

13 DIGITAL PROJEKTERING

Erik Kjems, Aalborg Universitet

13.1 Indledning

Den traditionelle vejprojektering, som igennem flere årtier fremherskende blev foretaget ved hjælp af tegnemaskiner og til dels lommeregner og edb-kørsler, er helt eller delvist afløst af projektering på grafiske arbejdsstationer, hvor tegninger og beregninger er integreret i større programsystemer. Denne form for projektering kaldes CAD (Computer Aided Design).

Projektering med CAD-systemer kræver et digitalt datagrundlag og en helt anden forståelse for projektet som rumlig model. I det følgende beskrives, hvilke muligheder der er for at fremskaffe et digitalt datagrundlag, og hvorledes disse data bearbejdes for at skabe en rumlig datamodel. Den rumlige datamodel benyttes til den egentlige projektering i henholdsvis to og tre dimensioner. Resultatet er ofte de traditionelle tegninger, såsom plantegninger, længdeprofil og normaltværsnit samt massekurve/massedigram eller detailtegninger i forskellige målestokke. Det digitale slutprodukt kan også omfatte beregningslister af forskellig art, digitale afsætningsdata og være grundlaget for en præsentation med 3D visualiseringsprogrammer.

13.2 Datagrundlaget

Til etablering af det digitale kortmateriale kan følgende metoder benyttes:

- Opmåling i marken med en totalstation
- Fotogrammetrisk opmåling
- Digitalisering (direkte på skærmen eller med et digitaliseringsbord)
- Manuel indtastning af koordinater.

Til opmåling i marken benyttes ofte et vektormeter (teodolit med elektronisk distancemåler) og en registreringsenhed (lille computer til opsamling af data), hvilket tilsammen betegnes en totalstation, se figur 13.1.

Denne form for opmåling har meget høj præcision. En typisk punktnøjagtighed ligger indenfor en cm, og benyttes kun på mindre projekter fx igennem byområder eller ved ombygning af eksisterende veje, hvor nøjagtigheden især er krævet ved opmåling af vejens belægningskant. Dette digitale kort, der herved fremstilles, betegnes



Figur 13.1 Totalstation.

også et vektorkort, idet alle linier i kortet kan beskrives matematisk ved en vektor.

Mange strækninger er opmålt på forhånd i forbindelse med berigtigelsen af landevejsplaner, efter at anlægsarbejdet er udført. Landevejsplaner benyttes især på amts- og statsveje, idet de her danner kortgrundlaget, typisk i mål 1:1000, og følger vejens kilometrering med typisk 1 km pr. plan. Men selvom disse opmålinger igennem mange år er foretaget digitalt med et vektormeter, så mangler ofte højden som den meget vigtige tredje dimension. Det er især anlægsarbejder for broer og veje, som kræver meget høj præcision i det digitale kortmateriale. Dette gælder også for højdeinformationer. Ved den produktion af digitalt kortmateriale, som har fundet sted gennem de sidste 10 til 20

år, har der ikke været taget hensyn til dette. Det vil derfor næsten altid være nødvendigt at måle projektområdet op ved opstart af et projekt i forbindelse med anlægsarbejder. Selvom der skulle foreligge et digitalt kort, er der almindeligvis alligevel behov for at foretage supplerende opmålinger og ajourføringer.

Ved større projekter anvendes kort fremstillet fotogrammetrisk. Det vil sige, her danner flyfotooptagelser grundlaget for en elektronisk registrering. Denne form for opmåling er mindre præcis. En typisk punktnøjagtighed ligger her mellem 0.5 og 1.0 m. Til gengæld er det muligt at producere et digitalt kort over selv meget store områder på relativ kort tid. Detaljeringsgraden er knap så stor ved den fotogrammetriske opmåling, men tilstrækkelig for de fleste skitseprojekter.

En anden mulighed for at opnå et digitalt datagrundlag er en digitalisering af eksisterende kort og planer. Digitaliseringen kan foretages med håndkraft ved hjælp af et digitaliseringsbord, som findes i mange størrelser fra A4 til A0. Tegningen placeres på bordet og transformeres via paspunkter, som er koordinerede punkter i tegningen, til System 34. System 34 er det koordinatsystemet, der anvendes i Danmark med X- og Y-akserne pegende henholdsvis mod vest og nord. Systemet er defineret således, at det geodædiske punkt på Agri Baunehøj på Mols har koordinaterne $(x, y) = (200.000 \text{ m}, 200.000 \text{ m})$.

Herefter gentegnes alle linier, der har interesse. Digitaliseringen kan med fordel udføres direkte på skærmen, idet metoden her principielt er den samme, blot ligger vejplanen som baggrundsbillede på skærmen. Selve projekteringen kan også foregå direkte på skærmen med billedet som baggrund uden en forudgående digitalisering af eksisterende kørebanekanter m.m. Herved bliver nøjagtigheden ikke mindre, men selve projektet kan godt virke mindre overskueligt. Tegnede linier kan på det nærmeste drukne i billedet, idet liniernes farver kan være meget lig de farver og nuancer, der er i billedet.

En anden form for digitalisering er en vektorisering af en scannet vejplan. Det er en automatisk proces, hvor et billedbehandlingsprogram selv tolker de forskellige linier med tykkelse og type. Således omdannes et billede til linier og punkter (vektorer), der herved bliver til objekter, som kan håndteres i et CAD-program. Metoden kan bruges i mange sammenhænge, men kræver ofte en del redigering efterfølgende, og nøjagtigheden bliver aldrig bedre end den originale vejplan. Fordelen er, at selv gamle vejplaner kan foreligge digitalt i to dimensioner på relativ kort tid.

Et gennemgående træk ved disse opmålingsmetoder er brugen af temakoder. Disse er meget væsentlige, når data skal kunne adskilles i et edb-program. Når vi som mennesker med synssansen intakt ser på et kort trykt på papir eller tegnet på skærmen, er vi ikke i tvivl om,

hvad det er vi ser. Således vil en kørebanekant tydeligt fremstå som den ene side af vejen, og et hus utvetydigt være beskrevet ved dets omrids. En edb-maskine kan ikke umiddelbart skelne blandt disse forskellige elementer og må derfor have hjælp i form af temakoder.

Temakoden knyttes til hvert opmålte element. Temakoden er entydig og vil normalt kunne tolkes af CAD-systemet. Temakoden benyttes især ved udveksling af data. I Danmark har man valgt en standard, der hedder DSFL (Dansk Selskab for Fotogrammetri og Landmåling). Fx er temakoden for en belægningskant "KG3 U16", og et hus målt ved tagudhæng har koden "KG4 U1". Temakoder beskrevet efter DSFL er opdelt i hovedgrupper og undergrupper, jvf. (1) for en nærmere beskrivelsen af DSFL-formatet.

Temakoder genskabes som en lagstruktur i CAD-systemerne. Således vil det være muligt at deaktivere lag, der ikke har nogen betydning for projektet og at aktivere lag, der er væsentlige. Deaktivering af lag har den fordel, at der er færre detaljer, som skal tegnes på skærmen med højere udtegningshastighed til følge. Hvilke lag, der er væsentlige, og hvilke der er mindre væsentlige, varierer over projekteringsfaserne.

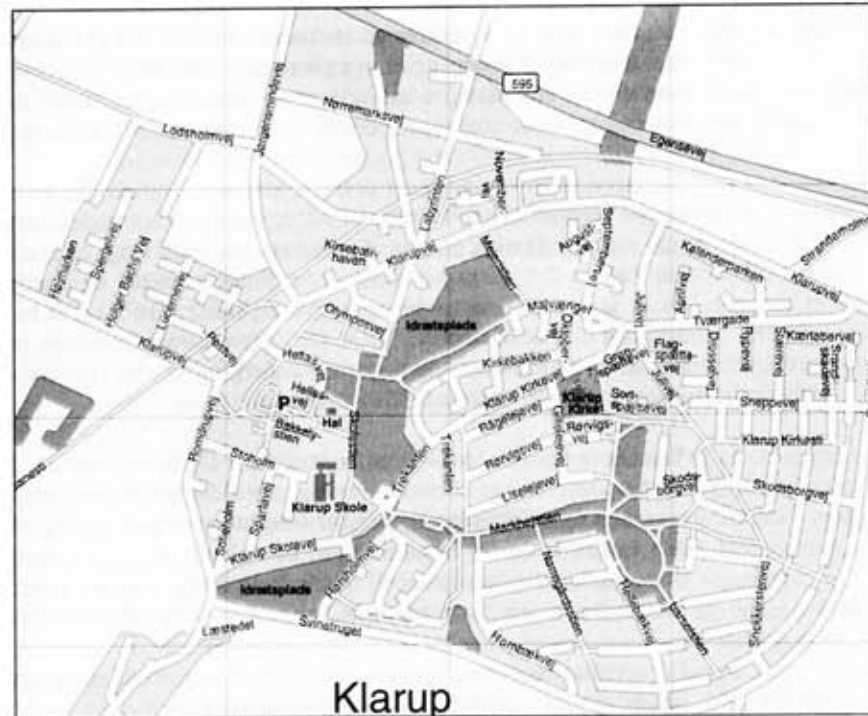
De opmålte elementer opdeles i tre objekttyper, hvad enten opmålingen er sket i marken eller fotogrammetrisk:

- Punkter
- Linier
- Flader.

Punkterne og linierne danner grundlaget for den digitale projektering. Deres præsentation på skærmen bliver som nævnt bestemt af temakoderne, hvorved punkter markeres med forskellige markeringssymboler, såsom en lysmast eller nedløbsrist. Linier beskrives ved forskellige farver/stregtykkelser og forskellige linietyper, såsom stregprik eller stregprik-linier. Fladerne derimod benyttes ikke som egentlige elementer, men indgår kun som lukkede polygoner. Definerede flader benyttes typisk i GIS-systemer, hvor der knyttes data til disse enheder, og der gives mulighed for en farvelægning.

13.3 Digitale kort i to dimensioner

Det digitale kortgrundlag kan være på enten rasterform eller vektorform. Således er rasterformen fx det billede som kunne benyttes som baggrund ved projekteringen og vektorformen tegningen af linier og punkter i CAD-systemet. På figur 13.2 ses for samme område i Aalborg et udsnit af henholdsvis et rasterkort (Kraks vejviser) og et vektorkort (kommunens tekniske kort).



Figur 13.2 Rasterkort og vektorkort over samme område (2) og (3).

Benyttes rasterkort ved projekteringen har man definitivt ingen højdeinformationer. Accepterer man små afvigelser, er disse heller ikke nødvendige ved projekteringen i planet. Højdeinformationer er derimod uundværlige ved projektering af fx. længdeprofilet og ved tværsnitsberegninger. Et rasterkort er let og hurtigt at fremskaffe, idet både satellit- og flyfoto kan indgå. Tendensen er klart, at der indtages flere og flere billeder ved planlægningen og projekteringen.

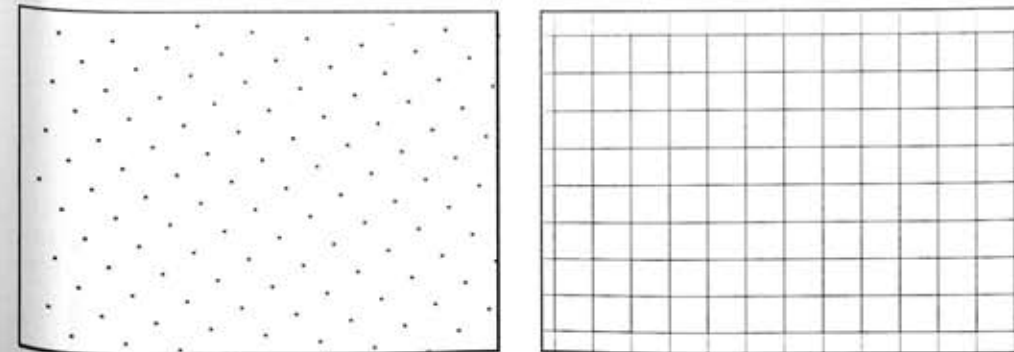
Vektorkortet er væsentligt dyrere at fremskaffe, hvis man selv skal producere kortet. Danmark er efterhånden godt dækket ind med både almindelige tekniske vektor kort, som primært naturgas-selskaberne producerede i 80'erne, og matrikulære kort, som Kort- og Matrikelstyrelsen har færdiggjort i 1997.

13.4 Digitale højdemodeller

I stedet for at tale om digitale kort i tre dimensioner skal det følgende handle om digitale højdemodeller eller rettere terrænmodeller. Grundlaget herfor fremskaffes enten ad fotogrammetrisk vej eller ved digitalisering af højdekurver, som tidligere omtalt.

Udgangspunktet er således punkter og linier med z-koordinater eller rettere sagt koter. Disse i sig selv giver ikke nogen terrænmodel, idet en terrænmodel kræver et sammenhængende net af linier og knuder. I et sådant net er det meget let og præcist at interpolere sig frem til en kote for et hvilket som helst punkt i planen indenfor nettets grænser.

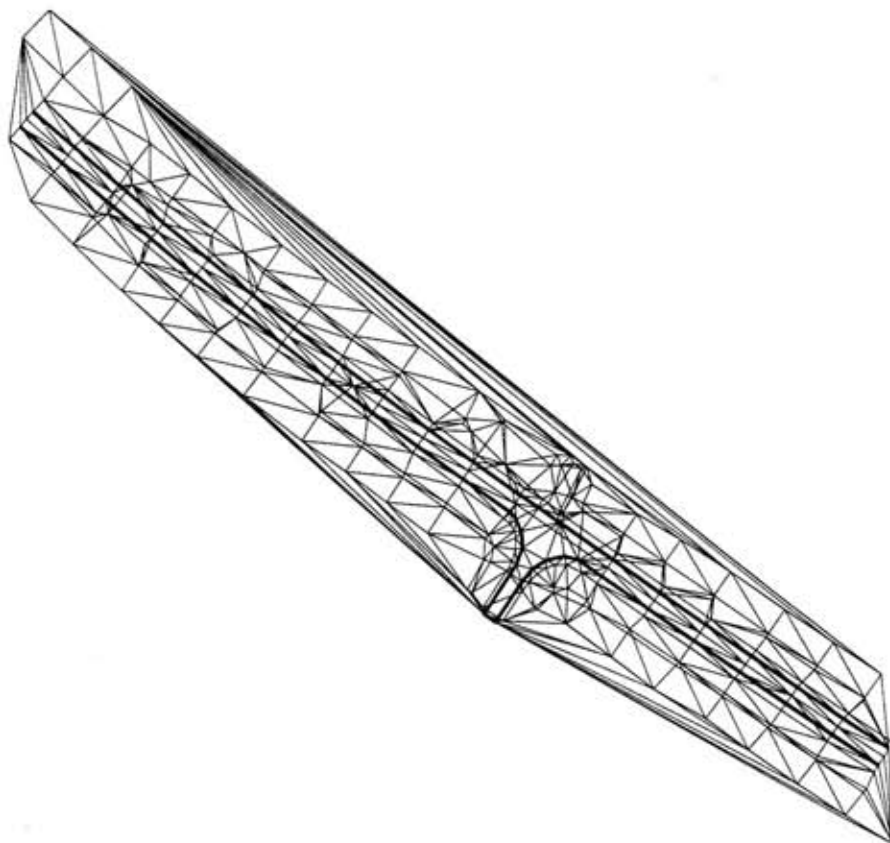
En terrænmodel er enten en model bestående af trekanter eller en model bestående af firkanter. En kombination af disse to er også muligt. Fremskaffes højdeinformationerne ad fotogrammetrisk vej, vil der typisk foreligge et net af punkter med 10 eller 20 meters mellemrum. Disse bliver så omdannet til en terrænmodel bestående af firkanter - et kvadratenet, som illustreret i figur 13.3.



Figur 13.3 Fra punktnet til kvadratenet.

Kvadratnettet giver den pæneste præsentation ved en perspektivisk gengivelse af landskaber, dog har den en stor mangel, idet fx en vej med tagformet profil og grøfter ikke kan repræsenteres tilfredsstillende med ene lige store kvadrater. Ligger en terrestrisk opmåling til grund for terrænmodellen, vil det være ganske utilfredsstillende kun at have et kvadratnet over et givet område, idet opmålingen af eksisterende kørebanekanter, grøfter m.m. ikke kan fremgå af en sådan terrænmodel.

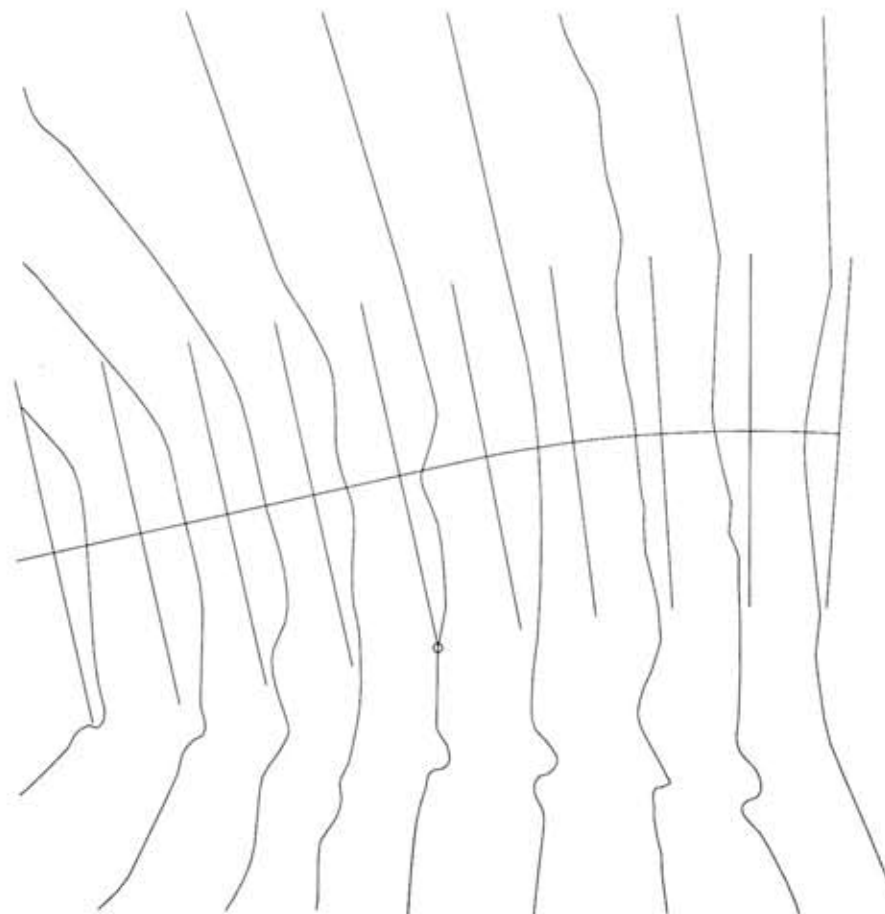
Trekantsmodellen giver mulighed for, at disse karakteristiske linier i marken kan indgå i terrænmodellen. En trekantsmodel skabes ved en såkaldt triangulering. Herved dannes et net af forskelligt udformede trekanter imellem de x,y,z-koordinater, der er tilgængelige. Gode trianguleringsprogrammer stræber efter at danne ligesidede trekanter, idet de giver den bedste terrænmodel. I en trekantsmodel vil der være mulighed for at have brudlinier, som fx kan være en kørebanekant og således give en relativ præcis placering af denne, se figur 13.4.



Figur 13.4 Trekantsmodel med vej.

Hvorfor det er nødvendigt med en terrænmodel ved digital projektering, skal vises i det følgende. Som eksempel herpå benyttes tværsnitsberegningen ud fra en givet linieføring, et længdeprofil og et normalt tværnsnit. I figur 13.5 er vist en situation, hvor tværsnittenes udbredelse og forløb er tegnet vinkelret på linieføringen. Samtidig fremgår højdekurverne af figuren.

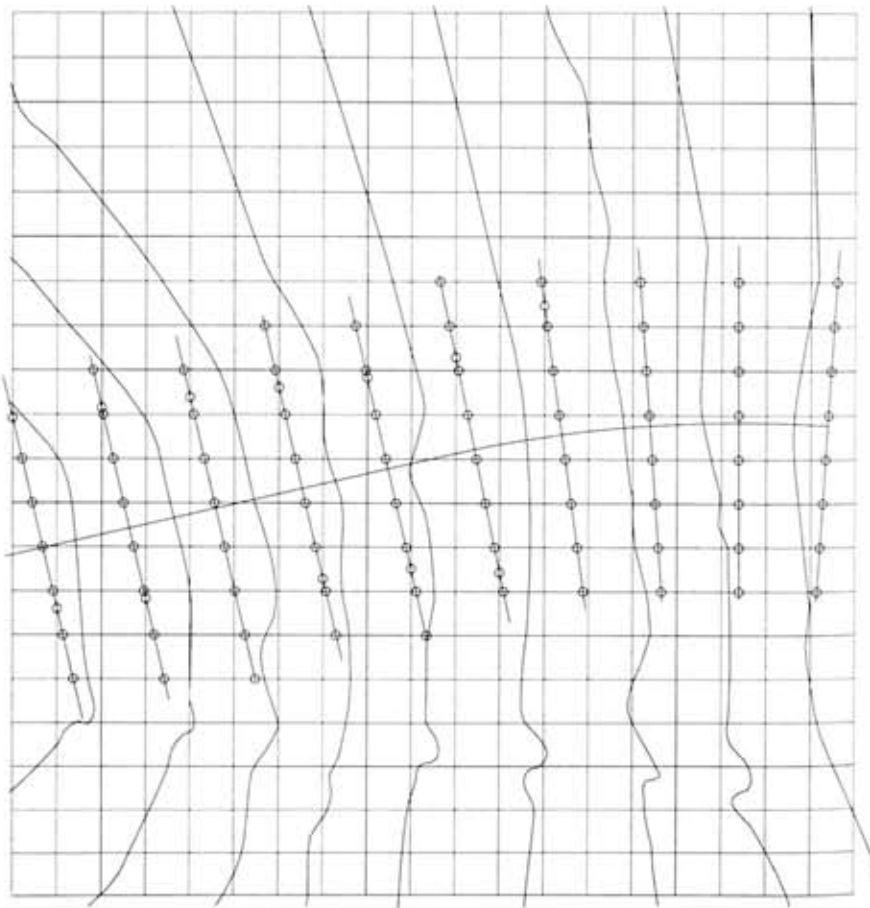
Det ses tydeligt, at højdekurverne i høj grad forløber imellem tværnittene og derfor ikke kan bidrage med egentlig højdeinformation, idet dette kun sker, når en højdekurve skærer et tværnsnit. Principielt er det muligt at interpolere mellem højdekurverne, men dette er meget unøjagtigt og vil næsten altid medføre meget upræcise tværnsnit. Ligger højdeinformationerne i et punktnet som vist i figur 13.3, bliver situationen ikke meget bedre.



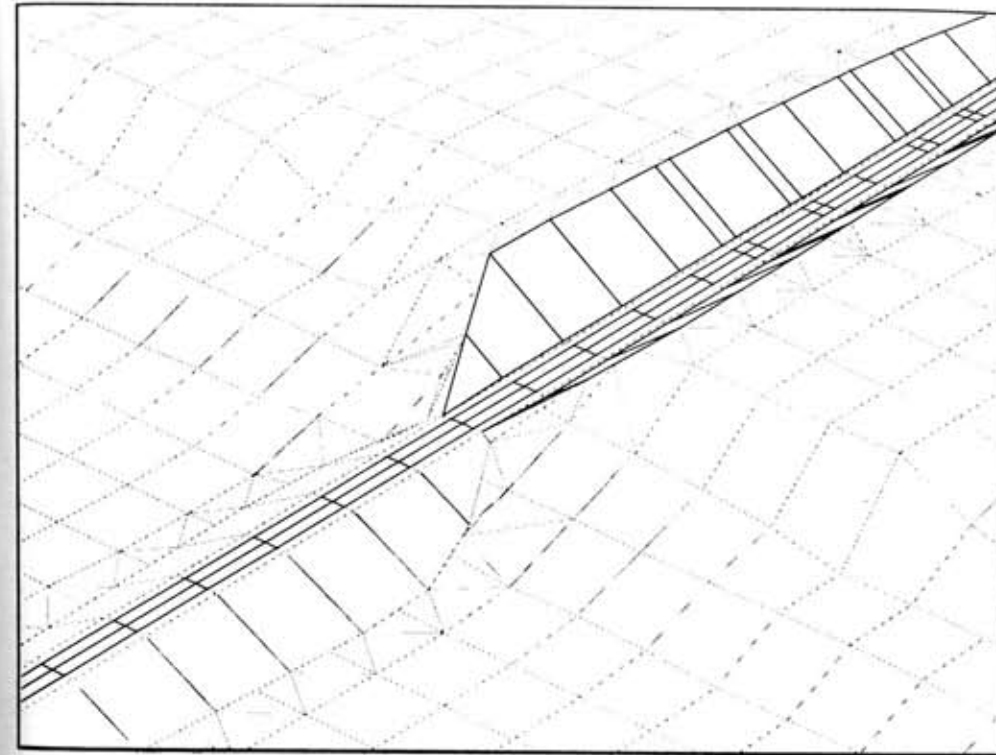
Figur 13.5 Tværnsnit langs en linieføring med højdekurver.

I figur 13.6 er samme situation vist med et kvadratnet som højdemodel. Her ses, at der nu ligger en hel del skærende linier til grund for at kunne optegne et fornuftigt tværsnit.

Måles terrestrisk i marken, er man mere eller mindre uafhængig af en terrænmodel, idet man blot skal sørge for at måle på langs med vejen. Herved fås klart de bedste terræntværsnit, idet alle knæk i tværsnittene opmåles som brudlinier i marken. Problemet opstår så senest ved jordberegningen, idet en egentlig terrænmodel her klart er at foretrække til beskrivelse af hele overfladen på den nye vej og det oprindelige terræn. Ligeledes kan det være vanskeligt at optegne et længdeprofil, når alle opmålte linier ligger parallel hermed. I figur 13.7 er vist, hvorledes både en kvadratnets- og en trekantsmodel kan kombineres i forbindelse med en 3D-præsentation.



Figur 13.6 Bestemmelse af tværsnit ved brug af kvadratnet.



Figur 13.7 Kombination af kvadratnetsmodel og trekantsmodel.

13.5 Arbejdsgang

Arbejdsgangen ved den digitale projektering afviger principielt ikke særlig meget fra den traditionelle projektering. Dette skyldes blandt andet, at projekterings-systemerne er udviklet med den baggrund og viden, man har til rådighed i den traditionelle projektering uden hjælp af CAD.

Grunden til at man overhovedet benytter sig af CAD ligger i hastigheden og genanvendelsen. Selvom mange vil påstå, at man med CAD som hjælpemiddel bruger lige så lang tid til et projekt som uden, er det dog ganske sikkert, at det i længden går væsentlig hurtigere med CAD. Senest når arbejdsprocedurer er på plads og kendskabet til programmet ligger på et så højt niveau, at man bruger tiden på projektet og ikke på at finde rundt i systemet.

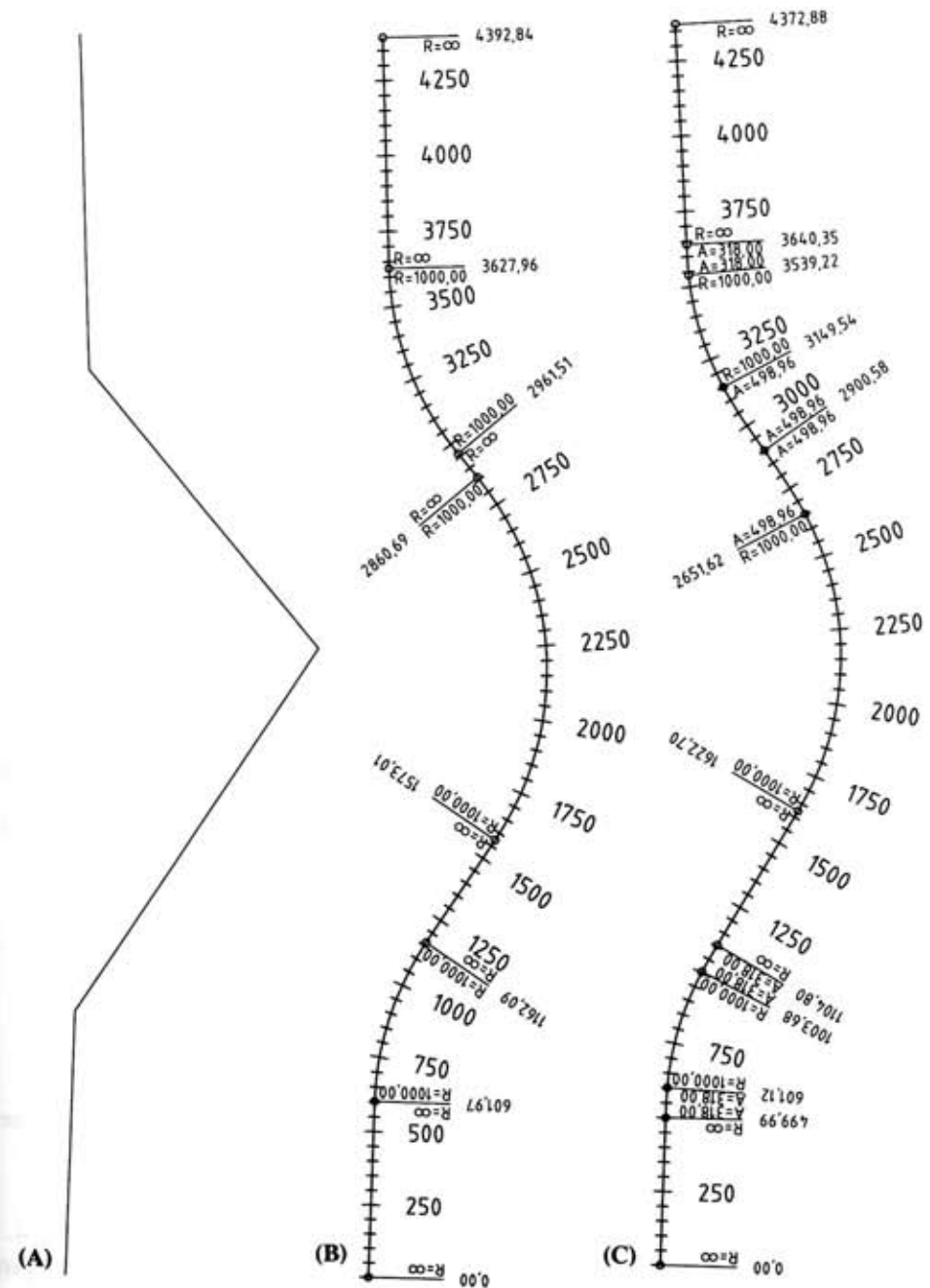
Ved den traditionelle tekniske tegning med tuschpen på papir ligger den mulige præcision for en dygtig tegner med en rolig hånd indenfor ca. 0,25 mm. Dette er fuldt ud tilstrækkeligt for et tegningsmateriale. To linier, der skal tangere hinanden, markeres på papiret med et tangentpunkt fx en lille streg. Således tangerer disse to linier nærmest pr. definition. Et CAD-system arbejder med mange decimaler. Således skal tangentpunkter her findes som helt eksakte punkter, hvilket sommetider godt kan være lidt tidskrævende, idet små afvigelser helt ud på 6 decimalen (μm) kan forhindre en nøjagtig tangering. At rette sådan en fejl er i praksis ganske unødvendigt, men ikke for systemet, idet der ellers kan opstå fejl i efterfølgende beregninger. Dette forhold gør sig ikke gældende for en linieberegning, men ved projektering af andre elementer fx kryds og lignende kan dette fænomen opstå. Måske vil fremtidige CAD-systemer kunne arbejde med en form for toleran-
ceangivelse, der vil gøre arbejdet endnu hurtigere.

Når det digitale kortgrundlag er fremskaffet og terrænmodellen etableret, kan selve projekteringen begynde. I det følgende beskrives først arbejdsgangen ved projektering af en ny vej i det åbne land. Herefter gives en kort omtale af digital projektering i bebyggede områder og udformning af vejkryds.

Linieføring

Det vil altid være en god idé, at have en skitse af en ny linieføring tegnet på et almindeligt analogt kort fx i en målestok på 1:10.000. Med skitsen som baggrund er det så muligt at tegne en foreløbig linieføring på skærmen. Det enkleste er først at skitsere linieføringen ved rette linier og dermed groft beskrive vejlinien ved tangentretninger, den såkaldte tommestoksmetode. Herefter kan man indsætte radier efter eget valg. Når en grov linie ligger nogenlunde på plads, kan linieføringen finpudses ved indsættelse af klotoider eller vendeklotoider. Se figur 13.8.

Når linieberegningen foretages direkte på skærmen uden forudgående definition af særlige tvangspunkter, betyder det, at CAD-programmet nødvendigvis selv må definere disse ud fra de tegnede rette linier og cirkelbuer på skærmen. CAD-systemerne benytter typisk liniernes og buernes endepunkter. Dette kan selvfølgelig medføre, at nogle linier får mulighed for en vinkeldrejning, hvor det absolut ikke er ønskeligt, fx ved tilslutningen til eksisterende veje, hvor netop tangentretningen er givet på forhånd. Her er det vigtigt helt at have styr på geometrien og overstyre programmets forslag til tvangspunkter. Det er ikke tilrådeligt at sætte tvangspunkter på klotoider, selvom det beregnings-teknisk godt kan lade sig gøre. Ændringer foretages normalt dynamisk direkte i tegningen eller ved hjælp af dialogbokse, der præsenterer linieberegningen ved dens geometriske parametre.



Figur 13.8 Fra tommestok til beregnet linieføring. (A) tangenter udpeges, (B) radier vælges, (C) klotoider indsættes.

Længdeprofil

Når en linieføringen er fastlagt, kan systemet optegne terrænets længdeprofil ud fra den etablerede terrænmodel. Herpå skitseres vejens længdeprofil principielt som ved linieføringen - dog uden at anvende klotoider.

I Danmark anvendes forskellige projekteringssystemer herunder MOSS, InRoads fra Intergraph og NovaCAD. Uden at komme nærmere ind på de forskellige systemer, er der dog grundlæggende forskelle på projekteringsforløbet. Dette skyldes, at MOSS reelt set er et CAE-system (Computer Aided Engineering), dvs. et vejprojekteringssystem, der er bygget op omkring rumlige linieforløb. InRoads og NovaCAD er bygget op omkring et generelt CAD-værktøj, såsom AutoCAD i tilfælde af NovaCAD. Disse systemer arbejder primært i to dimensioner. CAE-systemer henvender sig typisk til ingeniører som operatører og de almindelige CAD-systemer til både ingeniører, tekniske assistenter og tegnere.

Tværsnit

I to-dimensionelle systemer bestemmes et normalt tværsnit, som så beregnes langs med det rumlige forløb for centerlinien beskrevet ved en linieføring og et længdeprofil. Herved fremkommer vejen som en rumlig vejmodel med parallelle linier for alle knækpunkter i normalt tværsnittet placeret inde i den oprindelige terrænmodel.

I MOSS benyttes ikke et egentligt normalt tværsnit. Her konstrueres vejens tværsnittet op omkring det rumlige forløb af centerlinien ved at angive hældning og en afstand til fx kørebane-kanten, fra kørebane-kanten til kronekanten osv. Herved defineres nye rumlige linier ud fra allerede projekterede - linie for linie. Udover at denne metode er forholdsvis krævende, indebærer den en del fleksibilitet og konstruktive muligheder for den rumlige projektering, som umiddelbart ikke er så enkel i 2-dimensionale systemer. Også i det videre projekteringsforløb er der forskelle, men det vil føre for vidt at beskrive disse her, især fordi forløbet ændres i takt med nye programversioner. For yderligere oplysninger henvises til bl.a. programsystemernes manualer. Der er fordele og ulemper ved begge systemer. Hvor MOSS i Danmark primært benyttes af Vejdirektoratet og af enkelte store rådgivende virksomheder, anvendes de to-dimensionale CAD-systemer primært af kommuner, amter og rådgivere.

Bebyggede områder

Digital projektering i bebyggede områder er ret kompliceret sammenlignet med projektering i det åbne land. I byerne består projekteringen typisk af små geometriske ændringer i randområderne, såsom ved fortove og cykelstier. Da vejens tværsnit varierer kontinuerligt igennem en by, kan dette ikke beregnes som i det åbne land ved fx angivelse af et fast normalt tværsnit, men må bestemmes individuelt for

typisk hver 10 meter. Imidlertid er det ofte ikke nødvendigt med en egentlig rumlig projektering, fordi afgravnings- og påfyldningsmasserne er ganske små sammenlignet med vejprojekter i det åbne land.

Vejkryds

Projektering af vejkryds er heller ikke særlig enkelt. Derfor har programsystemerne hjælpeprogrammer til netop sådanne delprojekter. Disse virker selvfølgelig også meget forskellig fra system til system. Fælles for dem er, at de benytter grundlæggende designparametre, fx dimensioneringshastighed og dimensionsgivende køretøj, som tilpasses det enkelte projekt.

Udgangspunktet her er de skærende veje, som typisk udpeges som primærvej og sekundærvej. Udtegnen krydset automatisk, er det tvivlende nødvendigt helt at have styr på beregningsforudsætningerne. Se også kapitel 9.

13.6 Generelle forhold

Når man arbejder med digitale systemer, er det vigtigt hele tiden at have styr på input i forhold til output. En generel skepsis overfor outputtet er nyttig. Når man arbejder med digital projektering, især indenfor et relativt vanskeligt område som veje, er det altid en god idé at have datagrundlaget i baghovedet. En typisk fejl, når man sidder med et sådant system, er at overlade "tænkningen" til systemet. Lige meget hvor gode systemerne er i dag, er der mange forskellige parametre, systemet ikke kan kende til. Et system, hvor dette var tilfældet, ville være ekstremt regelbaseret under projekteringen og ikke særligt fleksibelt. Når man projekterer veje er der godt nok mange vejledende regler, men der er flere undtagelser og variationsmuligheder, som et system kun meget vanskeligt kan holde styr på. Med andre ord er det en god idé at checke de oplysninger, man har givet som input til systemet. Er størrelserne korrekte og geometrisk mulige? Er omfanget af oplysninger tilstrækkelige? Sandsynligheden for, at det er personen bag skærmen, der har lavet en fejl, er normalt en hel del større, end at det er maskinen, selv om dette bestemt ikke kan udelukkes.

Et vejprojekt er meget komplekst. En lille geometrisk ændring i en del af projektet kan ofte medføre store ændringer andre steder. Systemet kan ikke automatisk tage højde for selv små ændringer, derfor skal man også ved den digitale projektering arbejde systematisk og hele tiden kontrollere, at helheden er i orden. Fremtidens systemer vil klart råde bod på dette, men der vil gå en hel del år endnu, inden der vil være så meget "intelligens" indbygget i systemerne, at kontrolfunktionerne er en integreret del.