

Seminarieuppsatser nr 162

Digitala höjdmodeller och höjdsystem. Insamling av höjddata med fokus på flygburen laserskanning.

Per-Ola Olsson

2009
Centrum för Geobiosfärvetenskap
Naturgeografi och Ekosystemanalys
Lunds Universitet
Sölvegatan 12
223 62 Lund



**Digitala höjdmodeller och
höjdsystem.
Insamling av höjddata med fokus
på flygburen laserskanning.**

**Per-Ola Olsson
Kandidatuppsats i naturgeografi**

**Handledare:
Lars Harrie**

**Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemanalys
Lunds universitet, 2009**

Förord

Detta är en kandidatuppsats i naturgeografi, som behandlar höjdmodeller, och olika metoder att samla in höjddata. Arbetet med uppsatsen har inte utförts på heltid, utan genomförts parallellt med övriga studier, arbete, barnpassning och en del andra projekt. Dessutom fanns inte data för den praktiska utvärderingen tillgänglig förrän i ett senare skede av arbetet. Att skriva uppsatsen under sådana förhållanden gör att tid går åt att sätta sig in i vad som gjordes senast, men är samtidigt en bra träning i planering, och är kanske mer lik en framtida arbetssituation, jämfört med att koncentrerar sig enbart på uppsatsen under en viss period. Jag vill framföra ett stort tack till min handledare Lars Harrie, för bra synpunkter och tips. Stort tack också till Anders Pikkuniemi och Jonas Rasmusson på Helsingborgs kommun, som gett mig tillgång till höjdmodell och utvärderingsdata. Tack också till Robin Gullstrand på Geobiblioteket som i mer än ett halvår försökte beställa en bok från USA, tyvärr utan resultat. Tack också till Alfred för att han inte väcker pappa klockan 4 varje natt och vill sparka boll, boll.

Abstract

Elevation data of high quality is important. In Sweden a governmental climate and vulnerability study (*Klimat och sårbarhetsutredningen*) states that some analyses of vulnerability due to future climate changes, like hydrological analyses to estimate the risk of flooding, do require elevation models of high quality. The present national elevation model does not reach the accuracy requirements. Since these analyses are of national interest it has been decided that Lantmäteriet (*the Swedish mapping, cadastral and land registration authority*) shall produce a new digital elevation model. A digital elevation model is a digital representation of the bare ground. The most common structures for storing an elevation model are grid and TIN (*Triangular Irregular Network*). The new national elevation model will be stored as a TIN, but delivered as grid. Each time data is ordered a grid is created from the TIN. The advantage of this is that data delivered will always be updated.

Data for the new model will be collected using airborne laser scanning, lidar. Two other remote sensing techniques used to collect elevation data are photogrammetry and radar. Of the three techniques, lidar gives the highest accuracy, with photogrammetry only slightly lower. Radar data is of lower quality. Maybe the most important advantage of lidar is that the pulses can penetrate vegetation, giving more accurate bare ground elevation in dense vegetation. Another advantage compared to photogrammetry is that lidar is an active sensor allowing it to collect data in the dark, or under cloudy skies. Lidar also makes it possible to collect data over large areas in short time. Direct digital capture of data makes data available fast. A disadvantage is that large amount of data is collected. This sometimes means data-processing is time consuming. Another disadvantage is that if the quality of GPS- and inertial data, collected during the scanning to enable georeferencing, is low, the lidar data can not be used, and has to be re-collected.

Keywords: Geography, Physical Geography, Digital Elevation Model, grid, TIN, Vertical reference system, lidar, photogrammetry, radar.

Sammanfattning

Att ha tillgång till höjddata av hög kvalitet är viktigt. Enligt klimat och sårbarhetsutredningen är det bl.a. viktigt att kunna göra bra hydrologiska modeller för att kunna beräkna översvämningsrisker, eller risken för ras och skred p.g.a. framtida klimatförändringar. Flera av dessa analyser anses vara av nationellt intresse. Utredningen slår också fast att den nationella höjdmodell som finns idag inte motsvarar de noggrannhetskrav som ställs. Mot detta som bakgrund har Lantmäteriet fått i uppdrag att ta fram en ny nationell höjdmodell. Denna ska finnas tillgänglig som grid med en markupplösning på 2,5 x 2,5 m. Medelfelet i höjd ska ligga under 0,5 m. Höjddata till modellen kommer att samlas in med flygburen laserskanning, med start sommaren 2009. Arbetet beräknas ta 4,5 år.

En digital höjdmodell är en digital modell som representerar topografin i ett område. Det finns olika sorters höjdmodeller. En DEM (*Digital Elevation Model*) definieras av Lantmäteriet som en modell som representerar markytan. En höjdmodell kan lagras på olika sätt, varav de vanligaste är grid och triangelnät. Ett grid är ett regelbundet raster där värdet i varje cell representerar höjden i cellens centrum. Detta är den vanligaste lagringsstrukturen vid spatiala analyser. Beräkningarna är enkla att utföra eftersom inga beräkningar av höjdvärden behöver göras, och de flesta tillgängliga programvaror erbjuder flera olika analysverktyg. Ett triangelnät, TIN (*Triangular Irregular Network*), innebär att området delas in i trianglar. Hörnpunkterna utgörs av de kända höjdpunkterna i terrängen. För att få fram höjden i andra punkter görs en interpolering. Den nya nationella höjdmodellen kommer att lagras som ett triangelnät av Lantmäteriet, men när data levereras sker det i gridformat. Detta innebär att varje gång höjddata beställs görs en interpolation för att få fram ett grid. Fördelen med detta är att det alltid är uppdaterad data som levereras. Som det ser ut i dagsläget kommer grid med 2,5 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m respektive 100 m upplösning att erbjudas.

Det är viktigt att höjddata anges i ett referenssystem för höjd, ett s.k. höjdsystem. Ett sådant byggs upp av ett nätverk av noggrant inmätta referenspunkter s.k. höjdfixar. Vidare inmätningar utgår sedan från dessa. Höjden som anges är höjden över geoiden, vilken kan sägas vara en förlängning av havsytan in under land. Eftersom havsytan varierar med tiden krävs att en nollnivå definieras. Det senaste svenska höjdsystemet utgår från samma nollnivå som det gemensamma Europeiska. Vid satellitnavigering mäts höjden över ellipsoiden. Detta gör att höjden behöver räknas om till höjden över geoiden. Detta görs med hjälp av en s.k. geoidmodell.

Som nämnts tidigare kommer data till den nya svenska nationella höjdmodellen att samlas in genom flygburen laserskanning. Tekniken går ut på att en sensor som monterats på ett flygplan eller helikopter sänder ut korta pulser av laserljus. Sensorn registrerar sedan tiden det tar för reflektioner från pulserna att returneras. Eftersom pulsens hastighet är känd, kan avståndet till reflektionspunkterna beräknas. Genom att bestämma sensorns position med hjälp av satellitpositionering, och dess riktning med tröghetsnavigering kan en reflektionspunkts position i ett referenssystem bestämmas. Detta ger en svärm av punkter som representerar de olika pulsernas reflektionspunkter. Det är inte enbart markytan som reflekterar laserpulsen, utan även objekt ovan mark som vegetation och byggnader ger upphov till reflektioner. En och samma puls kan dessutom ge upphov till fler än en reflektion. För en höjdmodell är det enbart de punkter som härstammar från reflektion mot markytan, s.k. markpunkter, som är intressanta. För att få fram dessa görs någon form av filtrering av data. Filtringen kan delvis göras automatiskt, men även manuell bearbetning kan krävas. Exempelvis är det svårt att skilja broar från mark, vilket gör att manuell identifiering av broar ofta behöver göras.

Två andra metoder att ta fram höjddata är fotogrammetri och radar. Fotogrammetri är en teknik som bygger på mätning av geometrin i flygbilder. Två eller fler flygbilder monteras till en stereomodell. Genom att mäta avstånd i bilderna kan höjden i olika punkter bestämmas. Flygburen radar bygger på att pulser av mikrovågsenergi sänds ut från en sensor monterad på ett flygplan. Genom att mäta tiden det tar för reflektionerna att återvända till sensorn kan avståndet till reflektionspunkten bestämmas på liknande sätt som vid laserskanning.

Av de tre metoderna ger laserskanning högst noggrannhet, tätt följd av fotogrammetri. Radar ger lägre noggrannhet. Kostnadsmässigt är fotogrammetri dyrast, men skillnaden mot laserskanning är inte så stor. Om data ska samlas in över stora områden är radar klart billigare, men med en lägre noggrannhet.

Den kanske största fördelen med laserskanning är att laserpulserna kan tränga igenom vegetation och därmed bestämma höjden på marknivå bättre i tät vegetation. Noggrannheten påverkas visserligen negativt men inte i lika stor utsträckning som för fotogrammetri och radar. En annan fördel är att tekniken fungerar även vid mulen väderlek och i mörker. Detta gör att säsongen för laserskanning är längre än för fotogrammetri som kräver molnfritt och dagsljus. Det är även en fördel att stora områden kan skannas på kort tid och höjddata samlas direkt i digital form. Detta gör att data kan användas kort efter skanningen. En nackdel är att datamängden blir stor, vilket kräver bearbetning som kan göra att tidsvinsten i förhållande till fotogrammetri blir liten. En annan nackdel är att om störningar gjorts att data från satellitpositionering och tröghetsnavigering inte håller tillräckligt hög kvalitet måste skanningen göras om eftersom höjddata inte kan georefereras på annat sätt.

Den praktiska utvärderingen av en laserskannad höjdmodell som genomfördes visade på ett medelfel i höjd på 25 cm, vilket ligger i det intervall man skulle kunna förvänta sig, och klart under det krav som ställs på den nya nationella höjdmodellen. Dock var utvärderingsdata vid tidpunkten för utvärderingen enbart tillgänglig i ett begränsat område av höjdmodellen varför det är osäkert att dra några slutsatser av utvärderingen.

Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Syfte	2
2 Höjdmodeller, höjddata och höjdsystem	3
2.1 Definition av höjdmodeller	3
2.2 2,5D och 3D modeller	5
2.3 Lagringsstruktur för höjdmodeller	5
2.3.1 <i>Grid, regelbundet raster</i>	5
2.3.2 <i>TIN, triangelnät</i>	6
2.3.2.1 <i>Brytlinjer i triangelnät</i>	8
2.3.3 <i>Höjdkurvor</i>	9
2.4 Höjdsystem	9
2.4.1 <i>Höjd över havet, geoidhöjd</i>	9
2.4.2 <i>Höjdsystemets nollnivå</i>	10
2.4.3 <i>Geoidmodeller</i>	11
2.4.4 <i>Landhöjningsmodeller</i>	11
2.5 Svensk nationell höjddata. Historia, nutid, och framtida planer	12
2.5.1 <i>Nationella precisionsavvägningar</i>	12
2.5.2 <i>Svenskt nationellt höjdsystem idag, RH2000</i>	13
2.5.3 <i>Svensk nationell höjddata idag och framtida planer</i>	14
3 Insamling av höjddata	15
3.1 Avvägning	15
3.2 Fotogrammetri	16
3.2.1 <i>Flygbilder</i>	17
3.2.2 <i>Höjdbestämmning genom parallaxmätning</i>	18
3.2.3 <i>Stereomodeller</i>	19
3.3 Radar	20
3.3.1 <i>Principen för flygburen radar, SLAR</i>	20
3.3.2 <i>Upplösning för SLAR radar</i>	21
3.3.2.1 <i>Längdupplösning, marklängdupplösning och riktninglängdupplösning</i>	21
3.3.2.2 <i>Breddupplösning</i>	23
3.3.3 <i>Radarbildens geometri</i>	23
3.3.4 <i>Stereoeffekt i radarbilder</i>	24
3.3.5 <i>Interferometrisk radar</i>	25
3.3.6 <i>Fjärranalys med radar från rymden</i>	26
4 Flygburen laserskanning	27
4.1 Kort historia	27
4.2 Laserskanning – teknisk beskrivning	27
4.2.1 <i>Positionering av laserdata</i>	27
4.2.2 <i>Sensors position</i>	28

4.2.3 Avstånd till reflektionspunkten	29
4.2.4 Riktning till reflektionspunkten	30
4.2.4.1 <i>Sensors riktning</i>	30
4.2.4.2 <i>Strålens riktning i förhållande till sensorn</i>	31
4.2.4.3 <i>Strålens riktning</i>	32
4.3 Planering vid laserskanning och viktiga parametrar	32
4.3.1 <i>Planering av stråk</i>	32
4.3.2 <i>Flyghöjd</i>	33
4.3.3 <i>Punkttäthet</i>	33
4.3.4 <i>Fotpunkt</i>	33
4.3.5 <i>Laserfrekvens</i>	33
4.3.6 <i>Öppningsvinkel och svepbredd</i>	33
4.3.7 <i>Reflektioner</i>	33
4.3.8 <i>Yttre förhållanden</i>	34
4.4 Data och databehandling	34
4.4.1 <i>Laserdata</i>	34
4.4.2 <i>Primär databehandling</i>	35
4.4.2.1 <i>Kalibrering av laserskanningssystemet</i>	35
4.4.2.2 <i>Geometrisk korrigerings</i>	35
4.4.2.3 <i>Plan och höjdinpassning</i>	35
4.4.3 <i>Sekundär databehandling</i>	35
4.4.3.1 <i>Filtrering</i>	35
4.4.3.2 <i>Klassificering av objekt ovan mark</i>	36
4.4.3.2.1 <i>Broar</i>	36
4.4.3.2.2 <i>Vegetation och byggnader</i>	37
4.4.3.2.3 <i>Sjöar och vattendrag</i>	37
5 Jämförelse mellan olika metoder att samla in data	38
5.1 Kostnadsjämförelse	38
5.2 Fotogrammetri	38
5.3 Interferometrisk radar, IFSAR	38
5.4 Laserskanning	39
6 Utvärdering av laserskannad data i Helsingborgs stad	40
6.1 Introduktion	40
6.1.1 <i>Tillgänglig data</i>	40
6.2 Metod	42
6.3 Resultat	44
6.4 Diskussion om utvärderingen	44
7 Slutsatser	45
Referenser	47

1 Inledning

En digital höjdmmodell, DEM (*Digital Elevation Model*), är enligt Lantmäteriets definition en modell som representerar markytan (Lantmäteriet, 2007a). En höjdmmodell kan lagras på olika sätt, varav de vanligaste är grid och triangelnät. Ett grid är ett regelbundet raster där värdet i varje cell representerar höjden i cellens centrum. Detta är den vanligaste lagringsstrukturen vid spatiala analyser (Eklundh & Pilesjö, 2008). Analyserna är förhållandevis enkla att utföra eftersom höjdvärdena som används är de som finns lagrade i cellerna. Inga beräkningar av höjdvärden behöver göras. De flesta tillgängliga programvaror erbjuder flera olika analysverktyg för grid (Maune et al., 2007). Ett triangelnät, TIN (*Triangular Irregular Network*), innebär att området delas in i trianglar, där hörnpunkterna utgörs av de kända höjdpunkterna i terrängen (Eklundh & Pilesjö, 2008). För att få fram höjden i andra punkter görs en interpolering.

Den nationella höjdmmodell som finns i Sverige idag, GSD-höjddata (Geografiska Sverige Data), har en markupplösning på 50 x 50 m, med ett medelfel i höjd på 2 m (Lantmäteriet, 2007a). Den har främst använts för att automatisera produktionen av ortofoton. Senaste revideringen av modellen slutfördes 1994. Sedan dess har utvecklingen av teknik och kunskap möjliggjort nya användningsområden för geografisk information. Vid många analyser är man beroende av höjdinformation med högre noggrannhet än den dagens höjdmmodell erbjuder. En del av dessa analyser är av nationellt intresse, som beräkningar av sårbarhet p.g.a. framtida klimatförändringar. Detta enligt klimat och sårbarhetsutredningen (Miljödepartementet, 2007). Bl.a. är det viktigt att kunna göra noggranna hydrologiska modeller för att beräkna översvämningsrisker, eller beräkna risken för ras och skred. För bra resultat krävs höjdm modeller av hög kvalitet. Därför har Lantmäteriet fått i uppdrag att ta fram en ny nationell höjdmmodell med en markupplösning på 2,5 x 2,5 m och ett vertikalt medelfel på 0,5 m. Planen är att denna höjdmmodell ska vara klar 2015, och datainsamling ska ske med flygburen laserskanning (Lantmäteriet, 2007a).

Vid insamling av höjddata är det viktigt att höjdvärden anges i ett referenssystem för höjd, ett s.k. höjdsystem (Ekman, 2002). Ett sådant byggs upp av ett nätverk av noggrant inmätta referenspunkter s.k. höjdfixar (Ågren & Hauska, 2008). Vidare inmätningar av data utgår sedan från dessa. Höjden som anges är höjden över geoiden, vilken kan sägas vara en förlängning av havsytan in under land. Eftersom havsytan varierar med tiden krävs att en nollnivå definieras. Det senaste svenska höjdsystemet utgår från samma nollnivå som det gemensamma Europeiska. Vid satellitnavigering mäts höjden över ellipsoiden. Detta gör att höjden behöver räknas om till höjden över geoiden. Detta görs med hjälp av en s.k. geoidmodell.

Fjärranalys är olika metoder att få information om t.ex. en plats eller en process på avstånd. Man kan säga att just som du läser detta utför du en fjärranalys. Ögonen är sensorer som registrerar reflektionerna från pappret (eller strålningen från skärmen om du läser det digitalt). Den ”data” som ögonen registrerar sänds vidare till hjärnan, där den bearbetas och översätts till en bild av svarta bokstäver på vit bakgrund (Lillesand et al., 2004). Om man dessutom har tränat hjärnan att förstå bokstäverna och språket ser man att bokstäverna bygger upp ord, som bildar en text som man kan läsa, och förstå. På samma sätt kan man genom träning få ut mer information vid fjärranalys om man lär sig mer om hur informationen ska tolkas.

De vanligaste metoderna för fjärranalys går ut på att registrera elektromagnetisk strålning med t.ex. en vanlig optisk kamera; en sådan används bl.a. vid flygfotoografering. Kameran registrerar den elektromagnetiska strålningen, oftast i den synliga och/eller infraröda delen av

spektrumet, och en bild sparas. Denna kan sedan analyseras på olika sätt, bl.a. genom fotogrammetri, som behandlar de geometriska aspekterna av bilden (se avsnitt 3.2). Radar (*Radio Detection and Ranging*) är en annan teknik som används vid fjärranalys (se avsnitt 3.2) liksom laserskanning (se kapitel 4) vilken är den metod denna studie främst fokuserar på.

Laserskanning, LIDAR (*Light Detection and Ranging*), är en relativt ny metod inom fjärranalysen, som bygger på att man sänder ut pulser av laserljus från en sensor. Genom att mäta tiden det tar för pulserna att returneras till sensorn, kan avståndet till en reflektionspunkt beräknas, eftersom pulsens hastighet (ljusets hastighet) är känd. Om laserskannern placeras på ett flygplan eller helikopter, s.k. flygburen laserskanning, kan avståndet till marken mätas. Om man dessutom kan bestämma laserskannerns position och orientering, kan man få fram höjden och läget i plan för reflektionspunkterna, och på så sätt georeferera insamlad data. Sensorns position bestäms genom satellitpositionering, och dess orientering genom tröghetsnavigering (Lantmäteriet, 2007b).

Det är inte enbart markytan som kan registreras vid laserskanning. En och samma puls kan returnera flera reflektioner, vilka kan härstamma från detaljer ovan mark, som trädtoppar, annan vegetation, byggnader m.m. Genom att registrera samtliga ekon, kan informationen även användas till att analysera objekt på marken. Detta gör att flera tillämpningsområden öppnas för laserskanning, bl.a. inom skogsindustrin. Där pågår forskning för att försöka få fram metoder att genom laserskanning snabbt ta fram modeller över trädhöjd för att kunna beräkna timmervolym, och biomassa över större områden (Hyyppä et al., 2000). Den höga kvaliteten i höjddata gör även laserskanning till ett bra hjälpmedel vid hydrologisk modellering (van der Vegt & Hoffman, 2001). Laserskanning är också lämpligt för 3D-modellering av urbana områden för bl.a. visualisering och ljudmodellering. 3D-modeller kan också tas fram för planering av antennplacering för telekommunikation. Kartering av kustzoner som kan vara känsliga och svårtillgängliga är ett annat användningsområde, liksom kartering i stråk, för t.ex. infrastrukturprojekt (van der Vegt & Hoffman, 2001). Dessa tillämpningsområden kommer inte att diskuteras utförligt i denna rapport, som fokuserar på laserskanning som en metod för framtagning av höjdmodeller.

Vid framtagandet av en höjdmodell, är det enbart de pulser som härstammar från reflektion mot marken, de s.k. markpunkterna, som är intressanta (Klang & Burman, 2003). För att identifiera dessa måste någon form av filtrering göras innan höjdmodellen kan tas fram. Denna filtrering kan delvis göras automatiskt, men manuell bearbetning krävs också oftast för att exempelvis identifiera broar som blivit klassade som mark.

1.1 Syfte

Denna studie har tre syften. Det första är att beskriva höjdmodeller, med inriktning på svenska modeller. Det andra är att studera metoder för insamling av höjddata, och uppbyggande av höjdmodeller. Den insamlingsmetod som det fokuseras på är flygburen laserskanning. Det tredje och sista syftet är att göra en praktisk noggrannhetsutvärdering av en höjdmodell framtagen genom laserskanning.

2 Höjdmodeller, höjddata och höjdsystem

Detta kapitel inleds med en definition av olika benämningar på höjdmodeller. Därefter följer en beskrivning av olika lagringsstrukturer för höjddata, varav de två vanligaste är grid och triangelnät. Även höjdkurvor behandlas kortfattat. Ett höjdsystem är ett referenssystem för höjd. Detta beskrivs med fokus på svenska förhållanden. Avslutningsvis behandlas planerna för den nya nationella höjdmodell som lantmäteriet ska ta fram.

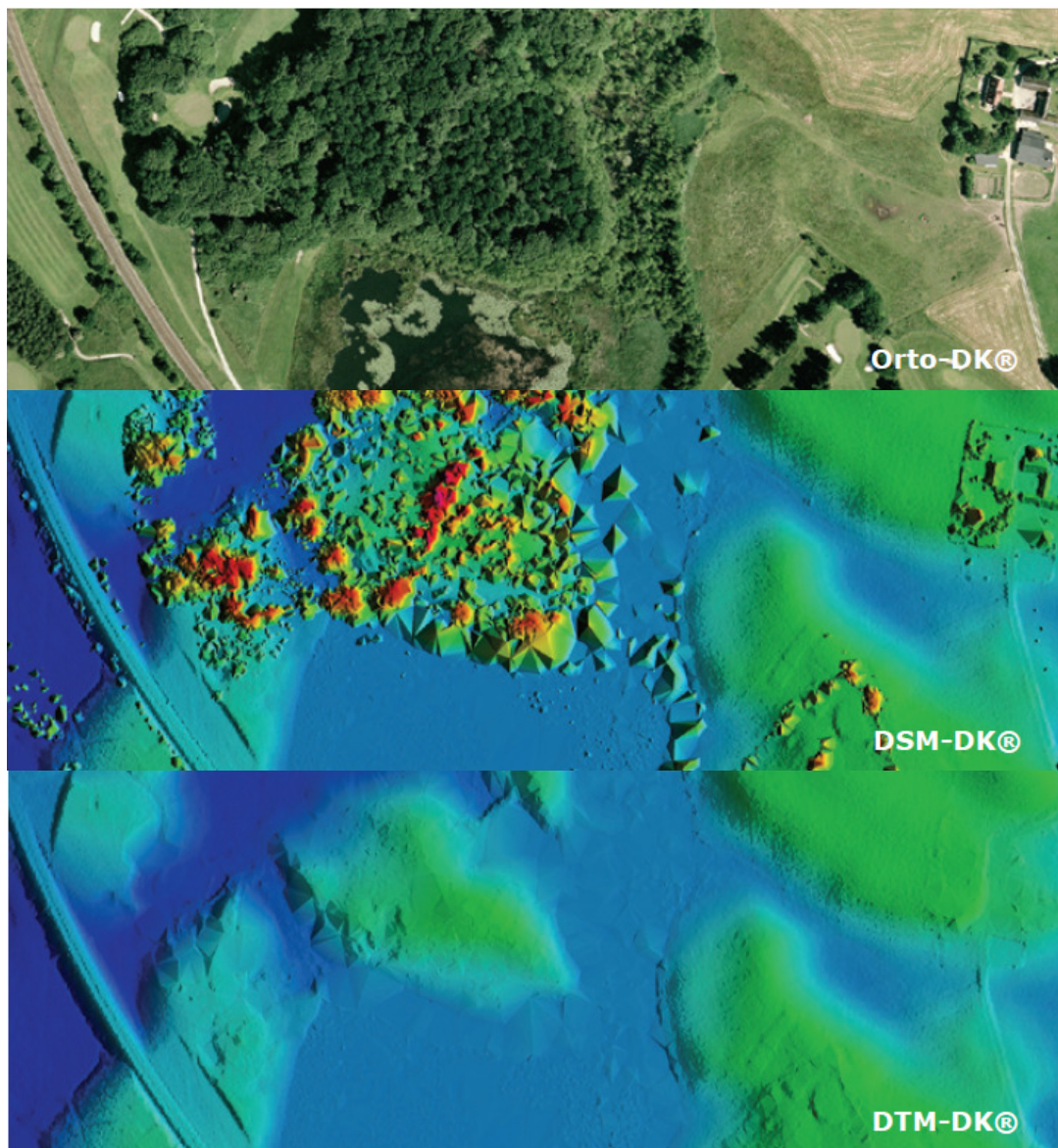
2.1 Definition av höjdmodeller

Det finns ett antal termer som beskriver olika typer av höjdmodeller. Definitionerna används på lite olika sätt, varför det ibland kan finnas risk för missförstånd

DEM, *Digital Elevation Model*, enligt Lantmäteriet översatt till ”Digital höjdmodell”. Denna modell definieras enligt Lantmäteriet som en digital beskrivning av markytan (Lantmäteriet, 2007a), men DEM används även som en generell benämning för olika typer av höjdmodeller (Egels & Kasser, 2002). I denna rapport används Lantmäteriets definition.

DSM, *Digital Surface Model*, enligt Lantmäteriet översatt till ”Digital ytmodell” (Lantmäteriet, 2007a), är en höjdmodell där även objekt ovan mark, som byggnader och vegetation finns med (se figur 2.1).

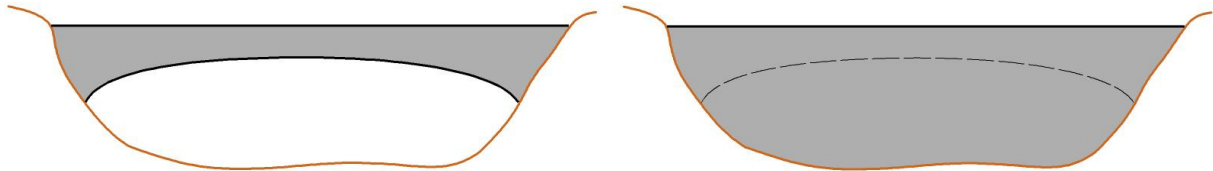
DTM, *Digital Terrain Model*, enligt Lantmäteriet översatt till ”Digital terrängmodell”, definieras som en digital beskrivning av terrängen, framtagen med hjälp av höjddata (Klang, 2006; Klang & Burman, 2003). Det innebär att utöver själva höjdmodellen definieras även modeller som t.ex. sluttningsskator och avrinningsmodeller som digitala terrängmodeller.



Figur 2.1 Ortofoto (överst), digital ytmödel, DSM (mitten) och digital terrängmodell, DTM (nederst) över samma område. Notera att här används termen terrängmodell annorlunda än enligt Lantmäteriet. Enligt Lantmäteriets terminologi är den nedersta bilden en DEM, digital höjdmödel som representerar markytan. (Källa Scankort, 2008). ©Scankort a/s, Danmark.

2.2 2,5D och 3D modeller

För att särskilja modeller som enbart kan lagra ett höjdvärde per plankoordinat, från modeller som kan ge en fullständig 3D beskrivning har begreppet 2,5D införts. 2,5D modellen kan inte beskriva objekt som går att passera under eller som är lodräta. Om t.ex. en bro bara lagras med ett höjdvärde, som i figur 2.2, kommer den att lagras likadant som en mur, och det går inte se att den är passerbar under. Detta gör exempelvis att hydrologiska modeller blir felaktiga. För en digital höjdmödel där enbart själva markytan representeras, fungerar 2,5D modeller bra men för mer komplexa ytmodeller, där man även behöver kunna se under en del föremål, eller där det finns lodräta kanter, t.ex. väggar på byggnader, krävs en 3D modell.



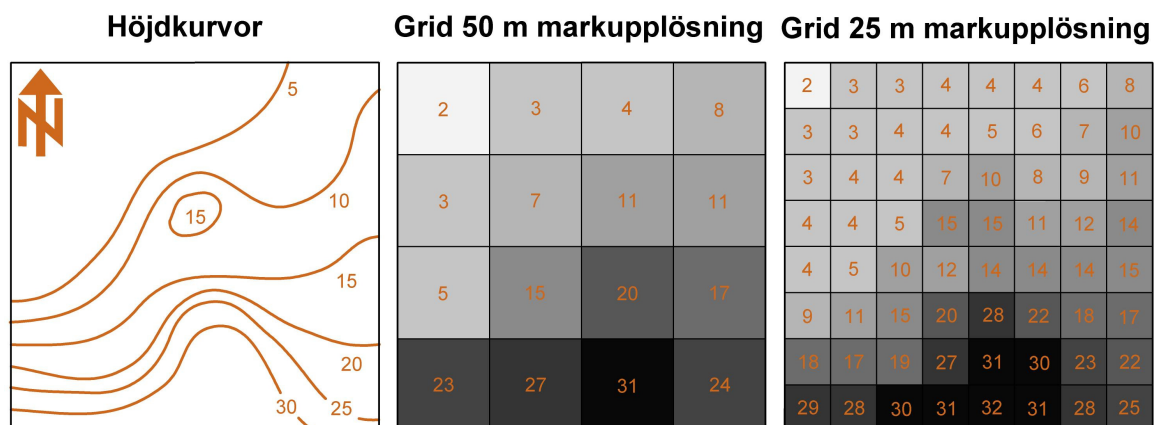
Figur 2.2 Sidovy av bro lagrad som 3D (till vänster) och 2,5D (till höger). Eftersom 2,5D enbart kan lagra ett höjdvärde per plankoordinat, avbildas bron som en mur. Om en hydrologisk modellering genomfördes med 2,5D modellen, skulle vattenflödet hindras eller flöda över bron om vattennivån blev tillräckligt hög.

2.3 Lagringsstruktur för höjdmödel

I detta avsnitt beskrivs de två vanligaste lagringsstrukturerna för höjdmödel, grid (raster) och TIN, triangelnät, med deras för- och nackdelar. Även en kortfattad beskrivning av höjdkurvor ges.

2.3.1 Grid, regelbundet raster

Höjdmödel i gridformat lagras som ett regelbundet raster (ibland används benämningen matris) där höjdvärdena motsvarar höjden i centrum av de enskilda cellerna. Detta är den dominerande lagringsformen för höjdmödel som används vid spatiaa analyser, som beräkning av skada vid översvämningar, eller mängd schaktmassa (Eklundh & Pilesjö, 2008). Det finns fler verktyg för sådana analyser för data lagrad som grid än för övriga lagringsstrukturer i tillgängliga dataprogram (Maune et al., 2007). Analyserna är lättare att göra eftersom varje punkt får det värde som den cell den befinner sig i. Inga beräkningar av värden behöver göras.



Figur 2.3 Visar hur upplösningen påverkar noggrannheten i en höjdmödel lagrad som grid. Till vänster höjdkurvor, i mitten grid med 50 m upplösning, och till höger grid med 25 m upplösning.

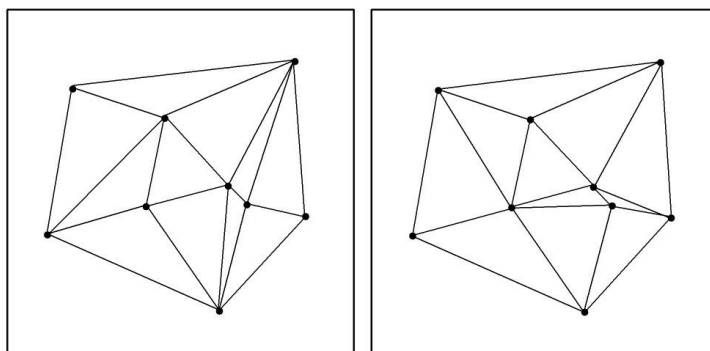
Figur 2.3 visar hur viktig markupplösningen är för hur detaljerat topografin kan avbildas. I den vänstra figuren används höjdkurvor för att representera höjden, medan den mellersta och högra figuren är i gridform. Ett grid med låg markupplösning, i detta fall 50 m, ger en betydligt mer schematisk bild av verkligheten, och bara de grövre dragen i topografin syns. Höjden i mitten syns inte alls. Med högre upplösning, här 25 m, avspeglas topografins former bättre. Man kan skönja höjden i mitten, och svackan öster om höjden syns, liksom åsen i södra kanten. Ökas upplösningen ännu mer, fås en höjdmodell som ger en bild som ännu bättre stämmer med verkligheten. Problemet är att ökad upplösning också ger ökad datamängd. Om cellstorleken halveras, ökar datamängden med en faktor 4. Detta eftersom cellen halveras i både x- och y-led, så att en cell i den lägre upplösningen, blir 4 i den högre. Det går inte ha olika cellstorlek i ett och samma raster, något som kunde vara önskvärt för att spara datamängd. Nordvästra delen av figur 2.3 skulle t.ex. kunna avbildas i betydligt lägre upplösning än de mellersta och södra delarna. Det blir med andra ord en avvägning mellan hur detaljerat modellen kan visa topografin, och hur stor datamängd den får innehålla. Det finns dock möjligheter att komprimera datamängden när flera närliggande celler har samma värde (Maune et al., 2007). En metod är skurlängdskodning (eng. *run-length encoding*) som beskrivs närmare i Worboys & Duckham (2004). Kortfattat går metoden ut på att intilliggande celler med samma värde lagras som en grupp, istället för individuella celler. Vad gäller högre upplösning är det inte enbart mängden data som ökar. En annan viktig faktor som gäller för samtliga lagringsstrukturer av höjddata är att högre noggrannhet innebär att insamlingen av data blir dyrare (Maune et al., 2007).

En annan nackdel med grid är att det exakta läget för exempelvis en bergstopp inte kan återges (Maune et al., 2007). Detta eftersom värdet som cellen anger är värdet i centrum. Inga positioner inne i cellen finns lagrade. För människoframställda objekt som exempelvis vägbankar eller skärningar, som har markanta brytlinjer (se avsnitt 2.3.2.1) där de börjar respektive slutar är grid också mindre bra på att representera verkligheten.

2.3.2 TIN, triangelnät

Triangelnät (TIN, *Triangular Irregular Network*) skapas genom att ett område delas in i trianglar, med utgångspunkt ur de kända höjdpunkterna, vilka utgör trianglarnas hörnpunkter (Eklundh & Pilesjö, 2008). Trianglarna kommer på så sätt att bilda ett plan som går mellan dess hörnpunkter, och som avspeglar terrängens form. Det finns olika metoder att skapa trianglarna och en given grupp av hörnpunkter kan ge flera olika versioner av triangelnät. Detta visas i figur 2.4.

Olika triangelnät med samma punkter



Figur 2.4 Två olika triangelnät skapade av samma punktsvärm.

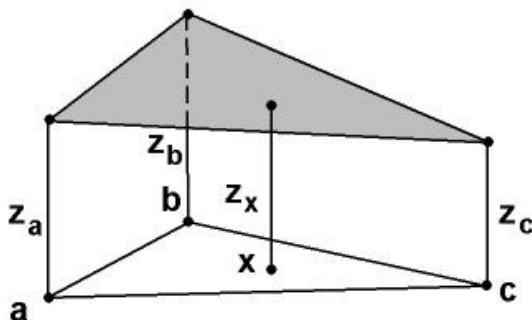
Den vanligaste formen av triangelnät är Delaunay trianglar. En Delaunay triangulering är unik, och kan därför bara få ett utseende för en given punktsvärm. Den ger även så få spetsiga vinklar som möjligt. Mer detaljerad definition och exempel på algoritmer för att utföra Delaunay triangulering finns beskrivna i t.ex. Worboys & Duckham (2004).

De kända höjdpunkternas värden interpoleras inte i ett triangelnät, utan representeras exakt, men för att veta höjden på mellanliggande punkter, behöver en interpolation göras. Eftersom de enskilda trianglarna har samma sluttningslutning och sluttningsriktning över hela ytan kan de beskrivas som en linjär trendyta (Eklundh & Pilesjö, 2008). Detta gör att höjdvärdet i varje punkt av ytan kan bestämmas genom linjär interpolation (Worboys & Duckham, 2004). Figur 2.5 visar en triangel i ett triangelnätverk. Höjden, z , och koordinaterna är kända i de tre hörnpunkterna a-c. För punkten x , vilken är en godtycklig punkt inne i triangeln, är koordinaterna kända och höjden z_x kan fås fram genom formel 2.1 (Worboys & Duckham, 2004).

$$z_x = \alpha z_a + \beta z_b + \gamma z_c \quad (\text{Formel 2.1})$$

z_x är sökt höjd i punkt x
 α , β och γ är koefficienter som kan bestämmas så att $\alpha + \beta + \gamma = 1$

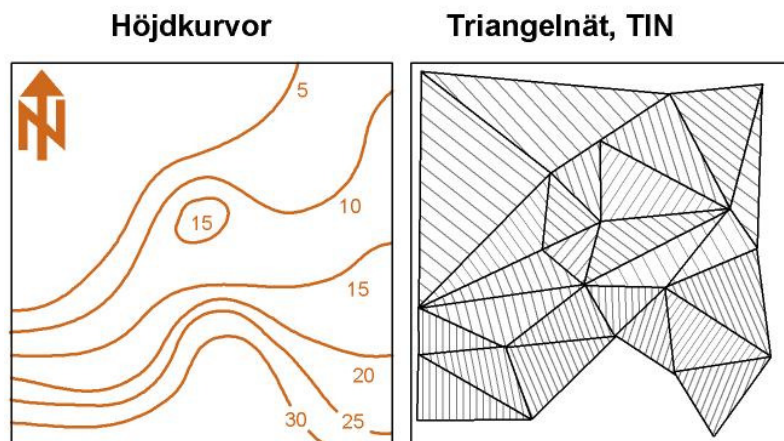
Höjden som fås fram är korrekt under förutsättning att triangelytan är plan. I verkligheten är det dock troligt att ytan inte är helt plan, vilket ger en avvikelse från det verkliga värdet.



Figur 2.5 Triangel i ett triangelnät där de tre hörnpunkterna a-c har kända koordinater och höjd. Höjden z_x i punkten x interpoleras fram med hjälp av formel 2.1 (Baserad på Worboys & Duckham, 2004, sid 189).

Att utföra analyser med triangelnät är mer beräkningsintensivt än för grid (Maune et al., 2007). Eftersom höjdvärden enbart sparas i hörnpunkterna, måste en interpolation göras för att få fram ett höjdvärde i aktuell punkt innan vidare analys kan utföras. Dessutom erbjuder, som nämnts ovan, flera dataprogram enbart möjligheter att göra vissa analyser på grid data.

En fördel med triangelnät är att trianglarnas storlek kan anpassas till terrängen, vilket gör att mängden data som krävs för att lagra höjdmodellen går att minska (Eklundh & Pilesjö, 2008). Detta genom att trianglarna kan göras stora i mer flacka områden, medan mer komplicerad topografi beskrivs med, till storleken, mindre trianglar. Detta visas i figur 2.6. Jämför med raster där upplösningen måste vara densamma över hela området, och en avvägning mellan detaljrikedom och datamängd måste göras. Triangelnätet kan också byggas upp så att det följer topografiska former som åsar och dalar med stor noggrannhet. En nackdel med triangelnät är triangelutseendet som terrängen får. I figur 2.1 syns triangelformerna ganska tydligt, speciellt i ytmodellen.

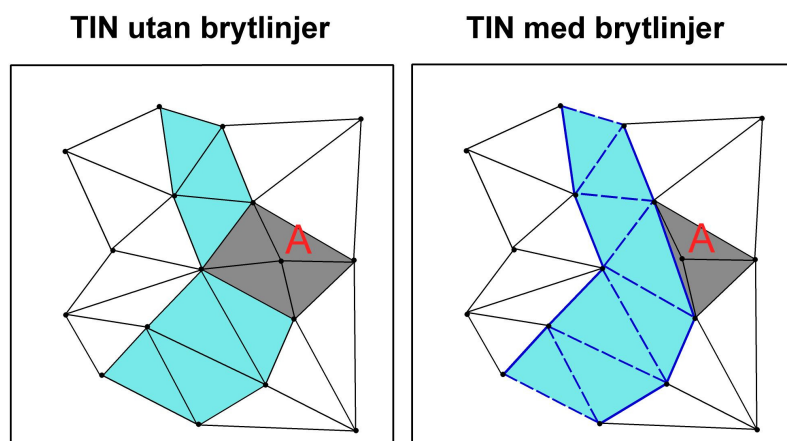


Figur 2.6 Samma område som figur 2.3 men som triangelnät.

2.3.2.1 Brytlinjer i triangelnät

En brytlinje är en linje där lutningen ändras markant (Maune et al., 2007). Brytlinjer kan antingen vara naturliga, som åsryggar, sjöar eller förkastningar, eller människoframställda, som kanter vid vägbankar, skärningar eller kanaler. En fördel med triangelnät är att brytlinjer kan inkluderas i trianguleringen, vilket ger en bättre representation av topografin. En metod att inkludera brytlinjer är att göra en *constrained Delaunay triangulering*. Det ger möjligheten att utöver punkterna i en punktsvärm, även kunna definiera ett antal linjer som ska vara med i den slutliga trianguleringen. Metoden beskrivs bl.a. i Worboys & Duckham (2004).

Figur 2.7 illustrerar en situation som kan uppstå om brytlinjer inte används. Figuren visar en kanal (blå) som flödar förbi en höjd (grått) som delvis sprängts bort för att ge plats åt kanalen. Resterande trianglar är ej viktiga för illustrationen och lämnas vita. I den vänstra figuren har inte brytlinjer använts. Här har den högsta punkten i höjden A inte skapat en triangel med flodbanken. Istället har det skapats två trianglar med en hörnpunkt på andra sidan floden. Detta bildar en större höjd som hindrar flodens flöde, och som ger en felaktig representation av verkligheten. Det skulle exempelvis ge felaktiga hydrologiska modeller. Den högra figuren visar ett triangelnät som utgått från samma punktsvärm av höjddata, men där brytlinjer har lagts in. Brytlinjerna är de blå linjerna som representerar flodbanken. Här tvingas den högsta punkten i höjden A att bilda triangel med flodbanken. Detta gör att en brant sluttning ned mot kanalen bildas, och både höjd och kanal representeras som i verkligheten. Detta triangelnät skulle ge bra hydrologiska modeller.



Figur 2.7 Två påhittade triangelnät för att illustrera en situation då brytlinjer kan vara bra. Triangelnäten är skapade utan (vänstra) respektive med brytlinjer (högra). A är en höjd som delvis sprängts bort för att ge plats åt kanalen. Med brytlinjer blir höjden korrekt lagrad i triangelnätet, och kanalen passerar vid foten. Utan brytlinjer skapas istället en större höjd som hindrar kanalens flöde, och ger en felaktig modell (Baserad på Maune et al., 2007), sid 567).

2.3.3 Höjdkurvor

En höjdkurva är en linje som binder samman punkter med samma höjd. De används främst för manuell tolkning av topografisk information (Maune et al., 2007). För en tvådimensionell karta är höjdkurvor en bra metod att visa höjdformationer. Åsar, dalar, toppar osv. är lättare att identifiera och tyda för det mänskliga ögat jämfört med om de lagras som grid eller triangelnät. En annan fördel med att lagra höjddata som kurvor är att de upptar en relativt liten del av datorns minne (Eklundh & Pilesjö, 2008). Dock motverkas det av svårigheten att bestämma höjdvärden mellan kurvorna. Detta gör att analyser blir komplicerade och tidskrävande.

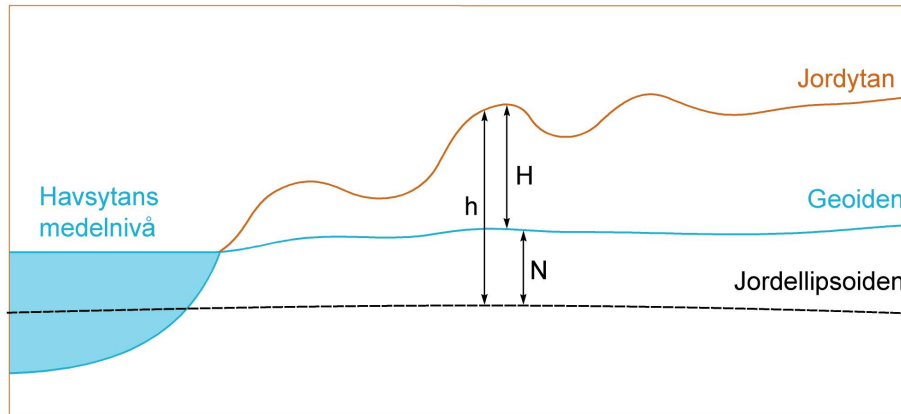
2.4 Höjdsystem

Förra avsnittet behandlade olika strukturer för lagring av höjddata. Detta avsnitt beskriver hur ett höjdsystem är uppbyggt, med fokus på svenska förhållanden. Oberoende av hur höjdvärdena lagras måste de anges i ett väldefinierat referenssystem för höjd för att ge hög noggrannhet (Ekman, 2002). Ett sådant referenssystem brukar kallas höjdsystem. Olika höjdsystem anger olika höjd för en och samma punkt. Det innebär att en känd höjd med okänt höjdsystem inte kan användas med hög noggrannhet. Höjdsystemet byggs upp av ett nätverk av noggrant inmätta referenspunkter s.k. höjdfixar (Ågren & Hauska, 2008). Dessa höjdfixar är sedan utgångspunkter för vidare höjdmätningar lokalt och regionalt. Nätverket byggs upp med precisionsavvägningar som beskrivs i avsnitt 3.1.

2.4.1 Höjd över havet, geoidhöjd

För att kunna ange en höjd krävs en nivå att referera till. Det måste vara höjden över något. Vanligtvis anges höjd som höjd över havet, men en mer korrekt benämning borde vara höjd över geoiden. "Geoiden definieras som den ekvipotentialyta (nivåyta) i jordens tyngdkraftsfält som så bra som möjligt ansluter till havsytans medelnivå" (Ågren & Hauska, 2008). Förenklat kan man säga att geoiden är en tänkt förlängning av havsytan in under land. Geoidens form är komplicerad, och det går inte att uttrycka den med någon enkel matematisk formel.

Figur 2.8 visar höjden över geoiden H , men också höjden över ellipsoiden h , och geoidhöjden N . Geoidhöjden är skillnaden i höjd över geoiden jämfört med ellipsoiden, och varierar mellan -100 m och +100 m (Ekman, 2002). Som nämnts tidigare brukar höjden anges som höjd över havet, men satellitbaserade mätmetoder, som GPS, mäter istället höjden över ellipsoiden (Ågren & Hauska, 2008). För att kunna konvertera dessa mätningar till höjd över geoiden, enligt $h = H + N$, krävs att geoidhöjden är känd. Den fås fram med hjälp av en geoidmodell, som beskrivs nedan.



Figur 2.8 Höjd över havet, eller geoiden, H , höjd över ellipsoiden h och geoidhöjd N (Baserad på Ågren & Hauska, 2008, sid 74).

Varför just geoiden valts som referens för att ange höjder har främst tre orsaker (Ågren & Hauska, 2008). En anledning är att höjder ofta används för att på något sätt kunna ange åt vilket håll vatten rinner. Med geoiden som referens rinner vatten alltid från ett högre värde till ett lägre, vilket det inte alltid skulle göra om ellipsoiden valdes som referens. En annan orsak är att havet är en naturlig nivå. Det är dit som vattnet strävar att flöda. Den tredje orsaken är att den noggrannaste metoden att bestämma höjd, avvägning (se avsnitt 3.1) ger höjdskillnader i förhållande till geoiden.

2.4.2 Höjdsystemets nollnivå

För att kunna bestämma hur högt över havet, eller geoiden, en punkt ligger, måste man först bestämma vad som ska räknas som havsytans medelnivå (Ågren & Hauska, 2008). Denna nivå kan bestämmas med hjälp av en mareograf, som i princip är en fast monterad linjal, på vilken vattenståndet avläses automatiskt. Under en tillräckligt lång tidsserie kan sedan en medelnivå beräknas. Ett problem här är att medelnivån inte är konstant (Ekman, 2002). Detta beror på långtidsförändringar som exempelvis förändringar i klimatet. Därför måste medelnivån för ett visst år bestämmas.

Vid val av havsnivå är det lämpligt att inte bara titta på egna kusten, utan helst välja en havsnivå som överrensstämmer med andra höjdsystem t.ex. grannländernas (Ågren & Hauska, 2008). I Europa baseras flera höjdsystem på en mareograf i Holland, känd som NAP (*Normaal Amsterdam Peil*). Den anger nollnivån för det gemensamma europeiska höjdsystemet EVRS (*European Vertical Reference System*), såväl som de svenska höjdsystemen som beskrivs i avsnitt 2.5. Nivån som används är medelhavsnivån vid högvatten 1683 - 1684. Med andra ord är det en nivå som uppmätts för länge sedan, men den ger en nivå som fortfarande stämmer hyfsat bra överrens med medelhavsnivån i Europa.

2.4.3 Geoidmodeller

En geoidmodell är en modell som kan användas för att omvandla höjder över ellipsoiden till höjder över havet (Ågren, 2009). Satellitbaserad positionering bestämmer höjden över ellipsoiden, vilket gör att en geoidmodell behövs för att omvandla höjderna till höjd över geoiden. En metod att bestämma geoiden är att utnyttja tyngdkraftsdata. Detta ger en s.k. gravimetrisk geoidmodell, vilken utgör en kontinuerlig representation av geoiden. En alternativ metod, s.k. geometrisk höjdbestämmning, går ut på att bestämma höjden över ellipsoiden h , i punkter med avvägda höjder över geoiden H . Geoidhöjden N , blir då skillnaden mellan ellipsoidhöjd och geoidhöjd, vilket visas i 2.8. Detta ger bara geoidhöjder i ett antal punkter. För att få en kontinuerlig yta behöver interpolering göras, vilket ger upphov till interpolationsfel.

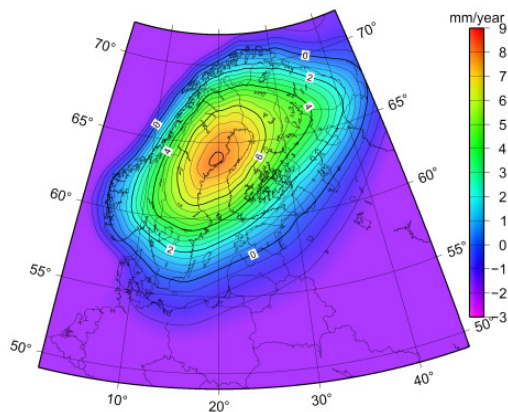
För att bestämma en geoidmodell är det oftast bäst att kombinera dessa två metoder (Ågren, 2009). Genom att passa in den gravimetriska modellen fås en anslutning till den geoid och ellipsoid som används i det aktuella referenssystemet. Genom interpolation av skillnaderna mellan de inmätta geoidhöjderna och de som fås fram genom den inpassade gravimetriska geoidmodellen, kan tidigare nämnda interpolationsfel reduceras. Vid bestämning av den nya svenska geoidmodellen SWEN08_RH2000 har denna kombination använts (Ågren, 2009).

2.4.4 Landhöjningsmodeller

Ett problem med höjddata i Sverige är landhöjningen som pågått sedan senaste inlandsisens avsmältning (Ekman, 2002). Anledningen till höjningen är att när marken belastades av den tunga inlandsisen sjönk jordskorpan sakta ner i jordmanteln. När sedan inlandsisen smälte och jordskorpan avlastades från det höga tryck som den tunga isen utövade, började den stiga. Detta är en långsam process vilket gör att höjningen fortfarande håller på. För närvarande är höjningen som mest 1 cm/år längs bottenvikskusten, och avtar med avståndet därifrån. I Skåne är höjningen noll (Ågren & Hauska, 2008).

Som nämnts tidigare byggs ett höjdsystem upp av ett nätverk av höjdfixar. De noggranna inmätningar som krävs för detta tar lång tid att genomföra. Den senaste nationella precisionsavvägningen (se avsnitt 2.5.1) som genomfördes för att ta fram nuvarande höjdsystem, RH2000, pågick mellan 1979 – 2003 (Olsson & Eriksson, 2005). Detta gör att det behövs en landhöjningsmodell för att synkronisera mätningarna, när ett nationellt höjdsystem tas fram (Ågren & Svensson, 2007). I annat fall skulle mätningar avvika p.g.a. tidsskillnaden mellan dem. Den tidpunkt till vilken de olika inmätningarna ska omräknas kallas epok.

En landhöjningsmodell kan tas fram bl.a. genom att mäta havsnivån eller genom satellitbaserade mätningar av höjden under långa tidsserier (Ågren & Svensson, 2007). Den går också modellera genom att ta hänsyn till bl.a. litosfärens och jordmantelns egenskaper. Den nuvarande landhöjningsmodellen i Sverige NKG2005LU togs fram i samband med det senaste höjdsystemet, RH2000, och är ett samarbete med de nordiska länderna. Epoken för RH2000 är år 2000.



Figur 2.9 Den nuvarande landhöjningsmodellen i Sverige NKG2005LU, som togs fram i samband med det senaste höjdsystemet RH2000. Den visar den årliga landhöjningen i mm. (Källa Ågren & Svensson, 2007, sid 96). © Lantmäteriverket

2.5 Svensk nationell höjddata. Historia, nutid, och framtida planer

Detta avsnitt ger en kort beskrivning av historiska och nuvarande höjdsystem i Sverige. Därefter beskrivs den nya planerade svenska höjddatabasen.

2.5.1 Nationella precisionsavvägningar

1857-1885 genomfördes den första systematiska höjdmätningen i Sverige vilket resulterade i höjdsystemet RH1860 (Olsson & Eriksson, 2005).

1886 – 1905 gjordes den första nationella precisionsavvägningen (Olsson & Eriksson, 2005). Detta innebär att RH1860 inte blev långlivat. Som nollnivå valdes medelvattenståndet i Stockholm år 1900. Avvägningar beskrivs i avsnitt 3.1.

1951 – 1967 genomfördes den andra nationella precisionsavvägningen, som resulterade i höjdsystemet RH70. Avvägningen genomfördes bl.a. för att den första avvägningen var för gles och av för låg kvalitet. Dessutom kunde, genom en andra avvägning, landhöjningen i landets inre delar beräknas. Som nollnivå valdes NAP (*Normaal Amsterdam Peil*).

1979 – 2003 genomfördes den tredje nationella avvägningen, kallad riksavvägningen (Olsson & Eriksson, 2005). Nätverket för denna visas i figur 3.xx. Avvägningen resulterade i RH2000, som blev officiellt 2005. Nollnivån är liksom för RH70 NAP vilken även utgör nollnivån för det gemensamma europeiska höjdsystemet EVRS (*European Vertical Reference System*). Arbetet gjordes i stor utsträckning i samarbete med övriga nordiska länder. För att kunna ansluta de olika nationella näten på bästa sätt, gjordes en gemensam utjämning av alla avvägningsnät i norra Europa.



Figur 2.10 Nätet för den tredje nationella precisionsavvägningen, riksavvägningen, som är grunden för RH2000 (Källa Lantmäteriet, 2009). © Lantmäteriverket

2.5.2 Svenskt nationellt höjdsystem idag, RH2000

Det senaste höjdsystemet i Sverige är RH2000, som nämnts ovan. De äldre systemen används dock fortfarande, och flera kommuner har egna lokala höjdsystem (Ågren & Hauska, 2008). För att underlätta utbyte av geografisk information är det önskvärt att harmonisera data genom att kommunerna byter ut sina lokala höjdsystem mot RH2000. Ett sådant arbete har inletts men år 2007 hade endast 8 stycken av Sveriges ca 290 kommuner övergått till RH2000 (Ågren & Hauska, 2008).

Den senaste landhöjningsmodellen är NKG2005LU vilken togs fram i samband med framtagningen av RH2000 (Ågren & Svensson, 2007). Modellen är ett samarbete mellan de nordiska länderna. Epoken för RH2000 är år 2000.

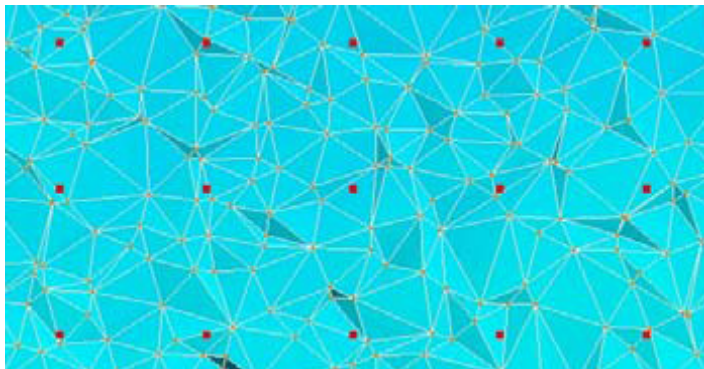
Den senaste nationella geoidmodellen är SWEN08_RH2000 (Ågren, 2009). Den används för att konvertera höjder över ellipsoiden till höjder i RH2000. Referenssystem i plan är SWEREF99.

2.5.3 Svensk nationell höjddata idag och framtida planer

Den nationella höjddata som finns idag är i gridform med en upplösning på 50 x 50 m, och ett medelfel i höjd på 2 m (Lantmäteriet, 2007a). Modellen har genomgått flera revideringar, varav den senaste avslutades 1994.

Som nämdes i inledningen motsvarar inte dagens höjddata de krav på noggrannhet som ställts av klimat och sårbarhetsutredningen. Därför är det beslutat att en ny nationell höjddata ska tas fram över Sverige. Upplösningen ska vara 2,5 x 2,5 m, med en medelfel i höjd som understiger 50 cm. (Lantmäteriet, 2007a). Data kommer att samlas in med laserskanning. Arbetet påbörjas sommaren 2009, och beräknas kunna klaras av på 4,5 år (Lysell, 2009). Färdiga höjddataprojekter beräknas finnas tillgängliga ca 6 månader efter ett område har skannats (Lysell, 2008).

Höjddata kommer att lagras som triangelnät, ur vilken regelbundna raster, grid, tas fram. Detta illustreras i figur 2.11. I blått syns det triangelnät som representerar hur höjddata kommer att lagras i den nya nationella höjddata. De röda punkterna är centrum i det grid som ska tas fram. Höjden i dessa tas fram genom interpolation som beskrivits i avsnitt 2.3.2. Denna interpolering görs från Lantmäteriets "Bas-DEM" varje gång en höjddata i gridform tas fram. Detta gör att en beställd höjddata alltid grundas aktuell höjddata (Lantmäteriet, 2007a). Hur data ska ajourhållas är inte beslutat ännu. Preliminärt kommer Lantmäteriet att erbjuda grid med 2,5 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m respektive 100 m upplösning (Lysell, 2008).



Figur 2.11 Triangelnät uppbyggt av laserskannad data. De röda punkterna markerar höjderna i ett regelbundet raster, grid (Källa Lantmäteriet, 2007a). © Lantmäteriverket

3 Insamling av höjddata

Tekniker för noggrann inmätning av enstaka punkter brukar traditionellt benämnas geodetiska mätmetoder, medan fjärranalys är metoder som ger en mer heltäckande representation av området i fråga (Klang & Ågren, 2008). Geodetiska mätmetoder kommer inte att i detalj beskrivas i denna rapport, men en kort beskrivning av avvägning kan vara lämplig eftersom precisionsavvägningar som bygger upp ett höjdsystem bygger på denna mätmetod.

Fjärranalys bygger istället på att data samlas in från avstånd av en sensor och analyseras. Sensorn som används kan antingen vara aktiv dvs. sänder ut egna signaler som mäts när de returneras, eller passiv dvs. registrerar de signaler som finns naturligt. En vanlig optisk kamera för flygfoto, både analog och digital, är ett exempel på en passiv sensor, eftersom den registrerar den elektromagnetiska strålning som når kameran. Vanligtvis registreras strålningen i den synliga delen av spektrum, men ofta även i den infraröda delen (se figur 3.1). Om man däremot använder blixtnär när man tar bilden fungerar kameran som en aktiv sensor, eftersom den strålning som kameran då registrerar är det ljus som sänts ut av blixten. Laserskanning och radar är aktiva sensorer eftersom de själva skickar ut den signal som sedan registreras när den åter når sensorn (Lillesand et al., 2004).

Detta kapitel inleds med en kort beskrivning av avvägning, och följs sedan av mer utförliga beskrivningar av fjärranalysmetoderna fotogrammetri och radar. Även laserskanning är en fjärranalysmetod men eftersom den tekniken behandlas mer utförligt tilldelas den ett eget kapitel.

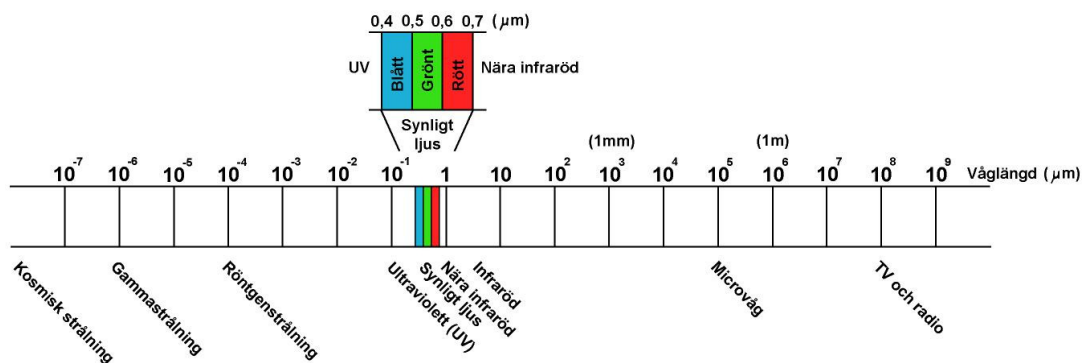
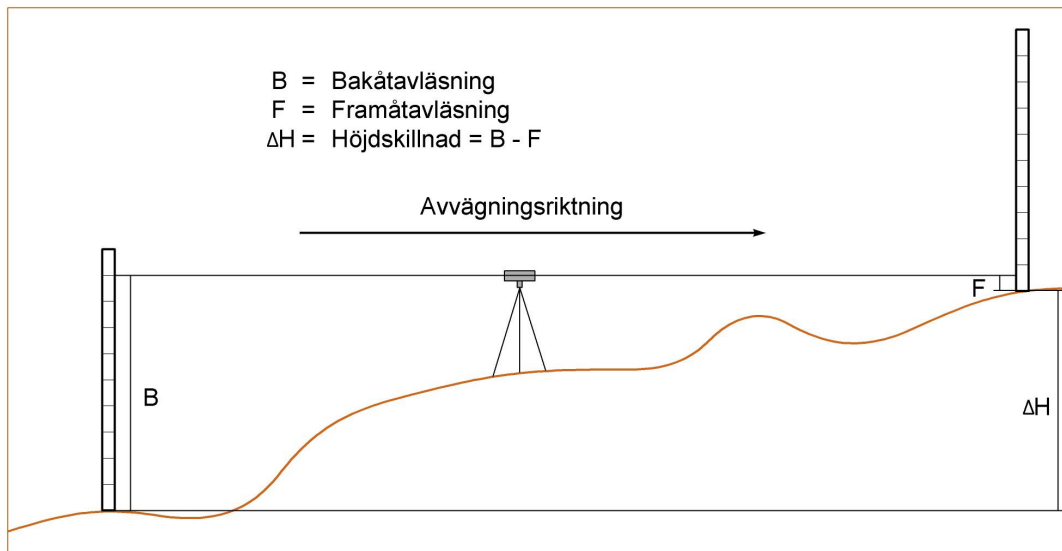


Fig 3.1 Elektromagnetiskt spektrum (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 5).

3.1 Avvägning

Avvägning är den noggrannaste metoden att mäta höjden över havet (geoiden), och används fortfarande vid precisionsavvägningar både nationellt och internationellt (Klang & Ågren, 2008). Den utrustning som behövs är dels avvägningstångar, vilka i princip är långa linjaler, med ett vattenpass, för att de ska kunna hållas i lod, dels ett avvägningssinstrument. Det senare är en kikare med hårkors, som riktas in i horisontalplanet. Principen som visas i figur 3.2 går ut på att avvägningstångarna placeras på två punkter, mellan vilka höjdskillnaden ska bestämmas. Mellan stängerna placeras avvägningssinstrumentet, som riktas bakåt mot startpunkten, där skalan på avvägningstången avläses. Detta ger höjdskillnaden mellan horisontalplanet och bakåtpunkten. Därefter vrids instrumentet mot framåtpunkten, och skalan på stängen läses av, vilket ger höjdskillnaden mellan framåtpunkten och horisontalplanet. Med höjdskillnaden mellan bakåtpunkt respektive framåtpunkt och horisontalplanet kända kan sedan höjdskillnaden mellan punkterna enkelt bestämmas.



Figur 3.2 Principen för avvägning (Baserad på Ågren & Hauska, 2008, sid 93).

Avvägning kräver fri sikt mellan instrument och avvägningstång, och större avstånd ger större fel (Klang & Ågren, 2008). 30-50 m kan anses som lagom avstånd vid avvägning. Därför delas längre mätningar upp i flera instrumentuppställningar, mellan den kända höjdfixen och den punkt som ska höjdbestämmas. Först mäts höjdskillnaden mellan höjdfixen och en tillfällig höjdfix, en s.k. padda, som består av en järnklump med höjdmärkning. Därefter placeras en ny padda ut, och avvägningstången från den kända höjdfixen flyttas till denna. Avvägningsinstrumentet placeras mellan paddorna, och höjdskillnaden mäts. Detta, ett s.k. avvägningståg, upprepas tills punkten som ska höjdbestämmas nås. För ett noggrannare resultat, och för att få en kontroll av att inget misstag gjorts brukar dubbelavvägning göras då extra hög noggrannhet krävs. Detta innebär att ett avvägningståg mäts i vardera riktningen mellan två punkter, och medelvärdet beräknas. I en precisionsavvägning länkas de olika avvägningstågen samman till ett nätverk av höjdfixar, som sedan bygger upp höjdsystemet. Se figur 2.10.

3.2 Fotogrammetri

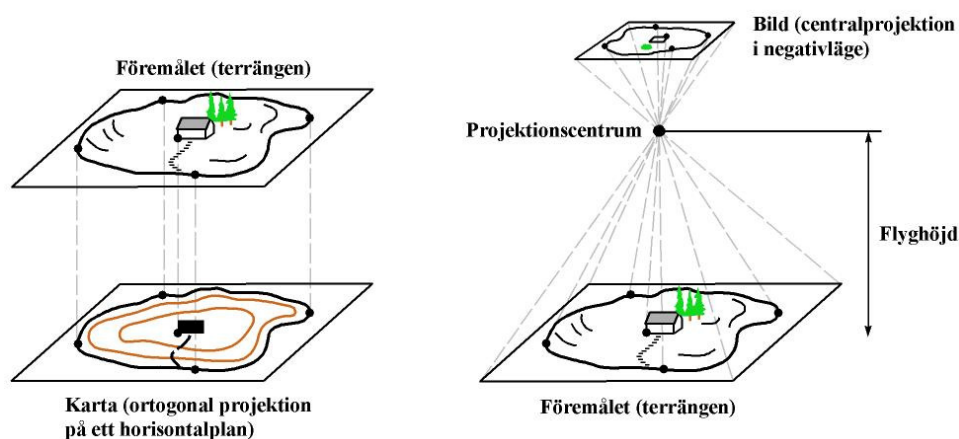
Fotogrammetri betyder språkligt sett "mätning i fotografisk bild" (Boberg, 2004). Det är vetenskapen om hur man med hjälp av fotografiers geometri, kan göra rumsliga (spatiala) mätningar. Kortfattat går det ut på att bestämma de geometriska relationerna mellan ett antal verkliga objekt, och deras lägen i en eller flera bilder (Klang & Ågren, 2008). Genom att rekonstruera denna fotograferingssituation, vilket görs genom att bygga stereomodeller av två, eller flera bilder, är det möjligt att med hög noggrannhet bestämma form, storlek och läge på alla objekt som syns i bilderna. Med hjälp av markstöd kan mätningarna georefereras till ett geodetiskt referenssystem.

Detta avsnitt inleds med en beskrivning av flygbilder och hur de skiljer sig från en karta. Höjddeplacering nämns och det beskrivs hur höjd kan mätas i flygbilder genom parallaxmätning och beräknas genom höjdskillnadsformeln. Därefter ges en beskrivning av stereomodeller.

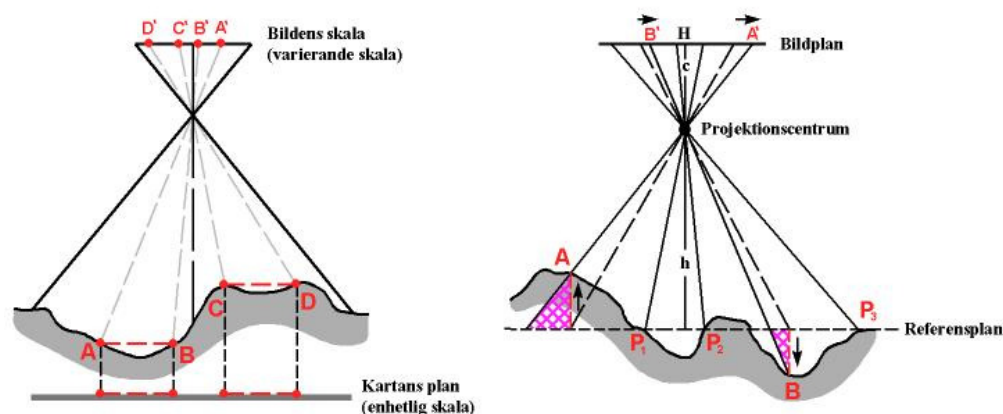
3.2.1 Flygbilder

En flygbild är en centralperspektivisk avbildning av terrängen, medan kartan är en ortogonal projektion (Ekelund, 1993). Som figur 3.3 visar är skillnaden att en karta avbildas genom att den träffas av projektionsstrålar som är lodräta mot ett horisontalplan. En flygbild däremot, träffas av strålar som först har passerat ett projektionscentrum, varför de träffar flygbilden med varierande vinklar. Detta ger kartan och flygbilden olika geometriska egenskaper. Kartan har konstant skala eftersom de lodräta strålar som bildar ortogonalprojektionerna träffar kartan på samma plats, oavsett höjden på den plats i terrängen de kommer från. Skalan i en flygbild däremot varierar med höjden, vilket Figur 3.4, vänstra visar. Ett parti i terrängen som ligger högre, och därmed närmare kameran, får större skala än ett parti som ligger på lägre höjd. Detta gör att bildskalan i en flygbild är en medelskala, som räknas från ett referensplan.

Skalvariationerna gör att detaljer i terrängen som ligger på olika höjd förskjuts i förhållande till varandra enligt figur 3.4, högra (Ekelund, 1993). Dessa lägesförskjutningar kallas höjddeplaceringar, och är alltid radiellt riktade, antingen från eller mot projektionscentrum. Höjder förskjuts från bildcentrum, medan dalar förskjuts mot centrum. Desto högre höjdskillnader desto större blir förskjutningarna. Höjddeplaceringarna är förutsättningen för stereobetraktning och mätning i flygbilder.



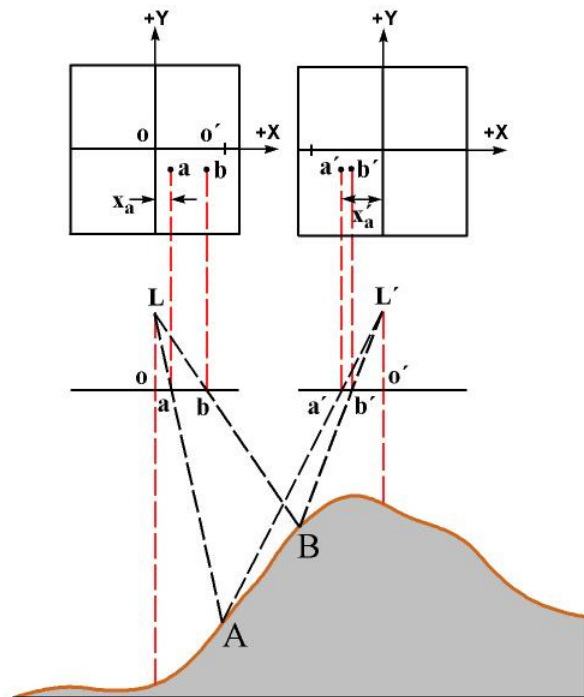
Figur 3.3 Skillnaden mellan ortogonal projektion (vänstra), så som en karta avbildas, och en centralprojektion (högra), som är hur flygbilder avbildas (baserad på Ekelund, 1993, sid 51).



Figur 3.4 Vänstra figuren visar hur skalan varierar inom en flygbild beroende på höjden. Avstånden AB och CD är lika långa i terrängen. På en karta kommer de också att vara lika långa. På en flygbild är avståndet C'D' längre än A'B'. Detta för att CD ligger högre i terrängen än A. Högra figuren visar lägesförskjutningar (höjddeplaceringar) i en flygbild. Höjder i terrängen (A) förskjuts ut från bildcentrum (H), medan dalar (B) förskjuts in mot bildcentrum. Detaljer (P_1 - P_3) som ligger i det tänkta referensplanet, från vilken flygbildens skala räknas förskjuts inte alls (baserad på Ekelund, 1993, sid 52)

3.2.2 Höjdbestämning genom parallaxmätning

Parallax är den skillnad i relativ position mellan fasta objekt med olika höjd som uppstår då man tittar på, eller fotograferar, dem från olika positioner (Lillesand et al., 2004). Det är samma fenomen som gör att det ser ut som om saker som ligger nära ser ut att förflytta sig fortare än mer avlägsna föremål om man exempelvis tittar ut genom fönstret när man åker tåg. Tar man två bilder ut genom fönstret med kort intervall, syns hur objekt på olika avstånd har olika relativa lägen i de båda bilderna. Det är detta fenomen som gör att det går få en 3D-bild i stereomodeller (se 4.1.3). Parallaxen för en punkt beräknas enligt formel 3.1 (Lillesand et al., 2004).

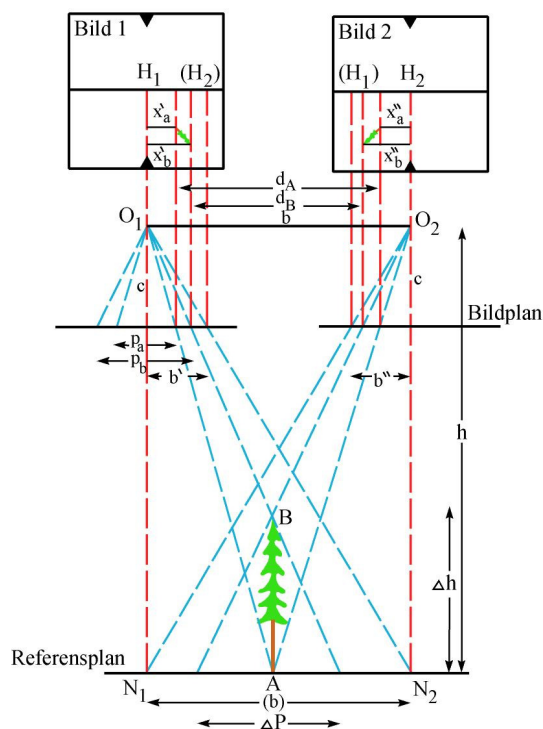


Figur 3.5 Parallax för punkt A i två överlappande flygbilder (baserad på Lillesand et al., 2004, sid 157)

$$p_{ax} = x_a - x'_a \quad (\text{Formel 3.1})$$

p_{ax} parallax för punkt a i x-led
 x_a uppmätt x-koordinat för punkt a i den vänstra flygbilden i stereoparet
 x'_a uppmätt x-koordinat för punkt a i den högra flygbilden

Mäts parallaxskillnaden mellan två punkter kan höjdskillnaden mellan dessa beräknas enligt höjdskillnadsformeln som härleds ur likformiga trianglar, formel 3.2 (Ekelund, 1993). Är höjden för en av punkterna känd kan dessutom den andras höjd bestämmas. I figur 3.6 beräknas parallaxen p_a för foten (A) av granen och för toppen (B) p_b . Parallaxskillnaden mellan dessa blir då $\Delta p = p_a - p_b$. Detta är detsamma som summan av granens höjddeplaceringar i de två bilderna (Boberg, 2004). Höjdskillnadsformeln kräver att fotograferingen skett enligt normalfallet och att bilderna är i lod. Normalfallet innebär att fotograferingsriktningarna för de båda fotografierna är parallella och vinkelräta mot bildbasen. Om det uppfylls blir y-koordinaterna desamma i båda bilderna, och därmed parallaxen i y-led noll. Lodbild innebär att bilden är tagen rakt nedåt.



Figur 3.6 Visar hur höjden kan bestämmas genom parallaxskillnaden (baserad på Ekelund, 1993, sid 73).

$$\Delta h = \frac{h \times \Delta p}{b' + \Delta p} \quad (\text{Formel 3.2})$$

- Δh är sökt höjdskillnad i terrängen (m)
- h är flyghöjd över referensplanet (m)
- b' är bildbasen (mm) (avståndet mellan bildcentrum i de båda bilderna)
- Δp är parallaxdifferensen i x-led mellan punkt A och B (mm)

3.2.3 Stereomodeller

Den noggrannaste fotogrammetriska metoden att bestämma terrängens form är genom stereoskopisk mätning och kartering i 3D-modeller (Ekelund, 1993). Tekniken, som inte kommer att beskrivas ingående i denna rapport, bygger på att två eller flera flygbilder monteras i ett stereoinstrument så att en 3D-bild av terrängen upplevs av betraktaren. 3D-effekten bygger på att människan ser föremål på olika avstånd genom att skapa olika bilder av föremålen i höger och vänster öga. Detta återskapas i stereomodellen genom att två flygbilder med överlappning betraktas med vardera ögat.

Skapandet av en stereomodell görs i två steg (Klang & Ågren, 2008). Först görs en relativorientering av flygbilderna. Det innebär att bilderna monteras i de lägen relativt varandra de hade vid exponeringen, vilket ger en lokal 3D-modell av terrängen. Lokal innebär att den inte är kopplad till något referenssystem. För att georeferera modellen görs därför även en absolutorientering där kända geodetiskt inmätta stödpunkter i terräng, s.k. markstöd, utnyttjas (Ekelund, 1993). Med hjälp av stödpunkterna görs en inpassning av modellen i ett geodetiskt referenssystem t.ex. SWEREF99. Modernare teknik där kamerans position och lutning vid exponering bestäms med satellitpositionering och tröghetssystem, möjliggör georeferering utan användande av markpunkter (Lillesand et al., 2004). Vanligtvis används dock en kombination av inpassning med data från inmätning av sensor och markstöd.

3.3 Radar

Detta avsnitt inleds med en kort beskrivning av radar, följt av en beskrivning av principen för flygburen radar. Därefter beskrivs ett antal olika upplösningar vid insamling av radardata, och radarbildens geometri. Sedan behandlas stereoeffekter i radarbilder, följt av en beskrivning av en teknik som heter interferometrisk radar. Slutligen behandlas fjärranalys med radar från rymden. Eftersom det varit svårt att hitta svenska översättningar har ett antal egna översättningar gjorts, främst i avsnitten om olika upplösningar.

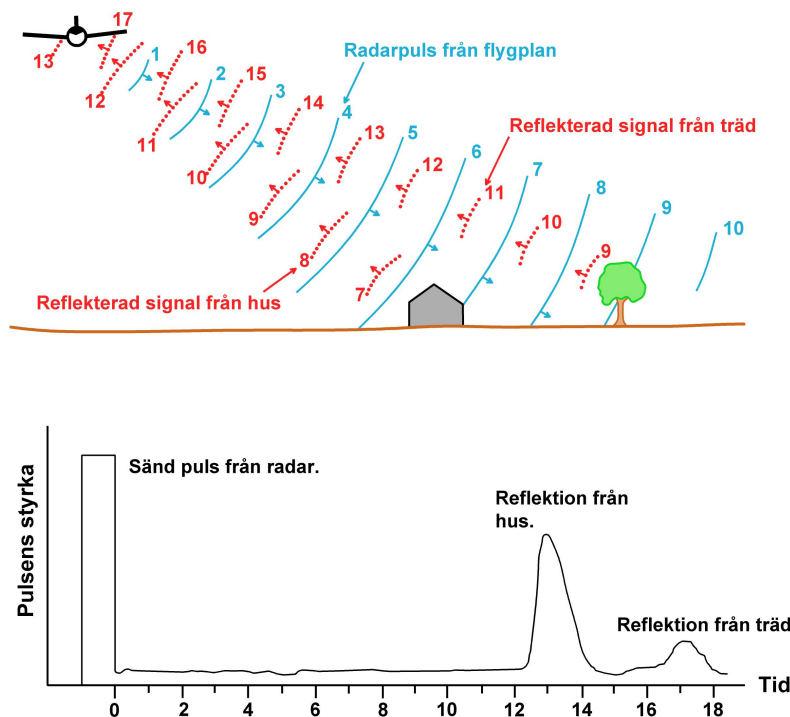
Som nämdes i inledningen står radar för *Radio Detecting and Ranging*. Det är en aktiv sensor som arbetar i mikrovågsdelen av det elektromagnetiska spektrumet. Dvs. våglängder mellan 1 mm – 1 m (Lillesand et al., 2004). Jämfört med synligt ljus är det betydligt längre våglängder (se figur 3.1). Tekniken bygger på att pulser av mikrovågsenergi sänds ut från en sensor. Energipulserna rör sig med en hastighet i närheten av ljusets (ungefär 3×10^8 m/s). Sensorn mäter sedan tiden det tar för pulserna att returneras, och deras intensitet. En fördel med radar är att den fungerar även i mörker. Detta eftersom det är en aktiv sensor och signalerna kan, beroende på våglängd, tränga igenom moln, dimma och rök. Radartekniken är tack vare detta användbar dygnet runt, i alla väder (Lillesand et al., 2004). Teoretiskt skulle de kortaste våglängderna ge bäst förutsättningar för täta registreringar. Dessa blockeras tyvärr av vattenånga, och kan därför inte användas vid mulen väderlek. Istället används de kortare våglängderna till markbundna vädersystem för övervakning av stora molntäckten och stormar. De längre våglängderna används bl.a. för framställning av höjddata i områden med mycket moln och skog (Klang & Ågren, 2008). Radar används även för övervakning av havsytor för att studera vind, våg och isläget. Även havsbottnars topografi har studerats med radar (Lillesand et al., 2004).

Flygburna system för radar kallas SLAR (*Side-Looking Airborne Radar*). De utvecklades från början för militära syften, vilket har medfört ett par nackdelar (Lillesand et al., 2004). Dels fördröjningen innan systemen blivit civilt tillgängliga, men kanske störst påverkan har det faktum haft att systemen designats för att hitta militära mål. För att dessa skulle bli så tydliga som möjligt i radarbilderna, var det nämligen inte bra att terrängföremål som gjorde bilderna röriga, och kunde dölja militära mål fanns med. För civila ändamål, är det oftast just dessa terrängföremål som är viktiga. Utvecklingen har dock gjort radar till en bra fjärranalysmetod även för civilt bruk. Speciellt i geografiska områden som ofta är molntäckta, vilket hindrar fjärranalysmetoder som använder sig av det synliga spektrumet, som t.ex. flygbilder, är radar en lämplig teknik.

3.3.1 Principen för flygburen radar, SLAR

Principen för flygburen radar visas i figur 3.7. Mikrovågsenergi sänds ut i korta pulser, tidsordningen mikrosekunder (10^{-6} sekunder), från en antenn på flygplanet. Figuren visar hur en puls utbreder sig från flygplanet. Siffrorna markerar antalet tidsenheter som förflutit sedan pulsen sändes ut. De blå heldragna linjerna, tidsenhet 1 – 10, visar den utgående pulsen från antennen. Strax efter tidsenhet 6, når pulsen huset, och en del av energin reflekteras mot flygplanet. Strax efter tidsenhet 12 når signalen åter antennen, och registreras. Se diagrammet i nedre delen av figuren. Vid tidsenhet 9 når den utsända pulsen trädet. En del av energin reflekteras mot flygplanet, och når åter antennen vid tidsenhet 17. Eftersom trädet reflekterar radarpulsens energi mindre effektivt än huset, blir signalen svagare, vilket tydligt syns i diagrammet. Genom att mäta tiden det tar från det att pulsen sänds ut tills att den åter når antennen kan avståndet till föremålet som reflekterade signalen bestämmas. Detta eftersom pulsens hastighet är känd (Lillesand et al., 2004). Liksom vid laserskanning (se kapitel 4)

georefereras data från radar genom att radarantennens position och orientering bestäms med hjälp av satellitpositionering och tröghetsnavigering (Hodgson et al., 2003).



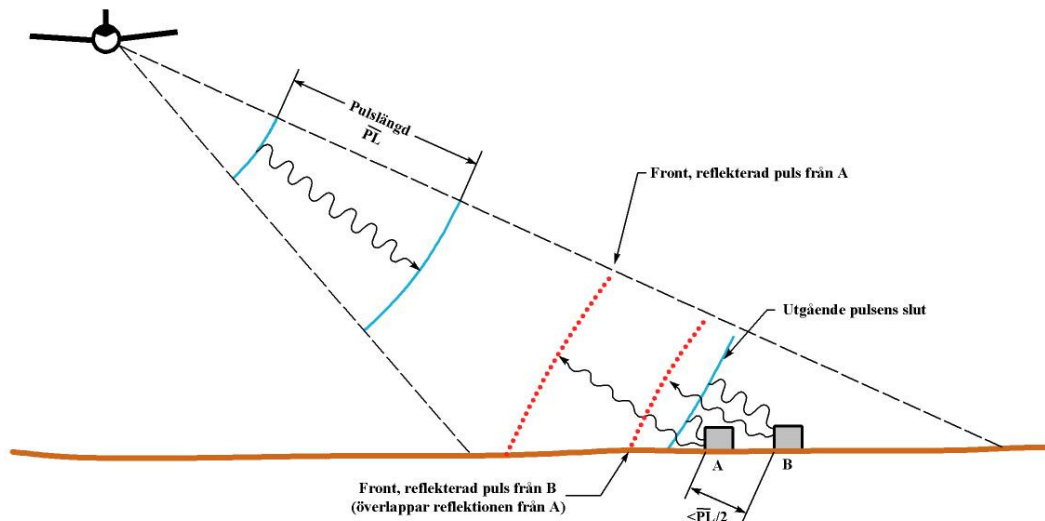
Figur 3.7 Principen för flygburen radar. Övre delen visar hur pulsen sänds ut från antennen på flygplanet, och reflekteras av huset respektive trädet. Notera att siffrorna står för tiden. Nedre diagrammet visar signalen i tidsintervallet upp till 18. Observera att skalan är enhetslös, men att intervallen, är samma som visas i övre delen (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 642).

3.3.2 Upplösning för SLAR data

Det finns ett antal olika typer av upplösningar för SLAR-data beskrivna (Lillesand et al., 2004). Dessa påverkas av de två oberoende systemparametrarna, pulslängd och antennens strålningsvidd (eng. *beamwidth*). Pulslängden styrs av hur länge antennen sänder ut radarstrålen, och påverkar upplösningen i den riktning radarpulsen sänds ut, dvs. i sidledd från flygriktningen. Detta är i denna rapport översatt till längdupplösning (eng. *range resolution*). Upplösningen i flygriktningen har översatts till breddupplösning (eng. *azimuth resolution*), och styrs av strålens bredd, vilken i syn tur bestäms av antennbredden.

3.3.2.1 Längdupplösning, marklängdupplösning och riktningslängdupplösning

Hur längdupplösningen påverkas av pulslängden illustreras i figur 3.8. För att två olika markobjekt ska kunna särskiljas i en radarbild, krävs att de reflekterade pulserna från de olika objekten inte överlappar varandra (Lillesand et al., 2004). Figuren visar hur en utsänd puls av längden PL reflekteras mot objekten A respektive B. I detta fall är avståndet mellan A och B, kortare än halva pulslängden. Därför hinner den reflekterade pulsen från B nå och passera A medan samma puls fortfarande håller på att reflekteras från A. Detta gör att reflektionerna överlappar varandra och kommer att registreras som ett stort objekt. För att kunna särskilja objekten måste skillnaden i riktningsavstånd (eng. *slant range*) mellan objekten vara större än halva pulslängden. Riktningsavståndet är avståndet direkt mellan antenn och objekt. Därför påverkas längdupplösningen i pulsens riktning, riktningslängdupplösningen (eng. *slant range resolution*), inte av ändrat avståndet till antennen, utan enbart av pulslängden. Riktningslängdupplösningen är halva pulslängden.



Figur 3.8 Visar hur pulslängden påverkar längdupplösningen för SLAR-bilder (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 646).

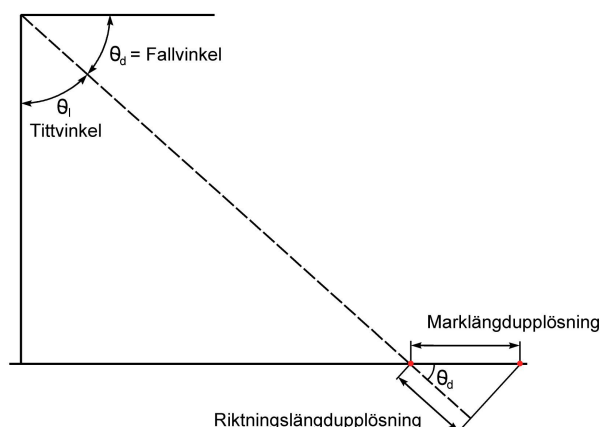
Markupplösningen i riktning ut från flygriktningen, marklängdupplösningen (eng. *ground range resolution*) däremot påverkas av avståndet till antennen (Lillesand et al., 2004). Detta illustreras i figur 4.xx. Marklängdupplösningen är omvänt beroende av cosinus för fallvinkeln (eng. *depression angle*) och kan beräknas enligt formel 3.3 (Lillesand et al., 2004). Eftersom fallvinkeln minskar med ökat avstånd från flygplanet, blir marklängdupplösningen sämre med ökat avstånd.

$$R_r = \frac{c * \tau}{2 * \cos \theta_d} \quad \text{Formel 3.3}$$

R_r = marklängdupplösningen

τ = pulslängd

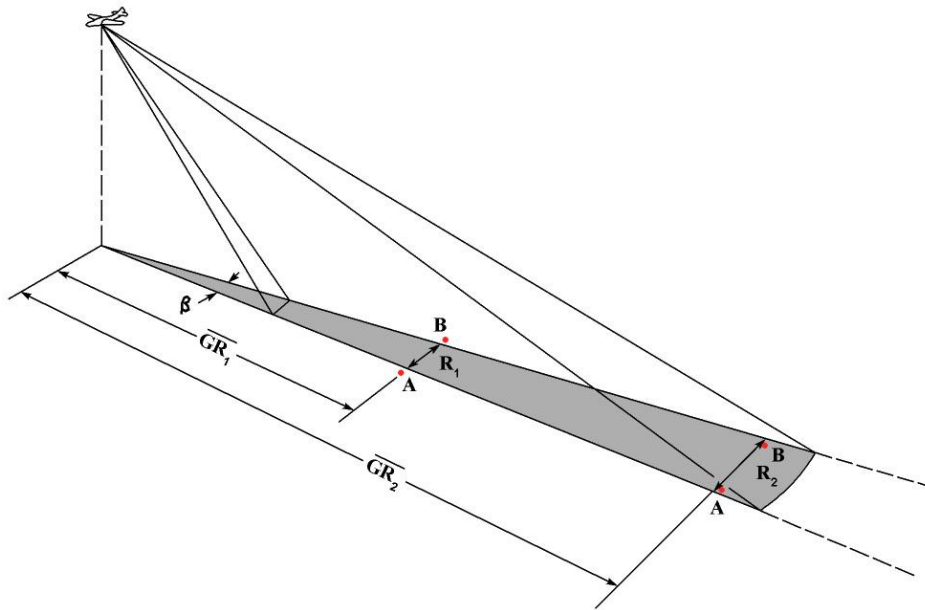
θ_d = fallvinkel



Figur 3.9 Visar hur avståndet till antennen påverkar marklängdupplösningen i strålningsriktningen för SLAR, även om riktninglängdupplösningen är densamma (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 647).

3.3.2 Breddupplösning

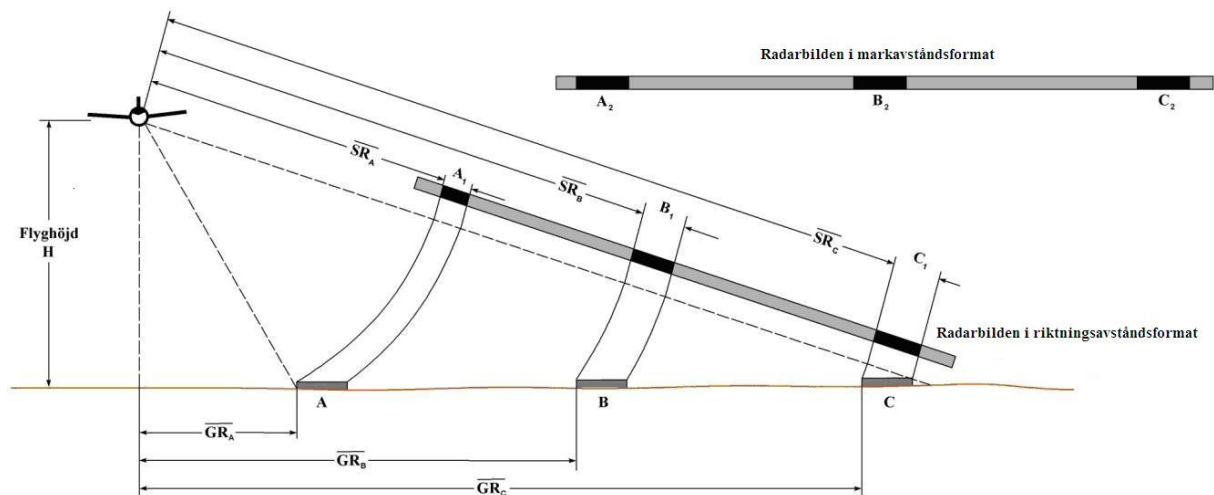
Upplösningen längs flygriktningen, breddupplösningen, påverkas av antennens vinkelbredd β (eng. *angular beamwidth*) och markavståndet (eng. *ground range*) (Lillesand et al., 2004). Markavståndet är avståndet från flygplanets lodlinje, till den plats pulsen når marken. Antennens vinkelbredd gör att strålens bredd ökar med avståndet från antennen. Desto större vinkelbredd, desto större ökning, vilket visas i figur 3.10. Detta gör att breddupplösningen ökar med avståndet från antennen. Objekten A och B, i figuren skulle t.ex. avbildas som två separata objekt vid första markavståndet (GR_1) eftersom de inte kommer att träffas av radarpulsen samtidigt. Vid andra markavståndet (GR_2) däremot har strålen blivit så bred att objekt A fortfarande skulle vara inom strålen, när objekt B, träffas. Därför skulle de avbildas som ett stort objekt.



Figur 3.10 Visar hur avståndet till antennen påverkar upplösningen i flygriktningen, breddupplösningen, för SLAR-bilder (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 648).

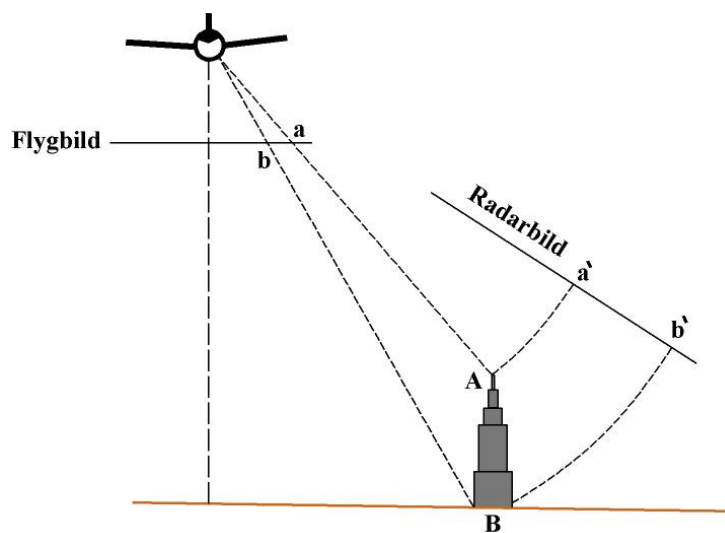
3.3.3 Radarbildens geometri

En radarbilds geometri skiljer sig fundamentalt från en flygbild (Lillesand et al., 2004). Detta i huvudsak beroende på att i en radarbild registreras avstånd. I en flygbild är det vinklar som mäts. Det finns två olika metoder att registrera bilder med SLAR. Riktningssvängningsbilder (eng. *slant range images*) innebär att tiden för den reflekterade pulsen att nå antennen mäts. Det innebär att avståndet som mäts är det direkt mellan antennen och föremålet, inte det horisontella avståndet. Används istället markavståndets (eng. *ground range*) metoden görs en tidsberäkning för att få fram det horisontella avståndet. Skillnaden mellan de olika metoderna illustreras i figur 3.11. Bilden i markavståndsformat har i det närmaste konstant skala, medan riktningssvängningsbilden har varierande skala. Skalan är minst närmast antennen och ökar med avståndet från antennen. Att få konstant skala i en hel SLAR-bild är komplicerat, eftersom skalan bestäms av olika faktorer i olika riktningar. I längdriktningen, dvs. ut från flygplanet, bestäms skalan av ljusets hastighet. I breddriktningen, dvs. flygriktningen, bestäms skalan istället av flygplanets hastighet.



Figur 3.11 Visar hur tre markobjekt, A-C, avbildas på en radarbild i riktningssvståndsformat, där riktningssvståndet registreras direkt, respektive markavståndsformat, där riktningssvståndet har räknats om till markavstånd (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 653).

Höjdeplaceringar i radarbilder är vinkelräta mot flygriktningen, men till skillnad från flygbilder, där högre partier ser ut att luta ut från bildcentrum, kommer höjder i radarbilder att luta in mot centrum (Lillesand et al., 2004). Detta beror på att avståndet från antennen till den högsta punkten är kortast, varför den kommer att träffas tidigast av pulsen.



Figur 3.12 Höjdeplacering i radarbild, där tornet ser ut att luta in mot bildcentrum, jämfört med flygbild där det ser ut att luta utåt (Baserad på Lillesand et al., 2004, sid 655).

3.3.4 Stereoeffekt i radarbilder

Liksom för flygbilder kan höjdskillnader bestämmas genom att mäta parallaxskillnader i radarbilder (Lillesand et al., 2004). För att skapa stereopar med radarbilder, är det vanligast att bilderna registreras från samma sida av området som ska avbildas. Detta görs antingen genom att flyga längs två olika stråk på samma höjd, eller i samma stråk, fast på olika höjd. På dessa sätt erhålls olika strålningsriktningar för radarn och stereoeffekt kan fås. Redan små skillnader i vinkel ger stereoeffekt. Anledningen till att dessa metoder är vanligare än att flyga på vardera sidan av området är att, radarbilder tagna från olika håll är svåra att stereobetrakta. Detta bl.a. beroende på sidobelysningseffekten som radartekniken ger, med olika reflektionsförhållanden i de olika bilderna om området flygs från två olika sidor.

3.3.5 Interferometrisk radar

Interferometrisk radar är en metod att ta fram topografisk information genom att mäta fasskillnaden för den reflekterade pulsen mellan två antenner med olika position (Lillesand et al., 2004). Det finns flera olika metoder att samla interferometriska radar data. Den enklaste metoden, enkelpass interferometri (eng. *single-pass interferometry*), går ut på att placera 2 antenner på ett och samma flygplan. Den ena antennen fungerar som både sändare och mottagare, medan den andra enbart verkar som mottagare. Avståndet mellan antennerna bildar då den interferometriska baslinjen (eng. *interferometric baseline*). Flerpass interferometri (eng. *Repeat-pass interferometry*), innebär att två eller fler flygningar, med enbart en antenn görs över området som ska undersökas. Den interferometriska baslinjen är då avståndet mellan de olika flygstråken. Detta avstånd bör inte överskrida tioalet meter för flygburen radar. Det är viktigt att de olika stråken flygs med kort tidsintervall. Längre tid mellan flygningarna ökar nämligen risken att det inte går att passa in radarbilderna bra, p.g.a. förändringar i landskapet. Exempelvis kan löv som ändrar sig med ändrad vindriktning försvåra inpassningen.

Figur 3.13 visar geometrin för en enkelpass interferometrisk SLAR-bild (Dowman, 2004). A1 respektive A2 är de 2 olika antennerna. B är baslinjen, dvs. avståndet mellan antennerna. H är höjden över ellipsoiden. Detta eftersom satellitpositionering används. Höjden som ska mätas är h. Riktningssavståndet, det direkta avståndet mellan antennen och föremålet som ska mätas representeras av p. Θ_1 är tittvinkeln (se även figur 3.9), och α är vinkeln mellan baslinjen och dess horisontella vektor. Med känd tittvinkel kan höjden h, beräknas enligt formel 3.4 (Dowman, 2004).

$$h = H - p * \cos \theta_1 \quad \text{Formel 3.4}$$

Θ_1 fås ur cosinussatsen

$$(p + \delta p)^2 = p^2 + B^2 - 2 * p * B * \cos(90 - \theta + \alpha) \quad \text{Formel 3.5}$$

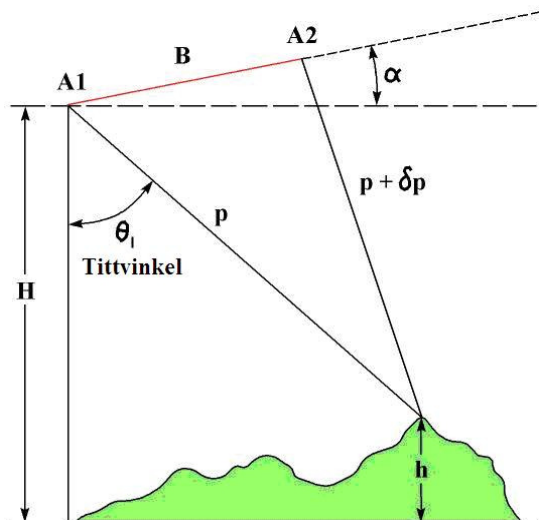
$$\Delta p = \frac{\lambda * \varphi}{2 * \pi} \quad \text{Formel 3.6}$$

δp är skillnaden i riktningssavstånd

λ är radarpulsens våglängd

φ fasskillnaden mellan de två retursignalerna

Fasskillnaden kan bara mätas inom en period, 2π , varför antalet hela perioder måste beräknas för att få fram höjden.



Figur 3.13 Geometrin för en enkelpass interferometrisk SLAR-bild (Baserad på Dowman, 2004, fig 2).

3.3.6 Fjärranalys med radar från rymden.

Fjärranalys med radar kan även ske från rymden. Detta startade 1978 med uppskjutningen av Seasat, en satellit inriktad på havsstudier, och flera system har följt efter det. Ett projekt med uppdrag att samla in höjddata över större delen av jorden var SRTM, *the Shuttle Radar Topography Mission*. I februari 2000 samlade rymdfärjan Endeavour in höjddata med radar över 99,9 % av landytan mellan 60° N och 56° S latitud. 60° N går strax norr om Uppsala och genom Oslo, vilket innebär att stora delar av Sverige inte täcks av dessa data. Data är i gridformat. Upplösningen är 3 bågsekunder i latitud och longitud, vilket motsvarar ungefär 90 m. Över USA är upplösningen 1 bågsekund, ungefär 30 m. Noggrannheten är bättre än 20 m i plan, och 16 m i höjd (Lillesand et al., 2004). För SRTM projektet användes interferometrisk radar (Dowman, 2004). Höjddata finns tillgänglig för nedladdning på USGS (2008).

4 Flygburen laserskanning

Flygburen laserskanning tillhör egentligen kapitel 3, insamling av höjddata, men eftersom laserskanning behandlas mer utförligt får den ett eget kapitel. Inledningsvis ges en kort historia, följt av ett mer tekniskt avsnitt där teknik och hårdvara vid laserskanning beskrivs. Därefter följer ett avsnitt om ett antal viktiga parametrar vid laserskanning som flyghöjd och punkttäthet. Slutligen beskrivs behandling av data från laserskanning som geometrisk korrigering, filtrering av markpunkter och klassificering av punkter ovan mark. Som ett förtydligande kan nämnas att i denna rapport används benämningen laserskanning för flygburen laserskanning. Det finns även markbundna laserskanningssystem (Fowler et al., 2007). Dessa används bl.a. till att ta fram 3D-modeller av byggnader. Enligt Fowler et al. (2007) använder alla idag tillgängliga laserskanningssystem GPS för positionering, men när det Europeiska systemet Galileo kommer i drift är det troligt att även det kommer att användas. I praktiken kan alla satellitpositioneringssystem användas, varför GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) egentligen vore en mer korrekt benämning. I denna rapport används dock främst GPS. Detta eftersom GPS är det som används i dagsläget, och även den benämning som används i de flesta rapporter och böcker.

4.1 Kort historia

Den första fungerande lasern presenterades 1960 av Theodore Maiman. Under 1960 och 1970-talet genomfördes sedan flera försök med laser som fjärranalysmetod, och under 1980-talet utvecklades teknik för luftburen laserskanning för insamling av data till höjddata (Flood, 2001).

De tidigaste systemen för flygburen laserskanning som kom i slutet av 1970-talet, kunde endast mäta det vertikala avståndet mellan flygplanet och marken s.k. profilmätning. Planets position bestämdes med fotografiska metoder, vilka hade låg noggrannhet i plan. Höjden bestämdes genom att mäta lufttrycket (Egels & Kasser, 2002). Med intåget av GPS-tekniken öppnades möjligheten till hög geometrisk noggrannhet, genom att laserskannern kunde positioneras med GPS. Ett av de institut som studerade tekniken var universitetet i Stuttgart, där undersökningar med hjälp av profilmätningar 1988-1993 visade vilken potential till hög geometrisk noggrannhet som finns. Numera kan data, med hjälp av satellitpositionering och tröghetsnavigering, georefereras med hög precision (Ackermann, 1999).

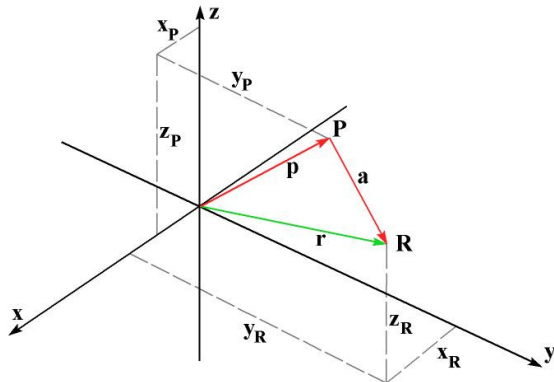
4.2 Laserskanning – teknisk beskrivning

Detta avsnitt ger en mer teknisk beskrivning av laserskanning och hårdvaran som ingår i ett laserskanningssystem. Även felkällor som påverkar noggrannheten behandlas. Avsnittet inleds med principen för hur en laserpunkt positioneras, genom att veta laserskannerns position, samt avstånd och riktning till punkten där laserpulsen reflekterats. Därefter beskrivs hur sensorns position bestäms. Nästa del beskriver hur avståndet till reflektionspunkten bestäms. Avslutningsvis ges en beskrivning av hur riktningen till reflektionspunkten bestäms. Här är tröghetsnavigering en viktig komponent.

4.2.1 Positionering av laserdata

Som nämnades i inledningen bygger laserskanning på att en laserpuls sänds ut från en sensor. Tiden det tar för denna att reflekteras tillbaka till sensorn mäts. Eftersom pulsens hastighet är känd kan avståndet till reflektionspunkten bestämmas, och genom att sensorns position och dess riktning är kända kan reflektionspunkten georefereras. Detta gör att data från laserskanning bygger på två skilda vektordataset (Katzenbeisser, 2003), vilket illustreras i figur 4.1. Det första är sensorns position P och det andra är avstånd och riktning (a) från sensorn till det objekt R som reflekterade pulsen. Slås dessa två samman fås vektorn till

objektet (r) och positionen för punkten R. Som tidigare nämnts bygger bestämningen av positionen för sensorn på satellitpositionering och dess lutning på tröghetsnavigering. Till skillnad från fotogrammetrin är det inte möjligt att rekonstruera flygplanets orientering i efterhand då laserdata samlas in (Klang & Burman, 2003). Detta eftersom laserdata ger diskreta punkter som inte kan länkas samman med "naturlighet".



Figur 4.1 Sensorns och det reflekterande objektets positioner (Baserad på (Katzenbeisser, 2003, fig 2).

4.2.2 Sensorns position

För att uppnå högsta precision görs GPS-positioneringen med fasmätning. Det innebär att färförskjutningen samt hela antalet våglängder, d.v.s. periodbekanta, i signalen mellan satelliten och mottagare mäts (Klang & Burman, 2003). Det är viktigt att hålla satellitkontakten, låsningen mot satelliterna, under hela flygningen för att periodbekanta ska kunna lösas med hög precision. Bibehållen kontakt med satelliterna underlättar även integrationen av GPS-data med data från tröghetsnavigeringen, i fortsättningen kallad TN-data. Förlorad låsning mot satelliterna kan kompenseras med TN-data, men endast om den förlorade kontakten är kort. Annars riskerar driften i tröghetsystemet att bli hög (Burman, 2000). Periodbekanta kan bestämmas på marken innan flygningen påbörjas, och sedan försöka bibehålla satellitkontakten under hela flygningen. Detta är dock svårt eftersom det kräver att flygplanet ligger så horisontellt som möjligt under hela uppdraget. I annat fall riskerar det att störa satellitsignalerna. Istället har metoder att bestämma periodbekanta on-the-fly utvecklats. Mindre fel kan kompenseras genom efterbearbetning. Detta kräver dock att kontrollpunkter används. Mätningarna görs inte i realtid, eftersom efterberäknade satellitbanor krävs för högsta noggrannhet.

Större systematiska fel i GPS-mätningarna, bl.a. orsakade av jonosfäriska och troposfäriska störningar, kan korrigeras för genom att använda tvåfrekvensmottagare och differentiell GPS, DGPS (Burman, 2000). Tvåfrekvensmottagare, innebär att mätning utförs mot båda de signaler som satelliterna sänder ut på två skilda frekvenser, benämnda L1 respektive L2. Differentiell GPS innebär att mottagarens position bestäms relativt en känd punkt (Lilje et al., 2007). Positionen för den kända punkten, referensstationen, mäts med en fast GPS-mottagare. Eftersom dess koordinater är bekanta kan avvikelser i den position som GPS-mätningen ger vid en viss tidpunkt beräknas. Dessa avvikelser sänds till den rörliga GPS-mottagaren, rovern, och används till att korrigera dess uppmätta position. Referensstationen kan antingen vara en tillfällig GPS-mottagare placerad i det område som ska laserskannas, eller en fast referensstation. I Sverige driver Lantmäteriet ett fast nätverk med referensstationer kallat SWEPOS (SWEPOS, 2009). Noggrannheten i de GPS-mätta positionerna, beror på avståndet till referensstationen. För bättre precision kan ett nätverk av flera referensstationer användas. Med en temporär referensstation, som placeras i området som ska laserskannas kan ännu högre noggrannhet uppnås. Detta eftersom den temporära referensstationen, kan placeras på

optimal plats för det specifika projektet. Det finns olika uppgifter om hur stort avståndet mellan referensstation och rover kan vara med bibehållen noggrannhet. Enligt Katzenbeisser (2003) bör det största avståndet inte överstiga 25 km. Endast vid extremt stabila, dock sällsynta, situationer i troposfär och jonosfär kan avstånd över 100 km ge tillräckligt hög noggrannhet. I Burman (2000) anges att avstånd upp till 300 km mellan rover och referensstation, i ett antal undersökningar gett noggrannhet av bibehållen kvalitet. De stora skillnaderna i avstånd mellan de olika referenserna beror troligen på olika tekniska lösningar.

För högsta noggrannhet behöver PDOP vara lägre än 2,5 (Katzenbeisser, 2003). PDOP står för Position DOP, och är ett av flera olika DOP-värden (*Dilution Of Precision*) (Lilje et al., 2007). DOP-värdena är mått på hur mätningens noggrannhet påverkas av satellitgeometrin. Desto lägre DOP-värde, desto högre noggrannhet. Ett lågt DOP-värde erhålls när satelliterna täcker så stor del av himlen som möjligt, vilket ger en bra satellitgeometri.

Det är viktigt att notera att den position som fås är den för GPS-antennen, vilken måste räknas om till positionen för tröghetssystemet (Katzenbeisser, 2003). Georeferering är mer känslig för avvikelser i riktning än i position (Burman, 2000). Därför det är lämpligast att placera tröghetssystemet närmast lasersensorn

4.2.3 Avstånd till reflektionspunkten

Avståndet från sensorn till reflektionspunkten bestäms genom att mäta tiden från det att en laserpuls sänds ut, tills att den returneras. Vanligtvis mäts tiden genom att räkna antalet cykler för en oscillator (Katzenbeisser, 2003). Sedan beräknas avståndet enligt formel 4.1.

$$s = \frac{n}{2f} \cdot C_a + \Delta s \quad \text{Formel 4.1}$$

Där: n = antal cykler
 f = oscillators frekvens
 C_a = ljusets hastighet i atmosfären
 Δs kompenserar för fördröjningar och optiska väg inom sensorn

Δs kan ses som konstant vad gäller den optiska delen, men fördröjningar orsakade av elektroniken kan variera med temperatur och ålder (Katzenbeisser, 2003). Det senare kan kompenseras med regelbundna kalibreringar, men det bör tas med som en möjlig felkälla att sensorns temperatur kan påverka mätresultatet. En annan och viktigare aspekt för noggrannheten är resultatet av en felaktig justering av oscillators frekvens. Redan mindre avvikelser från nominalfrekvensen orsakar märkbara fel i beräknade avstånd. För en upplösning i avstånd på 3 cm, krävs en nominalfrekvens på f = 10 GHz.

Den tredje parametern i formel 4.1, ljusets hastighet i atmosfären, är inte heller konstant (Katzenbeisser, 2003). Den beror på atmosfärens densitet, som i sin tur beror på tryck, fuktighet och temperatur. Vid klart väder kan fuktigheten utelämnas, men lufttrycket bör tas med i beräkningen, speciellt om flygningar på olika höjd genomförs. Pondera att två olika flygningar görs. En vid havsnivå, och en på 2 000 m höjd. I båda fallen är flyghöjden 2 000 m över marken. Om samma ljushastighet används för båda höjderna leder det till att avstånden på den högre höjden blir 12 cm för korta.

Ett felaktigt Δs ger ett systematiskt fel i beräkningarna (Katzenbeisser, 2003). Om Δs sätts för lågt ger det för höga höjdvärden, och tvärtom vid för högt Δs.

4.2.4 Riktning till reflektionspunkten

Strålens riktning beror dels på sensorns riktning, dels på strålens riktning i förhållande till sensorn (Katzenbeisser, 2003). Vad gäller sensorn är riktning en översättning av det engelska ordet *attitude*. Den mesta litteraturen som studerats är på engelska, och den enda svenska översättning som hittats är *attityd*. I denna rapport har istället ordet riktning valts.

4.2.4.1 Sensorns riktning

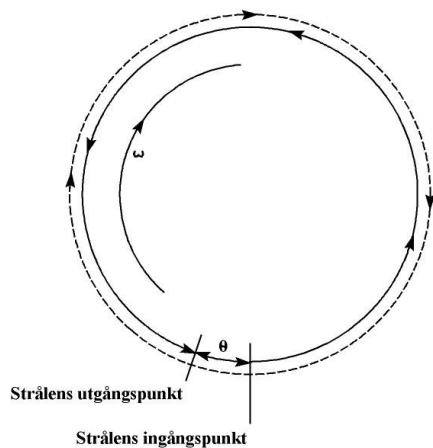
Tröghetsnavigering används som tidigare nämnts för att bestämma sensorns riktning. Det är en navigationsteknik som bygger på kontinuerlig mätning av acceleration och vinkelförändringar. Dessa mäts med hjälp av accelerometrar och gyroskop, och används för att bestämma position och riktning i förhållande till en startpunkt med känd position, orientering, och hastighet (Woodman, 2007). Tröghetsinstrumentet (eng. *IMU, Inertial Measuring Unit*) består vanligtvis av tre ortogonala gyroskop, som mäter vinkelhastighet, och tre ortogonala accelerometrar som mäter linjär acceleration. Det är oftast inbäddat i ett tröghetssystem (eng. *INS, Inertial Navigation System*) som processar rådata från tröghetsinstrumentet till orienteringsdata (Burman, 2000).

Det finns två i princip skilda varianter av tröghetsnavigeringssystem. Ett upphängt system (eng. *gimballed system*) innebär att systemet är monterat så att det hålls fixerat i ett yttre referenssystem. Detta genom att det är upphängt så att det kan rotera runt sina tre axlar när plattformen det är upphängt på ändrar läge (Woodman, 2007). Orienteringen fås genom att läsa vinklarna mellan balansringarna.

Vid georeferering av data är det vanligast att använda den andra typen, fast monterat tröghetssystem (eng. *strap down INS*) (Burman, 2000). Detta innebär att tröghetssystemet är fast monterat vid den utrustning det ska mäta position och riktning för (Woodman, 2007). Vid laserskanning innebär det sensorn. Eftersom systemet är fast monterat mäts vinklar och acceleration internt i förhållande till initieringsläget, inte direkt i ett referenssystem.

Mätningar gjorda med ett tröghetssystem innehåller fel som driver och växer med tiden, vilket gör att det måste initieras med jämna mellanrum. Detta gör att flygstråkens längd begränsas (Klang & Burman, 2003). Initieringen kan göras i luften genom att provocera fram accelerationer vid svängar och därvid jämföra GPS och tröghetsmätningar. Hur ofta detta måste ske beror på hur TN-data och GPS-data integreras, samt vilket tröghetssystem som används. Orsakerna till driften är exempelvis att axlarna inte är ortogonala, skalfaktorfel i gyron eller accelerometrar etc. (Burman, 2000). Även avvikelser i gravitation kan vara en felkälla. Detta eftersom accelerationen inte enbart beror på plattformens rörelser utan även gravitation och krafter som beror på jordens rotation. Vissa av dessa fel kan modelleras och kompenseras för med hjälp av referensdata från GPS. Vanligtvis görs detta med Kalman filtrering.

Priset för olika tröghetssystem varierar kraftigt, och med högre pris erhålls högre precision (Burman, 2000). Största faktorn för priset är hårdvaran, och då främst gyroskoperna, vilka brukar delas in i tre klasser: normal precision (eng. *precise or tactical grade*), hög precision (eng. *high precision or navigational grade*), samt mycket hög precision (eng. *very high precision or strategic grade*). Två typer av gyroskop som är vanliga vid laserskanning är DTG, *Dynamically Turned Gyro*, och FOG, *Fibre Optic Gyro*, vilka vanligtvis klassas som normal precision. Även RLG, *Ring Laser Gyro*, är vanligt förekommande. Liksom FOG är det ett optiskt gyro, men det klassas högre, nämligen som hög precision. DTG däremot är ett elektromekaniskt gyroskop (Junqueira & Barros, 2004).



Figur 4.2 Visar Sagnac effekten, vilken är principen som optiska gyroskop bygger på (Baserad på Woodman, 2007, fig 6).

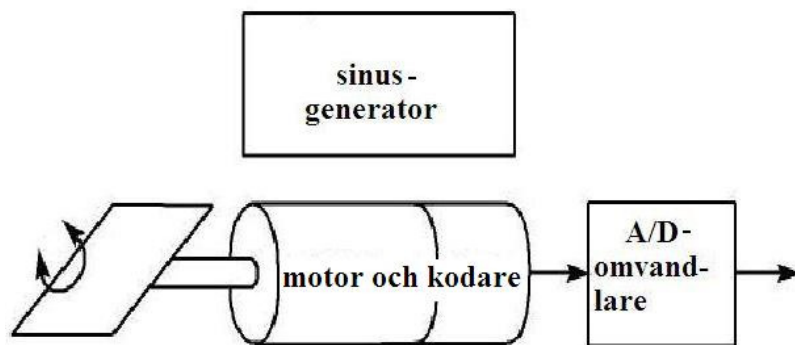
Den största nackdelen med mekaniska gyroskop är att de innehåller rörliga delar, som orsakar friktion och fel som driver med tiden (Woodman, 2007). Optiska gyroskop innehåller däremot inga rörliga delar, utan baseras på den s.k. Sagnac effekten, vilket visas i figur 4.2. Det innebär att två ljusstrålar med motsatt riktning strålar in i ett rör. Om sensorn roterar med vinkelhastigheten ω , kommer strålen som har samma riktning som rotationen att få längre väg att gå, än den som strålar mot rotationsriktningen. När strålarna lämnar röret, är de kombinerade till en stråle. Fåskillnaden mellan de två ingående strålarna, orsakar interferens, som går att bestämma. Ur denna kan sedan vinkelhastigheten fås. Ett optiskt gyroskops noggrannhet bestäms i hög grad av de två strålarnas längd, vilka beror på rörets diameter. Desto större diameter, desto högre noggrannhet, vilket i sin tur ger nackdelen att gyroskopet ökar i storlek.

Genom att använda den kontinuerliga DGPS-positionen samt rörelseriktning och hastighet beräknad ur denna, kan en riktning med hög precision beräknas genom att kompensera för driften i tröghetssystemet (Katzenbeisser, 2003). Beroende på tröghetssystemets kvalitet kan noggrannhet i riktning på 0,004 till 0,02 grader erhållas.

4.2.4.2 Strålens riktning i förhållande till sensorn

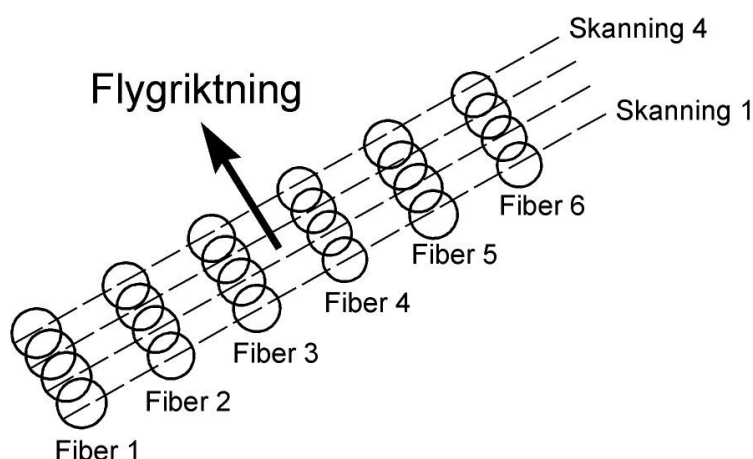
Det finns för närvarande tre olika komponenter som används för att styra laserstrålens riktning (Katzenbeisser, 2003), oscillerande spegel, roterande spegel och fiberskanner (eng. *fiber-scanner*).

En oscillerande spegel är en spegel som oscillerar mellan två positioner, driven av en motor, och styrd av en sinusgenerator enligt figur 4.3 (Katzenbeisser, 2003). Kodaren läser spegels lutning, vilken omvandlas digitalt. En roterande spegel fungerar efter en liknande princip.



Figur 4.3 Principen för uppbyggnaden av en oscillerande spegel (Baserad på Katzenbeisser, 2003, fig 7).

En fiberskanner är en skanner som är uppbyggd av en rad med fibrer som sänder ut laserpulserna och tar emot reflektionerna (Wehr & Lohr, 1999). Skanningsmönstret visar i figur 4.4. Skannern bildar en rad med pulser, där antalet pulser är lika med antalet fibrer. Vid varje skanning fås en ny rad med pulser, så att ett mönster bildas enligt figuren. Riktningen för pulsen från fibern beror på vilken fiber i ordningen som sänder ut pulsen (Katzenbeisser, 2003). Denna vinkel är konstant för de olika fibrerna och är stabil under skannerns livstid.



Figur 4.4 Skanningsmönstret för en fiberskanner (Baserad på Wehr & Lohr, 1999, fig 8).

4.2.4.3 Strålens riktning

Strålens riktning beror som nämnts både på sensorn riktning, och strålens riktning i förhållande till sensorn. För att få hög noggrannhet på strålens riktning bör sensorn vara monterad så nära tröghetsystemet som möjligt, och så stabilt som möjligt (Katzenbeisser, 2003). Om de exempelvis är monterade så att vinkeln mellan dem inte är stabil, medför det att riktningen för strålen blir felaktigt mätt.

4.3 Planering vid laserskanning och viktiga parametrar

Vid laserskanning påverkas slutresultat av ett antal parametrar som flyghöjd och punkttäthet (Klang & Burman, 2003). Dessa beskrivs i detta avsnitt.

4.3.1 Planering av stråk

Vid laserskanning skannas området genom att flygplanet flyger över området i stråk (Burman, 2004). Stråken bör ha en överlappning med minst 20 %. Även tvärstråk bör flygas med jämna mellanrum. Dessa används för att kontrollera driften i GPS och tröghetsnavigering. Ett tvärstråk är ett stråk som flyg vinkelrätt mot huvudstråken.

4.3.2 Flyghöjd

Flyghöjden är viktig för slutresultatet vid laserskanning. Vid högre flyghöjd kan ett större område täckas på kortare tid (Klang & Burman, 2003). Det finns dock ett antal nackdelar med att flyga högre. Lägesnoggrannheten blir sämre och punkttätheten påverkas negativt. Dessutom minskas mängden energi som återvänder till sensorn kvadratisk mot ökad flyghöjd. Detta gör det viktigt att välja rätt flyghöjd. Vid framtagandet av den nya nationella höjddatabasen kommer laserskanning att ske på cirka 3 000 m höjd (Lysell, 2008).

4.3.3 Punkttäthet

Punkttätheten är tillsammans med lägesnoggrannheten den viktigaste parametern vid flygburen laserskanning (Klang & Burman, 2003). Detta är ganska logiskt eftersom mer punkter ger större möjlighet att modellera verkligheten.

4.3.4 Fotpunkt

Fotpunkt är ytan som laserpulsen täcker då den når marken (Klang & Burman, 2003). En mindre fotpunkt gör det enklare att tolka markens form. Speciellt i områden med stora höjdförändringar, som vid byggnader, är fotpunktens storlek viktig. Fotpunktens storlek ökar med ökad flyghöjd.

4.3.5 Laserfrekvens

Laserfrekvensen är antalet pulser per tidsenhet som sensorn sänder ut (Klang & Burman, 2003). Punkttätheten är som nämnts viktig för kvaliteten på laserskannad data. Eftersom ökad frekvens ger ökad punkttäthet betyder det att högre laserfrekvens är bra för slutresultatet. Det finns dock begränsningar i hur hög frekvens som är möjlig. Dels rent tekniska som bestämmer hur hög frekvens som kan erhållas, dels det faktum att innan en ny puls kan sändas ut måste reflektionen från den förra ha nått sensorn. I annat fall går det inte veta från vilken puls reflektionerna härstammar. Detta gör att högre flyghöjd inte tillåter lika hög frekvens som lägre flygningar. Orsaken till det är att högre flyghöjd innebär längre avstånd till marken, vilket i sin tur betyder att det tar längre tid för pulsen att returneras till sensorn. Detta gör att tiden mellan utsända pulser måste öka med ökad flyghöjd.

4.3.6 Öppningsvinkel och svepbredd

Svepbredden anger hur brett område som kan täckas av ett stråk vid skanningen (Klang & Burman, 2003). En ökad svepbredd gör med andra ord att ett större område kan täckas. Nackdelen är att bredare svep kräver större öppningsvinkel. Dvs. större maximal vinkel mellan strålens riktning och lodlinjen. En större öppningsvinkel gör att det blir svårare att få tillräckligt många laserpulser som når marken i skog. Detta eftersom det är större chans att en laserpuls ska nå marken om den vinklas rakt nedåt, istället för med stor vinkel. Det vanliga är att använda en öppningsvinkel på +/- 15 - 20°.

4.3.7 Reflektioner

I sensorn kan intensiteten i varje reflektion bestämmas och användas till tolkning av vissa objekt, som skogsbilvägar (Klang & Burman, 2003). Dock härstammar intensiteten enbart från ett våglängdsområde och innehåller förhållandevis mycket brus. Markupplösningen är också låg vilket gör att informationen som kan fås är begränsad.

4.3.8 Yttre förhållanden

Kvaliteten i laserdata kan även påverkas av väderförhållandena (Burman, 2004). Om det ligger kvar vattenpölar och marken är fuktig efter regn påverkas punkttätheten. Detta beroende på att vattenpölar kan reflektera bort laserpulsen från sensorn, och vissa markslag absorberar pulsen då de är fuktiga. Om det ligger snö i området reflekteras laserpulserna på snön, istället för på marken. Även tjäle i marken kan påverka höjdmodellen, varför laserskanningen bör genomföras då risken för tjäle är minimal.

Antalet laserpulser som når marken kan reduceras av tät vegetation (Burman, 2004). Att i förhand förutsäga och redovisa alla typer av förhållanden är dock svårt eftersom olika vegetationstyper ger olika effekt på genomträngligheten. Det har gjorts undersökning där laserskannad data jämförts med andra höjddata, som pekar på medelavvikelser på 5 – 20 cm. Lokalt kan större fel förekomma. I samtliga fall har det varit laserdata som legat högst. Generellt har dock ett visst mönster visat sig. Vid vegetation som är tät högt ovan mark, som exempelvis bokskog, är ofta punkttätheten låg vid marken, men de punkter som registreras har ofta hög noggrannhet. Detta beror bl.a. på att träden släpper igenom mindre ljus, vilket gör att markvegetationen är gles. På motsatt sätt kan vegetation som är mer öppen högre upp, och som därigenom släpper ner mer ljus till marknivån, göra att markvegetationen bildar ett tätt täcke som laserpulserna inte kan tränga igenom. Laserdata kan då få hög punkttäthet i marknivå, men låg precision. Detta eftersom det inte är marken laserpulserna når utan de reflekteras på toppen av den tätat markvegetationen. Även öppna ytor som ängsmark och åkermark, kan ha ett vegetationstäck som inte laserpulserna kan tränga igenom. För att få så bra resultat som möjligt är det därför lämpligt att utföra skanningen vid en årstid då vegetationen ännu inte börjat växa, eller har vissnat för säsongen (Burman, 2004).

4.4 Data och databehandling

Detta avsnitt inleds med en kort beskrivning av laserdata. Därefter beskrivs bearbetningen av data, vilken kan delas in i primär och sekundär databehandling (Burman, 2004). Först beskrivs den primära behandlingen vilken innebär att data från skanningen korrigeras geometriskt så att systematiska fel och andra avvikelser minskas så långt som möjligt. Därefter beskrivs den sekundära behandlingen vilket innebär att data förädlas på något sätt. Det kan vara att ta fram en höjdmodell, eller att göra 3D-modeller av byggnader, eller vegetationsmodeller.

4.4.1 Laserdata

Resultatet av en laserskanning är en svärm av punkter med x- och y-koordinater, samt z – värden, som ligger i stråk. För att kunna skapa en höjdmodell, eller för att vara användbara i någon annan tillämpning, måste data bearbetas. Resultatet av det första steget i bearbetning blir ett s.k. block av laserdata, vilket är en punktsvärm som täcker ett större område (Klang & Burman, 2003). Kvaliteten på laserpunkterna i blocket är så homogen som möjligt. Efter detta steg har punkterna i svärmen fortfarande enbart koordinater och z – värden. Det finns ingen information om det är marken eller något annat som laserpulsen har reflekterats emot. För en höjdmodell är det enbart punkter som härrör från reflektion mot mark, s.k. markpunkter, som är intressanta. För att identifiera dessa görs en filtrering av data, och de klassas som markpunkter. Vid andra tillämpningar än för höjdmodeller är även övriga laserpunkter intressanta. Dessa brukar därför klassas som exempelvis broar, vegetation eller byggnader. Laserpunkterna från byggnader kan då användas till 3D-modeller, och vegetationspunkterna kan användas inom exempelvis skogliga tillämpningar.

4.4.2 Primär databehandling

Den primära databehandlingen innebär kalibrering av laserskanningssystemet och att en geometrisk korrigerings görs. Efter det görs en inpassning i plan och höjd. Dessa steg beskrivs i detta avsnitt.

4.4.2.1 Kalibrering av laserskanningssystemet

Kalibrering av laserskanningssystemet är ett steg som nästan uteslutande utförs av de som utför skanningen (Burman, 2004). Felen som kompenseras för genom kalibreringen är den sortens fel som diskuterades i avsnitt 4.2 där de tekniska aspekterna beskrevs, exempelvis korrigerings av de uppmätta avstånden till reflektionspunkterna och vridningar mellan laserskanner och tröghetssystem.

4.4.2.2 Geometrisk korrigerings

Det optimala sättet att kontrollera kvalitén i data vore att utvärdera data mot geodetiskt inmätta punkter på marken (Klang & Burman, 2003). Detta är dock en dyr och tidskrävande metod, och det är inte ekonomiskt försvarbart att kontrollera varje stråk från laserskanning på det sättet. Istället kan avvikelser mellan överlappande stråk mätas, och sedan kompensera för kvarvarande fel. Detta görs genom s.k. stråkutjämnings, som kan indelas i global och stråkvis korrigerings. Den globala korrigerings innebär att en global utjämnings görs för hela blocket för att hitta fel som ska korrigeras för i all data. Den lokala korrigerings innebär en stråkvis utjämnings mellan två stråk. På så sätt kan lokala avvikelser mellan stråk som inte hittats i den globala utjämnings upptäckas. Att modellera alla systematiska fel är dock inte realistiskt. Resultatet av stråkutjämningsarna blir ett stort block av laserpunkter med homogen kvalitet.

4.4.2.3 Plan och höjdinpassnings

För geometrisk korrigerings och kontroll av plannoggrannheten krävs en jämförelse mot referensdata (Klang & Burman, 2003). Finns inte dessa data tillgängliga behöver de mätas in. Planstöd, punkter för koll av läget i plan, kan exempelvis hämtas från kartmaterial av tillräckligt hög noggrannhet. Hur bra kvalitet på planstöden som krävs beror på noggrannhetskraven på laserdata.

Inpassnings mot höjdstöd bör ske efter att planinpassnings utförts (Klang & Burman, 2003). I annat fall riskeras att en inpassnings av höjden görs mot fel punkt i plan. För bra resultat bör höjdstöd väljas på underlag där laserskanning ger hög noggrannhet i höjd. Exempel på lämpliga ytor är asfalt, betong eller grus. Dessa ger en tydlig reflektion av laserpulsen. Olämpliga ytor är exempelvis skogsterräng, tät markvegetation eller dikesbottnar. Dessa ger inte lika tydliga pulser från markytan.

4.4.3 Sekundär databehandling

Den sekundära databehandlingen innebär att data förädlas på något sätt (Klang & Burman, 2003). Avsnittet behandlar först filtrerings, vilket innebär att laserpunkter som inte härstammar från reflektion mot marken filtreras bort. Därefter beskrivs klassnings av objekt ovan mark som broar, vegetation och byggnader.

4.4.3.1 Filtrerings

Filtrerings innebär att de punkter i data som inte är intressanta för den planerade tillämpnings filtreras bort (Klang & Burman, 2003). Det vanligaste användningsområdet för laserskannad data är att ta fram en höjdmodell, vilket ju även är ämnet för denna rapport. För detta är det enbart markpunkterna som är intressanta. Övriga punkter behöver filtreras bort till så stor del som möjligt. Olika programvaror använder olika metoder att göra filtrerings, men

gemensamt för det flesta är att markytan bestäms genom statistiska analyser. Dessa grundar sig på det faktum att markytan är en kontinuerlig yta. Andra objekt som vegetation och hus ligger ovanpå denna yta. Det kan även förekomma punkter i data som ligger under mark s.k. låga punkter. Dessa punkter kan exempelvis bildas genom att en och samma laserpuls reflekteras både mot en husvägg och på marken. Detta gör att pulsen färdas längre väg, och på så sätt registreras som om den returnerats från en punkt under marknivå. Även dessa punkter behöver identifieras och avlägsnas vid filtreringen. Vanligtvis är antalet låga punkter litet, vilket gör det relativt enkelt att filtrera bort dem (Burman, 2004).

När markfiltreringen genomförts finns det oftast en överrepresentation av punkter i områden med mindre komplicerad topografi. Om antalet punkter i dessa områden kan minska utan att noggrannheten i höjdmodellen försämras kan mängden data minskas (Klang & Burman, 2003). Notera att detta gäller datamängden i den laserskannade datan, inte själva höjdmodellen. Är höjdmodellen lagrad som ett grid kan inte datamängden minskas. Om höjdmodellen däremot är ett triangelnät kan trianglarna göras större som diskuterats tidigare.

Filtreringen är en viktig del vid skapandet av en höjdmodell. Helst ska alla punkter som härstammar från reflektion mot marken registreras som markpunkter, medan alla övriga punkter ska filtreras bort. Sithole & Vosselman (2003), presenterar en studie där olika filtreringsmetoder har testats. Resultaten från de olika filtreringarna jämfördes med en modell som bearbetats manuellt. Generellt visade studien att filtren fungerade bra i mindre komplicerade landskap. I komplexa miljöer, som exempelvis urbana områden, visade sig dock filtren ge något sämre resultat.

4.4.3.2 Klassificering av objekt ovan mark

Klassificering innebär att objekt ovan mark delas in i klasser som broar, vegetation och byggnader (Klang & Burman, 2003). Detta är en process som ofta kräver manuell bearbetning av data, men desto mer som kan utföras automatiskt desto mer tid kan sparas.

4.4.3.2.1 Broar

En sak som kan ställa till problem är broar. För exempelvis hydrologiska modeller är det viktigt att broar inte klassas som markpunkter (Klang & Burman, 2003). Om en bro klassas som mark skulle den nämligen blockera flödet i den hydrologiska modellen. Klang & Burman (2003) beskriver tre olika scenarion och lämpliga lösningar på problemet.

1. Det finns ingen tillgänglig information som kan hjälpa till att identifiera broar.

Detta är ett tidsödande fall eftersom det kräver mycket manuell bearbetning. En operatör måste då leta upp broarna genom att manuellt gå igenom området som skannats och ta bort de punkter som är broar, men som klassats som markpunkter.

2. Det finns information om broarnas lägen.

Detta fall kräver fortfarande manuell bearbetning, men eftersom broarnas läge finns, går det fort att hitta broarna. Sedan är det bara att klassa om punkterna så att de inte längre är markpunkter.

3. Det finns bro-masker för broarna.

En bro-mask är en sluten polygon som beskriver brons läge och utbredning. Dessa kan användas till att automatiskt klassa om alla broar som felaktigt klassats som mark. Detta sparar mycket tid.

4.4.3.2.2 Vegetation och byggnader

Som nämntes i inledningen kan data från laserskanning även användas inom skogsindustrin, och för att ta fram 3D-modeller i stadsmiljö. För en höjdmmodell som enbart representerar markytan, DEM, ska däremot laserpunkter som härrör från vegetation och byggnader filtreras bort. Detta är inte alltid enkelt. För exempelvis souterrängbyggnader där taket på något sätt har kontakt med marken är det risk att byggnaden registreras som mark (Klang & Burman, 2003).

4.4.3.2.3 Sjöar och vattendrag

Vattenytan ger ofta begränsade reflektioner vid laserskanning (Klang & Burman, 2003). Detta beror på att vattenytan fungerar som en spegel och reflekterar pulsen bort från sensorn. Det som reflekteras tillbaka till sensorn får då så låg intensitet att det inte räcker för en relevant registrering. För att komplettera höjdmodellen är det därför lämpligt att använda strandlinjer från andra källor, exempelvis från Lantmäteriet om de finns tillgängliga. Dessa strandlinjer kan lämpligen läggas in som brytlinjer i höjdmodellen. En sak som kan ge problem om strandlinjerna läggs in är om höjdvärdet för strandlinjen är felaktigt. Detta kan hända om planläget för strandlinjen och dess höjd har samlats in vid olika vattenstånd. Läggs en strandlinje med felaktig höjd in i laserdata kan det göra att diken eller åsar som följer strandlinjen skapas i modellen. För att undvika detta föreslår Klang & Burman (2003) att höjdvärdet för strandlinjen justeras.

5 Jämförelse mellan olika metoder att samla in data

De tre fjärranalysmetoder för att ta fram höjddata som beskrivs i denna rapport mäter alla höjden på olika sätt. De har olika styrkor och svagheter, och vilken metod som är lämpligast beror på vad höjddata ska användas till. Ibland kan det bästa vara att använda en kombination av flera metoder (McGlone, 2007). Exempelvis kan fotogrammetri användas i öppna områden, som öppen hedmark och berg i dagen, medan laserskanning används i skogsområden vid framtagning av en höjdmodell (Klang & Burman, 2003). Geodetiska mätmetoder är sällsynta vid insamling av höjddata förutom vid mindre projekt, som anläggningsarbeten eller då högre noggrannhet krävs (McGlone, 2007). Detta eftersom de är mindre kostnadseffektiva.

Detta kapitel inleds med en kostnadsjämförelse mellan de olika teknikerna, följt av beskrivningar av fördelar respektive nackdelar för fotogrammetri, interferometrisk radar samt laserskanning.

5.1 Kostnadsjämförelse

För att få en uppfattning om kostnaderna visar Mercer (2004) en kostnads och noggrannhetsjämförelse mellan laserskannad höjddata, höjddata framtagen med interferometrisk radar, samt genom fotogrammetri. Data framtagen genom fotogrammetri ligger på 200 - 1000 USD/km². Laserskannad data ligger i ungefär samma klass med en kostnad på 200 - 600 USD/km². Radardata är betydligt billigare med 20-80 USD/km². Dock följer den vertikala noggrannheten kostnaden. För laserskannad data ligger medelfelet i höjd på 0,2 - 0,5 m. För fotogrammetrisk höjddata något sämre på 0,3 - 0,7 m. Laserskannad data har även den fördelen att punkterna ligger betydligt tätare. Höjddata framtagen genom radar har ett vertikalt medelfel på 0,5 - 3 m. Upplösningen är även sämre med 5 m avstånd mellan punkterna. Rapporten ger ingen heltäckande bild av hur siffrorna tagits fram men det ger en ide om förhållandet i kostnad och kvalitet mellan de olika metoderna. Att radar är den metod med lägst kostnad gäller dock enbart då höjddata över större områden tas fram (Fowler et al., 2007). För mindre områden blir kostnaden betydligt högre.

5.2 Fotogrammetri

En fördel med fotogrammetri är att det är en känd och välbeprövad teknik (McGlone, 2007). Det går även att samla in andra data än enbart höjddata. Exempelvis kan planbilden karteras, och vid behov kan flygbilderna tas fram i ett senare skede om komplettering behöver göras. En nackdel med fotogrammetri är att vegetation som hindrar insyn till marken ställer till problem vid framtagning av höjdmodeller. Detta kan i viss mån kompenseras genom att flygbilderna tas vid den årstid då vegetationen är som minst uppväxt, men exempelvis täta barrskogar eller andra skogar som är gröna året runt gör att noggrannheten blir sämre än för öppen mark.

5.3 Interferometrisk radar, IFSAR

En fördel med IFSAR är att tekniken, liksom laserskanning använder sig av en aktiv sensor, vilket gör att den kan användas även vid mulen väderlek och i mörker (Hensley et al., 2007). Detta gör den lämplig att använda i tropiska områden som ofta är molntäckta. En annan fördel är att data kan samlas in över stora områden på kort tid. Ingen manuell redigering av data som vid laserskanning eller byggande av stereomodeller som vid fotogrammetri krävs. Det är även en fördel att data samlas in från hög höjd. Det gör det nämligen möjligt att använda IFSAR över områden där flygning på lägre höjd begränsas av annan flygtrafik. En annan fördel är att IFSAR gör det möjligt att skapa höjdfelskartor där det vertikala felet kan beräknas statistiskt

för varje cell i ett grid. Detta gör det möjligt att se om höjdmodellen håller tillräckligt hög kvalitet, och att hitta områden i den där noggrannheten är lägre.

En nackdel med IFSAR, liksom fotogrammetri, är att tät vegetation är ett problem. Även urbana områden kan ställa till problem eftersom de är komplexa med mycket byggnader och annat som kan vara svårt att särskilja i data (Hensley et al., 2007). Det är också en nackdel att IFSAR samlar in data från sidan (Fowler et al., 2007). Detta eftersom det gör att detaljer kan gömmas i skuggan av exempelvis högre höjder, vilket gör att data blir mindre homogen. En annan nackdel är att noggrannheten för IFSAR är lägre än för laserskanning och fotogrammetri (Mercer, 2004). Detta gör att för data som kräver högre noggrannhet är inte radar ett alternativ.

5.4 Laserskanning

En fördel med laserskanning är att tekniken gör det möjligt att se igenom vegetation, vilket gör att kvaliteten i höjddata blir högre än för fotogrammetri i områden med tät vegetation (McGlone, 2007). Dock ska man beakta att tät vegetation påverkar kvaliteten även för laserskannad data, även om den fortfarande är högre än för fotogrammetriskt insamlas data. Laserskanning är också mindre beroende av flygförhållandena än fotogrammetri eftersom det är en aktiv sensor. Även vid mulen väderlek och mörker fungerar laserskanning, medan fotogrammetri kräver dagsljus, och molnfritt för att flygbilderna ska vara användbara. Detta gör att säsongen för laserskanning är längre. En annan fördel med laserskanning är att det går att samla in höjddata över ett stort område på kort tid. En nackdel är dock att stråken som flygs är smala vilket gör att flygtiden blir längre, eftersom fler stråk behöver flygas. Det är också en fördel att data samlas in direkt i digitalt format, och efter georeferering är den klar att använda (Fowler et al., 2007). För en höjdmodell krävs det dock att filtrering och klassificering görs så att enbart markpunkter används.

En nackdel med laserskanning är att stora mängder data samlas in, generellt hundratals gånger större datamängd än för fotogrammetri (McGlone, 2007). Detta gör att mer databearbetning krävs, och i vissa fall kan den manuella bearbetningen bli så omfattande att den överstiger tiden det skulle ta att ta fram data genom fotogrammetri. Att datamängden är stor kan i vissa fall vara en fördel eftersom mer information kan fås fram, men för höjdmodeller är det enbart markpunkterna som är intressanta. En annan nackdel vid laserskanning är att om störningar gjorts att data från satellitpositionering och tröghetsnavigering inte håller tillräckligt hög kvalitet för att georeferera data måste laserskanningen göras om. Detta eftersom inte markstöd kan användas till georeferering, som vid fotogrammetri.

6 Utvärdering av laserskannad data i Helsingborgs stad

6.1 Introduktion

Det finns ett flertal beskrivna metoder att utvärdera höjddata. I Ahokas et al. (2003) beskrivs en metod där höjdnoggrannheten i höjdmodeller, och för de ursprungliga laserpunkterna utvärderas. Detta görs på olika typer av underlag, och på olika flyghöjd. Crombaghs et al. (2002) diskuterar en metod att beskriva noggrannheten i laserdata där flera komponenter som bidrar till felet behandlas: fel per laserpunkt, fel per GPS-observation, fel per laserstråk, samt fel per block. Ett block är en större modell där laserdata från enskilda stråk sammanslagits till ett större block. Abdullatif et al. (2004) beskriver en utvärdering av laserskannad data som utfördes över ett universitetscampus, *Purdue University*, USA. Klang (2006) är en rapport som beskriver en metod att utvärdera en höjdmodell.

Blak (2007) beskriver en metod att utföra och rapportera resultat av utvärdering av noggrannhet i höjd, av laserskannad höjddata. Metoden har utvecklats av NDEP, *National Digital Elevation Program Guidelines*, vilken är en amerikansk organisation som bl.a. består av USGS, *U.S. Geological Survey* och NASA, *National Aeronautics and Space Administration*. NDEP verkar för standarder och riktlinjer för att förenkla utbyte av topografiska data över land med hög noggrannhet. Riktlinjerna beskriver tre olika metoder för utvärderingen. Vilken som ska användas beror på underlaget, där utvärderingspunkterna samlats in. Noggrannheten kan anges antingen för hela höjdmodellen som ett värde, eller specificeras för olika underlag. Om samtliga utvärderingspunkter ligger i öppen mark utan vegetation ska ett s.k. Grundläggande Vertikalt Noggrannhetstest (eng. *Fundamental Vertical Accuracy test*) utföras. I detta fall antas avvikelserna följa en normalfördelning. Testet grundar sig på medelfelet, RMS, och konfidensintervallet anges som 95-percentilen. De två övriga testen kallas Supplementärt Vertikalt Noggrannhetstest (eng. *Supplementary Vertical Accuracy test*), respektive Konsoliderande Vertikalt Noggrannhetstest (eng. *Consolidated Vertical Accuracy test*). Dessa ska utföras då utvärderingspunkterna ligger på flera olika underlag, eller på underlag där avvikelserna inte antas följa en normalfördelning.

I denna rapport finns dock bara möjlighet att utföra en enklare form av utvärdering. Den metod som används går ut på att beräkna medelfelet, RMS (Root Mean Square) i höjd i ett antal noggrant inmätta utvärderingspunkter. Påverkan av fel i plan har inte tagits med i beräkningarna. Det bör dock tas med i beräkningen att fel i plan även påverkar noggrannheten i höjd. Om en punkt ligger förskjutet i plan, blir det nämligen inte samma punkt som jämförs i höjdmodell som i utvärderingsdata. Då punkterna ligger på helt plana ytor påverkar inte detta fel i höjddled. Detta eftersom en förskjutning i sidled fortfarande ger en punkt med samma höjd. I mer topografiskt detaljerade områden kan däremot en liten förskjutning i plan, medföra att det höjdvärde som utvärderas avviker från det verkliga värdet i punkten.

6.1.1 Tillgänglig data

Tillgänglig data för utvärderingen var en digital höjdmodell över Helsingborgs tätort i gridformat, med gridstorleken 1,5 x 1,5 m. Modellen finns tillgänglig i filformaten ASCII raster, och ASCII xyz. ASCII raster innebär att filhuvudet anger hur många rader och kolumner rastret innehåller, x- respektive y-koordinaterna för nedre vänstra cellens centrum, samt cellstorleken. Det anges även hur celler utan data representeras. Därefter följer höjdvärdena för samtliga celler i rastret. Exempel på filhuvud i ASCII raster format:

```
ncols 500
nrows 500
xllcenter 99999.750
y llcenter 622222.750
cellsize 1.5000
nodata_value -9999
```

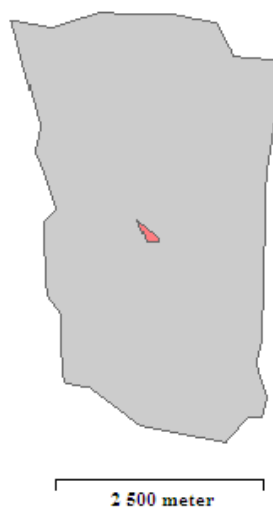
ASCII xyz innebär att för varje cell lagras x- respektive y-koordinat samt höjdvärde. Det innebär att detta filformat ger större filstorlek.

Höjdvärden är angivna i meter med 2 decimalers noggrannhet. Den vertikala noggrannheten var ej angiven. Data har samlats in med hjälp av laserskanning av Scankort A/S, Danmark, vilka även gjort höjdmmodellerna. Scankort använder termen DTM, digital terrängmodell, för en höjdmmodell som representerar markytan, vilket skiljer sig från Lantmäteriets benämning.

Utvärderingsdata var 810 punkter inmätta av Helsingborgs kommuns stadsbyggnadsförvaltning. De har skapat ett nytt stornät i plan avsett för en del större projekt, som södertunnelprojektet och byggandet av en ny stadsdel (Rasmusson, 2009). Inmätningen av punkterna i stornätet har genomförts med statisk GPS. Därefter har nätet beräknats och utjämnats i plan. För nämnda projekt är även kraven på noggrannhet i höjd höga. Därför har höjdvärdena i stornätet mätts in genom avvägning för att nå tillräckligt hög kvalitet. Avvägningen har utgått från riksavvägningen, vilket gör att höjddata är i höjdsystem RH2000. Inmätning av ytterligare punkter s.k. detaljmätning, utgår sedan från detta stornät, och utförs med totalstation. Det ger ett medelfel i höjd på låg centimeternivå. Dessa inmätningar är ett pågående projekt, vilket gör att mängden tillgänglig data vid utförandet av utvärderingen var begränsad.

Dessvärre fanns bara utvärderingsdata i en liten del av höjdmodellen tillgängliga vid tidpunkten för utvärderingen, vilket figur 6.1 visar. Av den totala ytan täcks endast 0,2 % av utvärderingspunkterna.

För utvärderingsdata gäller tumregeln att medelfelet i referensdata ska vara högst 1/3 av medelfelet i de data som ska utvärderas (Klang, 2006). I detta fall är utvärderingsdata av så hög kvalitet att de går bra att använda.



Figur 6.1 Höjdmmodellens omfång (grått), samt området där utvärderingspunkterna fanns inmätta (rött) vid tidpunkten för utvärderingen. Som synes är det ett begränsat område som täcks av utvärderingsdata.

Tabell 1. Area med utvärderingspunkter

Total area (m ²)	12 800 000
Area täckt av utvärderingspunkter (m ²)	24 000
Area täckt av utvärderingspunkter (%)	0,2

GIS-analyserna har gjorts i programmet ArcGIS från ESRI. Övriga beräkningar har gjorts i Microsoft Excel.

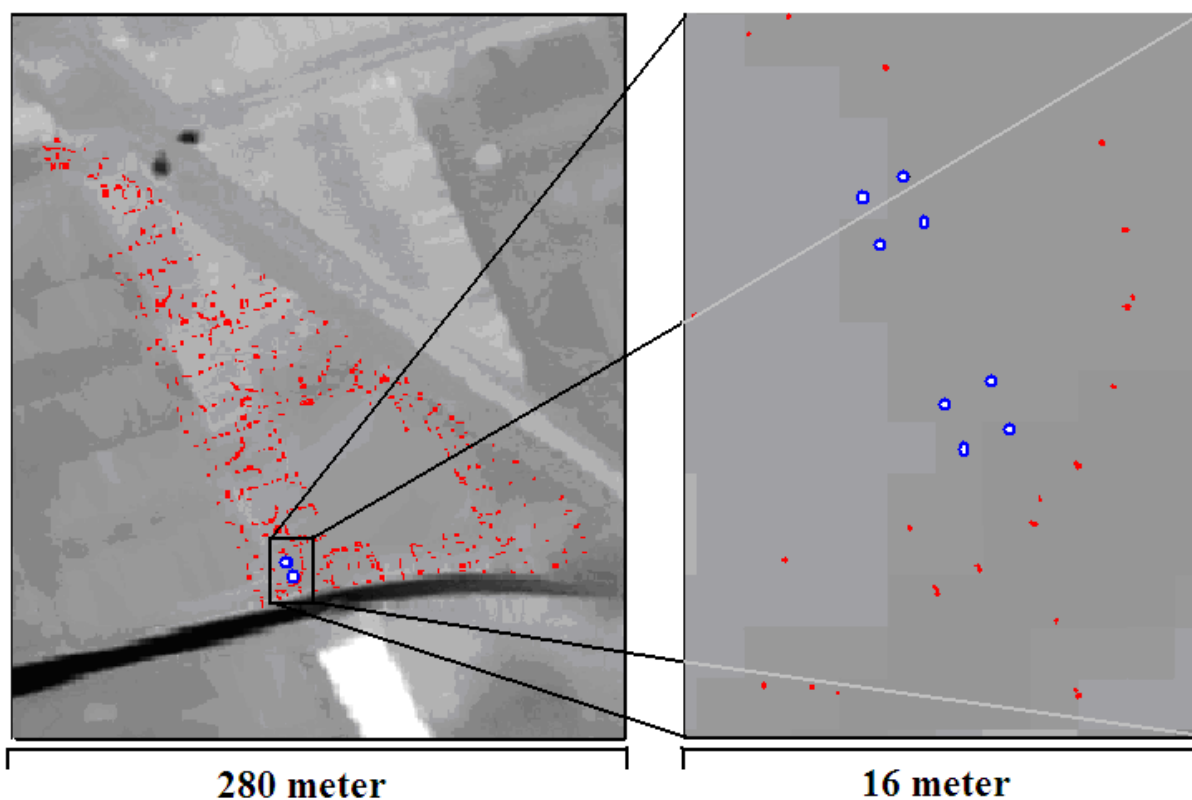
6.2 Metod

Den digitala höjdmodellen importerades till ArcGIS. För att göra utvärderingen gjordes modellen om till polygoner i vektorformat. För att konvertera raster till polygoner måste cellvärdet vara ett heltal. Terrängmodellen hade höjdvärdena lagrade som decimaltal, med två decimaler, därför multiplicerades alla höjdvärden med 100. På så sätt försvann alla decimaler med värdesiffror. Detta gjorde också att enheten för höjdvärdena ändrades från meter till centimeter. Nästa steg var att omvandla alla höjdvärden till heltal, vilket nu kunde göras utan att data förlorades. Sista steget var att konvertera rastret till polygoner. Detta gjordes utan att utjämna kanterna för att ge samma utsträckning som cellerna i rastret. Nu fanns ett lager med polygoner, där höjden var ett av attributen. En enkel manuell jämförelse gjordes mellan höjdmodellen och polygonlagret. De högsta och lägsta värdena, samt ett antal slumpvist utvalda punkter kollades, och samtliga var korrekta.

Utvärderingsdata importerades också till ArcGIS. Eftersom höjdvärdena i höjdmodellen multiplicerats med 100, gjordes det samma med utvärderingsdata. Detta sparades som ett nytt attribut, så originalhöjden fortfarande fanns kvar.

En överlagring mellan utvärderingsdata och höjdmodellen i polygonform gjordes. Detta gav ett nytt lager där attributtabeln innehöll både höjdvärdet från utvärderingsdata och höjdmodellen. I denna attributtabel skapades en ny kolumn, där avvikelsen mellan höjdmodell och utvärderingsdata beräknades. Det innebär att höjdvärdet för varje utvärderingspunkt jämfördes med värdet i den cell den ligger i. Eftersom en cell får värdet av höjden i dess centrum, blir det en närmaste granne interpolation som genomförs.

Av de 810 utvärderingspunkterna låg höjdmodellen inom -32,8 - +55,8 cm jämfört med utvärderingsdata förutom för 8 punkter. Dessa punkter visade sig samtliga tillhöra lagret trappa, liggandes tätt i två grupper om fyra punkter. Se figur 6.2. Den ena gruppen hade avvikelser på -569,9 – -564,1 cm. Den andra gruppen -292,1 – -285,4 cm. Eftersom de avviker så mycket från övriga värden är det troligen inte markpunkter i utvärderingslagret, varför det valdes att inte ta med dem i utvärderingen.



Figur 6.2 De åtta utvärderingspunkterna som valdes bort. Vänstra figuren visar deras placering bland samtliga utvärderingspunkter, där de två grupperna om fyra punkter markerats med blåa cirklar. Den högra visar deras inbördes placering i förstoring. Här markeras de inbördes punkterna med blåa cirklar. Röda prickar är övriga utvärderingspunkter.

Därefter räknades medelfelet, RMS, ut enligt formel 6.1. Även medianvärdet och antalet punkter med positiv respektive negativ avvikelse beräknades.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (z_j - z_j^{utv})^2}{n}}$$

Formel 6.1

6.3 Resultat

Utvärderingen gav ett vertikalt RMS = 25 cm.
(Med samtliga utvärderingspunkter RMS = 51 cm.)

Medianvärdet = 20,8 cm

Antalet punkter med positiv avvikelse = 779 st.

Antalet punkter med negativ avvikelse = 23 st.

Positiv avvikelse innebär att laserskannade data ligger högre än utvärderingsdata.

(Här är de åtta kraftigt avvikande punkterna borträknade)

6.4 Diskussion om utvärderingen

Eftersom utvärderingspunkterna enbart täckte 0,2 % av höjdmodellen känns det osäkert att dra några slutsatser av utvärderingen. Dock är 25 cm ett medelfel som ligger inom det intervall som brukar anges för laserskannad data. Exempelvis anger Mercer (2004) ett vertikalt medelfel på 0,2 – 0,5 m. Jämfört med kravet på den nya nationella höjdmodellen på 0,5 m, så ligger det klart under.

Medianvärdet och det stora antalet punkter där höjdmodellen ligger högre i värde, visar att den laserskannade höjdmodellen generellt har höga höjdvärden. Enligt Blak (2007) ligger höjdvärdena generellt högre i tät vegetation, och lägre på svart asfalt. I denna utvärdering är inga utvärderingspunkter i vegetation, och punkter i ”vägkant” och ”vägmitt” är klart överrepresenterade bland de punkter som ligger högst, vilket är något motsägelsefullt.

Om det är rätt att ta bort de åtta starkt avvikande punkterna kan diskuteras, men eftersom de avviker mycket i förhållande till andra punkter, och att de ligger placerade i två kvadrater som de gör, är det troligt att de inte är markpunkter. Därför blir troligen resultatet mest rättvist med de punkterna borttagna.

Det hade varit intressant att göra utvärderingen senare då Helsingborgs kommun färdigställt inmätningarna så att ett heltäckande nät av utvärderingspunkter hade varit tillgängliga. Detta skulle ge ett heltäckande nät av högkvalitativ utvärderingsdata, som kunde ge en bra utvärdering av laserskannade data. Det skulle då vara möjligt att göra flera utvärderingar där endast en klass av punkter, exempelvis ”vägmitt”, användes i en och samma utvärdering. Det skulle kunna ge en bild av om laserdata insamlad på vissa underlag generellt ligger högre eller lägre jämfört med geodetiskt inmätta höjddata. En annan fördel med en sådan utvärdering skulle vara att fel i plan kunde elimineras. Om exempelvis enbart punkter på parkeringsplats användes skulle samtliga ligga på en större plan yta. Lägesavvikelser i plan skulle då inte påverka utvärderingen på samma sätt som på lutande ytor, eftersom höjden på en plan yta inte ändras mycket med förflyttning i sidled.

7 Slutsatser

Att ha tillgång till höjddata av hög kvalitet är viktigt och av nationellt intresse bl.a. för att kunna göra beräkningar av sårbarhet p.g.a. framtida klimatförändringar. Exempelvis är det viktigt att kunna göra hydrologiska analyser för att beräkna risken för översvämning, eller att beräkna risken för ras och skred. Detta har klimat och sårbarhetsutredningen slagit fast. Den nationella höjdmodell som finns idag motsvarar inte de noggrannhetskrav som ställs av utredningen. Därför har Lantmäteriet fått i uppdrag att ta fram en ny nationell höjdmodell. Denna ska finnas tillgänglig som grid med en upplösning på 2,5 x 2,5 m. Medelfelet i höjd ska ligga under 0,5 m. Lantmäteriet kommer att lagra höjdmodellen som ett triangelnät. Varje gång en beställning av höjddata görs, skapas ett grid över aktuellt område, ur triangelnätet. Detta gör att det alltid är aktuell data som Lantmäteriet levererar. Höjddata till modellen kommer att samlas in med flygburen laserskanning, med start sommaren 2009. Arbetet beräknas ta 4,5 år.

Det finns olika metoder att samla in höjddata. Högst noggrannhet ger geodetiska metoder, som avvägning, men de är inte effektiva vid insamling av stora datamängder. Istället används någon form av fjärranalysmetod, som fotogrammetri, radar eller laserskanning. Ibland kan en kombination av mer än en metod vara lämpligast.

Fotogrammetri är en beprövad och välkänd teknik, som bygger på analys av flygbilder. Jämfört med laserskanning är fotogrammetri något dyrare, och har något sämre noggrannhet. Att vegetation hindrar insyn till marken är en nackdel som gör att noggrannheten försämras vid insamling av höjddata.

Radar är en annan teknik att samla in höjddata. Tekniken bygger på att radarpulser sänds ut i sidled från ett flygplan. Sedan mäts tiden det tar för reflektioner av pulserna att återvända till sensorn. Eftersom pulsens hastighet är känd kan avståndet till reflektionspunkten beräknas. Är sensorns position känd i ett referenssystem, och pulsen riktning från sensorn känd kan reflektionspunkten georefereras. Positionen bestäms genom satellitpositionering, och riktningen genom tröghetsnavigering.

Radar är en aktiv sensor, vilket gör att tekniken är lämplig i områden som ofta är molntäckta. En annan fördel är att höjddata kan samlas in över ett stort område på kort tid utan att någon manuell redigering av data krävs. För stora områden blir kostnaden betydligt lägre än för fotogrammetri och laserskanning.

Till nackdelarna hör att radar liksom fotogrammetri har problem i områden med tät vegetation, eftersom pulserna reflekteras av vegetationen, och inte på marken. En annan nackdel beror på att radar samlar in data från sidan. Det gör nämligen att en del områden göms i skuggan av exempelvis högre höjder. Detta gör att data blir mindre homogen. Jämfört med fotogrammetri och laserskanning har höjddata insamlad med radar lägre noggrannhet, vilket gör att dess tillämpningsområde blir annorlunda.

Flygburen laserskanning bygger på att pulser av laserljus sänds ut från en sensor, och tiden det tar för dessa att returneras från en reflektionspunkt till sensorn mäts. Positionen för sensorn bestäms genom satellitpositionering, och dess orientering bestäms med tröghetsnavigering. På så sätt kan reflektionspunkten georefereras eftersom pulsens hastighet är känd.

En stor fördel med laserskanning är att pulserna, till skillnad från fotogrammetri och radar, kan tränga igenom vegetation. Detta gör att noggrannheten på höjddata blir bättre i områden med tät vegetation. Visserligen försämras noggrannheten något men inte lika mycket som för fotogrammetri och radar. Liksom radar är det en aktiv sensor, vilket gör att tekniken kan användas i mörker och vid mulen väderlek. Det är också en fördel att data kan samlas in över ett stort område på kort tid, och att data samlas in i digitalt format.

Till laserskanningens nackdelar hör att stora mängder data samlas in, vilket gör att databearbetning kan bli krävande. Bl.a. måste filtrering göras så att enbart markpunkter används till skapandet av en höjdmodell. En annan nackdel är att om störningar gjort att data från satellitnavigering och tröghetsnavigering inte håller tillräckligt hög kvalitet måste skanningen göras om, eftersom georefereringen inte kan göras på annat sätt.

Den praktiska utvärderingen som gjordes har den nackdelen att utvärderingsdata enbart täckte ett begränsat område av höjdmodellen. Detta gör det svårt att dra några slutsatser av utvärderingen. Det går i alla fall konstatera att det uppmätta medelfelet ligger inom det intervall som nämns i de flesta rapporter, och det ligger väl under det krav på vertikal noggrannhet som ställs på den nya nationella höjdmodellen.

Referenser

Artiklar, böcker och publikationer

- Abdullatif, A., Bethel, J., Mikhail, E. M., 2004. Analysis and Accuracy Assessment of Airborne Laserscanning System. Proceedings of ISPRS Congress in Istanbul, Commission 2, 2004.
<http://www.isprs.org/istanbul2004/comm2/papers/113.pdf>
- Ackermann, F., 1999. Airborne laser scanning - present status and future expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54(2-3):64-67, 1999.
<http://welcome.warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1134.pdf>
- Ahokas, E., Kaartinen, H., Hyypä, J., 2003. A quality assessment of airborne laser scanner data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Dresden, Germany, XXXIV-3/W13.
http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Ahokas_ALSDD2003.pdf
- Blak, A. T., 2007. Kapitel 12, DEM Quality Assessment. I Maune, D.F. (red), 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland 2007. ISBN 1-57083-082-7.
- Boberg, A., 2004. Introduktion till fotogrammetrin, sjätte upplagan. Kungliga Tekniska Högskolan, Institutionen för infrastruktur, Stockholm, januari 2004.
- Burman, H., 2000. Calibration and Orientation of Airborne Image and Laser Scanner Data Using GPS and INS. Doktorsavhandling. KTH, Stockholm. ISBN 978-91-717-0565-5.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.12.8986>
- Burman, H., 2004. Rekommendationer vid flygburen laserskanning, version 1.0. Vägverket, publikation 2004:117. ISSN 1401-9612
http://publikationswebbutik.vv.se/upload/1109/2004_117_rekommendationer_vid_flygburen_laserskanning.pdf
- Crombaghs, M., Elberink S. O., Brügelmann, R., de Min, E., 2002. Assessing Height Precision of Laser Altimetry DEMs. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 34, Part 3A, "Photogrammetric computer Vision", Graz. p. A-85 ff.
<http://www.isprs.org/commission3/proceedings02/papers/paper133.pdf>
- Dowman, I., 2004. Integration of LIDAR and IFSAR for mapping. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXX IV, Part B2, Istanbul, Turkey. 90-100, 2004.
<http://cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm2/papers/104.pdf>
- Egels, Y. och Kasser, M., 2002. Digital photogrammetry. Taylor & Francis, London. ISBN 0-748-40945-9
- Ekelund, L., 1993. Kapitel 2 , Flygbildens geometriska egenskaper och kapitel 3, Stereometoder. I Nämnden för skoglig fjärranalyt, 1993. Flygbildsteknik och fjärranalyt. Upplaga Maj 1993. Skogsstyrelsen, Jönköping, 1993. ISBN 91-884 62-04-8. Sid. 51 – 64 och 65 - 116.
- Eklundh, L. och Pilesjö, P., 2008. Kapitel 6, Rumsliga datastrukturer. I Harrie, L. (red), 2008. Geografisk informationsbehandling – teori, metoder och tillämpningar, 4e omarbetade upplagan. Formas, Stockholm, 2008. ISBN 978-91-540-6015-3. Sid. 117 – 137.
- Ekman, M., 2002. Latitud, longitud, höjd och djup, referenssystem och kartprojektioner inom geodesi, hydrografi och navigation. Kartografiska sällskapet. ISBN 91-631-3170-6.
- Flood, M., 2001. Laser Altimetry: From Science to Commercial Lidar Mapping. Photogrammetric engineering & remote sensing. Journal of the American society for photogrammetry & remote sensing. Volume 67, No 11. 2001.
<http://www.asprs.org/publications/pers/2001journal/november/highlight1.html>
- Fowler, R.A., Samberg, A., Flood, M.J., Greaves, T.J., 2007. Kapitel 7, Topographic and Terrestrial Lidar. I Maune, D.F. (red), 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland 2007. ISBN 1-57083-082-7.

Hensley, S., Munjy, R., Rosen, P., 2007. Kapitel 6, Interferometric Synthetic Aperture Radar (IFSAR). I Maune, D.F. (red), 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland 2007. ISBN 1-57083-082-7.

Hodgson, M.E., Jensen, J.R., Schmidt, L., Schill, S., Davis, B., 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. Remote Sensing of Environment 84 (2003) 295–308.
http://people.cas.sc.edu/hodgsonm/Published_Articles_PDF/RSoE_LIDAR_IFSAR_USGSDem_evaluation_2003.pdf

Hyyppä, J., Pyysalo, U., Hyyppä, H. and Samberg, A., 2000. Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LIDAR, Dresden/FRG, June 16 – 17, 2000.
http://las.physik.uni-oldenburg.de/eProceedings/vol01_1/01_1_hyyppae1.pdf

Junqueira, F.C., Barros, E.A., 2004. Development of a dynamically tuned gyroscope – DTG, ABCM Symposium Series in Mechatronics – Vol. 1 – sid. 470 – 478. 2004. The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering.
http://www.abcm.org.br/symposiumseries/SSM_Vol1/Section_III_Machine_Design_and_CAD/SSM_III_05.pdf

Katzenbeisser, R., 2003. About the Calibration of Lidar Sensors. Proceedings of the ISPRS workgroupIII/3 workshop Dresden, pp. 59 – 64.
http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Katzenbeisser_ALSDD2003.pdf

Klang, D., 2006. KRIS-GIS® projekt i Eskilstuna, Kvalitet i höjdd modeller. LMV-rapport 2006:4, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731
www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter.../LMV-Rapport_2006_4_KrisGIS_Eskilstuna.pdf

Klang, D. och Burman, H., 2003. En ny svensk höjddmodell, Laserskanning, Testprojekt Falun. LMV-rapport 2006:3, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/LMV-rapporter/LMV-rapport_2006_03_Laserskanning_Falun.pdf

Klang, D. och Ågren, J., 2008. Kapitel 5, Insamling av geografiska data. I Harrie, L. (red), 2008. Geografisk informationsbehandling – teori, metoder och tillämpningar, 4e omarbetade upplagan. Formas, Stockholm, 2008. ISBN 978-91-540-6015-3. Sid. 89 – 115.

Lilje, C., Engfeldt, A., Jivall, L., 2007. Introduktion till GNSS, Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, LMV-rapport 2007:11, Lantmäteriet. ISSN 280-5731.
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/LMV-rapporter/LMV-rapport_2007_11.pdf

Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J., 2004. Remote sensing and image interpretation, 5e upplagan. John Wiley & Sons, USA. ISBN 0-471-15227-7.

Lantmäteriet, 2007a. Ny nationell höjddmodell, Infoblad n:o 13 Ny nationell höjddmodell.
[http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssystem/Infoblad/info_blad-13-NationellHojddmodell.pdf_\(ändrad_2007-12-06\)](http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssystem/Infoblad/info_blad-13-NationellHojddmodell.pdf_(ändrad_2007-12-06))

Lantmäteriet, 2007b. Ny nationell höjddmodell, Infoblad n:o 14 Flygburen laserskanning.
[http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssystem/Infoblad/info_blad-14-FlygburenLaserskanning.pdf_\(ändrad_2007-12-06\)](http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssystem/Infoblad/info_blad-14-FlygburenLaserskanning.pdf_(ändrad_2007-12-06))

Lysell, G., 2008. Ny nationell höjddmodell, Aktuell information. Lantmäteriet, Augusti 2008.
[http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor/Nyhetsbrev_080827_Hojddata_QA.pdf_\(ändrad_2008-08-27\)](http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor/Nyhetsbrev_080827_Hojddata_QA.pdf_(ändrad_2008-08-27))

- Lysell, G., 2009. Ny nationell höjdmmodell, nyhetsbrev nr. 3. Lantmäteriet, 2009-02-06.
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/kartor/Nyhetsbrev3_ny_hojdmodell.pdf (nedladdad 2009-05-02)
- Maune, D.F., Kopp, S.M., Crawford, C.A., Zervas, C.E., 2007. Kapitel 1, Introduction. I Maune, D.F. (red), 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland 2007. ISBN 1-57083-082-7.
- McGlone, J.C., 2007. Kapitel 5, Photogrammetry. I Maune, D.F. (red), 2007. Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual, 2nd edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Maryland 2007. ISBN 1-57083-082-7.
- Mercer, B., 2004. DEMs created from airborne IFSAR – an update, Proceedings of the ISPRS XXth Congress, Istanbul. Från ISPRS Archives, Vol. XXXV-B2, 841-848, Juli 2004.
<http://cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm2/papers/242.pdf>
- Miljödepartmentet, Klimat och sårbarhetsutredningen, 2007. Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter, kap 5-7. Statens offentliga utredningar, SOU 2007:60.
<http://www.regeringen.se/content/1/c6/08/93/34/0af98686.pdf> (ändrad 2007-10-04)
- Olsson, P-A. och Eriksson, P-O., 2005. Nationella höjdsystem – historik. Lantmäteriet 2005-12-16
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Referenssystem/Hojdsystem/Historik-hojdsystem.pdf (ändrad 2006-03-30)
- Sithole, G. and Vosselman G., 2003. Comparison of Filtering Algorithms. Workshop on 3D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR Data, ISPRS, Dresden, Germany, 8-10 October 2003.
http://www.isprs.org/commission3/wg3/workshop_laserscanning/papers/Sithole_ALSDD2003.pdf
- van der Vegt, J. och Hoffman, A., 2001. Airborne laser scanning reach maturity. Geoinformatics sept 2001.
http://www.terraimaging.nl/fileadmin/PDFs/publications/e/Geoinformatics_092001.pdf
- Wehr, A., Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54(2-3):68-82, 1999.
<http://welcome.warnercnr.colostate.edu/~lefsky/isprs/1136.pdf>
- Woodman, O.J., 2007. An introduction to inertial navigation. Technical Report, Number 696, Computer Laboratory, University of Cambridge, Augusti 2007. ISSN 1476-2986.
<http://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>
- Worboys, M. och Duckham, M., 2004. GIS A Computing Perspective, Second Edition. CRC PRESS. ISBN 0-415-28375-2.
- Ågren, J., 2009. Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70. LMV-Rapport 2009:1. Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem. Lantmäteriet, Gävle 2009.
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/LMV-rapporter/LMV-rapport_2009_1.pdf (ändrad 2009-01-26)
- Ågren, J. och Hauska, H., 2008. Kapitel 4, Referenssystem och kartprojektioner. I Harrie, L. (red), 2008. Geografisk informationsbehandling – teori, metoder och tillämpningar, 4e omarbetade upplagan. Formas, Stockholm, 2008. ISBN 978-91-540-6015-3. Sid. 67 – 87.
- Ågren, J. och Svensson, R., 2007. Postglacial Land Uplift Model and System Definition for the New Swedish Height System RH 2000. LMV-rapport 2007:4. Lantmäteriet, 2007.
http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/LMV-rapporter/LMV-Rapport_2007_4.pdf (ändrad 2007-06-15)

Internet

USGS, 2008.

<http://edc.usgs.gov/products/elevation.html>

SWEPOS, 2009.

<http://swepos.lmv.lm.se/>

Privat kommunikation (e-post)

Avsändare: Jonas Rasmusson, Produktionschef Stadsbyggnadsförvaltningen Helsingborgs kommun.

Titel: Jutan, utvärderingsdata

Mottaget: 4e Maj 2009.

Figurer

Scankort, 2008.

Scankort a/s. Productsheet – UK version. Ver. 1, nov. 06. (nedladdad 2008-11-03)

http://scankort.dk/files/Scankort_produkark_DTM-DK.pdf

Lantmäteriet, 2009. Enhetligt geodetiskt referenssystem, Infoblad n:o 3 Nytt höjdsystem.

http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Nytt_referenssystem/Infoblad/info_blad-3.pdf

Lunds Universitets Naturgeografiska institution. Seminarieuppsatser. Uppsatserna finns tillgängliga på Naturgeografiska institutionens bibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND. Serien startade 1985. Uppsatserna är även tillgängliga på <http://www.geobib.lu.se/>

The reports are available at the Geo-Library, Department of Physical Geography, University of Lund, Sölvegatan 12, S-223 62 Lund, Sweden.

Report series started 1985. Also available at <http://www.geobib.lu.se/>

111. Tränk, L., (2005): Kadmium i skånska vattendrag – en metodstudie i föroreningsmodellering.
112. Nilsson, E., Svensson, A.-K., (2005): Agro-Ecological Assessment of Phonxay District, Luang Phrabang Province, Lao PDR. A Minor Field Study.
113. Svensson, S., (2005): Snowcover dynamics and plant phenology extraction using digital camera images and its relation to CO₂ fluxes at Stordalen mire, Northern Sweden.
114. Barth, P. von., (2005): Småvatten då och nu. En förändringsstudie av småvatten och deras kväveretentionsförmåga.
115. Areskoug, M., (2005): Planering av dagsutflykter på Island med nätverkanalys
116. Lund, M., (2005): Winter dynamics of the greenhouse gas exchange in a natural bog.
117. Persson, E., (2005): Effect of leaf optical properties on remote sensing of leaf area index in deciduous forest.
118. Mjöfors, K., (2005): How does elevated atmospheric CO₂ concentration affect vegetation productivity?
119. Tollebäck, E., (2005): Modellering av kväveavskiljningen under fyra år i en anlagd våtmark på Lilla Böslid, Halland
120. Isacson, C., (2005): Empiriska samband mellan fältdata och satellitdata – för olika bokskogsområden i södra Sverige.
121. Bergström, D., Malmros, C., (2005): Finding potential sites for small-scale Hydro Power in Uganda: a step to assist the rural electrification by the use of GIS
122. Magnusson, A., (2005): Kartering av skogsskador hos bok och ek i södra Sverige med hjälp av satellitdata.
123. Levallius, J., (2005): Green roofs on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefits.
124. Florén, K., Olsson, M., (2006): Glacifluviala avlagrings- och erosionsformer i sydöstra Skåne – en sedimentologisk och geomorfologisk undersökning.
125. Liljewalch-Fogelmark, K., (2006): Tågbuller i Skåne – befolkningens exponering.
126. Irminger Street, T., (2006): The effects of landscape configuration on species richness and diversity in semi-natural grasslands on Öland – a preliminary study.
127. Karlberg, H., (2006): Vegetationsinventering med rumsligt högupplösande satellitdata – en studie av QuickBird-data för kartläggning av gräsmark och konnektivitet i landskapet.
128. Malmgren, A., (2006): Stormskador. En fjärranalytisk studie av stormen Gudruns skogsskador och dess orsaker.
129. Olofsson, J., (2006): Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6000 years.
130. Johansson, T., (2006): Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i

- stormfällen efter stormen Gudrun med hjälp av satellitdata.
- 131 Eckeskog, M., (2006): Spatial distribution of hydraulic conductivity in the Rio
Sucio drainage basin, Nicaragua.
- 132 Lagerstedt, J., (2006): The effects of managed ruminants grazing on the global
carbon cycle and greenhouse gas forcing.
- 133 Persson, P., (2007): Investigating the Impact of Ground Reflectance on
Satellite Estimates of Forest Leaf Area Index
- 134 Valoczi, P. (2007): Koldioxidbalans och koldioxidinnehållsimulering av
barrskog i Kristianstads län, samt klimatförändringens inverkan på skogen.
- 135 Johansson, H. (2007): Dalby Söderskog - en studie av trädarternas
sammansättning 1921 jämfört med 2005
- 137 Kalén, V. (2007): Analysing temporal and spatial variations in DOC
concentrations in Scanian lakes and streams, using GIS and Remote Sensing
- 138 Maichel, V. (2007): Kvalitetsbedömning av kväveretentionen i nyanlagda
våtmarker i Skåne
- 139 Agardh, M. (2007): Koldioxidbudget för Högestad – utsläpp/upptag och
åtgärdsförslag
- 140 Peterz, S. (2007): Do landscape properties influence the migration of Ospreys?
- 141 Hendrikson, K. (2007): Småvatten och groddjur i Täby kommun
- 142 Carlsson, A. (2008): Antropogen påverkan i Sahel – påverkar människans
aktivitet NDVI uppmätt med satellit.
- 143 Paulsson, R. (2008): Analysing climate effect of agriculture and forestry in
southern Sweden at Högestad & Christinehof Estate
- 144 Ahlstrom, A. (2008): Accessibility, Poverty and Land Cover in Hambantota
District, Sri Lanka. Incorporating local knowledge into a GIS based
accessibility model.
- 145 Svensson T. (2008): Increasing ground temperatures at Abisko in Subarctic
Sweden 1956-2006
- 146 af Wåhlberg, O. (2008): Tillämpning av GIS inom planering och naturvård -
En metodstudie i Malmö kommun.
- 147 Eriksson, E. och Mattisson, K. (2008): Metod för vindkraftslokalisering med
hjälp av GIS och oskarp logik.
- 148 Thorstensson, Helen (2008): Effekterna av ett varmare klimat på fenologin hos
växter och djur i Europa sedan 1950.
- 149 Raguz, Veronika (2008): Karst and Waters in it – A Literature Study on Karst
in General and on Problems and Possibilities of Water Management in Karst in
Particular.
- 150 Karlsson, Peggy (2008): Klimatförändringarnas inverkan på de svenska
vägarna.
- 151 Lyshede, Bjarne Munk (2008): Rapeseed Biodiesel and Climate Change
Mitigation in the EU.
- 152 Sandell, Johan (2008): Detecting land cover change in Hambantota district, Sri
Lanka, using remote sensing & GIS.
- 153 Elgh Dalgren, Sanna (2008): vattennivåförändringar i Vänern och dess
inverkan på samhällsbyggnaden i utsatta städer
- 154 Karlgård, Julia (2008): Degrading palsa mires in northern Europe: changing
vegetation in an altering climate and its potential impact on greenhouse gas
fluxes.
- 155 Dubber, Wilhelm and Hedbom, Mari (2008) Soil erosion in northern Loa PDR
– An evaluation of the RUSLE erosion model

- 156 Cederlund, Emma (2009): Metodgranskning av Klimatkommunernas lathund
för inventering av växthusgasutsläpp från en kommun
- 157 Öberg, Hanna (2009): GIS-användning i katastrofdrabbade utvecklingsländer
- 158 Marion Früchtl & Miriam Hurkuck (2009): Reproduction of methane emissions from
terrestrial plants under aerobic conditions
- 159 Florian Sallaba (2009): Potential of a Post-Classification Change Detection
Analysis to Identify Land Use and Land Cover Changes. A Case Study in
Northern Greece
- 160 Sara Odellius (2009): Analys av stadsluftens kvalitet med hjälp
av geografiska informationssystem.
- 161 Carl Bergman (2009): En undersökning av samband mellan förändringar i
fenologi och temperatur 1982-2005 med hjälp av GIMMS datasetet och
klimatdata från SMHI.
- 162 Per Ola Olsson (2009): Digitala höjdmodeller och höjdsystem. Insamling av
höjddata med fokus på flygburen laserskanning.
- 163 Johanna Engström (2009): Landskapets påverkan på vinden -sett ur ett
vindkraftperspektiv.
- 164 Andrea Johansson (2009): Olika våtmarkstypers påverkan på CH₄, N₂O och
CO₂ utsläpp, och upptag av N₂.
- 165 Linn Elmlund (2009): The Threat of Climate Change to Coral Reefs
- 166 Hanna Forssman (2009): Avsmältningen av isen på Arktis - mätmetoder,
orsaker och effekter.
- 167 Julia Olsson (2009): Alpina trädgränsens förändring över 100 år.