendfunktion som har den egenskapen att den systematiska trenden i höjderna eliminerar. På så sätt erhålles mätdata som representerar en stationär stokastisk process. Vanligen ansätts något polynom som trendfunktion. När trenden är eliminerad består nästa steg i att bestämma kärnfunktionen (K). Vanligen har denna funktion avståndet mellan observationerna (d) som oberoende variabel. Beroende på vissa restriktioner på kärnfunktionen $K(d)$ kan man skilja mellan två olika metoder

a Kovariansfunktioner som kärnfunktioner.

Dessa funktioner vilar på teorin om stationära stokastiska processer och har följande karakteristiska drag

- $K(0) > 0$ dvs variansen vid avståndet noll är positivt
- $K(d) \leq K(0)$ dvs kovariansen mellan två punkter är mindre än deras varians
- $K(d)$ är oberoende av riktningen mellan observationerna

Kovariansfunktionens utseende bestäms ur mätdata och eventuellt sker en anpassning till en analytisk funktion.

- b) Multikvadriska funktioner som kärnfunktioner. Dessa funktioner baseras på geometriska och fysikaliska aspekter i stället för teorin om stokastiska processer. Av ovanstående villkor för kovariansfunktioner bibehålles endast villkoret om att kärnfunktionen är symmetrisk. Funktionens utseende bestäms vanligen i förväg och är oberoende av mätdata.

Oberoende av vilka kärnfunktioner man väljer så blir beräkningarna väldigt likartade. När kärnfunktionen är bestämd bildas autokorrelationsmatrisen C . Elementen i denna matris består av korrelationen mellan observationerna, där korrelationen erhålls ur kärnfunktionen. Om vi har n st höjdobservationer så har matrisen C dimensionen $n \times n$.

Beräkning av den trendeliminerade höjden z_p för punkten p sker sedan genom formeln

$$z_p = \bar{c}^T C^{-1} \bar{z}$$

där z_p = beräknad trendeliminerad höjd

\bar{c}^T = vektor med korrelationen mellan punkten p och originalmätningarna. Erhålles ur kärnfunktionen

C = autokorrelationsmatrisen

\bar{z} = vektor med trendeliminerade höjdobservationer

Observera att autokorrelationsmatrisen C måste inverteras, vilket är ett omfattande arbete då antalet observationer är stort. Denna invertering behövs dock göras endast en gång, men ändå kan beräkningsarbetet bli betungande. Ett sätt att lindra det numeriska arbetet är att dela in området i små beräkningsenheter som behandlas separat.

Om man har använt en multikvadrisk funktion som kärnfunktion så kan man välja ut ett mindre antal "nodpunkter" för invertering av korrelationsmatrisen. Om vi har n st observationer och m st nodpunkter ($m < n$) så bildas korrelationsmatrisen C som har dimensionen $n \times m$. Beräkning av trendeliminerad höjd z_p sker då genom formeln

$$z_p = \bar{c}^T (C^T C)^{-1} C^T \bar{z}$$

där z_p = beräknad trendeliminerad höjd

\bar{c}^T = vektor med korrelationen mellan punkten p och nodpunkterna

- C = korrelationsmatris
 \bar{z} = vektor med trendeliminerade höjdobservationer
 i nodpunkterna

På detta sätt kan man minska dimensionen på matrisen som skall inverteras.

4.2.3 Samtidig utjämning av lokala polynom (finita element)

Här delas området in i ett tätt regelbundet rutnät $s \times k$ finita element. Dessa element kan vara plana eller bestå av ett högre ordningens polynom. Genom att anpassa de finita elementen till höjdobservationer i området, samt genom att tillföra villkor på de finita elementens variation erhålles ett överbestämt ekvationssystem som kan lösas på traditionellt sätt genom minsta-kvadrat-metoden. Obekanta i ekvationssystemet är de sökta höjderna i rutnätspunkterna. De villkor som används är exempelvis att andra ordningens differenser i rutnätspunkterna skall minimeras. I de fall mer komplicerade finita element används så kan villkor om kontinuerliga derivator införas. Metoden kräver vanligen rätt omfattande beräkningar men genom att ekvationssystemets struktur är bandformad och genom att brytlinjen lätt kan införas i beräkningarna är metoden mycket användbar.

4.2.4 Approximering i ett regelbundet rektangulärt rutnät

Höjderna i ett regelbundet rektangulärt rutnät kan ha tillkommit genom en tidigare approximation eller genom en direkt mätning i detta rutnät. Vanligen sker en linjär interpolation eller så anpassas ett polynom av högre ordningen. Vid en sådan anpassning används vanligen villkor om kontinuitet för derivatorna och man måste då ta hänsyn till de omkringliggande rutnätspunkterna. För lösning av polynomets koefficienter bildas en koefficientmatris som måste inverteras. Eftersom rutnätet är regelbundet så är denna koefficientmatris konstant och behöver således inverteras endast en gång. Detta underlättar räknearbetet betydligt. De polynom som används är vanligen bikubiska (16 eller 12 termer), bikvadratiska (8 termer) eller bilinjära (4 termer).

4.2.5 Approximering i ett nät av trianglar

Även här anpassas vanligen någon form av polynom till trianglarna. Är nätet regelbundet kan man förfara på liknande sätt som hos ett regelbundet rektangulärt rutnät. I de fall triangelnätet ej är regelbundet åtgår mycken tid till att skapa själva triangelnätet och sökningen i datamängden blir också mer komplicerad. När nätet väl är skapat kan man anpassa ett polynom av ett visst gradtal till trianglarna på tidigare beskrivet sätt.

4.2.6 Approximering mellan polygoner

Många av de tidigare digitala höjdmodellerna består av mät-punkter belägna längs karakteristiska linjer, exempelvis brytlinjer. Dessa linjer är mätta i form av polygoner och interpolering sker ofta rätlinjigt mellan dessa polygoner. Exempelvis kan interpolerad höjd hos en godtycklig punkt erhållas genom linjär interpolation längs den kortaste linjen mellan två omkringliggande polygoner.

4.3 Generering av utdata

Efter en eventuell punktförtätning till ett regelbundet rutnät eller ett skapande av triangelnät genom att konstruera olika indexfiler så följer generering av utdata. Beroende på applikation av höjdmodellen så varierar databehandlingen.

4.3.1 Massberäkning

Genom numerisk integration av lagrade höjder kan massvolymen ovanför en given yta beräknas. Det finns standardmässiga numeriska metoder för denna integration såsom trapetsregeln, Rombergs metod m m. I det flerdimensionella fallet kan man antingen göra integrationen i steg eller direkt flerdimensionell.

4.3.2 Profilritning

Genom att lägga profiler i höjdmodellen och genom användning av någon av ovan beskrivna approximationsmetoder kan höjder längs profilen lätt beräknas. Dessa höjder kan sedan åskådliggöras genom profilritning.

4.3.3 Styrdata till ortofotoprojektor

Vid framställning av ortofotokartor sker en transformation från bildens centralprojektion till kartans ortogonalprojektion. För en godtycklig markpunkt approximeras en höjd med hjälp av någon av ovan nämnda approximationsmetoder. För denna markpunkt kan sedan motsvarande bildelement beräknas genom en perspektivisk transformation.

4.3.4 Ritning av nivåkurvor

Denna typ av utdata är relativt omfattande att framställa. Programmen består här av två eller tre delar.

- a Det behövs rutiner för att för en godtycklig markpunkt beräkna dess höjd. Detta görs vanligen med någon av ovan nämnda approximationsmetoder. Vanligt är dock att problemet omformuleras så att man söker markpunkten för en viss höjd. Sökning efter denna punkt sker då inom ett avgränsat område eller längs en del av en rät linje. På så sätt erhåller man markkoordinater för punkter längs

nivåkurvorna. Vanligen är interpolationen linjär och sökning sker längs rutnätslinjerna.

- b Nästa steg blir att sortera de beräknade punkterna till polygoner som beskriver nivåkurvornas förlopp. Detta är ett väldigt omfattande sorteringsarbete och görs främst för att uppritningen av en höjdkurva skall ske kontinuerligt. En annan orsak är att den möjliggör steg c, som är kurvutjämning.
- c Det enklaste sättet att rita en polygon är att rita räta linjer mellan de punktnoder som definierar polygonen. Om avståndet mellan punktnoderna är stort blir dessa höjdkurvor dessvärre taggiga och ej acceptabla ur kartografisk synpunkt. Detta brukar avhjälpas med en kurvutjämning som kan ske på i princip två olika sätt
 - kurvutjämning genom att anpassa en funktion $f(x,y) = 0$ till punktnoderna. Man kan även uttrycka den ena koordinaten som en explicit funktion av den andra inom ett visst intervall. Indelningen i intervall bestäms av kurvans förlopp (riktning). Hela höjdkurvan representeras således av en mängd funktioner
 - kurvutjämning genom parameterisering, där x och y uttrycks som olika funktioner av parametern s .

Kurvutjämningsmetoder brukar ha nackdelen att öglor och andra ej önskvärda kartografiska fenomen kan uppträda. Ett alternativ är att redan vid beräkning av nodpunkternas läge (steg a) för nivåkurvorna, göra en mer komplicerad form av interpolation och samtidigt lägga nodpunkterna så pass tätt att linjär ritning går bra.

4.3.5 Övrig utdata

Det finns även annan form av utdata för andra typer av applikationer. Det finns även tillfällen när den digitala höjdmodellen samkörs i sin helhet med annan information, exempelvis för geometrisk korrektion av satellitbilder m m. Exempel på ytterligare användningsområden för digitala höjdmodeller är simulering av lokalklimat, beräkning av siktförhållanden för radar och telekommunikationer m m.

5 PRESENTATION OCH APPLIKATIONER AV DIGITALA HÖJDMODELLER

Det som är avgörande för den önskade noggrannheten i en digital höjdmmodell är den tilltänkta användningen (applikationen). De digitala höjdmmodellerna används framför allt till följande tre syften.

5.1 Ritning av nivåkurvor

Ett vanligt sätt att enkelt redovisa terrängens nivåvariationer är att rita nivåkurvor på kartor. Det finns i dag ett flertal programsystem som ur en digital höjdmmodell ritar nivåkurvor på ett kartografiskt acceptabelt sätt. Framställning av digitala höjdmmodeller ur fotogrammetriska mätningar för ritning av nivåkurvor är ej så vanligt i Sverige men det förekommer. Den övervägande delen av nivåkurvekonstruktionen sker i dag på traditionellt fotogrammetriskt sätt. Gjorda undersökningar visar dock att nivåkurvorna blir både noggrannare (Ebner 1981, Krauss 1981) och i många fall billigare (Assmus 1976, Stanger 1976) vid användandet av en digital höjdmmodell.

5.2 Teknisk projektering

Vid projektering av exempelvis vägar är det vanligt att använda sig av digitala höjdmmodeller. Ur dessa kan man sedan göra massberäkningar och profilritningar. Användande av digitala höjdmmodeller kan ske dels i planeringsstadiet och dels i samband med själva byggandet. I det senare fallet används huvudsakligen geodetiska mätningar vid beräkningarna medan man i planeringsstadiet även brukar använda fotogrammetriska mätningar.

De fotogrammetriskt mätta höjdmmodellerna är i de fall kontinuerlig registrering har använts behäftade med fel av systematisk karaktär samt även andra kända systematiska fel. Dessa fel kan reduceras med hjälp av digital teknik. De kända systematiska felen kan elimineras genom att använda kalibreringsdata för använda instrument (kameror m m) samt göra korrektion för jordkrökning och refraktion. De fel som orsakas av den kontinuerliga registreringen kan till viss del reduceras genom filtreringsteknik.

Genom införande av digital teknik och genom mätning av enkelpunkter ökas noggrannheten i de fotogrammetriskt mätta höjdmmodellerna så drastiskt att den börjar bli jämförbar med geodetisk mätning. Om man dessutom kan börja göra specialflygningar från låg höjd och med normalvinkelobjektiv kan man teoretiskt sett likställa punktnoggrannheten med geodetisk takymetermätning. Ett kvarstående problem är dock vegetationseffekten men metoder för reducering av denna effekt finns föreslagna (Leupin et al 1980). En vidareutveckling av fotogrammetriska metoder för datainsamling samt korrektioner för systematiska fel bör ge som resultat digitala höjdmmodeller som uppfyller högt ställda noggrannhetskrav som kan förekomma vid teknisk projektering. Detta skulle

i så fall innebära stora ekonomiska besparingar vid projekteringen. Detta är en utveckling som många bedömer som fullt möjlig.

5.3 Produktion av ortofotokartor

En vanlig storskalig karta kan betraktas som en ortogonalprojektion av terrängen, dvs den är skalriktig och vinkelriktig inom små felmarginaler. En vanlig flygbild är däremot en centralprojektion av terrängen och den är normalt varken skalriktig eller vinkelriktig. Flygbilder kan sålunda ej direkt användas som skalriktiga kartor. Bilderna kan däremot omprojiceras från centralprojektion till en skal- och vinkelriktig ortogonalprojektion med hjälp av en sk ortofotoprojektor. För denna omprojektion krävs data om terrängens höjdvariationer och i de modernaste instrumenten utnyttjar man digitala höjdmodeller. I Sverige har tekniken främst använts i produktion av den ekonomiska kartan hos Lantmäteriverket (LMV). För fortsatt framställning av ortofotokarta är en digital höjddatabank under uppbyggnad. Utomlands produceras regelmässigt ortofotokartor i större skala. Den svenska produktionen av storskaliga ortofotokartor (< 1:10 000) är förhållandevis blygsam, men ett ökat intresse för dessa kartor har börjat göra sig gällande på sistone. Vad gäller datafångst för denna applikation av digitala höjdmodeller är det vanligt att fotogrammetriska mätningar ligger till grund i form av profilplåtar och nivåkurvekartor m m. Digitalisering av denna information måste då ske.

5.4 Tänkbara applikationer

De tre ovan beskrivna applikationerna av digitala höjdmodeller är de i dag mest vanligt förekommande. Andra applikationer som beräkning av radarsikter och simulering av lokalklimat förekommer. Den framtida utvecklingen av nya metoder och uppkomst av nya problem kan även ge upphov till nya applikationer. Två tänkbara framtida applikationer av digitala höjdmodeller är:

5.4.1 Fjärranalys

Höjddata kan här användas för ökad noggrannhet

- a Geometrisk korrektion av svepradiometerdata (Larsson 1980)
- b Extra "spektral" kanal vid klassificering (Larsson 1980)
- c Korrektion av spektrala signaturer (Talts 1981, Arnberg 1981).

5.4.2 Å jourföring av karta

Å jourföringen av kartor är ett växande problem och det består av i princip två delar, nämligen

- a Lokalisering av förändringar
- b Införande av förändringar på kartorna (eller kartdata bankerna).

Höjddata kan här användas för lokalisering av förändringar. Vi förutsätter här att området flygfotograferas och att bilderna skall användas till lokalisering av förändringar i kartbilden.

Ett alternativ är att ur flygbilderna framställa en ortofotokarta i samma skala som karteras och sedan jämföra ortofotokartan med den ursprungliga kartan.

Ett annat alternativ föreligger om man har sina kartdata lagrade i en kartdatabank. Då kan man för detta ändamål rita upp sina kartdata i samma centralprojektion som flygbilden och på så sätt jämföra kartdatabankens innehåll mot nuläget (flygbilden).

6 NOGGRANNHET I DIGITALA HÖJDMODELLER

Begreppet noggrannhet kan delas upp i tre komponenter

i) Precision

Med precision i exempelvis en mätning menas dess repeterbarhet. Vid upprepade mätningar kan man jämföra deras interna spridning och precisionen kan anges i termer som standardavvikelse m m. Denna typ av mätfel anses vara normalfördelade och av tillfällig (stokastisk) art.

ii) Modellens riktighet

Vid användandet av mätdata bildas en matematisk modell för bearbetningen. Denna modell är mer eller mindre komplett (riktig). Exempelvis kan nämnas att man inom fotogrammetrin använder sig av perspektivisk transformation. Denna transformation brukar kompletteras med uppgifter om kända systematiska fel som linsernas felteckning, atmosfärens refraktion m m. Våra modeller av verkligheten är dock aldrig helt fullständiga.

iii) Förekomst av grova fel och dess inverkan

Grova fel förekommer inom all mättningsverksamhet och de orsakas av slarv, misstag e d. Möjligheten att upptäcka grova fel beror dels på felets storlek, dels på den mätkonfiguration som används. Vid planering av mätkonfigurationen är det i detta sammanhang två frågeställningar man bör ta hänsyn till

a) Hur stort kan ett grovt fel vara innan det upptäcks?

b) Vilken inverkan på slutresultatet har de grova felen som ej upptäcks?

Genom att analysera sin mätkonfiguration och mätmetod med avseende på dessa frågor kan man minska systemets känslighet för grova fel.

Vad gäller noggrannheten i fotogrammetriskt mätta digitala höjdm modeller kan följande kommentarer göras.

6.1 Precision

Precisionen bestäms av stokastiska fel som införes i systemet vid mätprocessen. Felen har varierande orsaker och storlek, såsom instrument, operatör, bilder m m. De flesta stokastiska felen är dock rätt väl kända till sin storlek och kan uppskattas redan vid planeringen. Dessa fel fortplantas dock genom den efterföljande bearbetningen och dess inverkan på slutresultatet är dock fortfarande oklart. Det finns däremot försök att uppskatta denna inverkan. Exempelvis har Jacobi 1980 och Frederiksen 1980 angett ett formelsamband mellan slutgiltig precision, terrängtyp och mätningarnas precision. Eftersom sambandet är mycket enkelt så bygger det på grova approximeringar. Hur pass allmängiltiga dessa approximeringar är kan dock vara svårt att säga.

En form av fel som hittills ej har varit väl känd bland flertalet, är inverkan av kontinuerlig dynamisk registrering. Man har i ett flertal undersökningar funnit att höjdmodeller mätta under kontinuerlig rörelse har klart sämre noggrannhet än höjdmodeller mätta med diskret punktregistrering. Att en enskild punktregistrering har sämre precision vid kontinuerlig registrering är väl rätt naturligt, men att även den slutliga terrängmodellen blir sämre är dock ett ej uppmärksammat faktum. Ackermann, 1978 hittade fel av systematisk natur vid kontinuerlig registrering längs profiler och höjdkurvor. Även Marckwardt, 1976 har hittat systematiska effekter vid profilering. Någon förklaring till dessa fel är svår att få, varför det är svårt att klassificera dem som tillfälliga eller systematiska. Vissa misstankar har riktats mot den s k Fertscheffekten.

I senare undersökningar har man försökt jämföra noggrannheten vid kontinuerlig registrering kontra diskret punktregistrering. Ebner, 1981 har gjort en jämförelse över ett testområde. Här fann man att kontinuerlig registrering längs profiler med 20 meters avstånd mellan profilerna gav samma noggrannhet i slutresultatet som en diskret punktregistrering i ett rutnät om 60 x 60 m. I en annan undersökning av noggrannheten hos plandetaljer (Thompson, 1981) fann man att medelfelet fördubblades vid kontinuerlig registrering jämfört med punktvis diskret registrering. Man skall kanske vara försiktig med att dra alltför långtgående slutsatser ur ovannämnda siffror, speciellt som den negativa effekten av kontinuerlig registrering är beroende av topografin och hastigheten i registreringen. Det finns dock fler och mer omfattande undersökningar gjorda (Rüdenauer 1978) som pekar på samma sak, nämligen att kontinuerlig registrering har en negativ inverkan på slutresultatet jämfört med diskret registrering.

Ett vanligt argument för kontinuerlig registrering är att metoden är snabb. Enligt Ebner, 1981 är dock mätning av enkelpunkter både snabbare och noggrannare än kontinuerlig registrering. Tilläggas bör dock att Ebners undersökning är gjord i analytiska stereoinstrument.

6.2 Modellens riktighet

Vi har i detta sammanhang ett flertal modeller som används och vars riktighet bör undersökas närmare.

- i) I det perspektiviska samband som ligger till grund för den fotogrammetriska utvärderingen ingår vanligen ej korrektioner för kända systematiska fel. Möjligheterna att göra dessa korrektioner ökar avsevärt vid digital bearbetning, men är ändå sparsamt utnyttjad. Förbättrade metoder för denna typ av korrektion är alltså önskvärd. Man kan eventuellt även tänka sig att direkt ur bildmaterialet bestämma de systematiska felen (self calibration eller on-the-job calibration) och ej använda sig av i förväg kalibrerade värden.

Det finns även fel av systematisk natur i det geodetiska stödet som används vid orienteringen av modellerna. Förbättrade metoder för hantering av dessa

problem är också önskvärda.

- ii) De primärpunkter som utgör indata till beräkningarna skall vara representativa för terrängen. Detta innebär att punkturvalet är en beståndsdel i modellriktigheten. Denna faktor är dock beroende av den efterföljande databearbetningen (approximeringsalgoritmen). Det är svårt att ge några generella regler om hur primärpunkter bör väljas, men de bör kunna fånga upp terrängens brytlinjer, dess allmänna trend samt dess stokastiska brus. Betydelsen av olika metoder för punkturval är ännu ej undersökt.
- iii) Den eller de approximeringsalgoritmer man använder sig av vid beräkning av utdata är en tredje modell. Effektiviteten hos olika approximeringsmetoder är beroende av bl a valet av primärpunkter. Det finns undersökningar gjorda (Tempfli, Makarovic 1979, Rauhala 1978) där olika approximeringsmetoder har jämförts. Dessa visar inte på några större skillnader mellan de olika approximeringsmetoderna och den allmänna åsikten är att valet av approximeringsmetod är mindre viktig för fotogrammetriskt mätta digitala höjdm modeller.

6.3 Grova fel och dess inverkan

Detta är ett område där mycket arbete återstår att göra. Storleken på de grova felen varierar och de riktigt stora grova felen kan upptäckas ganska lätt med diverse kontrollåtgärder. Problemet här gäller i stället de grova fel som är av mindre magnitud. Man kan dra en parallell till metoder att eliminera grova fel vid blocktriangulering. Här kan grova fel delas in i grupperna stora grova fel, medelstora grova fel och små grova fel. De stora grova felen elimineras genom kontrollåtgärder. De medelstora och de små grova felen kräver dock någon annan metodik. En metodik är att detektera de medelstora grova felen med hjälp av robusta estimatorer och de små grova felen med datasnooping.

Rent allmänt kan sägas att detektering av grova fel i samband med digitala höjdm modeller består i att framställa kontrollritningar som granskas samt att smärre kontrollberäkningar görs. Avsaknaden av mer sofistikerade kontrollmetoder beror delvis på avsaknaden av en sofistikerad terrängklassificering, dvs en matematisk beskrivning av någon av terrängens egenskaper. En skillnad mellan mätta höjder och förväntade resultat enligt terrängklassificeringen kan bero på grovt fel i mätdata eller ett fel i terrängklassificeringen. Detta bör ge upphov till kontroll. Eftersom någon sådan mer sofistikerad metod för felsökning ej existerar i dag är det svårt att uttala sig om den praktiska nyttan av en sådan metod. Man kan dock slå fast att förbättrade metoder för detektering av grova fel är önskvärt och att ovan beskrivna sofistikerade metod är teoretiskt möjlig.

För alla programsystem och ADB-system är datastrukturen av stor betydelse. Kraven på datastrukturen varierar beorende på var i arbetsprocessen man befinner sig. De krav som kan vara aktuella att ställa på digitala höjdm modeller och som har betydelse för datastrukturen är följande (Spliid 1981, Nachmens 1977).

- i) Kort söktid.
 Detta krav är väsentligt för systemets effektivitet. I vissa fall räcker det med sekvensiell sökning och det ställer inga större krav på datastrukturen medan man i andra fall måste tillgripa mer sofistikerade sökmetoder.
- ii) Kompakt lagring.
 En kompakt lagring är en förutsättning för att en större databank skall bli hanterbar. En kompakt lagring är även betydelsefull vid off-line överföring av data mellan t ex stereoinstrument och dator.
- iii) Varierande datatäthet.
 Ett generellare datasystem kan ej förutsätta att data är likformigt fördelat över området. Många av de metoder för val av mätpunkter medför att data väljs beorende på terrängens form, dvs fördelningen av mätta primärpunkter blir ojämn. Detta ställer stora krav på datastrukturen för att datorns minnesutrymme skall utnyttjas effektivt.
- iv) Varierande datatyp.
 Data kan insamlas på många olika sätt (enkelpunkter, polygoner m m) och de representerar olika företeelser i terrängen (brytlinjer, områdesbegränsningar m m). Dessa uppgifter om datatyp måste kunna lagras i datorn eftersom de är av stor betydelse för vidarebehandlingen av data.
- v) Snabb uppdatering och rättning.
 Data som ingår i en digital höjdmmodell eller digital höjddatabank måste ibland ändras av olika anledningar. Det kan vara rent datafel eller så kan databanken vara inaktuell och behöva ändras. En snabb uppdaterings- och rättningsprocess är därför betydelsefull för den praktiska hanteringen av höjdmmodellen eller databanken.
- vi) Snabb presentation.
 För att bestämma innehållet i höjdmmodellen bör det finnas möjlighet till snabb presentation av statistik m m, som exempelvis antalet mätta punkter, dess rumsliga fördelning, enklare kontrollritningar m m.
- vii) Datakvalitet.
 Som tidigare nämnts kan data insamlas och bearbetas på många olika sätt. Detta medför också att data har varierande kvalitet. Vid användningen av dessa data bör därför uppgift finnas om datakvalitet. Detta är speciellt viktigt vid samkörning av flera olika digitala höjdm modeller vid databankshantering.

- viii) Backup och återstartsmöjligheter.
Vid all databehandling får man vara beredd på att de aktiva minnena förstörs i t ex en skivkrasch. Säkerhet mot denna typ av händelse kan fås genom backup som exempelvis dumpning och loggning. Man bör ha en snabb procedur för återstart av systemet efter en sådan krasch. Man bör även tänka på att förvara sina backuper på ett sådant sätt att effekten av en eventuell brand ej blir ödesdiger.
- ix) Sekretess.
Vid all databashantering ställs krav på sekretess. Detta innebär bl a att obehöriga ej skall kunna ändra i en befintlig databas.
- x) Flexibilitet.
Ett ADB-system är vanligen optimerat med avseende på en speciell tillämpning. Kraven på systemet kan dock ändras genom åren och därför bör systemet vara flexibelt i fråga om val av söknycklar m m.

Betydelsen av ovan beskrivna krav varierar i olika skeden av arbetsprocessen. Beorende på kravens betydelse varierar även datastrukturen genom arbetsprocessen. Man kan skilja på fyra olika skeden där datastrukturen varierar.

7.1 Struktur på indata

Vid överföring av indata från stereoinstrument till dator är en kompakt lagring/överföring att föredra, speciellt om överföringen sker off-line på exempelvis hållremsa. När data väl är inne i datorn kan man släppa lite grand på kravet om kompakt lagring och i stället betona andra krav som t ex kort söktid. Data lagras här på skivminne och man kan skilja mellan följande datastrukturer

- i) Data i regelbundet rutnät och triangelnät.
Lagring av data sker här exempelvis radvis i rutnätet. Eftersom antalet kolumner i rutnätet är känt så kan adressen för en godtycklig höjd i rutnätet direkt härledas, s k härledd direktadressering. Samma princip kan även utnyttjas för data i regelbundna triangelnät.
- ii) Oregelbundna enkelpunkter och oregelbundna polygoner.
Dessa data beskriver vanligen karakteristiska detaljer i terrängen och är ur programmets synvinkel sett slumpmässigt fördelade. Förutom koordinater kan även uppgift om punkttyp lagras. För att underlätta sökningen brukar man då använda sig av indexerad adressering, dvs man bildar indestabeller. Här delas vanligen området in i rutor (index) och adressen till första punkt eller polygon i varje ruta anges av indestabellen. De övriga punkterna och polygonerna i rutorna är sedan ihoplänkade med startobjektet.
- iii) Data i oregelbundna trianglar.
Dessa data består av enkelpunkter som är logiskt formerade till trianglar. Vanligen framgår denna formering av en speciell tabell, där punktnummer

(adress) för de i triangeln ingående punkterna finns angivet.

- iv) Data i lokalt förtätade rutnät eller triangelnät.
Vid s k progressiv mätning erhålls data i ett regelbundet rutnät som på vissa ställen kan vara lokalt förtätade. På liknande sätt kan man vid datareduktion av korrelationsmätningar erhålla ett liknande rutnät eller triangelnät (Gomez & Guzman 1979). Eftersom det övergripande nätet är regelbundet samt att den lokala förtätningen följer vissa klart definierade procedurer så är det här lämpligt att lagra data i en s k trädstruktur.

7.2 Struktur på beräknad höjdmödel

Genereringen av den digitala höjdmödeln består vanligen i att en approximeringsalgoritm beräknar höjder i ett regelbundet rutnät. I så fall lagras dessa approximerade höjder på ovan beskrivet sätt. I vissa fall kan även andra typer av data ingå i höjdmödeln, t ex brytlinjer och/eller ett oregelbundet triangelnät. Även här kan man välja en ovan beskriven struktur. Det är alltså inga nya förslag på strukturer som anges här, men för ett enskilt program kan strukturen ändras. Det finns dock förslag på att en annan datastruktur bör användas (Mark 1979). Han anser att datastrukturen skall anpassas "till användarna av den digitala höjdmödeln, s k "Phenomenon-based data-structure"". Detta kan dock med tanke på de digitala höjdmödelernas mångsidighet i fråga om utdata vara rätt svårt att genomföra och det ges heller ej några förslag på dessa "mer användarnära" datastrukturer.

7.3 Struktur på utdata

Utdata från en digital höjdmödel är vanligen resultat av massberäkningar eller styrinformation till en ritmaskin eller ortofotoprojektor. I fråga om styrinformation är data vanligen sekvensiellt sorterade som exempelvis x, y-koordinater för höjdkurvor till ritmaskinen eller bildkoordinater till ortofotoprojektorn.

7.4 Struktur hos lagrad databank

I dessa dagar är det allt fler av de offentliga förvaltningarna som lägger upp sina kartverk i form av digitala kartdatabanker. Hur en lämplig struktur på sådan bank bör se ut är hittills ej tillräckligt behandlat. Lagringen sker här vanligen på magnetband som man vid uppdatering e d laddar på skivminne. Databankerna är t ex sorterade filvis efter kartblad och skivminnesfilerna är dumpade på magnetband. Detta skapar systembeorende databanker, vilket ej behöver vara någon större nackdel. Ett problem med digitala kartdatabanker är specificeringen av innehållet. Det kan vara väldigt svårt att förutse vilken typ av information som bör ingå och en ändring av innehållet kan vara både tidsödande och kostsamt. Det är även kostsamt att lagra

överflödlig information. Detta medför att kravet på flexibilitet bör sättas högt i detta sammanhang. Detta i sin tur medför att databankens informationsmängd bör vara samlad till ett fåtal filtyper. Således bör indexfiler o d ej innehålla egen information utan endast information som är härledbar ur andra poster. Detta för att en ändring av sökbegreppen skall beröra ett minimalt antal filer.

8 SAMMANFATTNING AV UTVECKLINGSTENDENSERNA OCH SLUTSATSER

I de tidigare avsnitten har vissa tekniska egenskaper hos digitala höjdmodeller och därtill hörande frågeställningar diskuterats, som fotogrammetriska instrument, metoder för punktval, beräkningssteg vid databearbetningen, applikationer och datastrukturer. Vidare har statusen hos nuvarande moderna programsystem och de aktuella utvecklingstendenserna berörts. Här nedan följer en sammanfattning av denna diskussion.

8.1 Fotogrammetriska instrument

De flesta instrument som används i dag är s k manuella analoginstrument, dvs de styrs av en operatör och terrängen rekonstrueras optiskt-mekaniskt. Nyutvecklingen består här främst i utvecklandet av halvautomatiska analytiska stereoinstrument, dvs instrument som styrs av en operatör och en dator och där terrängen rekonstrueras analytiskt. Dessa instrument ger en väsentligt höjd produktivitet, men de är också förhållandevis dyra. Detta är en av orsakerna till att anskaffningen av sådana instrument har varit blygsam här i Sverige. Däremot kan de billigare men ej lika noggranna versionerna bli attraktiva för kartproduktion i Sverige. Utveckling av sådana andra ordningens analytiska stereoinstrument väntas ske under den kommande fyraårsperioden.

8.2 Val av mätpunkter

Standardmässigt används ett antal metoder för val av mätpunkter (gittermätning, profilmätning, selektiv mätning mm). Vanligt är dock att endast en metod för punktural används åt gången. Kombinerad av metoder (sammansatt mätning) är något som har börjat användas först på senare tid. Här är det främst gittermätning som kombineras med selektiv mätning av brytlinjer.

En metod för val av mätpunkter som är speciellt anpassad till de analytiska stereoinstrumenten har utvecklats av B Makarovic och K Tempfli. Denna metod kallas för progressiv mätning och består av en datorstyrd successiv förtätning av mätpunkter i de områden där terrängens nivåvariationer är stora. Det förslag om interaktiv mätning och kontroll som har kommit från institutionen för fotogrammetri vid KTH är också ett led i samma riktning, nämligen metoder för att kontrollera indata redan vid måttillfället, så att dessa är så kompletta och riktiga som möjligt. Det finns ett antal organisationer som har sina stereoinstrument direkt anslutna till ett IGS-system. I dessa fall används dock instrumenten endast för plankartering, något som IGS-systemens programvara kan hantera. Vi har ej funnit någon organisation som mäter digitala höjdmodeller interaktivt mot ett IGS-system, ej heller har vi funnit något IGS-system som klarar detta på ett tillfredsställande sätt.

Detta ämnesområde, dvs val av mätpunkter, är för närvarande

uppmärksammat av en arbetsgrupp inom internationella sällskapet för fotogrammetri och fjärranalys (ISPRS). Denna arbetsgrupp studerar effekten av olika metoder för punktval genom ett internationellt experiment, lett av professor K Torlegård vid institutionen för fotogrammetri vid KTH.

8.3 Databearbetning

Vad avser utvecklingen av beräkningsalgoritmer har det ej hänt så mycket de senaste åren. Vissa nya approximeringsmetoder har dock konstruerats som exempelvis finita elementmetoder.

De flesta av de äldre systemen är ursprungligen skrivna för stordator. Detta har medfört att beräkningarna oftast sker i sk batch-processing, dvs man har en eller flera indatafiler, exekverar programmet och får sina utdata. Efter som beräkningarna är rätt så omfattande är det fortfarande ett naturligt sätt att arbeta på. De senaste årens utveckling mot kraftfulla minidatorer har medfört att programmen har börjat läggas över på denna typ av datorer. Det finns numera även programsystem som är direkt konstruerade för minidator (Ebner et al 1980). Vissa smärre program finns även på bordsdatorer. En utvecklingstendens är således att programmen exekveras på mindre datorer. Däremot är fortfarande exekveringsformen batch. Viss realtidsbearbetning kan dock förekomma, som t ex ändringar i indatafiler o d.

8.4 Databanker och datastrukturer

Denna utveckling bedrivs ej av fotogrammetriker i någon större omfattning utan snarare av dataspecialister. De fotogrammetriska och kartografiska insatserna består här främst i tillämpning av utvecklade metoder och system. Viss nyutveckling kan dock förekomma, av t ex sökningsalgoritmer, sorteringsalgoritmer samt konstruktion av filhanterings-system. Ett utvecklande av databashanteringssystem ombesörjes dock av dataspecialister. Ur kartografisk och fotogrammetrisk synpunkt är dock applikationerna av dessa system av intresse. Det som här tilldrar sig det största intresset är utvecklandet av digitala kartdatabanker. Det är här främst plankarteringen som är av intresse i Sverige men även höjdinformationen är av intresse.

8.5 Terrängklassificering

Ett av problemen vid mätning av digitala höjdmodeller är att bedöma effekten på noggrannheten som ett visst val av mätpunkter. Det finns ett antal tumregler men önskvärt vore att en mer utvecklad form av samband kunde framställas. Genom att ställa upp en modell för sambandet mellan t ex mätnoggrannhet, terrängtyp, punkttäthet och höjdmodellens noggrannhet kan man för en viss terrängtyp och noggrannhetskrav bestämma en ekonomiskt optimal datainsamling (Jacobi 1980 och Frederiksen 1980).

8.6 Noggrannhet

Noggrannheten kan delas upp i begreppen precision, modellriktighet och inverkan från grova fel. Precisionen i en fotogrammetrisk mätning är främst beorende av flyghöjd och instrument. Man kan konstatera att utvecklingen på instrumentsidan nått en hög precision i de befintliga instrumenten. Vad gäller modellriktigheten så består utvecklingen främst i ökade möjligheter för korrektion av systematiska fel samt förbättrade metoder för val av mätpunkter (se avsnitt 3.2). Däremot har jämförelser visat att skilda typer av approximeringsmetoder ej leder till någon signifikant skillnad i slutresultatet. Vad gäller detektering av grova fel görs det i allmänhet genom kontrollritningar o d. En mer sofistikerad metod saknas liksom metoder för uppskattning av inverkan från de ej detekterade grova felen. Inga teorier och metoder finns här föreslagna ännu vad gäller digitala höjdmodeller mätta i stereoinstrument. Viss automatisk felsökning förekommer dock vid användning av korrelatorer.

8.7 Slutsatser

Det arbetsmässigt mest omfattande momentet vid digital kartering i allmänhet är datainsamlingen. Vid all mättningsverksamhet görs s k grova fel vilka skall elimineras ur datamaterialet. Vid datainsamlingen görs därför normalt överbestämningar så att kontroller mot grova fel kan göras samt så att eliminering av grova fel ej medför att datamaterialet blir ofullständigt. Denna kontroll mot grova fel göres vanligen i samband med övriga beräkningar och ej vid måttillfället. Kontroll av mätdatas fullständighet görs vid datainsamlingen men den kontrollen är oftast mycket bristfällig. Det föreligger således ett stort behov av att redan vid måttillfället bättre kunna kontrollera fullständigheten i mätdata samt att lokalisera och eliminera eventuella grova fel.

I Holland är ett system under utveckling som behandlar denna problemställning, s k progressiv mätning. Här görs kontrollen av en dator som styr insamlingen av mätdata. Den av institutionen för fotogrammetri föreslagna metoden om interaktiv grafisk kontroll av mätdata är en vidareutveckling av den progressiva mätningen i och med att operatören får ökade möjligheter att inspektera sina mätdata och själv föreslå förtätning av mätpunkter. Det skall dessutom tilläggas att den progressiva (holländska) mätningen är datorstyrd och det medför att den är svår att tillämpa på vanliga analoga stereoinstrument som är den dominerande instrumenttypen i Sverige. Eftersom något system för interaktiv mätning av digitala höjdmodeller ej existerar för närvarande, vore det av stort vetenskapligt värde om en sådan metod kunde utvecklas. Genom att den även bedöms betydligt reducera felsökning i senare skeden bör den komma att bli ett ekonomiskt attraktivt hjälpmedel vid datainsamling till digitala höjdmodeller.

En stor del av arbetet i detta projekt har bestått av litteraturstudier. Nedan ges här en förteckning över de rapporter och artiklar som har bearbetats och bedömts vara relevanta i sammanhanget. Litteratursökningen har skett dels i databaser och dels via litteraturreferenser. Den datorbaserade litteratursökningen har genomförts vid Kungliga tekniska högskolans bibliotek (KTHB) genom dess Informations- och dokumentationscentral (IDC) samt vid BYGGDOK. Sökningen har varit dels retrospektiv (återblickande) och dels har nyinkomna litteraturreferenser kontinuerligt genomförts med hjälp av en sökprofil.

Det bör påpekas att nedanstående bibliografi ej är fullständig. Det finns ett ytterligare antal publikationer som behandlar detta ämnesområde men dessa har ej blivit studerade på grund av tidsbrist. Ämnesområdet är nämligen så pass vidsträckt att en fullständig täckning av litteraturen skulle vara ett mycket omfattande arbete. Tonvikten har i stället lagts vid de fotogrammetriska problemställningarna och förhoppningsvis kan nedanstående bibliografi tjäna som en startpunkt för vidare fördjupning inom ämnesområdet.

- Ackermann F, 1976. Kurzbericht über das Stuttgarter Schichtlinienprogramm (SCOP). Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH Karlsruhe
- Ackermann F, 1978. Experimental investigation into the accuracy of contouring from DTM. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 44, No 12
- Allam M M, Wong C K, 1976. Gridding topographical surfaces. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Allam M M, 1978. DTM application in topographic mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 44, No 12
- Allam M M, 1980. Software package for the contouring of massive DEM in a minicomputer environment. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Arnberg W, 1981. Integrering av kartor och fjärranalysdata. Svensk lantmäteritidskrift, nr 3
- Ayeni O O, 1976. Objective terrain description and classification for digital terrain models. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Ayeni O O, 1979. Optimum least squares interpolation for digital terrain models. Photogrammetric Record, 9 (53), april
- Assmus E, 1976. Extension of Stuttgart contour program to treating breaklines. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors

- Bengtsson T, Jörgensen L T, 1980. An automatized small scale mapping project - a preliminary report. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Bauhuber F, Erlacker V, Günther P. Ein Programmsystem für die Behandlung digitalen Höhenmodelle. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3 (43)
- Blachut T J, 1979. A Brief History of the ANAPLOT. The Canadian Surveyor, Vol 33, No 2
- Boehm B W, 1967. Tabular representation of multivariate functions with application to topographic modelling. Assoc for Computing Machinery, 22nd Nat Conf Proc
- Bopp D, 1975. Konzept für ein Verbundsystem verschiedener digitaler Geländemodelle. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3 (43)
- Bopp D, 1976. Digitales Geländemodell für den Strassenentwurf. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Bosman E R, Eckhart D, Kubik K, 1972. Delft - A Programme System for Surface Approximation. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 1 (40)
- Corcodel G, Ionescu I, 1980. Digital terrain model in levelling plotting on large scale topographic maps. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Danko J O, 1980. The versatility of the Kelsh K-320 ORTHOSCAN with the DIM converter. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Dorrer E, 1975. Gedanken zum digitalen Geländemodell. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3 (43)
- Doyle F J, 1978. Digital terrain models. An overview. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 44, No 12
- Doytsher Y, Shmutter B, 1980. Adjustment of overlapping areas in neighbouring models. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Ducholm K S, 1979. Geological and topographic mapping from aerial photographs. Instituttet for landmåling og fotogrammetri, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse nr 10
- Eberhard, 1976. Das DGM der R + Z - GmbH. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Ebner H, Hofmann-Wellenhof B, Reiss P, Steidler F, 1980. HIFI - A minicomputer program package for height interpolation by finite elements. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Ebner H, 1981. Erfahrungen mit dem Programmpaket HIFI. Vortrag nr 16, 38. Photogrammetrische Woche, Stuttgart
- Elfick M H, 1979. Contouring by use of a triangular mesh. The Cartographic Journal, 16 (1)

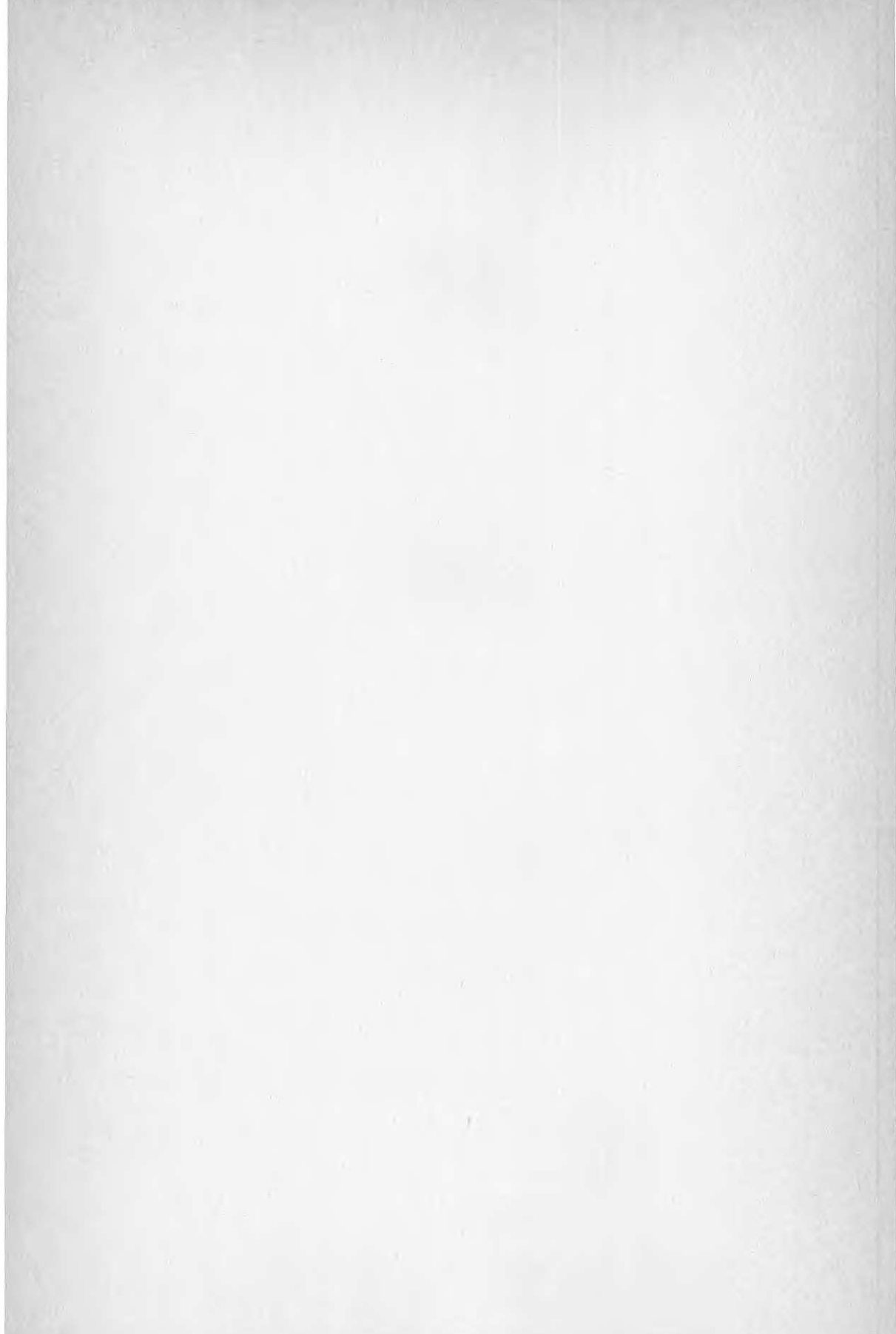
- Frederiksen P, 1979. Boundary problems in digital terrain models. Instituttet for landmåling og fotogrammetri, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse nr 10
- Frederiksen P, 1980. Terrain analysis and accuracy prediction by means of the Fourier transformation. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Ghosh S K, Ayeni O O, 1977. Digital terrain and differential mapping. Report no 260 of the Department of Geodetic Science, The Ohio State University
- Gomez D, Guzman A. Digital model for three-dimensional surface representation. Geoprocessing vol 1, No 1
- Gottschalk H J, Neubauer H G, 1975. Herstellung eines digitalen Höhenmodells. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 3 (43)
- Göpfert W, 1977. Interpolation mit der multiquadratischen Methode. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 10 (102)
- Hallert B, 1964. Fotogrammetri. Nordstedt och Söner, Stockholm
- Hallmen B, Augusen B, Swärd L E, Segnestam B, Levander G, Syverstad C, 1976. Das digitale Geländemodell - Ein Standardisierungsvorschlag. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Hannah M J, 1979. Error detection and rectification in digital terrain models. Jt proc of the ASP-ACSM, Falls Church Va
- Hardy R L, 1977. Least squares prediction. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 43, No 4
- Helava U V, 1957-58. New principle for photogrammetric plotters. Photogrammetria, Volume XIV
- Heupel G, 1976. Das Anwendungsprogramm DGM in Kommunikations- und Datenbanksystem GEOMAP. Bericht zum CAD-Seminar. Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Hoborough G L, 1959. Automatic stereo plotting. Photogrammetric Engineering
- Jacobi O, 1979. A digital terrain model based on arbitrary profile data. Instituttet for landmåling og fotogrammetri, Danmarks Tekniske Højskole, Meddelelse nr 10
- Jacobi O, 1980. Digital terrain model, point density, accuracy of measurements, type of terrain and surveying expenses. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Jancaitis J R, Junkins J L, 1973. Modelling Irregular Surfaces. Photogrammetric Engineering, No 4
- Kager H, 1976. Numerische Aspekte der Interpolation nach kleinsten Quadraten. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 9 (101)

- Knuth D E, 1973. The Art of Computer Programming, Vol 3, Sorting and Searching. Addison-Wesley publishing Company
- Kratky V, 1980. Spectral analysis of interpolation. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Kraus K, 1972. Interpolation nach kleinsten Quadraten in der Photogrammetrie. Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 1 (40)
- Kraus K, 1973. Ein allgemeines digitales Geländemodell. Numerische Photogrammetrie, Herbert Wichman Verlag, Karlsruhe
- Kraus K, 1981. Anforderungen and das Digitale Höhenmodell aus der Sicht des Anwenders. Vortrag nr 17, 38. Photogrammetrische Woche, Stuttgart
- Kubik K, Botman A G, 1976. Interpolation Accuracy for Topographic and Geological Surfaces. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Langer F T, 1976. Programmsystem zur digitalen Speickering und Auswertung von beliebigen dreidimensionalen Messungen mit Hilfe von Polynominterpolationen. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Larsson J, 1980. Rectification of digital images for remote sensing analysis. Fotogrammetriskä meddelanden nr 2:43, Institutionen för fotogrammetri, KTH, Stockholm
- Leberl F, 1976. Interpolation mittels Stützpunktgruppen unterschiedlichen statistischer Eigenschaften. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 9 (101)
- Leberl F, Kropatsch W, Lipp V, 1980. Interpolation of raster heights from digitized contour lines. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Leupin M M, Chukaoui M, 1980. The use of an automatically generated DTM for mapping at different scales. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Lindig G, 1978. Automatic data acquisition for digital height models. Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe II, Heft no 36, Frankfurt a M
- Makarovic B, 1979. From progressive to composite sampling for digital terrain models. Geoprocessing, Vol 1, No 2
- Makarovic B, 1980a. Automatic off-line generation of digital terrain models. Working group paper of the Comm II, WG 3, of the ISP, presented at the XIV Congress, Hamburg
- Makarovic B, 1980b. Image Correlation Algorithms. Presented paper to the Comm II of the ISP at the XIV Congress, Hamburg

- Marckwardt W, 1976. Digital filtering of profile data.
Presented paper to the Comm II of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Mark D M, 1975. Computer analysis of topography:
A comparison of terrain storage methods. *Geografiska Annaler*, 57 A
- Mark D M, 1979. Phenomenon-based data-structure and digital terrain modelling. *Geoprocessing*, Vol 1, No 1
- de Masson d'Autmue G, 1979. Surface modelling by means of an elastic grid. *Photogrammetria*, 35 (2)
- McCulloch M J, Ross C G, 1980. Delaunay triangulation of a random data set for isarithmic mapping. *The Cartographic Journal*, Vol 17, No 2
- Melamed I, 1976. Praktisch Anwendungen des MBB-Programmsystems DGM. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Nachmens S, 1977. Datasystem och datorsystem. Studentlitteratur, Lund
- Ottoson L, 1981. Översikt över utrustning för grafisk inmatning. *Sigrad, bulletin nr 13*
- Palm R, 1975. Numeriska terrängmodellens användbarhet. *Byggforskningen, anslagsrapport 654:6*, Stockholm
- Palmqvist S, 1970. Erfarenheter från användningen av numerisk terrängmodell i stadsbyggandet. Svenska kommunal-tekniska föreningen, handlingar, Stockholm
- Panton D J, 1978. A flexible approach to digital stereo mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 44, No 12
- Rapior L, Bopp D, 1975. Weiterentwicklung des Programmes „Auswertung digitales Geländemodell“. *Bildmessung und Luftbildwesen*, Heft 3 (43)
- Rapior L, 1976. DV-technische Überlegungen zum Digitalen Geländemodell. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung, MBH, Karlsruhe
- Rauhala U A, 1976. Digital terrain data compaction using array algebra. *DBA Systems Inc, Melbourne, Florida*
- Rauhala U A, 1978. Array algebra DTM. Presented paper to the symposium on digital terrain models, St Louis
- Rauhala U A, 1980. Experimental array algebra modelling algorithms. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Richardus P, 1973. The precision of contour lines and contour intervals of large- and medium-scale maps. *Photogrammetria*, No 3, Vol 29
- Rüdenauer H, 1978. Problemanalyse und Untersuchungen zur zweckmässigsten photogrammetrischen Datenerfassung für die digitale Verarbeitung zu strassenbahnlichen Zwecken. *Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen, Technische Universität Hannover*

- Rüdenauer H, 1980a. Analytische Plotter-Programme zur Objektiven On-Line Punktdichtenbestimmung in Digitalen Höhenmodellen. Presented paper to the Comm II/IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Rüdenauer H, 1980b. Experimentelle Genauigkeitsanalyse Digitalen Höhenmodellen. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Schagen I P, 1980. The use of stochastic process in interpolation and approximation. Intern J Computer Math, section B, vol 8
- Schilcher M, 1977. A comparison of the accuracy of several contour plots of the Söhnstetten test field. Proceedings of the 36th Photogrammetric Week, Stuttgart
- Schult R, 1976. Digitales Höhenmodell. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Schulze K H, 1976. Anforderungen an das DGM aus der Strassenvermessung. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Schut G H, 1976. Review of interpolation methods for digital terrain models. Invited paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Simonsson G, Westermark E, Wiberg B, 1980. Digital mapping. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Simonsson G, 1981. Storskalig halvautomatisk fotogrammetrisk kartering (SHAFK). Rapport nr R86:1981, Bygghögskolestyrelsen, Stockholm
- Spliid A M, 1981. Digitale terren modeller - deres opbygning og anvendelser. Meddelelse nr 11, Institut for landmåling og fotogrammetri, Danmarks Tekniske Højskole
- Stanger W, 1973. Das Stuttgarter Höhenlinienprogramm - Beschreibung und Ergebnisse. Numerische Photogrammetrie, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe
- Stanger W, 1976. The Stuttgart contour program SCOP - Further development and review of its application. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIII Congress, Helsingfors
- Strauss, 1976. Wiesbadner Topografisches Zeichenprogramm. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Stüttgen W, 1977. Das Digitale Geländemodell - Entstehung, Entwicklung und Anwendungsmöglichkeiten. Festschrift zur Emeritierung von O prof dr techn Fritz Löschner, Aachen
- Talts J, 1981. Sambearbetning av fjärranalysdata och kartdata. Svensk lantäteritidskrift, nr 3
- Tempfli K, Makarovic B, 1979. Transfer functions of interpolation methods. Geoprocessing, Vol 1, No 1
- Tempfli K, 1980. Spectral analysis of terrain relief for the accuracy estimation of digital terrain models. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg

- Thacker W C, 1979. An improved triangulation algorithm. *Appl Math Modelling*, 3 (6)
- The ASP DTM Symposium, May 9-11, 1978. The future of DTM-panel discussion. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol 44, No 12
- Torlegård K, 1972. Digital Terrain Models - General Survey and Swedish Experiences. *Bildmessung und Luftbildwesen*, Heft 1 (40)
- Torlegård K, 1981. Photogrammetry and digital elevation models, present status of development and application. Invited paper to the 38th photogrammetric week, Stuttgart
- Völker, 1976. Automatische Dreiecksmaschenbildung und Massen zwischen Horizonten. Programmsystem für die Bauabrechnung mit digitalen Gelände- und Flächenmodell. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Weber, 1976. Datenstruktur eines Digitalen Geländemodells. Bericht zum CAD-Seminar, Gesellschaft für Kernforschung MBH, Karlsruhe
- Wild E, 1980. Interpolation with weight-functions - a general interpolation method. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Winter V, 1980. Vergleich Digitaler Geländemodelle. Presented paper to the Comm IV of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Xianlin L, 1980. An introduction to computer-controlled digital mapping system. Presented paper to the Comm III of the ISP at the XIV Congress, Hamburg
- Zaitsev V M, Lavrova V S, Chigirev A A, 1973. Use of a Digital Computer to Construct Isoline Maps Based on a Stereomodel of Terrain. *Geodeziya i kartografiya*, no 4. Translated to English by National Technical Information Service (NTIS), US Department of Commerce, Springfield, Va.



Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
801101-6 från Statens råd för byggnadsforskning
till institutionen för fotogrammetri, KTH, Stockholm.

R39: 1982

ISBN 91-540-3680-1

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700539

Abonnemangsgrupp:
X. Samhällsplanering

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirkapris: 25 kr exkl moms