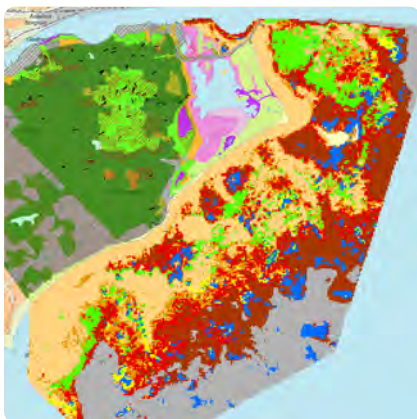
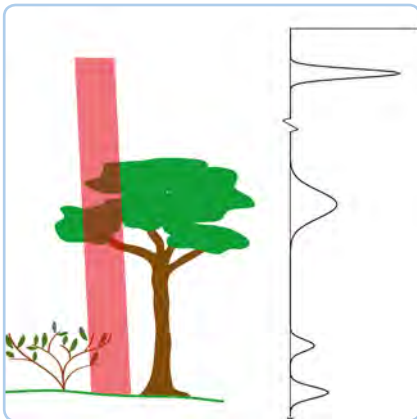


Flygburen laser och digitala bilder för kartering och övervakning av akvatisk och terrester miljö

HÅKAN OLSSON, HELLE SKÅNES, MICHAEL TULLDAHL,
SOFIA WIKSTRÖM, HANS KAUTSKY, BENGT RYDELL,
ERIK ÅRNFELT, JAN EKLÖF OCH OVE STEINVALL

RAPPORT 6633 • DECEMBER 2014



Flygburen laser och digitala bilder för kartering och övervakning av akvatisk och terrester miljö

Håkan Olsson, Helle Skånes, Michael Tulldahl,
Sofia Wikström, Hans Kautsky, Bengt Rydell,
Erik Årnfelt, Jan Eklöf och Ove Steinvall

Beställningar

Ordertel: 08-505 933 40

Orderfax: 08-505 933 99

E-post: natur@cm.se

Postadress: Arkitektkopia AB, Box 110 93, 161 11 Bromma

Internet: www.naturvardsverket.se/publikationer

Naturvårdsverket

Tel: 010-698 10 00 Fax: 010-698 10 99

E-post: registrator@naturvardsverket.se

Postadress: Naturvårdsverket, 106 48 Stockholm

Internet: www.naturvardsverket.se

ISBN 978-91-620-6633-8

ISSN 0282-7298

© Naturvårdsverket 2014

Tryck: Arkitektkopia AB, Bromma 2014

Omslag: foto Helle Skånes

Förord

Stora förhoppningar sätts till att modern informationsteknologi ska effektivisera den offentliga förvaltningen. Detta gäller även miljöområdet. I många fall kan detta ske genom införande av informationsteknik som utvecklats för att fylla breda administrativa behov. Inom andra områden är behoven mera speciella och tillgodoses inte automatiskt av teknikforskning och -utveckling bedriven utanför miljösektorn. Miljöövervakning och naturinventeringar är två områden där behoven är mer specifika – det finns utvecklingsbehov av nya metoder som passar för att kartlägga förbuskning av betesmarker eller utbredning av ålgräsängar på grunda havsbottnar. Det är därför nödvändigt att bevaka teknikutvecklingen i omvärlden, och ha beredskap och resurser för att vid behov investera i ytterligare forskning och utveckling för att anpassa dem till miljöarbetets behov.

Kring millennieskiftet stod det klart att flygburen laserskanning var en sådan intressant teknologi, som redan hade tagits i bruk för topografisk kartering av mark och grunda bottnar och som började få fäste inom skogssektorn för uppskattning av bl.a. virkesförråd på beståndsnivå. En annan viktig utveckling var införande av nya, högupplösande digitalkameror inom Lantmäteriets program för flygfotografering. Ny lovande teknik – men outvecklad kunskap för tillämpning inom miljöövervakning och naturinventeringar. Detta var bakgrunden till den utlysning från Naturvårdsverkets forskningsanslag som blev till EMMA-programmet 2009–2013 (Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images), ett forskningsprogram med en budget på totalt 12 miljoner kronor. Programmet har bestått av en akvatisk och en terrester del, samt en integrerande fas mellan land och hav.

Forskningsprogrammet har letts av professor Håkan Olsson (Institutionen för Skoglig resurshushållning, SLU, Umeå) som även ansvarat för den terrestra delen. Ansvaret för den akvatiska delen har Michael Tulldahl (Avdelningen för Sensor- och TK-system, FOI, Linköping) haft. Bland övriga medverkande i programmet finns Sofia Wikström, AquaBiota Water Research; Hans Kautsky och Helle Skånes, Stockholms Universitet; Bengt Rydell, Linda Blied och Jim Hedfors, SGI; Erik Årnfelt, Länsstyrelsen i Östergötland; Ove Steinvall, FOI; Niklas Strömbeck, Strömbeck Consulting; Anders Glimskär, SLU i Uppsala; Mattias Nyström, Eva Lindberg, Ann-Helen Granholm, Mats Nilsson, Johan Holmgren och Anna Allard, SLU i Umeå; samt Jan Eklöf, Umeå Universitet.

I programmets referensgrupp har följande medverkat: Mikael Johansson, Lantmäteriet (t.o.m. juli 2013); Artur Larsson, Artdatabanken (t.o.m. augusti 2012); Hans Gardfjell, SLU; Ulf Bergström, Fiskeriverket, senare SLU; Bertil Håkansson, SMHI, senare Havs- och vattenmyndigheten; Patrik Wiberg, Sjöfartsverket; samt Ola Inghe och Cecilia Lindblad, Naturvårdsverket. Vid Naturvårdsverket har Martin Gustafsson ansvarat för programmet.

Författarna ansvarar ensamma för rapportens innehåll.

Naturvårdsverket i september 2014

Innehåll

FÖRORD	3
INNEHÅLL	4
1. SAMMANFATTNING	6
2. SUMMARY	11
3. INLEDNING	13
4. UTVECKLINGEN AV LASERSKANNING OCH FOTOGRAMMETRI	14
5. KARTERING AV GRUNDA HAVSBOTTNAR	17
5.1. Akvatisk laserskanning	17
5.2. Data från flyg- och satellitbilder	20
5.3. Insamling av referensdata	22
5.4. Bottentypsklassning	24
5.5. Kartering av bottenvegetation och -habitat	26
5.6. Kartering och uppföljning av marina skyddade områden	29
5.7. Miljöövervakning	32
5.8. Underlag för fysisk planering	33
5.9. Laserskanning och flygfotografering av grunda bottenar – möjligheter, kostnader och begränsningar	36
6. KARTERING OCH ÖVERVAKNING AV TERRESTER VEGETATION	38
6.1. Förbearbetning och markmodellering	40
6.2. Insamling av fältdata	42
6.3. Vegetationskartering med laserdata	43
6.4. Vegetationskartering med kombination av laserdata och satellitbilder	48
6.5. 3D-punktmoln från digital fotogrammetri	50
6.6. Kartering och skattning av fjällvegetation	52
6.7. Visuellt tolkning av naturvårdsvariabler i laserpunktmoln och markmodeller från laserskannerdata	56
6.8. Tekniska aspekter på visuellt tolkning i laserpunktmoln	66
7. INTEGRERAD KARTERING AV LAND- OCH VATTENMILJÖ	69
7.1. Integrerad djup–markmodell	69
7.2. Integrerad vegetationsdatabas	70
7.3. Övervakning av stranderosion	71

8. LÄSTIPS OCH SLUTORD	75
9. KÄLLFÖRTECKNING	77
BILAGA 1: TEKNISK UTBLICK	82
BILAGA 2: FOTOGRAMMETRISKA ARBETSSTATIONER	94
BILAGA 3: LÄNKAR	97

1. Sammanfattning

Det finns ett växande behov av effektiva metoder för kartering av såväl land- som vattenmiljöer. Sådana behövs för grundläggande naturresursinventeringar, som underlag för bland annat beslut om olika former av skyddade områden samt för hållbar naturresursförvaltning i ett ekosystem- och landskapsperspektiv. Sådana metoder behövs också för uppföljning inom såväl naturresursförvaltning som på en mer strategisk nivå inom miljöövervakningen, för uppföljningen av miljömålen och för internationell rapportering. Två för dessa uppgifter viktiga teknologier som utvecklats starkt på senare tid är flygburen laserskanning och digital fotogrammetri. Med laserskanning kan mark och vegetation avbildas som ett tredimensionellt punktmoln. Det finns även system som med laser avbildar grunda havsbottnar. Syftet med forskningsprogrammet EMMA (Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images; <http://emma.slu.se/>) har varit att utveckla metoder för att tillvarata data från i första hand flygburen laserskanning för miljöövervakningens och naturvårdens behov av kartläggning av vegetation såväl på land som på grunda havsbottnar. Tolkning och fotogrammetrisk mätning av flygbilder är välkända tekniker och har därför inte varit en del av forskningen i EMMA. Däremot har användningen av färginformation från digitala flygbilder tillsammans med laserdata undersökts i EMMA-programmets akvatiska del och i den terrestra delen har automatiserad användning av tredimensionella punktmoln som kan erhållas genom matchning av flygbilder undersökts.

Sammanfattning av resultat inom programmets akvatiska delar

För akvatisk miljö har programmet utvecklat och visat ett antal tillämpningar som direkt kan omsättas i ett operativt sammanhang. Vi har visat att det med laserdata går att kartera ytsubstrat med hög noggrannhet (> 80 %), så att en heltäckande karta genereras som anger täckningen i procent av hårda respektive mjuka substrat ned till laserns djupräckvidd (ca 2–3 gånger siktdjupet). Utifrån dessa data kan metoden användas som stöd för att finna värdefulla marina områden och för uppföljning av marina skyddade områden (t.ex. naturtyperna *Rev* och *Sandbankar* enligt Art- och habitatdirektivet). Information om utbredningen av hård- och mjukbottnar är ett grundläggande underlag för att beskriva utbredningen av biotoper enligt det europeiska habitatklassificeringssystemet EUNIS, och HELCOM:s vidareutveckling av detta system för Östersjön (HELCOM Underwater Biotopes/Habitats, HUB). Här har laserdata en viktig funktion att fylla, eftersom detaljerade kartor över ytsubstrat i stort sett saknas för grunda havsområden. Resultaten från EMMA visar att batymetrisk laser kan vara en bra metod att samla in sammanhängande botteninformation som kan gå in som ett underlag i översiktsplanering. Djup- och bottensubstratkartor från lasermätningar är även viktiga underlag för att ta fram kartor över livsmiljöer på havsbotten med hjälp av rumslig modellering. Heltäckande kartor över livsmiljöer är i sin tur ett viktigt delunderlag som tillsammans med annan information kan skapa underlag i det politiska arbetet som till exempel leder till en kustzonsplan eller en kommunal översiktsplan.

Utöver dessa operativa tillämpningar har programmet även tagit fram resultat som ger en grund för fortsatt metodutveckling inom området. Vi har visat att det med laserdata (utöver ytsubstrat och naturtyper) går att kartera högväxt vegetation. En metod som skulle kunna möjliggöra yttäckande övervakning eller detektering av förändringar till en lägre kostnad per ytenhet är användning av satellitbilder, flygbilder eller bilder från mini-UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) som kombineras med laserdjupdata insamlade vid ett tillfälle. Kombinationen av laser- och bilddata medför att bilddata kan djupkorrigeras och att flygbildernas användbarhet för bottenkartering därmed ökar. Denna flygbildsövervakning skulle kunna genomföras ned till optiska siktdjupet i området. En möjlig datakälla kan vara bilder från Lantmäteriets nationella flygfotografering. Vi har sett att det finns potential att detektera blåstång och smaltång på hårda substrat genom att kombinera data från flygburen laser och flygbilder. Vi bedömer också att det finns stora möjligheter till fortsatt utveckling inom området dels tack vare ny teknik (kameror eller lasersystem med högre spatial och spektral upplösning, t.ex. laser med flera våglängder eller fluorescenskanaler) och dels tack vare nya algoritmer för bearbetning av laser- och bild-data.

De akvatiska studierna i EMMA har genomförts i samverkan med ett antal externa projekt (ULTRA, SUPERB och HISPARES). Förutom kunskapsutbyte har det medfört utökade möjligheter att utveckla och testa metoderna i flera geografiska områden och få återkoppling från användare av data. I EMMA har vi arbetat med akvatiska testområden på den svenska ostkusten, från Norra Kvarken till Skåne, men liknande resultat har även uppnåtts på den spanska Atlantkusten och metoderna bör därmed vara lika applicerbara på den svenska västkusten. Vi har generellt uppnått bra resultat i alla områden där vattnet inte varit för grumligt. Dagens operativa lasersystem kräver ett siktdjup på minst 3 m för att kunna ge bra djupdata. Det begränsar teknikens användbarhet i vissa kustnära områden av Bottniska viken, speciellt i områden med stort utflöde av humusrikt älvvatten, och i en del områden med dåligt siktdjup i andra havsområden.

Sammanfattning av resultat inom programmets terrestra delar

Data från flygburen laserskanning ger information om markens form, samt vegetationens höjd, slutenhet och i viss utsträckning även dess vertikala skiktning och fördelning. Vid tät skanning (mer än 5–10 retur / m²) så framträder även de flesta enskilda trädskronorna, samt många objekt på marken, som liggande trädstammar, större stenar etc. Laserdata kan relativt enkelt bearbetas i dator eftersom det utgörs av diskreta 3D-punkter. Exempelvis kan objekt nära marken bli lättare att tolka visuellt om punkterna som returnerats från kröntaket tas bort och de underliggande punkterna ges olika färg beroende på höjd över marken.

Relationen mellan laserdata och fältmätta mått på vegetationens egenskaper (t.ex. genomsnittlig trädhöjd eller kronslutenhet) kan dock variera något, beroende på bl.a. sensortyp och inställningar vid skanningen såsom pulsfrekvens, flyghöjd, och årstid. För att automatiskt översätta laserdata till kända storheter så behövs därför en statistisk analys där mått från laserdata kalibreras med hjälp av fältmätta provytor. Vanligen används provytor med ca 10 m radie. De skattade sambanden

mellan mått i laserdata (t.ex. höjden över marken för 90 % av alla returerna från träd-kronorna inom en fältmätt provyta) och fältmätta mått för samma yta (t.ex. trädens medelhöjd) kan sedan användas för att göra rumsligt heltäckande rasterkartor för hela det område som laserskannats under jämförbara förhållanden. Denna teknik har utvecklats inom skogsbruket och kallas då areabaserad skattning. Inom EMMA-programmet har vi visat att den även fungerar väl för fjällbjörkskog, trots att träden där är lägre och mer oregelbundna i sin form och utbredning. Vi har också visat att lantmäteriets förhållandevis glesa skanning med ca 1 retur / m² ger nästan lika bra areabaserade skattningar av fjällbjörkskog som betydligt tätare skanning från helikopter. Vi har även visat att laserdata från olika registreringstillfällen kan göras jämförbara med en teknik som kallas histogrammatchning, samt att etablering av nya träd i trädgränsen eller på gräsmarker kan upptäckas med laserskanning även på ett tidigt stadium. Sistnämnda försök gjordes dock då träden fortfarande hade löv och det är därför osäkert hur användbara laserdata som registrerats utanför vegetationssäsongen kommer att vara för att upptäcka små lövträd.

En del lasersystem kan spara laserljusets hela returnerade vågform. Om vågformsdatat analyseras istället för de diskreta punkter som systemet genererar från vågformen, så kan ytterligare information erhållas från lasermätningarna. Denna möjlighet är särskilt intressant då syftet är att analysera trädskiktets vertikala struktur. Bearbetningar av vågformsdata är dock mycket mer komplicerade och stöds sällan av färdiga programvaror för analys av laserdata.

Dagens lasersystem stödjer sällan användning av spektral information. Det är endast ett våglängdsband som används för avståndsmätningen, och skalningen för det mått på den returnerade pulsens styrka som registreras (kallat intensitet) kan ibland ändras beroende på hur ljusa objekt sensorn ser. För att skilja olika vegetationstyper åt (t.ex. lövskog kontra barrskog) utöver vad som kan åstadkommas genom analys av deras 3D-former, så behövs spektrala data från någon annan källa. Laserdata och satellitbilder från t.ex. SPOT- eller Landsat-satelliterna är två olika datakällor som kompletterar varandra på ett utmärkt sätt. För vegetationskartering med den klassindelning som använts för skogsmarken enligt Lantmäteriets databas GSD-Marktäcke förbättras den totala klassningsnoggrannheten med ca 10 procentenheter när satellitbilderna kompletteras med laserdata. För vegetationsklassning på kalfjället så är det främst områden med något högre vegetation, såsom videbuskar, som klassas bättre då laserdata används. Då det gäller klassning av fjällvegetation så har det också visat sig att bearbetningar av data från en markmodell kan förbättra vegetationsklassningar från satellitdata väsentligt.

Den nationella laserskanning som Lantmäteriet nu genomför är än så länge inte planerad att upprepas och startkostnaden för specialbeställning av laserskanningar kan vara hög. Det är därför mycket intressant att 3D-punktmoln som liknar laserdata även kan skapas genom sambearbetning av digitala flygbilder som fotografierats med stereoövertäckning. De digitala flygbilder som Lantmäteriet regelbundet registrerar över hela landet har visat sig mycket bra för detta ändamål. I jämförelse med laserdata så ger 3D-modeller från flygbilder inte mycket information om marken eller vegetationen under krontaket, men vegetationens höjd kan skattas med god noggrannhet om 3D-data från flygbilder subtraheras med t.ex. lantmäteriets

markmodell som framställts genom laserskanning. 3D-data från flygbilder kan också tilldelas färginformation från bilderna. Ytterligare en fördel med att beräkna 3D-modeller från flygbilder är att flygbilderna då kan utgöra underlag för automatisk avgränsning av likartade områden (segmentering), vilket är svårt med vanliga ”2D”-ortofoton, eftersom träden framträder från olika vinklar i olika delar av en sådan bild. Lantmäteriets ambition att regelbundet fotografera hela landet öppnar också upp för nya tillämpningar där vegetationens höjdutveckling kan följas automatiskt över tiden.

Inom EMMA-programmet har vi också studerat hur informationen i bearbetade laserpunktmoln kan användas för visuell tolkning. Resultaten visar att det går att tolka olika strukturer som buskar, block och liggande död ved. Tolkningsbarheten beror på en rad olika faktorer och varierar kraftigt mellan högupplösta och lågupplösta data. Andra viktiga faktorer är tätheten för krontak från buskar och träd, om detta domineras av barrträd eller lövträd samt vilken tidpunkt under vegetations-säsongen som registreringen har skett.

Kustzonen

Idag utförs kartering av land- och vattenmiljöer oftast separat från varandra, vilket begränsar möjligheterna att behandla kustzonen som en integrerad övergångszon mellan land och vatten.

Eftersom EMMA-programmet omfattat kartering med 3D-tekniker i både akvatiska och terrestra miljöer så har även genomförts en studie i ett kustzonsavsnitt vid Åhus, där sömlös kartering av hav och land demonstrerats. Syftet har varit att ta fram en integrerad databas över kustzonen som beskriver såväl akvatiska som terrestra biotoper och illustrera hur integrerade kartor kan tas fram. Dessa kan bland annat användas för att simulera effekter av havsnivåhöjning på exempelvis erosion och översvämningar och för att studera förändringar av strandzonen för bedömning av naturvärden, pågående erosion och risk för framtida erosion.

Karteringen utgjordes av två produkter, dels en sömlös kombination av en markmodell från Lantmäteriets skanning (nationella höjddmodellen, NH) och en bottenmodell från batymetrisk laserskanning, dels en likaledes sömlös naturtypskartering för land och havsbotten. För naturtypskarteringen har förutom höjddata från laserskanning även spektrala data från digitala flygbilder använts. Genom att kombinera resultat från laserskanning och tolkning av flygbilder finns möjligheter att presentera information på ett antal kartor som kan användas för naturvård, fysisk planering och klimatanpassning av befintlig bebyggelse och infrastruktur. Det finns också möjligheter till vidareutveckling av klassningsmetoder och att kombinera automatiska, semiautomatiska och manuella metoder där den tekniska utvecklingen inom fjärranalysområdet tas till vara.

Sammanfattning av möjligheter

Sammanfattningsvis så finns nu ett antal nya tekniker vilka möjliggör en effektivare och mer automatisk kartering av vegetationen, såväl i havet, som på land. Detta inbegriper 3D-data från laserskanning, spektral information och 3D-data från regelbundna flygfotograferingar med digitalkamera, samt ett allt bättre flöde av fria

satellitdata. För att omsätta dessa data till definierade klasser eller skattningar så krävs även referensdata. Förutom framställning av heltäckande kartor, så kan dessa data även ligga till grund för stickprovsbaserade undersökningar där sampelområden följs över tiden. Det senare kan vara effektivt om målet är att i regional skala kvantifiera miljöförändringar över tiden. På den terrestra sidan finns redan det stickprovsbaserade programmet Nationell Inventering av Landskapet i Sverige (NILS), vilket skulle kunna ha nytta av några av de studerade teknikerna. På den akvatiska sidan så kan det finnas skäl att skapa ett program som liknar NILS för att kunna följa trender över tiden.

2. Summary

This is the final report from the research program EMMA (Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images; <http://emma.slu.se/>), which was funded by the Swedish Environmental Protection Agency between 2009 and 2013. The report communicates the research results from EMMA and related research programs regarding the new possibilities offered by airborne laser scanning and digital photogrammetry for computer-aided mapping and monitoring of vegetation and nature. Mapping of terrestrial and aquatic vegetation and habitats are both addressed. The program also made a case study illustrating how seamless mapping of the terrestrial and aquatic coastal zone environments could be done. The intended readers are users of remote sensing techniques. Since this report is written in Swedish, English speaking readers are for further information referred to the publications listed at the home page of the program (<http://emma.slu.se/emma-en/>) and to the publications cited in this report.

Airborne laser scanning delivers data in the form of three dimensional (3D) point clouds with coordinates for the return points at the ground or in the vegetation; alternatively the full waveform of the returned laser signal can also be obtained from some instruments. Digital photogrammetry provides pixels with reflected colour information; additionally 3D point clouds can be obtained when images from different positions are combined using matching techniques. In the aquatic part of the program, primarily full waveform information from scanning with a green laser has been used, and in some studies this has been used together with colour information from aerial photos. In the terrestrial part, primarily 3D point clouds from either small footprint airborne laser scanners or digital photogrammetry have been used.

In the aquatic part of the research program, a number of applications ready for operational use have been developed. We have shown that full waveform data from bathymetric laser scanning with proper calibration can be used to classify the sea bottom into three classes comprising two main substrate types: hard (bedrock, boulders, large stones) and soft (sand and sediment), and high vegetation on soft substrate. The overall accuracy of this classification was greater than 80 %. Thus, wall-to-wall maps of bottom types can be created with laser techniques in shallow waters, down to a maximum of two to three times the Secchi depth. The maps of substrate types could be used together with depth data as an aid in mapping important habitats such as Reefs and Sublittoral Sandbanks according to the EU's Habitats Directive. Furthermore, it is shown that high and dense seabed vegetation such as eelgrass (*Zostera marina*) can be mapped with bathymetric laser scanning. Depth data from the laser scanning can be used to calibrate the colour information in digital aerial photos for variations in the water depth and turbidity, thus providing photos of the bottom colour with a high and uniform quality. By combining laser and aerial photography, it is thus possible to detect rockweeds (*Fucus* sp.) on rocky substrate. We also conclude that there are possibilities for further development within this field, partly because of the continuous technical development

(cameras and laser systems with higher spatial and spectral resolution, e.g., multi-wavelength or fluorescence sensing laser scanners) and partly due to algorithm development (processing of laser and image data).

In the terrestrial part of the research program, it has been shown that point clouds from airborne laser scanning are efficient for mapping biomass, canopy height and crown closure in mountain birch forests near the tree-line ecotone and that the results are not very sensitive for scanning density. This finding is of high relevance for operational mapping since all of Sweden, including the mountain areas, is currently being laser scanned at a relatively sparse scanning density (0.5–1.0 returns / m²). Furthermore, it has been shown how changes in the tree line ecotone can be detected even when laser scanner data from very different types of scanners are compared. The possibility to detect afforestation of small trees in grasslands was also demonstrated, as well as the improved possibility to estimate vertical forest structure when full waveform data were used instead of 3D point clouds. Since digital aerial photos are regularly acquired for all of Sweden by Lantmäteriet (the national mapping agency), it is of interest to develop methods that can automatically use these data for vegetation mapping and monitoring. In the EMMA program, it was shown that 3D digital surface models derived from matching of multi-view angle digital aerial photos could be used for automated segmentation of homogenous patches in the forest landscape. The spectral information in the aerial photos is more difficult to use in the forest landscape due to varying view angles in different parts of the photos. Instead, 3D information (from laser scanner data or digital photogrammetry) has been combined with spectral data from satellite imagery, leading to successful vegetation classification. It was also investigated to what degree 3D point clouds from laser scanning could be used for visual interpretation of structures such as wind felled trees or understory vegetation.

3. Inledning

Stora delar av Sveriges landyta och nästan alla kustnära bottnar saknar detaljerade vegetationskartor. De enda landstäckande databaserna över Sveriges terrestra vegetation är gjorda med automatiserad satellitbildsteknik, vilket ger en begränsad klassningsnoggrannhet. Befintliga vegetationskartor baserade på manuell tolkning av färginfraröda (IRF) flygbilder täcker cirka hälften av Sveriges landyta och håller på att föråldras. För kustnära bottnar finns enstaka försök att kartera vegetation (främst ålgräs) med flygbilder och satellitdata, medan övriga vegetationskartor baserar sig på rumslig modellering av arters utbredning.

Vegetationskartor behövs som underlag för planering av infrastruktur och naturvårdsåtgärder, för ekologisk forskning, m.m. Inte minst har behovet av kartor över havsbotten ökat kraftigt i och med införandet av havs- och kustzonsplanering, som ställer höga krav på ett sammanhållet och enhetligt kartunderlag för kust- och havsmiljöer. Dessutom finns ett stort behov av övervakning av vegetationens utveckling över tiden. Många jordbrukslandskap inklusive skyddade områden riskerar att växa igen. Likaså kan klimatförändringen leda till en ökad förekomst av buskar och träd på myrar och i fjällen. I havsmiljön påverkas vegetationen både av ändringar i vattenkvalitet och av klimatförändring.

Flygburen laserskanning ger data i form av ett tredimensionellt punktmoln, vilket erbjuder nya möjligheter för automatiserad kartering av vegetationens tredimensionella struktur, både på land och för grunda havsbottnar. Även flygfotograferingen har genomgått en revolution med övergången till digitala bilder vilket även medger förbättrade möjligheter att automatiskt använda bildernas färg, samt att sambearbeta flera bilder till tredimensionella punktmoln och ytmodeller liknande de som kan erhållas från laserdata. För att utveckla dessa möjligheter för mer automatiserad vegetationskartering har Naturvårdsverket under åren 2009–2013 finansierat forskningsprogrammet EMMA (Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images).

Syftet med denna rapport är att sammanfatta resultat som uppnåtts i EMMA och näraliggande projekt i Sverige, samt sprida dessa resultat till användare av fjärranlysteknik inom naturvården och andra intressenter i samhället.

4. Utvecklingen av laserskanning och fotogrammetri

Laserskanningens utveckling

Tekniken att mäta avstånd med laser kallas ibland lidar (*light detection and ranging*). Lidartekniken bygger på att tiden tills en utsänd laserpuls returneras tillbaka till en sensor registreras, och eftersom ljusets hastighet är känd så kan avståndet till den punkt som ljuset reflekteras från mätas. På 1980-talet testades tidiga flygburna lidarsystem som saknade skanningmekanism och därför brukar kallas för profilerande system. I likhet med all annan fjärranalysteknik så föregicks utvecklingen av civila system av den militära utvecklingen. Således utvecklade dåvarande FOA på 1980-talet ett skannande lasersystem som kallades FLASH och som var avsett för spaning i grunda vatten. Utvecklingen av militära system ledde i Sverige även till att SAAB i början av 1990-talet började tillverka laserskannersystem för den civila marknaden. Man utvecklade såväl ett system för mätning av grunda bottenar med grön laser som hette HawkEye och ett system som för mätning över land med nära infraröd laser (1064 nm) som hette TopEye. SAAB:s utveckling av laserskannersystem omvandlades så småningom till ett fristående bolag kallat AHAB. Hösten 2013 köptes AHAB av Leica som är en stor aktör inom tillverkning av system för flygburen laserskanning och fotografering, Leica ägs i sin tur numera av det svenska företaget Hexagon. Bland andra producenter av laserskannersystem kan bl.a. Optech i Kanada och Riegl i Österrike nämnas.

De första systemen för laserskanning över land som kom för 20 år sedan gjorde ca 2000 avståndsmätningar per sekund, medan en del av dagens system (år 2013), kan göra upp till 500 000 mätningar per sekund. Denna snabba utveckling av systemens kapacitet förväntas att fortsätta; dels utvecklas system som snabbt kan registrera allt större områden från allt högre höjder, dels utvecklas även allt mindre och billigare system (se även Bilaga 1 för en översikt av den förväntade tekniska utvecklingen på laserskannerområdet).

Mätprinciper vid laserskanning

Utvecklingen av GPS-tekniken i kombination med tröghetsnavigering (IMU) har varit avgörande för laserskanningsteknikens genombrott som mätteknik. GPS-systemet registrerar sensorsystemets läge och IMU-systemet registrerar sensorsystemets rotationer och hastighetsändringar. Tillsammans kompletterar dessa system varandra så väl att läget på marken för reflektionspunkten för en utsänd laserpuls kan bestämmas med en noggrannhet om någon decimeter eller bättre.

Vid mätningar över land används vanligen nära-infrarött laserljus (1064 nm). Vissa system från t.ex. Riegl använder dock kortvågsinfrarött laserljus (1550 nm). Vid mätning av grunda bottenar används grönt laserljus (532 nm), eftersom detta dämpas mycket mindre av vatten än t.ex. det nära-infraröda ljuset. Vid mätning med flygburen laser är det givetvis viktigt att det utsända laserljuset inte får vara så starkt att det kan skada ögonen hos betraktare på marken. Behovet att använda

starkt laserljus har dock minskat eftersom de detektorer som registrerar det returnerade laserljuset blir allt känsligare. Idag finns det till och med system som detekterar enskilda fotoner.

En laserpuls som sänds ut under 4 nanosekunder (ns) får en längd om ca 1,2 m. När pulsen reflekteras mot ett mål kan den returnerade pulsen bli ytterligare utsträckt i tiden, i synnerhet om den reflekteras mot vegetation som är halvgenomtränglig för laserstrålen. Sensorn registrerar hela den returnerade laserpulsens form används. De flesta av dagens system, som främst är avsedda för mätning av markens topografi, detekterar dock en eller flera punkter på den returnerade pulsen varefter endast de beräknade tredimensionella (3D) koordinaterna för dessa punkter sparas. Tillsammans bildar dessa punkter ett tredimensionellt punktmoln. Ofta sparas även ett mått på den returnerade signalens styrka för den detekterade punkten. Detta mått brukar kallas *intensitet* och är proportionellt mot reflektansen för laserstrålens våglängd för det material som laserstrålen reflekteras mot; dock är det sätt som intensitetsmättet beräknas på ofta odokumenterat. Väljer man att visa intensitetsdata så får man en bild som liknar en flygbild, fast utan skuggor eftersom signalen tas emot i samma vinkel som ljuset sänds ut.

Den digitala fotogrammetrins genombrott

Utvecklingen av fotogrammetri som teknik, d.v.s. konsten att i fotografiska bilder mäta objekt, har en mer än 100 år lång historia med analoga flygbilder (Ottoson m.fl. 2004). Utvecklingen tog fart i mitten av 1900-talet tack vare lanseringen av analoga bearbetningsinstrument och förbättrade kamerasystem. Från mitten av 1980-talet utvecklades den digitala fotogrammetrin, till en början med data från skannade fotografiska flygbilder. Analoga flygbilder skannades och digitala ortofoton kunde skapas med hjälp av den första generationen fotogrammetrisk mjukvara. En kort översikt över digitala arbetsstationer för fotogrammetriska tillämpningar med fokus på 3D-betrakning ges i Bilaga 2.

Sedan införandet av digitala flygfotokameror i början av 2000-talet har utvecklingen av den digitala fotogrammetrin gått starkt framåt, bland annat därför att de digitala bilderna innehåller mer radiometrisk information i varje bildelement än skannade fotografiska bilder gör. I maj 2004 fick Lantmäteriet sin första digitala mätkamera, en Zeiss Intergraph (Z/I DMC). En bidragande orsak till att man investerade i detta teknikskifte var att det inte behövs något kemiskt fotolaboratorium när man går över till en helt digital produktionskedja. Från och med säsongen 2013 fotograferar Lantmäteriet med en ny digitalkamera, Vexcel UltraCam Eagle (UCE). Med denna kamera kan flyghöjden nästan fördubblas i förhållande till fotografering med DMC-kameran, utan att bildernas upplösning försämras. Lantmäteriet fotograferar själva, eller via upphandling, ca 30 % av landet varje år. Därtill finns det idag också flera kommersiella flygfoto-operatörer som kan göra flygfoto-grafering på beställning. Vid beställning av flygfotouppdrag, liksom även laser-skanning och andra mätuppgifter, så kan de rekommenderade standarder som finns i Lantmäteriets nya Handbok i Mät- och Kartfrågor (HMK) vara till god hjälp (se länk i Bilaga 3).

Utvecklingen på kamerafronten är också fortsatt mycket snabb. Z/I DMC och Vexcel Ultracam som Lantmäteriet använt registrerar centralprojektioner där filmen ersatts med en matris av CCD element. Antalet pixlar som dessa kameror registrerar begränsas dock av hur stora CCD-matriser som kan konstrueras och därför har kamerorna flera kamerahuvuden med separat optik (Gruber m.fl. 2012). Bilderna sätts sedan samman till en gemensam bild. En alternativ teknik är *push broom*, som använder en linjeskanner för att bygga upp bilden allteftersom planet förflyttas framåt. Bilder från moderna push broom-kameror, som Leica ADS80 eller ADS100, innehåller betydligt mer information men är beroende av väl fungerande navigeringsdata som ger exakt information om hur planet och sensorn rör sig under registreringen av bilden.

Den senaste utvecklingen är att lågflygande obemannade farkoster, s.k. UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), används för fotogrammetriska ändamål. Dessa ger extremt högupplöst information som kan användas för att skapa detaljerade ortofoton och tredimensionella ytmodeller för begränsade områden.

5. Kartering av grunda havsbottnar

I detta kapitel sammanfattas metoder och forskningsresultat från försök med kartering av den akvatiska bottenmiljön med stöd av tredimensionella data från flygburen laserskanning i kombination med fältdata och digitala flyg- och satellitbilder. Flygburen laserskanning med grön, så kallad batymetrisk, laser är en idag operativ metod för att kartera bottendjup i grunda områden. Det finns dock få studier som visar användning av flygburen laserskanning för att kartera mer än bottendjupet, såsom klassificering av bottensubstrat och vegetation. I Sverige har ett antal sådana studier gjorts inom EMMA och de näraliggande projekten ULTRA, SUPERB och HISPARES och det är i första hand resultat från dessa studier som redovisas här.

Ett alternativ till flygburen batymetrisk lidar är fartygsburna akustiska metoder såsom sidskannande sonar och multibeam-sonar. Akustiska metoder kan täcka stora områden med relativt hög upplösning. De har stor djupräckvidd, till flera 100-tals meter, och ger mycket noggrann djupinformation (multibeam). Utveckling inom teknik och signaltolkning, som kommer att möjliggöra allt noggrannare kartering även av substrat och vegetation, pågår även inom sonar-området (Kautsky m.fl. 2010). Gemensamt för flygburen laserskanning och digitala flyg- och satellitbilder är att dessa metoder har en stor fördel i grunda och svårnavigerade områden. Flyg- och satellitburna metoder har även en avsevärt större yttäckningshastighet (karterad yta per tidsenhet) än fartygsburna metoder. En kombination av flygburen teknik i grunda områden och fartygsburen teknik (t.ex. multibeam) i djupare områden framstår som en framkomlig väg för heltäckande kartering av havsbottenmiljön.

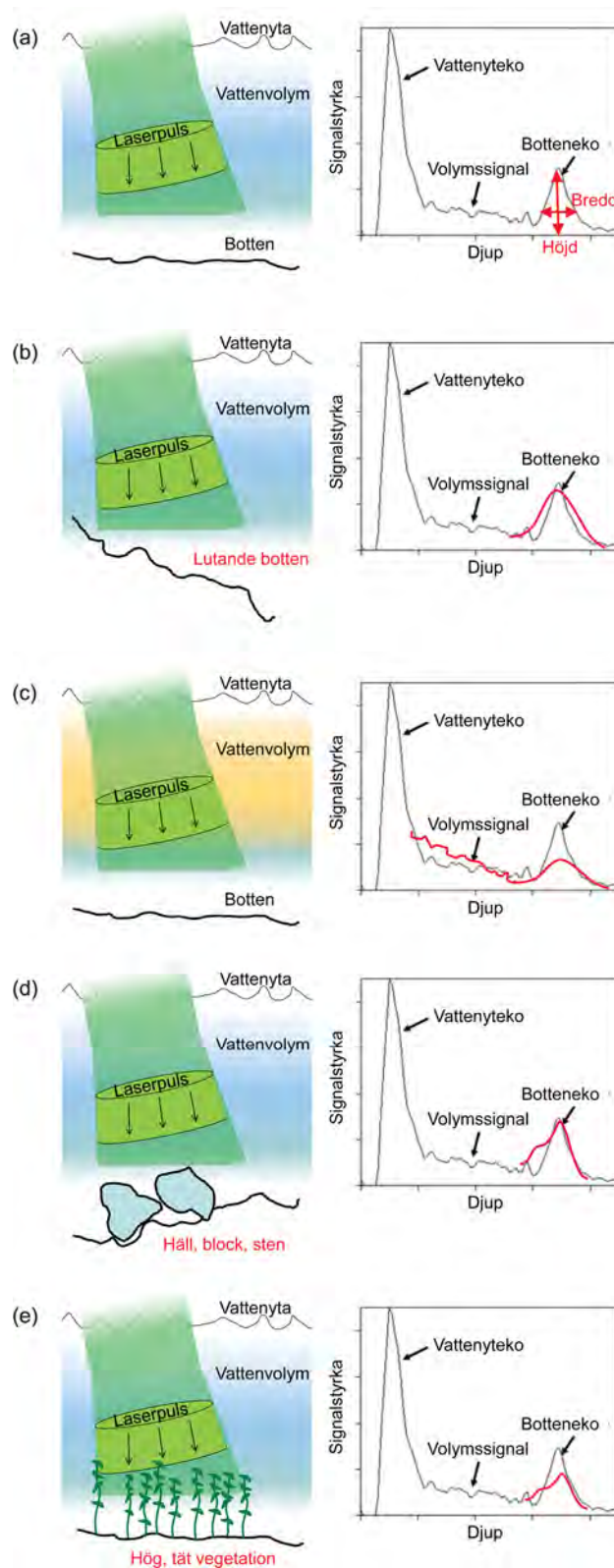
Som användare av data är det viktigt att känna till att kvaliteten både på djupdata och klassningskartor beror på kvaliteten i ursprungsdata. Vid akvatiska mätningar är förutom bra väderförhållanden även goda siktförhållandena i vattnet en viktig förutsättning. Vid användning av data med låg kvalitet kan resultaten bli direkt missvisande. Mätning med ett felinställt lasersystem under dåliga siktförhållanden kan medföra glesa data eller helt bortfall av data i strandzonen eller över mörka vegetationstäckta bottnar då signalerna från vattenyta, grumlighet och botten kan blandas samman.

5.1. Akvatisk laserskanning

De första operativa systemen för laserskanning i vatten utvecklades under 80- och 90-talen (till exempel det svenska HawkEye, SHOALS från Canada och LADS från Australien). Dagens system följer samma mätprincip, men har vidareutvecklats på en rad punkter, bland annat med förbättrad tillförlitlighet, högre yttäckningshastighet och lägre vikt (HawkEye II, SHOALS-3000, LADS Mk3). Vanligen bärs laserskannern av ett tvåmotorigt flygplan och flyghöjden är mellan 250 och 600 m. Från systemet sänds laserljus ut i mycket korta laserpulser och den reflekterade signalen från vattenytan, vattenvolymen och havsbotten registreras i systemets

mottagare. Baserat på tidmätning av dessa signaler och kännedom om ljushastigheten i luft och vatten kan vattendjupet beräknas. Den laserpuls som används för bottensignalen har grön våglängd eftersom denna våglängd tränger ned bra i vatten. Detektionen av vattenytan görs antingen med en nära infraröd (NIR) våglängd eller med så kallat Raman-spritt ljus (Ramansignalen uppstår genom spridning av den gröna pulsen i vattenvolymen precis nedanför vattenytan). Lasersystemets skanner fördelar laserpulserna i ett svepmönster över vattenytan. Efter flygningen bearbetas data från lasersystemet (skannervinklar, refraktion, registrerade pulser, flygplanets position och orientering) för att skapa noggrant positionerade djupdata. Efter att störningar i datasetet tas bort, får man en datamängd med punkter som täcker hela undersökningsområdet. Eftersom tekniken baserar sig på ljus, begränsas den av grumlighet i vatten. För ett konventionellt ”stort” system (HawkEye II, SHOALS-3000, LADS Mk3) kan man beräkna den maximala räckvidden till 2,5–3 gånger siktdjupet. Det har även kommit mindre, lättare system på marknaden som har lägre uteffekt, lägre vikt och mindre mottagaroptik (RIEGL VQ-820-G, respektive Chiroptera). Dessa system anges av tillverkarna ha maximal djupräckvidd på 1–1,5 gånger siktdjupet. Punkttätheten för djupdata från de stora systemen är vanligen lägre (0,3–0,6 punkter / m², HawkEye II) än för de mindre systemen (0,8–1,6 punkter / m², Chiroptera). Här kan även nämnas nya systemtyper (HawkEye III) där en högupplöst laser för grunda bottnar kombineras i ett och samma system med en mer lågupplöst laser med större djupräckvidd.

Utöver djupdata, där bottenekot omräknats till geografiska x,y,z-värden, kan även den returnerade laserpulsens vågform, d.v.s. hur signalen ser ut över tiden, ge information om vattenytan, vattenvolymen och havsbotten (se Figur 5.1 (a)). Bottenekot i vågformen påverkas av det som finns på botten och denna information kan utnyttjas för att få ut mer information än bara bottendjupet. Det är huvudsakligen två typer av information som finns i bottenekot: dels jämnhet/ojämnhet och dels huruvida botten är ljus eller mörk (reflektivitet). Principen för att skatta ojämnheter och reflektivitet är att mäta bottenekots bredd respektive höjd (se Figur 5.1 (a)). Genom att kombinera denna information med variabler som beräknats direkt från punktdata (t.ex. bottenlutning och bottendjupets standardavvikelse) kan en bottenklassificering göras för varje enskild datapunkt. För att denna klassificering ska fungera för alla olika förhållanden som råder över ett område måste vågformsdata korrigeras. I denna korrektion tas hänsyn till bottendjupet, bottens lutning, vattnets grumlighet och små förändringar i flyghöjden eftersom alla dessa parametrar påverkar bottenekots utseende (se schematisk illustration i Figur 5.1 (b)–(c)). Efter att korrektionerna har genomförts kan små förändringar i bottenekot användas för att detektera närvaron av hållar, block, sten eller högväxande vegetation på botten (Figur 5.1 (d)–(e)).



Figur 5.1. Schematisk illustration av laserpuls, den akvatiska miljön och den registrerade vågformens delar: Bottenekots bredd och höjd (a), förändring av bottenekots utseende vid lutande botten (b), ökad grumlighet (c), närvaro av häll, block, sten (d), och högväxt vegetation (e). De olika egenskaperna illustreras i rött.

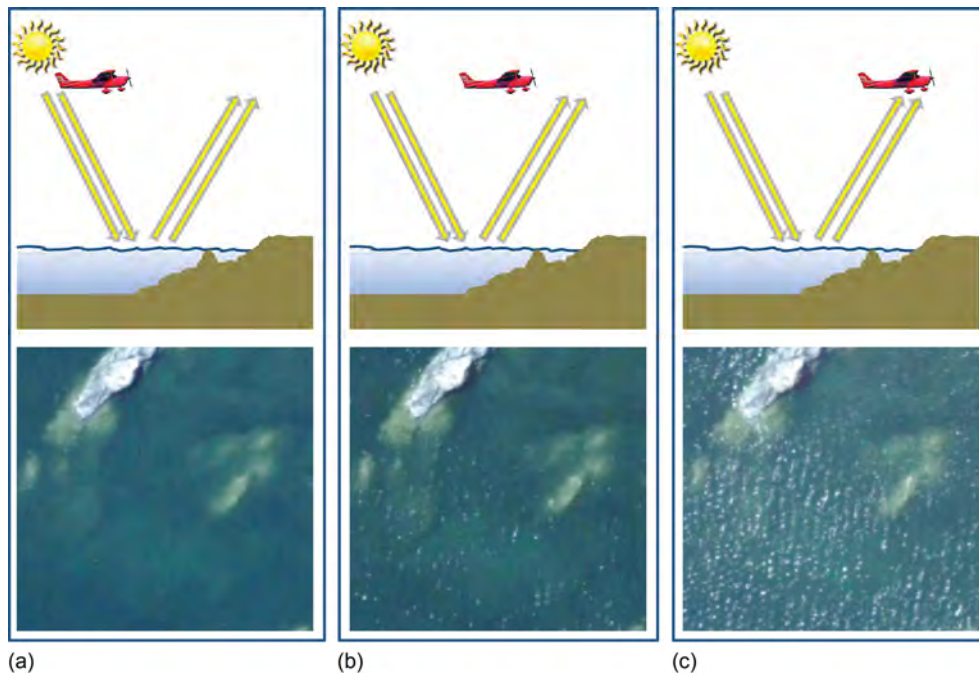
5.2. Data från flyg- och satellitbilder

Flygfoton eller satellitbilder kan användas för att kartera havsbotten ned till ett ungefärligt maximalt djup motsvarande siktdjupet. Exakt hur djupt karteringen kan nå beror på bottenens reflektivitet, vattnets egenskaper, känsligheten i kameran och hur stor dynamik (antalet bitar) som varje pixel i bilddatat lagrats med. Några fördelar med att använda bilddata jämfört med laserdata är att färginformation kan erhållas och att pixelupplösningen kan vara relativt hög. För att skapa goda förutsättningar för bottenkartering med bilddata bör ljusstillgången vara så bra som möjligt, vilket inträffar när solen står högt på himlen. Detta betyder att bilder tagna under dagtid, molnfria dagar under sommarhalvåret ger de bästa förutsättningarna. Kravet på god ljusstillgång medför också att förutsättningarna är bättre i södra Sverige än i norra delen av landet där solhöjden är lägre.

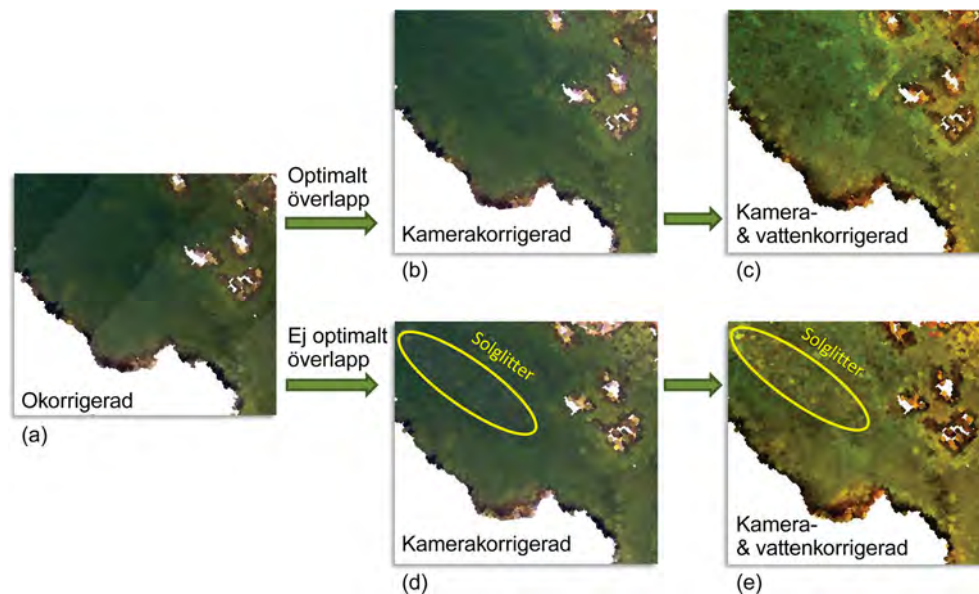
Skillnaden mellan att kartera landmiljöer och havsbottenmiljöer med bilddata är att intensiteten i pixlarna i det senare fallet består av signaler (ljus) från såväl havsbotten som från vattenytan och vattenvolymen. I vissa fall (t.ex. mörka bottenar) är andelen ljus från botten lägre än från vattenvolym och vattenyta. Ljusstyrkan i bilder över vatten är vanligen också betydligt svagare än över land. Det användbara våglängdsområdet är också smalare i vatten, eftersom enbart synligt ljus (ca 400–700 nm) transmitteras väl i vatten medan kortare (ultraviolett) och längre våglängder (infrarött) dämpas kraftigt i vatten. I många sjöar, kustvatten och innanhav som t.ex. Östersjön är våglängdsområdet som är användbart för bottenkartering ytterligare begränsat i huvudsak till det gröna och röda våglängdsområdet (ca 500–650 nm) på grund av lösta humusämnen i vattnet. Det ljus som registreras i bilderna är reflekterat (direkt) solljus och (sprint) himmelsljus. Reflexer i vattenytan från det direkta solljuset, vanligen kallat solglitter, kan ha mycket hög intensitet, vilket kan försvåra tolkningen av bilddata. Det finns flera sätt att reducera solglitter. Ett effektivt sätt är att utnyttja överlappen mellan flera näraliggande flygbilder. I Figur 5.2 illustreras denna metod med Lantmäteriets flygbilder över Askö (Z/I DMC-kameran). Genom att för varje område utnyttja den bild som har en optimal vinkel från solen kan solglitteret från vattenytan nästan helt elimineras jämfört med mindre lämpliga bilder. Produktion av ortofoton från flygbilder tar normalt inte hänsyn till dessa aspekter beroende på att bearbetningsprogrammen vanligen är anpassade för att ge bästa bildkvalitet över land. Kartering av grunda bottenar med flygbilder kan därför ge bättre resultat om man utgår från enskilda bilder istället för att använda ett ortofoto sammansatt av flera bilder. Ett ytterligare motiv till att utgå från separata bilder är att det på ett mer flexibelt sätt möjliggör radiometrisk korrektioner av bilderna.

Vi kommer här kortfattat redogöra för de radiometrisk korrektioner som är relevanta för flyg- och satellitbilder över vatten. Om dessa korrektioner görs noggrant så ökar det bildernas användbarhet för kartering av grunda bottenar. Den första korrektionen som genomförs är att kompensera för kamerans olika känslighet över bilden (kamerakorrektion). I en okorrigerad bild är t.ex. kanterna mörkare än mitten av bilden (så kallad vinjettering). Denna effekt är inte alltid urskiljbar över land men kan synas tydligt över vatten i gränserna mellan sammansatta bilder (se Figur

5.3 (a)). Genom kalibrering (mätning eller kännedom om kameran) kan kamera-korrigerade bilder skapas där övergången mellan bilderna är korrekt (Figur 5.3 (b) och (d)). Övriga radiometrisk korrektioner är relaterade till vad som händer med ljuset i vattenytan, vattenvolymen och på havsbotten. Vi benämner dessa korrektioner med samlingsbegreppet ”vattenkorrektioner”. I dessa korrektioner tas hänsyn till solvinklar, tittvinkel, grumlighet och färg i vattnet, bottendjup, och bottenlutning (Figur 5.3 (c) och (e)). I flera av dessa steg är samtidiga laserdata av stort värde vid korrigeringen av bilddata. Solvinklar kan tillsammans med bottenlutning användas för att korrigera bilddata som faller på skuggsidan respektive solsidan av en topografisk upphöjning. Korrektur för grumlighet och bottendjup görs med en modellbeskrivning av hur intensiteten avtar med ökande bottendjup. Denna korrektion är viktig för att kunna särskilja t.ex. grunda, mörka bottenpartier från djupare, ljusa bottnar. Dessa två botten typer kan vara svåra att särskilja i en okorrigerad bild. Tittvinkeln används för att korrigera för den vinkelberoende transmissionen både genom vattenytan och genom vattenvolymen. Om någon korrektion görs felaktigt eller om solglitter påverkat ursprungsbilden så kan kamera- och vattenkorrigerade bilden påverkas negativt. Ett sådant exempel visas i Figur 5.3 (d), där icke optimalt valda överlappsbilder valts med följd att kvarvarande solglitter påverkar delar av den vattenkorrigerade bilden (delfigur e), att jämföra med delfigur (b)–(c), där optimala bilder valts från överlapp vid sammansättningen av enskilda bilder.



Figur 5.2. Illustration av solreflexer från vattenytan i flygbilder. Genom att utnyttja den bild som har en optimal vinkel mot solen kan solglitteret från vattenytan nästan helt elimineras (a) jämfört med mindre lämpliga bilder (b) och (c). Exemplet illustreras med Lantmäteriets flygbilder över Askö tagna 2011-04-24 kl. 1407. Flygbilderna är tagna med ca 10 s intervall längs en och samma flyglinje. Flygbilder © Lantmäteriet.



Figur 5.3. Exempel på radiometriska korrekationer av flygbilder från HawkEye II-systemet. Bilderna är tagna över Bockholmsviken vid Askö 2010-05-21 kl. 16. Bottendjupet är 0–4 m. Panel (a) visar okorrigerade, sammansatta bilder över viken. I panelerna (b) och (d) har den sammansatta bilden korrigerats för kamerans känslighet. Genom vattenkorrektur (korrektur för solvinklar, tittvinkel, grumlighet i vattnet, bottendjup, och bottenlutning) framträder slutligen en tydligare bild av botten ((c) och (e)). I panelerna (d)–(e) visas skillnad mellan icke optimalt valda överlappsbilder (kvarvarande solglitter) och (b)–(c) där optimala bilder valts för reduktion av solglitter.

5.3. Insamling av referensdata

Både batymetrisk laser och flygbilder innehåller mycket information om bottenens utseende och de arter som finns där, men en förutsättning för att kunna använda denna information är att man har tillgång till fältobservationer som kan kopplas till laserdata och bilder. Resultat och erfarenheter från EMMA och andra forskningsprojekt visar på några viktiga egenskaper hos sådana referensdata.

Det krävs en relativt *stor mängd* referensdata för att man ska kunna göra en bra automatiserad klassning av botten typer. Av den anledningen är det vanligast att använda sig av undervattensvideo för att samla in referensdata för denna typ av studier. Inom EMMA har vi framförallt använt släpvideo, med efterföljande manuell tolkning av vegetation och botten substrat (för metodbeskrivning, se Naturvårdsverket 2006, Bäck m.fl. 2011). En fördel med släpvideo är att gränserna mellan olika bälten kan observeras, vilket underlättar vid visuell kontroll av den slutliga klassningen. Som alternativ till släpvideo kan även dropvideo och dykning användas för att samla in data, givet att det går att få in en tillräckligt stor datamängd. I ULTRA-projektet (www.ultra-superb.eu) användes förutom släpvideo även dykning för att samla in fältdata för botten typsklassning med laserskannerdata (Bäck m.fl. 2011).

Erfarenheterna från EMMA visar att 2–3 dagars filmande med släpvideo (6–10 km videotranssekt med ca 1 m bredd) ger ett bra dataunderlag för att klassificera ett område med 10–15 km² yta. Det är viktigt att få med alla botten typer som finns i ett område samt att täcka in hela deras djuputbredning eftersom lasersignalen från en viss botten typ kan variera med djupet. Detta kräver en viss grundläggande kun-

skap om undersökningsområdet, men en bra utgångspunkt är att filma både i våg-skyddade och exponerade områden och i hela det djupintervall som täcks av laserdata. Snorkling och vattenkikare kan vara möjliga komplement i mycket grunda eller svårnavigerade områden där framkomligheten med båt är begränsad. I grunda områden är det även möjligt att använda manuell flygbildstolkning av botten typer och arter som syns i flygbilden.

Det är också viktigt med en *noggrann skattning av botten typ och täckningsgrad av vegetation*, oavsett om dessa tolkas från videodata eller skattas av dykare i fält. Osäkerheter i fältdata leder till en ökad osäkerhet i klassificeringen av botten typer med laserdata. En ytterligare erfarenhet från EMMA är att det är värdefullt att man förutom täckningsgrad även noterar vegetationshöjd eftersom denna påverkar laser-signalen och därför behövs vid analysen av laserdata.

Det är även viktigt att ha en mycket *noggrann positionering* av referensdata. Eftersom upplösningen i batymetriska laserdata ligger kring meternivå bör positioneringsnoggrannheten för fältmätningen helst vara kring en meter. En sådan god precision är dock svår att uppnå med befintliga metoder. Dels finns en osäkerhet i GPS-positionen hos en vanlig GPS. Denna osäkerhet kan minskas genom att utnyttja mer noggrann GPS-teknik (DGPS eller RTK). Dessutom tillkommer att positionen måste mätas ovanför ytan, vilket gör att kamerans position i vattnet kan avvika från GPS-enheten. Ju djupare kameran befinner sig desto svårare är det att hålla dess position direkt under mottagaren, i synnerhet om det är strömt. Det är därför bra att uppskatta kamerans avstånd från GPS-enheten för att korrigera positionerna i efterhand. Det är även bra att utgå från kända, väl synliga objekt i naturen, som syns på ortokorrigerade flygfotografier eller som ger en tydlig avgränsning i laserdata (t.ex. större block, udde, etc.). En viktig aspekt vid GPS-positionering är också att ha en lämplig placering av GPS-antennen så att den har fri sikt över hela himlen, ända ned till horisonten. Om delar av himlen skymms, kan signalerna från de skymda satelliterna blockeras och/eller reflekteras mot delar på båten vilket medför att precisionen i positioneringen minskar.

Videodata är generellt känsliga för fel i positioneringen eftersom kameran ser en relativt liten yta av botten i en bild; en videotranssekt är typiskt inte mer än en meter bred. I svenska havsområden är det vanligt att olika botten typer förekommer omväxlande på små rumsliga skalor. Det räcker då med ett litet fel i positioneringen för att det som syns i ett videoavsnitt inte motsvarar vad som finns exakt på denna position. I arbetet inom EMMA har vi därför infört ett extra kvalitetsgranskningssteg av fältdata, där vi jämfört videodata med underlag från laser och/eller flygbilder och valt bort avsnitt eller delar av avsnitt som ligger på eller i närheten av gränser. Ett annat sätt att minska problemet med positioneringsfel är att fokusera på att hitta stora, sammanhängande områden med enhetlig botten och vegetation, som kan användas som referenspunkter. I ULTRA-projektet gjordes exempelvis en översiktlig inventering för att hitta sådana enhetliga ytor, som sedan inventerades noggrant av dykare.

Optimalt är om referensdata kan samlas in *samtidigt* med lasermätningen men det är ofta svårt att uppnå, inte minst eftersom det tar längre tid att samla in fältdata än att flyga över med laser. Hur nära i tiden fältdatainsamlingen bör göras beror på

hur snabbt bottenmiljön förändras. Vissa vegetationstyper, exempelvis tångvegetation, förändras relativt lite över ett år, medan vegetation på mjukbotten växer till mycket under en sommarsäsong. Rörliga, drivande alger kan förflytta sig mycket på bara några timmar eller dagar, speciellt vid kraftig blåst. Om stora, täta volymer av lösa alger förekommer i området, kan detta dels minska möjligheterna att få korrekt djupmätning och dels försvåra sammankoppling mellan lasermätta data och fältdata vilket försämrar noggrannheten i klassningen. Utbredningen av bottensubstrat (t.ex. hårbotten, sand och finsediment) ändrar sig mycket litet mellan år utom i dynamiska områden med hög vågexponering och/eller erosion och ackumulation. Hur lång tid som kan accepteras mellan fjärranalys- och fältdata beror alltså på vad man huvudsakligen är ute efter att kartlägga. En eller ett par veckors skillnad mellan fjärranalys- och fältmätning kan som tumregel vara helt acceptabelt medan en månad eller mer kan försvåra analysen.

5.4. Bottentypsklassning

Med hjälp av referensdata från fält skapas en klassningsmodell som gör det möjligt att automatiskt klassa bottentyp utifrån laserdata och/eller flyg- eller satellitbilder. I detta avsnitt beskriver vi några viktiga principer för bottentypsklassning med batymetrisk laser, som har gett robusta resultat i alla geografiska områden inom EMMA-programmet och i samverkansprojekten ULTRA och SUPERB.

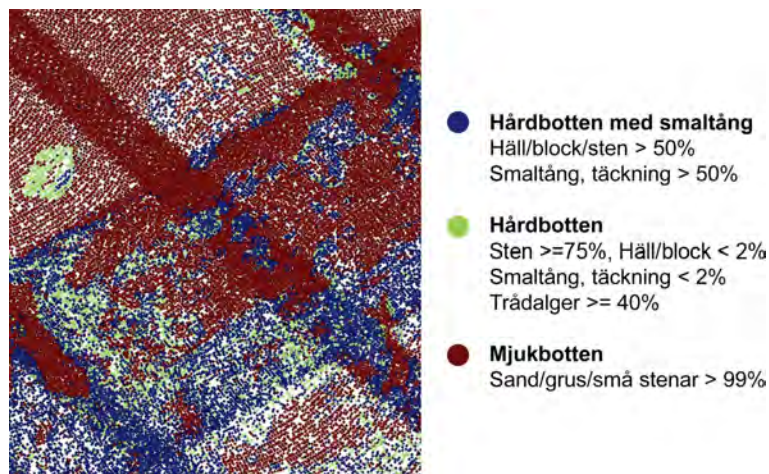
Ett viktigt första steg i klassificeringsarbetet är att *definiera bottentypsklasser* som (1) är intressanta att kartlägga och (2) är möjliga att skilja ut med laser och/eller flyg- eller satellitbilder. I detta steg analyseras fältdata för att hitta ”rena klasser” som kan vara möjliga att skilja åt med laserdata. Med ”rena klasser” avser vi fältdataavsnitt som har antingen hög eller låg täckning av ett visst substrat (t.ex. block) eller vegetation (t.ex. ålgräs). Fältdataavsnitt från blandmiljöer (t.ex. 5 × 5 m yta, med 50 % sand, 20 % block, 30 % sten) undviks så långt det är möjligt. Skälet att arbeta med ”rena klasser” är positionsosäkerheten mellan laserdata och fältdata, som gör att laserstrålen kan ha träffat antingen helt på ett block, till hälften på ett block och resten sand, eller annan godtycklig kombination utan att det finns detaljerad information om vilket. Om en klass definieras utifrån lasersignaler från en blandmiljö, kommer laservariablerna bestå av signaler från flera olika bottentyper. Detta strider mot syftet med klassningen: att så noggrant som möjligt separera olika botten- och vegetationstyper. Det bör finnas ett minsta antal fältdataavsnitt för varje klass för att möjliggöra träning av klassningsmodeller och för utvärdering av klassningsnoggrannheten. Som en tumregel bör det finnas minst 10–20 fältavsnitt för varje potentiell klass.

Ett annat viktigt steg är att *välja ut variabler* från laser- och/eller bilddata för klassningen. Vilka variabler som ger bäst klassningsnoggrannhet kan variera något från område till område och beror dels på systemspecifika parametrar som flyghöjd och sonderingstäthet och dels på miljöparametrar som grumlighet och botten/vegetationstyper. För laserdata har vi använt 3–4 variabler varav 1–2 från vågformen (t.ex. bottenekots korrigerade bredd och/eller höjd; Figur 5.1) och 1–2 variabler beräknade från punktdata (t.ex. bottenlutning och djupets standardavvikelse).

Med hjälp av de utvalda, förklarande variablerna från laser- och/eller bilddata och de definierade bottenypsklasserna tränas sedan en *klassningsmodell*. I detta steg utvärderas noggrannheten mot träningsdata och man kan behöva revidera valet av förklarande variabler.

I det fortsatta arbetet med klassningen görs en gruppering av de rena klasserna till *generaliserade klasser*. Generaliseringen görs både baserat på vilka rena klasser som sammanblandas i laser-/flygbilddata och baserat på vilka klasser som är viktiga att separera ur ett användarperspektiv. Syftet med generaliseringen är att uppnå en hög noggrannhet vid klassningen samtidigt som klasserna har meningsfull och användbar indelning. Ett typexempel på generalisering av klasser är att gruppera *häll*, *block* och *stor sten* till en generaliserad klass *Hårdbotten*.

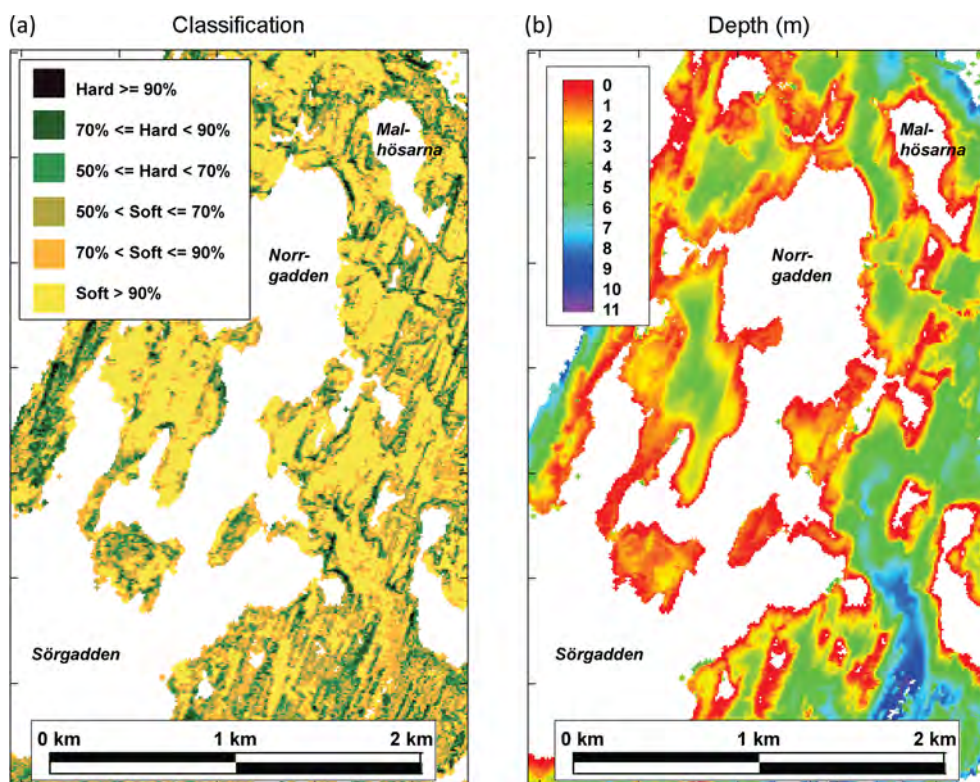
Som för all klassning är det viktigt att utvärdera klassningens noggrannhet med *oberoende valideringsdata*. Vid utvärderingen används valideringsdata som inte använts vid i de tidigare stegen i klassningsprocessen (urval av förklarande variabler, träning av klassningsmodellen och generalisering av klasserna). Som komplement till denna utvärdering är det nödvändigt att låta klassningskartan gå igenom en *visuell kvalitetskontroll* så att det inte finns artefakter som beror på felaktigheter i klassningsmodellerna eller på felaktiga korrektioner av de förklarande variablerna. Detta visar sig vanligen vid överlappande ytor mellan flyglinjer, där klassningen i så fall blir olika för olika flyglinjer. Det kan bero på att flyghöjden eller flygriktningen påverkat variablerna och att denna påverkan inte korrigerats på rätt sätt. Här kan även brister i kvaliteten hos laserdata upptäckas som kan bero på t.ex. felaktiga inställningar i lasersystemet. Även osäkerhet i klassningen, d.v.s. att bottenypsklasserna inte kan skiljas på ett bra sätt med laser-/bilddata, kan visa sig genom dålig överensstämmelse vid överlappande ytor mellan flyglinjer. Ett exempel på en väl fungerande klassificering visas i Figur 5.4, där överlappande ytor från längs- och tvärgående flyglinjer ger samma klassningsresultat.



Figur 5.4. Exempel på klassning på punktdatanivå baserad på laserskanning av Norrskär, Kvarken, 2011-10-16. Överlappande ytor har klassats likvärdigt oberoende av flyglinje och flygriktning, vilket indikerar att klassningen är robust. Notera att klassningen av punktdata inte är den slutliga kartan. Notera även att klassen "Hårdbotten" (gröna punkter) med låg täckning/frånvaro av smältång förekom i större omfattning endast för hårdsubstratet Sten, varför denna klass innefattar just Stensubstrat (inte häll/block).

5.5. Kartering av bottenvegetation och -habitat

Den finskaliga batymetriska informationen från en lasermätning, tillsammans med formen på den returnerade laserpulsens, säger mycket om bottenens struktur. Exempelvis är det möjligt att skilja ut jämna, släta bottenar från branta bottenar eller bottenar med block och sten som skapar en varierad yta. Detta innebär att det är möjligt att skilja ut hårt substrat (stor sten, block och hållar) från sand- och finsedimentbottenar med hjälp av lasersignalen och att det därför går att ta fram en karta över utbredningen av dessa substrattyper. I figur 5.5 (a) visas ett exempel med andelen (täckningen) laserpunkter för respektive substrattyp inom 10 m pixlar.

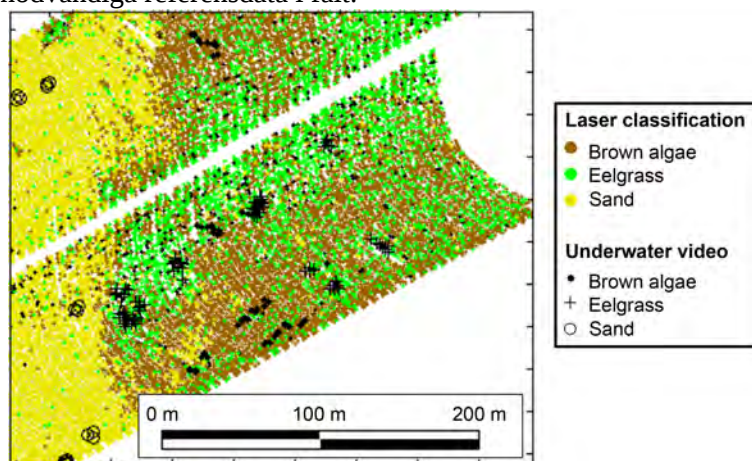


Figur 5.5. Exempel på heltäckande laserkartering av substrat (a) från Holmöarna i Västerbottens län. Djupet i området visas i figur (b). Utbredningen av hårt substrat (stor sten, block och hållar) urskiljs från sand- och finsedimentbottenar genom klassificering med hjälp av lasersignalen. I figur (a) visas andelen laserpunkter för respektive substrattyp inom 10 m rutor. Vita områden är antingen land eller djupare än maximala djupräckvidden för lasermätningen (drygt 10 m). Arbetet har genomförts i samverkan mellan EMMA och SUPERB-projektet.

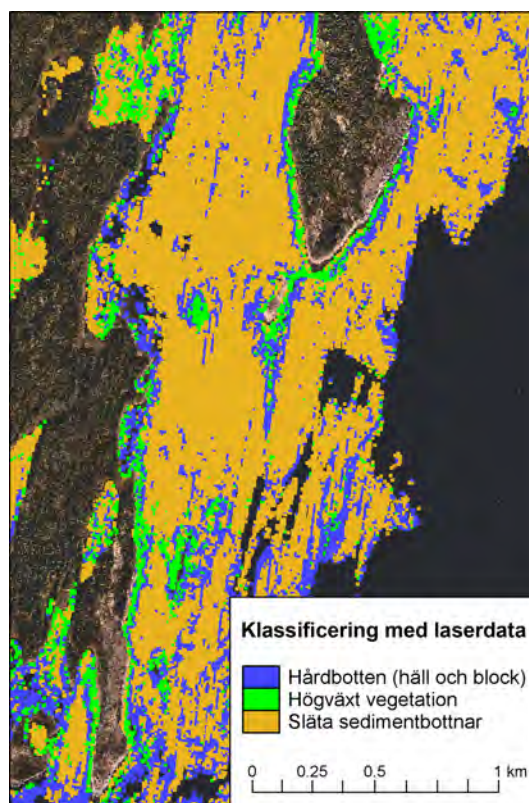
Vi har i flera studier visat att hårt substrat och sediment kan kartas med 80–90 % säkerhet med hjälp av en kombination av djupdata (batymetri) och vågformsdata från batymetrisk laser (t.ex. Tulldahl m.fl. 2007, Bäck m.fl. 2011, Tulldahl & Wikström 2012, Tulldahl m.fl. 2013, www.ultra-superb.eu).

Även viss typ av vegetation påverkar lasersignalen och kan därför kartas med batymetrisk laser. Den vegetation som kan urskiljas i laserdata är främst högväxt kärlväxtvegetation (exempelvis ålgräs, natearter och slingor) på sedimentbottenar (Tulldahl m.fl. 2007, Tulldahl & Wikström 2012). Två exempel visas i figurerna

5.6 och 5.7. För att vegetationen skall kunna utskiljas från övrig botten krävs att täckningsgraden och vegetationshöjden är relativt hög. Det underlättar också om vegetationen kontrasterar mot en slät sedimentbotten. Den högväxta vegetationen måste också förekomma i tillräcklig omfattning i området så att det är möjligt att samla in nödvändiga referensdata i fält.

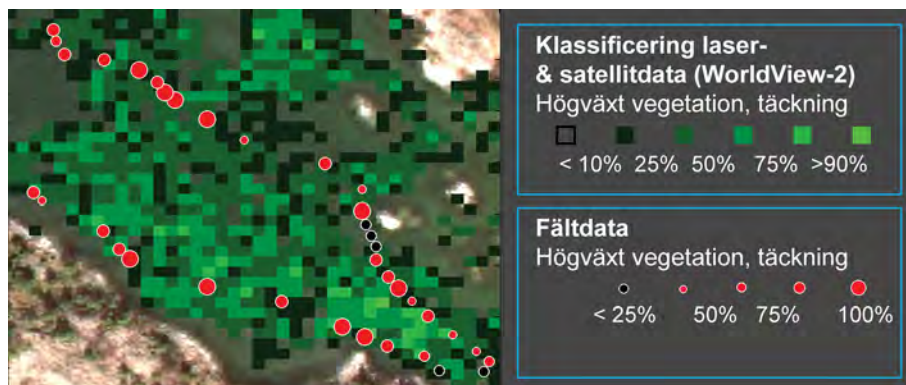


Figur 5.6. Exempel på laserkartering av högväxt vegetation (ålgräs/Eelgrass, *Zostera marina*) utanför Ystad i Skåne (Tulldahl m.fl. 2007). Varje liten färgad punkt i figuren representerar en laserpunkt. Klassningen är gjord med hjälp av vågformsdata från lasersignalen. I figuren visas även positioner för referensdata tagna med undervattensvideo.



Figur 5.7. Exempel på resultat som kan tas fram baserat på klassificeringen av varje enskild laserpunkt och/eller bildpixel. Bilden visar majoritetsklassning inom 10 × 10 m-rutor baserad på laserskanning av Sävarfjärden utanför Umeå 2009-09-07--08. Arbetet har genomförts i samverkan mellan EMMA och ULTRA-projektet.

Om laserdata kombineras med data från flygfoto eller satellit öppnar det större möjligheter att kartera utbredningen av vegetation. Med laser- och satellitdata var det möjligt att kartlägga tångvegetation på hårbotten med relativt hög säkerhet i Asköområdet i Södermanland, medan lösliggande tångbestånd var svårare att kartera (Tulldahl m.fl. 2013). Satellitbilden förbättrade även möjligheten att kartlägga kärleväxtvegetation på sand- och mjukbotten (se Figur 5.8), även om denna biotop till viss del blandades samman med lösliggande tång eller andra alger i analyserna. Kartläggning i tre generella klasser (hård-, mjukbotten och högväxt vegetation på mjukbotten) med användning av enbart satellitdata gav låg noggrannhet. En trolig förklaring var närvaron av lösliggande mörk vegetation på mjukbotten som vid klassningen sammanblandades med mörk fast vegetation på hårbotten. Det var alltså svårt att separera dessa botten typer enbart baserat på reflektansinformation från satellitbilden.



Figur 5.8. Exempel på resultat som kan tas fram genom klassificering baserad på laserdata (HawkEye II, 2010-05-21) kombinerat med satellitbild (WorldView-2, 2010-05-02 kl. 12:13). Bilden visar täckning av högväxt vegetation inom 5 × 5 m rutor baserat på laser- och satellitdata. I bilden visas även fältdatapositioner och täckning av högväxt vegetation från fältdata insamlade 2010-05-24--28. Arbetet har genomförts i samverkan mellan EMMA och HISPARES-projektet (Tulldahl m.fl. 2013).

I EMMA-projektet har vi bara arbetat på den svenska ostkusten, från Norra Kvarken till Skåne, men liknande resultat har även uppnåtts på den spanska Atlantkusten (Chust m.fl. 2010) och metoderna bör vara lika applicerbara på den svenska västkusten. Det bör noteras att laserdatas fulla potential inte utreddes i studien vid spanska Atlantkusten eftersom detaljerad bearbetning av vågformsdata inte ingick i den studien. Vi har generellt uppnått bra resultat i alla områden där vattnet inte varit för grumligt eller färgat. Dagens operativa lasersystem (t.ex. HawkEye II) kräver ett siktdjup på minst 3 m för att kunna ge bra djupdata. Det begränsar teknikens användbarhet i vissa kustnära områden av Bottniska viken, speciellt i områden med stort utflöde av humusrikt älvvatten, och i en del områden med dåligt siktdjup i andra havsområden.

Sammanfattningsvis är det tämligen grova botten typsklasser som går att urskilja med laserdata, med eller utan flygbilder eller satellitdata. Även denna grova information kan dock vara värdefull i flera sammanhang. Information om utbredningen av hård- och mjukbotten är ett grundläggande underlag för att beskriva utbredningen av biotoper enligt det europeiska habitatklassificeringssystemet

EUNIS och HELCOM:s vidareutveckling av detta system för Östersjön (HELCOM Underwater Biotopes/Habitats, HUB). Här har laserdata en viktig funktion att fylla, eftersom finskaliga kartor över ytsubstrat saknas i stort sett helt för grunda havsområden.

I EMMA har vi även studerat framtida möjligheter med nya kompletterande tekniker. En möjlig utveckling är att använda laserskanning med flera laservåglängder, som skulle kunna öka separerbarheten mellan vegetationstyper jämfört med dagens lasersystem som bara använder en våglängd. I en studie (Steinvall m.fl. 2012) jämfördes separerbarheten genom att först mäta nio arters reflektansspektra i laboratorium och sedan genomföra teoretiska klassningstester baserade på ett eller flera våglängdsband. En tvåbandslaser (laser och mottagare vid den vanliga laservåglängden 532 nm och en extra våglängd i intervallet 550–650 nm) medförde en starkt ökad klassificeringsnoggrannhet från ungefär 40 % till 85 % enbart baserat på reflektansinformationen. Resultaten var oberoende av området arten hade insamlats ifrån, i alla fall över ett begränsat geografiskt område. Med val av ett antal (två eller flera) våglängder skulle man därför i framtiden öka möjligheterna att även urskilja ett antal arter och detta skulle kunna göras över ett större djupområde än vad dagens satellitbilder, flygbilder och hyperspektrala kameror klarar av. Det bör noteras att detta resultat erhöles vid mätning direkt mot arterna på kort avstånd och att ett verkligt fall med en flygburen sensor kan ge annorlunda resultat. Här bör även nämnas svårigheterna att identifiera enskilda arter vid flerskiktade samhällen. I samma studie genomfördes även mätning och klassningstester baserade på arternas fluorescenssignaturer. Ett flygburet fluorescenssystem skulle till exempel, utöver den normala mottagarkanal vid 532 nm, kunna ha en extra mottagare (fluorescenskanal med hög känslighet) vid 575 nm. Ett sådant system skulle kunna uppnå en ökad teoretisk klassificeringsnoggrannhet på 65 % för de testade nio arterna. Med ett fluorescenssystem skulle även arter med specifika signaturer skiljas ut på ett effektivt sätt såsom rödalgen rödsleke (*Ceramium* sp.). I bilaga 1 redovisas en teknisk utblick med exempel på flera nya utvecklingsområden som kan förbättra möjligheterna till miljö- och vegetationskartering i framtiden.

5.6. Kartering och uppföljning av marina skyddade områden

Uppföljning av skyddade områden sker för att förbättra och effektivisera naturvårdsarbetet. Gällande lagstiftning ställer formella krav på uppföljningen bland annat inom Natura 2000-habitat. För att uppfylla de krav som ställs på uppföljningen har ett system med tre delar eller block utvecklats (Havs- och vattenmyndigheten 2012). Block A är obligatoriska parametrar, B områdesspecifika målindikatorer och C är förtätad nationell art- och habitatuppföljning. Block A är obligatoriskt i alla skyddade områden och det är där en användning av marin laserskanning är mest relevant. För marin miljö ska arealen samt fysiska ingrepp i botten av alla grunda habitat uppdateras vart 12:e år (Naturvårdsverket 2010).

Fokus i uppföljningen ligger till stor del på Natura-naturtyper som ingår i Bilaga 1 i Art- och Habitatdirektivet. Tabell 5.1 visar de marina naturtyper som före-

kommer i Sverige och indikerar vilka data från laserskanning som kan vara användbara för att kartera dessa, vilket också beskrivs närmare nedan.

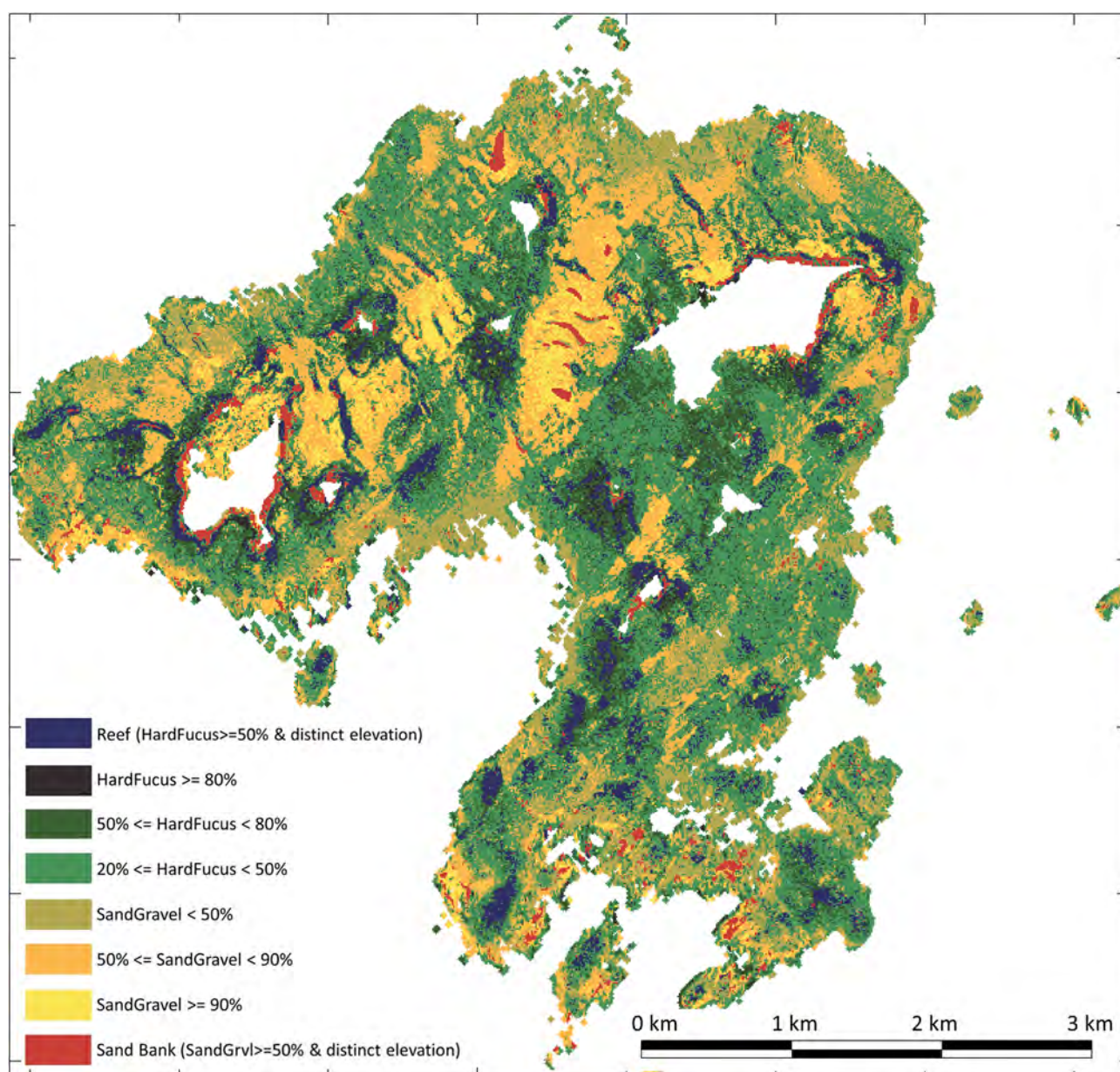
Tabell 5.1. Marina Natura-naturtyper som förekommer i Sverige och för vilka avgränsningskriterier för dessa som batymetriska laserdata kan bidra.

Natura-naturtyper		Avgränsningskriterier från laserbatymetri			
Nr.	Kortnamn	Djup	Botten-topografi	Substrat	Vegetation
1110	Sandbankar		x	x	x
1130	Estuarier	x	x		
1140	Blottade ler- och sandbottenar	x		x	
1150	Laguner	x	x		
1160	Vikar och sund				
1170	Rev		x	x	
1180	Bubbelstrukturer				
1610	Åsöar i Östersjön	x		x	x
1620	Skär i Östersjön	x		x	x
1650	Smala Östersjövikar	x			

Sandbankar (1110, Sublittorala sandbankar) är upphöjningar från botten (*skiljer sig topografiskt från omgivande bottenområden¹*) och består i huvudsak av sandiga sediment. Batymetriska data från laserskanning kan användas för att avgränsa områden som är topografiskt avgränsade om sandbankarna ligger inom laserns djuputbredning. I djupare miljöer är hydroakustiska metoder lämpligast. Information om bottensubstrat från laserdata kan användas för att skilja sandbankar från andra upphöjningar, exempelvis rev. Figur 5.9 visar ett exempel på kartläggning av sandbankar med batymetrisk laser. Möjligheten att kartera högväxt vegetation på mjukbotten är också intressant eftersom förekomsten av höga kärlväxter definierar undergrupper till sandbankar: "Utan vegetation" och "Med ålgräsängar och annan långskottsvegetation".

Estuarier (1130, Estuarier) avgränsas mot land av medelvattenståndet och mot havet vid ett djup på 6 meter och/eller där skyddande land upphör. De kan därför avgränsas utifrån djupdata från batymetrisk laser. Estuariernas karakteristiska vidsträckta sand- och gyttebankar kan även fångas in vid en laserskanning. Estuarier är dock ofta en problematisk miljö för laserskanning då stora sötvattenstillströmningar ofta ger sämre siktdjup.

¹ Kursiverad text i detta avsnitt är direkta citat från den svenska tolkningen av Natura 2000-naturtyper, beslutade 2011-06-13, som finns på Naturvårdsverkets hemsida (<http://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/natura-2000/naturtyper/kust-och-hav/>)



Figur 5.9. Exempel på substrat- och naturtypskarta över Norrskär i Kvarken baserad på laser- och fältdata. En förhöjning på > 0,5 m (av mediandjup inom 10 × 10 m) i förhållande till omgivande botten inom en referensyta på 200 × 200 m, tillsammans med substratklassificering från laserdata, har använts för att avgränsa naturtyperna "Rev" och "Sandbankar". Arbetet har genomförts i samverkan mellan EMMA och SUPERB-projektet.

För att avgränsa naturtypen **Blottade ler- och sandbottnar (1140, Ler och sandbottnar som blottas vid lågvatten)** behövs dels en karta över förekomsten av sand och lera, dels en heltäckande djup- och markmodell för att avgöra vilket område som ligger inom rätt djupzon (mellan medelvattenståndet och det lägsta lågvattenståndet). Genom att kombinera bottenkartan som tagits fram och vattenståndsdata skulle det således vara möjligt att exakt avgränsa utbredningen av denna naturtyp i undersökningsområdet.

Laguner (1150, Laguner) karakteriseras av en tröskel eller annat som begränsar vattenutbytet med omgivande hav. I de fall begränsningen utgörs av en uppgrundad botten kan denna ses i högupplösande djupdata. Detta har belagts i projektet ULTRA (Bäck m.fl. 2011), men generellt kan det vara så att laserskanning är mindre lämplig på grund av bristande siktdjup och riklig vegetation.

Precis som sandbankar definieras **Rev (1170, Rev)** av att de är *topografiskt avskilda genom att de höjer sig över havsbotten*. De består av hårt substrat och *avgränsas mot omkringliggande botten där revbildningen övergår med mer än 50 % i mjukbottenytan och/eller där biogena bildningar understiger 10 % av täckningsgraden*. De kan därmed avgränsas med djup- och substratdata från laser, inom laserskanningens djupräckvidd (se Figur 5.9).

Rullstensåsöar i Östersjön (1610, Rullstensåsöar i Östersjön med littoral och sublittoral vegetation) definieras av att de till minst 50 % består av väl sorterad sand, grus och sten. Habitatet sträcker sig ned till makrovegetationens nedersta djuputbredningsgräns. Genom att mäta upp djuputbredningsgränsen i ett område och sedan utnyttja djupdata från laserskanningen kan habitatets utbredning därför bestämmas. Habitatet bör även begränsas av där rullstensåsen täcks av omgivande mjukbotten, vilket också går att fånga i laserdata om det ligger inom laserns djupräckvidd.

Även naturtypen **Skär och små öar i Östersjön (1620, Skär och små öar i Östersjön)** avgränsas av makrovegetationens nedersta djuputbredningsgräns och kan karteras på samma sätt som rullstensåsöar. Habitatet bör även begränsas av där berg eller morän täcks av omgivande mjukbotten i de fall denna gräns ligger grundare än vegetationens djuputbredning. Även denna gräns går att fånga med laserdata.

Smala Östersjövikar (1650, Smala vikar i Östersjön) är en ovanlig naturtyp som liksom laguner ska vara avskilda från det öppna havet genom en tröskel. Ligger tröskeln grundare än lasermätningens djuputbredning kan förekomsten av tröskel registreras men då habitatet ska vara relativt djupt och tröskeln har begränsad utbredning är hydroakustiska metoder (ekolod, multibeam) troligen lämpligare metoder.

Sammanfattningsvis visar resultaten från EMMA att laserskanning kan ha en roll i den kommande uppföljningen av marina habitat i skyddade områden. Lasersystem har en roll i grundare miljöer och kan med fördel kombineras med hydroakustiska metoder i djupare habitat.

5.7. Miljöövervakning

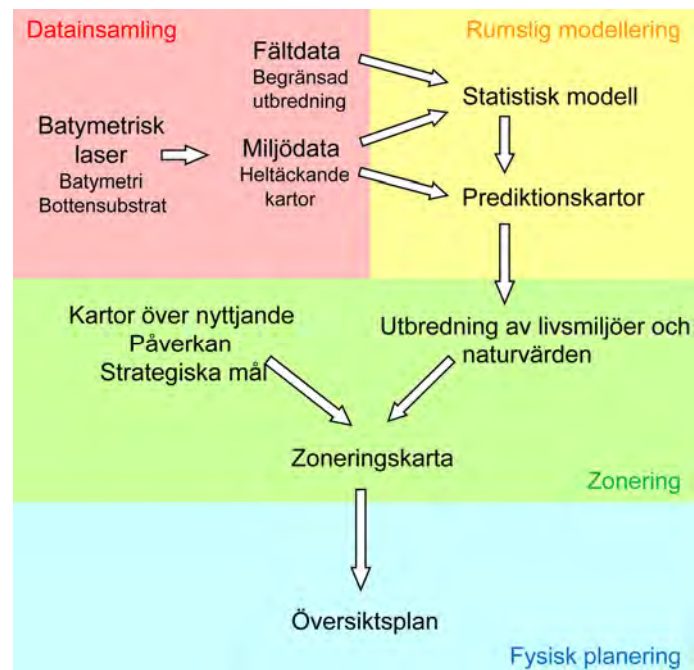
Dagens miljöövervakning av grunda bottenar, liksom uppföljning av skyddade grunda områden, syftar till att visa ekologisk status eller bevarandestatus av ett

definierat område och följa förändringar över tid. Fokus ligger ofta på ett antal arter som har en viktig habitatbildande funktion och svarar tydligt på förändringar i närsaltsbelastning och andra typer av störning, exempelvis tång och andra perenna algarter på hårbotten liksom ålgräs och andra rotade växter på mjukbotten. Traditionellt övervakas utbredningen av dessa arter genom upprepade studier av rutor (prover) eller kartering längs med transekter som genomförs med olika metoder, såsom snorkling-, dyk- och videotransekter. Snorkling och dykning ger mycket hög upplösning. Med videoteknik kan ett större område täckas än om bara dykare används, men med sämre upplösning i artsammansättningen. Fjärranalys har potential att ge mer eller mindre heltäckande övervakning av större områden, men används idag i mycket liten utsträckning för miljöövervakning av grunda bottenar.

Resultaten från EMMA visar att lasertekniken i förening med t.ex. släpvideo har potential att användas inom miljöövervakning och uppföljning av grunda havsbottenar. Med befintliga system är det möjligt att skatta botten typ och dessutom få en översiktlig bild av den areella utbredningen av vegetation och genom att kombinera laser med flyg- eller satellitbilder går det att få ut ännu mer information om vegetationens sammansättning. En möjlig kombination av dessa tekniker är att utnyttja laserbatymetri från ett mätillfälle för att djupkorrigera flyg- eller satellitbilder från upprepade tillfällen och använda de djupkorrigerade bilderna för förändringsanalys. Fortsatta studier av metodernas repeterbarhet och osäkerheten i ytskattningar krävs dock innan det är möjligt att bedöma om de kan användas för miljöövervakning. Det ska också påpekas att vegetationsbältenas nedre gräns, som är i fokus för dagens miljöövervakning, troligen är svår att övervaka med laserteknik och flygbilder; dels eftersom djupräckvidden är begränsad och dels eftersom metoderna inte är lämpade att hitta glesa och småväxta plantor vid den djupaste utbredningsgränsen.

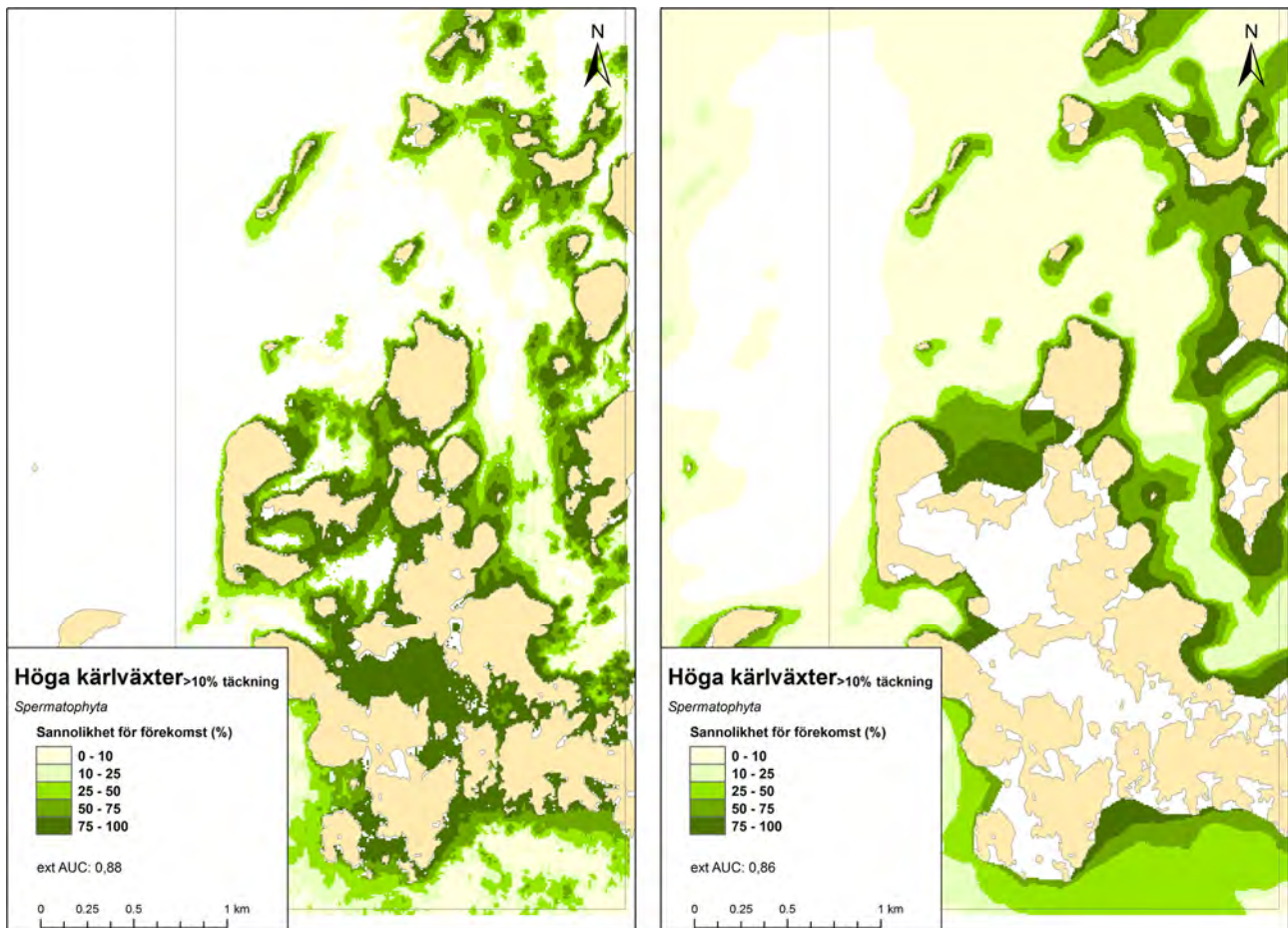
5.8. Underlag för fysisk planering

Havsmiljön och kustzonen utnyttjas i allt högre grad för bebyggelse, rörligt friluftsliv och turism och energiutvinning, samtidigt som klimatförändring sätter extra tryck på kustzonen och den verksamhet som finns där. Detta skapar ett ökande behov av rumslig översiktsplanering av havsmiljön, för att hantera kumulativa effekter av olika verksamheter och intressekonflikter mellan olika näringar och mellan bevarande- och exploateringsintressen. Flera kommuner har också ett aktivt marint planeringsarbete och i vissa områden sker det inom ramen för kommunförbund och likande organisationer. För att möjliggöra en effektiv översiktsplanering ställs stora krav på kartunderlag över den marina miljön. Ett viktigt krav är att kartorna måste vara heltäckande för det område som ska bedömas. Information i avgränsade områden är svår att hantera om man vill ha en heltäckande planering. Resultaten från EMMA-programmet visar att batymetrisk laser kan vara en bra metod för att samla in sammanhängande botteninformation som kan gå in som ett underlag i denna typ av översiktsplanering (Figur 5.10).



Figur 5.10. Den batymetriska laserskanningens roll som underlag för kustzonsplanering. Laserdata bidrar med viktiga heltäckande underlag till rumslig modellering av utbredningen av livsmiljöer (gul ruta), vilket i sin tur är ett viktigt underlag till zoneringsanalys (grön ruta). Resultatet av zoneringsanalys förbättrar möjligheten till effektiv fysisk planering (blå ruta).

Batymetri och bottenstruktorkartor från lasermätningar är viktiga underlag för att ta fram kartor över livsmiljöer på havsbotten med hjälp av rumslig modellering. Rumslig modellering bygger på idén att arter bara förekommer i specifika miljöer, definierade av olika miljögradienter. En art kan exempelvis vara begränsad till ett visst djupintervall, till en viss bottenart och bara förekomma vid hög eller låg salt-halt. Genom att ta fram det statistiska sambandet mellan utbredningen av biotopbildande arter och ett antal miljövariabler är det sedan möjligt att förutsäga utbredningen med hjälp av heltäckande kartor för dessa miljövariabler. Djup och bottenstruktursubstrat hör till de viktigaste faktorerna för att modellera utbredningen av biotopbildande arter (t.ex. Nyström Sandman m.fl. 2013, Snickars m.fl. 2014) och brist på bra djup- och substratkartor är ofta begränsande för hur bra prediktionskartor det är möjligt att ta fram (Naturvårdsverket 2009). I en delstudie i Norra Kvarken var djup och olika mått på bottenens topografi (t.ex. lutning och djupvariation) tillsammans de miljövariabler som uppvisade det starkaste sambandet med utbredningen av alg- och kärlväxtarter och underlag från batymetrisk laser förbättrade kraftigt möjligheten att modellera utbredningen av biotopbildande arter (Figur 5.11 Wikström m.fl. 2010, Wikström m.fl. in prep.).



Figur 5.11. Jämförelse mellan utbredningskarta baserad på laserskanning (vänster) och sjökort (höger). Kartorna visar sannolikheten för förekomst av höga kärlväxter (minst 10 % täckningsgrad) i en del av Norra Kvarnen och är framtagna med GAM (Generalised Additive Model), där utbredningen predikteras utifrån en statistisk modell baserad på fältinventeringar och ett antal miljövariabler. Ext AUC är ett mått på säkerheten i prediktionskartan och var något lägre för den sjökortskartan (0.86) än för laserkartan (0.88). De grå linjerna i kartan visar gränsen för området som karterats med laser. Vita områden saknar djupdata. En viktig skillnad är en större detaljrikedom i kartorna baserade på laserdjup, där sjökortskartorna ger en utslätad bild. Utbredningskartor baserade på sjökort tenderar också att överskatta utbredningen av grunt växande arter. Sjökortens syfte är huvudsakligen att underlätta navigation, d.v.s. förhindra båtar från att gå på grund, vilket gör att de tenderar att underdriva djupet i grundare områden. Även topografiska mått som lutning och djupvariation bidrog till att förbättra modelleringen genom att hjälpa till att skilja mellan hårt och mjukt substrat (se kapitel 5.5).

Heltäckande kartor över livsmiljöer är i sin tur ett viktigt underlag i zoneringsanalys med exempelvis Marxan, ett beslutstödswerktyg för bevarandeplanering (Ball m.fl. 2009). Zonering innebär att dela in ett område i planeringsenheter ("zoner") med olika syfte och där olika aktiviteter är tillåtna. Indelningen grundar sig på (i) utbredningen av livsmiljöer, (ii) nuvarande och planerat nyttjande av havsmiljön, (iii) hur detta nyttjande påverkar livsmiljöerna samt (iv) befintliga strategiska mål (exempelvis att en viss andel av ekosystem eller livsmiljöer ska skyddas; Figur 5.10). Från dessa underlag väljs systematiskt ut vilka områden som är lämpliga att skydda och vilka områden som är lämpliga för olika typer av mänskliga aktiviteter om konflikter med olika intressen ska minimeras. Den resulterande zoneringskartan kan fungera som ett viktigt underlag i det politiska arbetet som leder fram till en

färdig kustzonsplan eller kommunal översiktsplan. Flera exempel på hur laserdata och flygbilder kan användas för att ta fram planeringsunderlag för kustzonen beskrivs i kapitel 7, som fokuserar på integrerad kartering av land- och vattenmiljön.

5.9. Laserskanning och flygfotografering av grunda bottnar – möjligheter, kostnader och begränsningar

Kostnaden per kvadratkilometer för batymetrisk laserskanning beror mycket på hur stort område som ska karteras. Normalt tas en framkörningsavgift på omkring 20 000 euro. Som exempel genomfördes lasermätningarna i ULTRA-projektet till en kostnad av 1800 euro per km² (Bäck m.fl. 2011). Detta projekt bestod av två områden (Sävar och Rönnskären) på totalt knappt 70 km². Efterprocesseringen av laserdata tar normalt 2–3 månader från flygningen till leverans av djupdata inklusive rådata för vidareanalys. Därefter vidtar den vidareanalys och det klassificeringsarbete, som har beskrivits ovan i kapitel 5. Vidareanalys/klassificering har kostat (arbetstid) ca 20–25 % av kostnaden för själva lasermätningen. Därutöver tillkommer kostnad för insamling av fältdata. Själva analysen har tagit 2–3 månader att utföra för varje respektive område.

Här nedan sammanfattas resultat och erfarenheter från EMMA-programmets akvatiska del och de samverkansprojekt som vi arbetat med (ULTRA, SUPERB och HISPARES).

Tillämpningar som vi tydligt sett fungerar och som direkt kan omsättas till ett operativt sammanhang

- *Substrat och naturtypskartor:* Vi har visat att det med laserdata går att kartera ytsubstrat med hög noggrannhet (> 80 %), så att en heltäckande karta genereras med täckning (%) hårda respektive mjuka substrat ned till laserns djupräckvidd. Dessutom kan, som en följd av dessa data, ett antal Natura 2000-naturtyper kartas (bland annat *Rev*, *Bankar*, och sannolikt även *Ler- och sandbottnar som blottas vid lågvatten*).

- *Kartering av utbredning av högväxt vegetation:* Vi har visat att det med laserdata (utöver ytsubstrat och naturtyper) går att kartera högväxt vegetation.

Tillämpningar som vi är osäkra på eller som skulle kräva mer forskning eller utveckling

- *Övervakning av utbredning av högväxt vegetation:* Lasermätningar över något/några områden från flera år skulle göra det möjligt att kartera yttäckande förändringar av beståndet. Utvecklingen och utmaningen ligger här i dels att få hög noggrannhet och dels att kunna detektera långsiktiga trender där man tar hänsyn till säsongsvariationer. Tillämpningen borde vara intressant för att dokumentera status och följa upp förändringar i områden.

- *Övervakning, grunda vikar (< 3–5 m djup) med flygbilder:* En metod som skulle kunna ge yttäckande detektion av förändringar med vanliga flygbilder eller troligen ännu lämpligare med bilder från mini-UAV. Flera insamlingar på en säsong kan göras så att man kan hantera lösa alger och säsongsvariationers inverkan, vilka kan ge brus som kan missleda tolkningen av långsiktiga trender.

- *Övervakning, flygbilder (< 3–5 m djup) från nationell flygfotografering:* Det finns digitala flygbilder från Lantmäteriet som skulle kunna användas bakåt i tiden för att göra yttäckande förändringskartor. I EMMA har vi tagit fram metoder att använda flygbilderna för noggrann miljökartering, men vi har inte tillämpat detta för att detektera förändringar. Metoden har störst potential i områden där det finns högupplösta djupdata, så en utvärdering görs lämpligen i område där det finns t.ex. laserdata. Eftersom bilderna redan finns eller samlas in i nationellt program, så är kostnaden för dessa fjärranalysdata mycket låg.

- *Yttäckande kartering av blåstång:* Vi har vi sett att det finns potential att detektera närvaro eller frånvaro av blåstång och smaltång på hårda substrat. En metod som vi bedömer har stor potential, på kort sikt, är att kombinera både laser och bilddata (satellit, flyg, eller mini-UAV). En fokuserad studie skulle kunna arbeta med frågeställningen att specifikt detektera och kartera blåstång. Detta skulle kunna göras m.h.a. befintliga laser- och bilddata (t.ex. Askö). Tillämpningen borde vara intressant för att dokumentera status och följa upp förändringar i områden. Dock bedöms inte denna metod kunna nå tillräckligt djupt för att följa upp den maximala djuputbredningsgränsen.

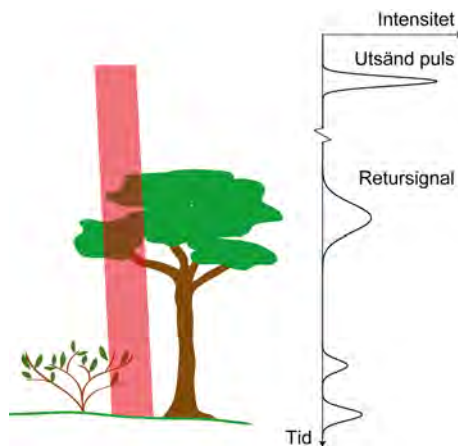
- *Nya möjligheter med ökad upplösning i laser- och bilddata:* I framtiden kommer det finnas nya möjligheter att göra högupplöst tredimensionell kartering dels tack vare ny teknik (kameror eller lasersystem med högre spatial och spektral upplösning, t.ex. laser med flera våglängder eller fluorescenskanaler) och dels p.g.a. nya algoritmer (bearbetning av laser- och bilddata).

6. Kartering och övervakning av terrester vegetation

I detta kapitel sammanfattas metoder och forskningsresultat från försök med kartering av den terrestra vegetationens utbredning, egenskaper och förändringar med stöd av tredimensionella data från flygburen laserskanning eller digital fotogrammetri. Flygburen laserskanning har fått en omfattande praktisk användning inom skogsbruket och det finns en mängd studier där metoder för skogliga skattningar med laserdata har dokumenterats (Holmgren 2003, Næsset m.fl. 2004, Hyyppä m.fl. 2008). Det finns emellertid väsentligt färre studier då det gäller kartering och övervakning av vegetation för andra ändamål än skogliga. I Sverige har dock ett antal sådana studier gjorts inom EMMA och näraliggande projekt och det är i första hand resultat från dessa studier som redovisas här. Den som vill lära sig att själv bearbeta laserdata kan ha nytta av ett kompendium av Nordkvist m.fl. (2013), där tekniker för detta beskrivs mer ingående än i denna rapport, som mer fokuserar på resultaten.

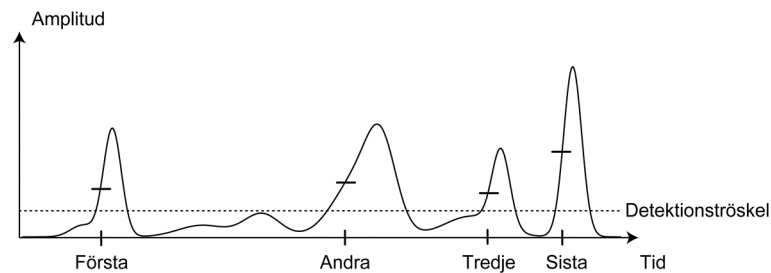
Generering av punktdata

De laserdata som använts är i regel tredimensionella (3D) punktmoln, där punkterna anger koordinaterna för var på marken, eller i vegetationen, en utsänd laserpuls reflekterats. Den returnerade laserpulsen utgörs egentligen av en mer eller mindre utsträckt våg av returnerat ljus (Figur 6.1).

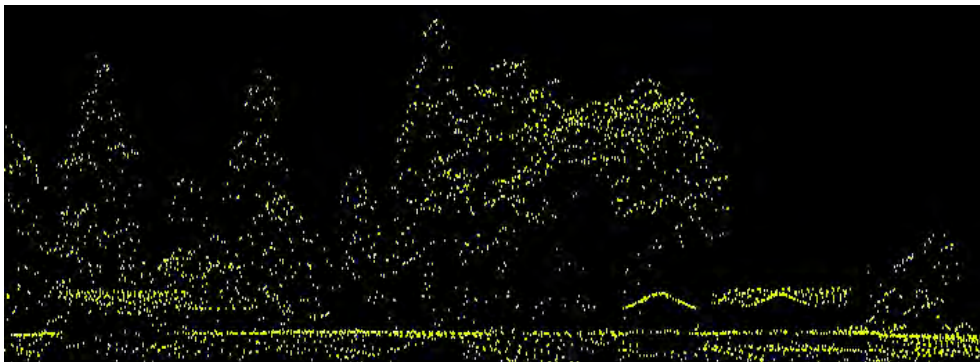


Figur 6.1. Illustration av hur en utsänd laserpuls reflekteras från olika nivåer i vegetationen, vilket leder till flera toppar i den returnerade signalen som kan detekteras som olika 3D-returpunkter. Från Nordkvist m.fl. 2013.

Från denna våg av ljus identifieras sedan toppar, från vilka returpulsens 3D-koordinater genereras. Metoden för att identifiera bestämda 3D-punkter från topparna kan dock skilja mellan olika laserskannersystem och är inte heller alltid väl dokumenterad. Ofta triggas en registrering av en retur då pulsen nått en viss andel av toppens maximala värde (Figur 6.2). Resultatet blir ett punktmoln med 3D-koordinater (Figur 6.3).



Figur 6.2. En vanlig metod för registrering av retursignal är att en topp i signalen triggar en registrering när den når en viss andel av sitt maximala värde, till exempel 50 % (vågräta streck). Endast toppar som når över detektionströskeln (prickad linje) registreras. Från Nordkvist m.fl. 2013.



Figur 6.3. Profil av 3D-punktmoln från flygburen laserskanning. Från Nordkvist m.fl. 2013. Laser-data, © Lantmäteriet i2014/764.

Man kan utgå från att skannersystemen är kalibrerade för att mäta läget för hårdgjorda ytor så bra som möjligt, men det finns ingen garanti för att olika lasersystem ger likadana returerna från trädvegetation, där ju delar av det utsända ljuset kan reflekteras från olika nivåer i krontaket. Vanligen kan också ett lasersystem detektera flera returerna när en utsänd laserpuls reflekteras från olika lager i vegetationen, samt från marken. Man talar då om första, andra, tredje returen, o.s.v. Ofta lagras också ett mått på vågformens amplitud i anslutning till den genererade pulsen, som brukar benämnas intensitet. Det hör nära samman med reflektansen för det objekt som laserstrålen träffar, men även intensitetsmättet är ofta odokumenterat och beroende av bland annat sensortyp. Det finns också system som kan spara data som beskriver hela den returnerade laserpulsens vågform. Man talar då om "fullvågformsdata" (eng. "full waveform data").

Begrepp

Flygburna laserskannersystem för terrestra tillämpningar utvecklades ursprungligen för att kunna mäta markens höjd, även under vegetation. När det finns behov att förtydliga skillnaden mot de batymetriska system som används för djupmätning i havet, så kan beteckningen *topografiska* laserskannrar, eller *topografiska lidar-system*, användas. Med *terrester laserskanning* avses däremot ett system som är fast uppställt på marken.

Lantmäteriet håller för närvarande på att avsluta en laserskanning som primärt gjorts för att framställa en ny nationell höjdmodell. Denna nya höjdmodell förkort-

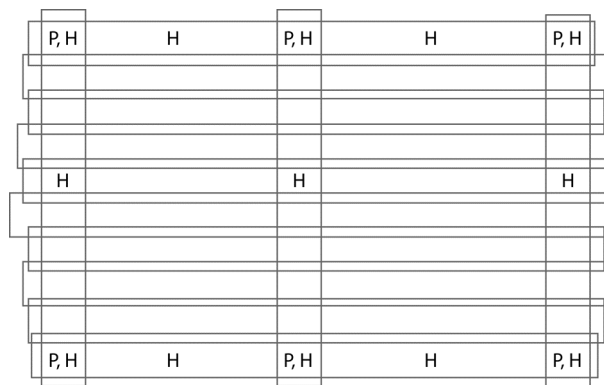
ades ursprungligen NNH, men har nu bytt namn till enbart NH för *Nationell Höjdmodell*. I denna text använd begreppet *markmodell* som synonymt med höjdmodell. En annan vanlig benämning för en datormodell som anger markens höjd är *Digital Terrängmodell*. På engelska användes begreppen *Digital Elevation Model* (DEM) och *Digital Terrain Model* (DTM). Ofta är alla dessa begrepp synonyma, men i en del sammanhang används de som beteckning för data med olika bearbetningsnivåer. För att beteckna vegetationens och bebyggelsens övre höjd används på svenska begreppet *ytmodell* och på engelska *Digital Surface Model* (DSM). Trädvegetationens höjd beräknad som skillnad mellan en ytmodell och en markmodell betecknas ofta *kronhöjdsmodell* (engelska *Canopy Height Model*, CHM).

Vid Lantmäteriets skanning för en Nationell Höjdmodell är målet att få data med en punkttäthet om ca 0,5–1,0 retur / m². Ibland benämns denna typ av laserdata som ”glesa” laserdata. Vid skanning av mindre områden förekommer ofta väsentligt högre punkttätheter; vid ca 10 retur / m² kan t.ex. kronformen för de flesta enskilda träden urskiljas. I vegetationskarteringssammanhang brukar sådana data betecknas som ”täta laserdata”.

6.1. Förbearbetning och markmodellering

Upphandling av laserflygningar kräver kompetens från ämnesområdet. Visst stöd beträffande utformning av en upphandling och vad köparen respektive leverantören av data behöver beakta på finns i Lantmäteriets skriftserie ”Handbok i Mät- och Kartfrågor” (HMK) där även en volym om rekommenderade standarder för laser-mätningar ingår; se <http://www.lantmateriet.se/HMK>.

När laserdata skannats och kontrollerats görs vanligen en stråkutjämning. Skanningen har oftast gjorts i block med parallella stråk och ofta även med tvärgående stråk som är avsedda att förbättra den geometriska kvaliteten i det slutliga blocket (Figur 6.4). Vid stråkutjämningen används datorprogram som anpassar de olika stråkens geometri till varandra, samt helst även till fältmätta referenspunkter. Detta steg görs vanligen av leverantören av laserdata.



Figur 6.4. Block med laserstråk, samt fältmätta höjdstöd (H) och planstöd (P). Från Nordkvist m.fl. 2013.

I nästa steg behöver data inspekteras och klart avvikande laserreturer tas bort. Det kan t.ex. vara returerna som ligger högt över trädkronorna och som orsakats av

dimma eller fåglar, eller returerna som kommer från studsar mellan trädstammarna och därför uppfattas som liggande långt under marken. Eftersom sensorn tittar snett ut mot stråkets kant så finns det en risk att den yttersta delen av stråket har returerna från marken och låg vegetation, men inte från topparna av de träd som står nära stråkets kant. Då data från trädvegetation ska analyseras bör därför den yttre delen (en remsa med minst bredden: maximal trädhöjd $\times$ tangens för skannervinkeln) av respektive stråk tas bort.

Därefter identifieras de returpunkter som sannolikt härrör från marken. Det finns många metoder för detta. En metod utvecklad vid tekniska universitet i Wien är bl.a. implementerad i gratisprogramvaran FUSION från US Forest Service. En annan, mycket vanlig metod som bland annat används vid konstruktion av Lantmäteriets markmodell är utvecklad vid KTH av Peter Axelsson och implementerad i den finska kommersiella programvaran Terra Solid. Metoden går ut på att de lägsta punkterna i ett rutnät identifieras och binds samman i en datastruktur, därefter förtätas datastrukturen med nya låga markpunkter, givet parametrar för vinklar och marklutning m.m. Den lämpliga inställningen av dessa parametrar kan variera beroende på terrängförhållandena och syftet med den slutliga markmodellen. Ska t.ex. större stenar ingå i den eller inte? Hur viktigt är det att branter blir riktigt representerade etc. Från de punkter som klassats som mark kan sedan en rastermodell som visar markens yta interpoleras fram. Markmodellen måste dock tas fram på ett sätt som stämmer med det slutliga syftet. Om markmodellen ska användas för hydrologisk modellering så är det t.ex. viktigt att broar och dikesstrummar identifierats i ett efterföljande steg. Kunskapen om vilka bearbetningar av laserdata som är optimala för att ta fram markmodeller för olika syften behöver öka. Eftersom olika varianter av markmodeller behövs för olika syften, så är det också viktigt att ursprungliga laserdata sparas och tillgängliggörs på ett sätt som medger enkel ombearbetning av dem. Det finns dock fall då markmodellen inte blir korrekt därför att inga laserpulser alls når marken på grund av tät och hög markvegetation, t.ex. högt gräs.

Lantmäteriets NH-markmodell som framställs från laserskanning har en gridstorlek om 2 m. Den ersätter en äldre markmodell med 50 m grid som var gjord med manuell fotogrammetri och som primärt togs fram för produktionen av ortofoton. NH-markmodellen genomgår nu en manuell efterredigering där uppenbara felaktigheter rättas och bl.a. broar läggs in som en egen klass i databasen. NH-modellen fungerar väl som markreferens vid t.ex. skattning av trädhöjd med olika typer av 3D-data. För speciella ändamål, som t.ex. att få fram så mycket detaljerad information som möjligt om detaljer i markens form, eller om objekt nära marken, kan det dock finnas anledning att utgå från Lantmäteriets laserdata och beräkna en ny markmodell med en metod som är anpassad för ändamålet. Om kraven på detaljrikedom är höga kan det också finnas skäl att beställa en ny laserflygning med tätare skanning.

6.2. Insamling av fältdata

Laserdata innehåller mycket information om vegetationens höjd och täthet men det exakta förhållandet mellan laserdata och vegetationsdata kan variera med sensor, flyghöjd, årstid, m.m. Det enklaste sättet att automatiskt omvandla laserdata till vegetationsdata är därför att använda empiriska samband mot vegetationsdata som mätts på provytor i fält eller, alternativt, insamlats via flygbildstolkning. När man med hjälp av t.ex. regressionsanalys omvandlar fjärranalysdata till kontinuerliga variabler som trädhöjd mätt i decimeter så brukar man tala om skattningar. Om man istället använder statistiska metoder för att dela in data i diskreta klasser, så brukar det kallas klassning.

I skogliga sammanhang samlas ofta fältdata in på cirkulära provytor med ca 10 m radie och detta kan vara en bra utgångspunkt även för vegetationskartering. När ytstorleken ökas så kan fältarbetet bli svårare och risken för att ytan omfattar flera vegetationstyper ökar. Om ytornas area minskas så ökar inflytandet av de positioneringsfel som provytan och laserdata har. Dessutom så blir sambanden mellan laserdata och fältdata osäkrare när ytan minskas eftersom färre laserträffar kan användas. Ett alternativ till stora ytor kan dock vara att i fält mäta ett kluster av flera mindre ytor, minst 3×3 st, och sedan använda laserdata för hela det område som klustret representerar. Det är viktigt att ytans koordinater bestäms med mycket hög noggrannhet och helst bör en GPS som ger mindre än 1 m fel, även under krontak, användas. Detta kan uppnås med en GPS-mottagare av god kvalitet med differentiell korrigering (DGPS) eller realtidskorrigering (RTK).

På provytan mäter eller uppskattar man de variabler som man vill kunna skatta eller klassa i sin slutliga karta eller databas och som är rimligt korrelerade med de fjärranalysdata man kommer att använda. Det kan t.ex. vara vegetationsklass, täckningsgrader för olika vegetationstyper, kronslutenhet, trädhöjd, eller trädskiktning. Om analysen av data ska ske för enskilda träd istället för hela rasterceller, så bör trädens position relativt ytcentrum också mätas in.

Det är viktigt att provytorna representerar hela det spektrum av vegetationsdata som man vill kunna skatta, samt att varje vegetationsklass etc. representeras av flera olika provytor. Det snabbaste sättet att få tillräckligt antal provytor av varje vegetationstyp är i regel att subjektivt välja typiska ytor, eller alternativt att använda någon typ av stratifiering vid utläggningen. Om ytorna väljs helt systematiskt eller slumpmässigt, så riskerar man att datainsamlingen behöver bli mycket omfattande för att även de ovanliga klasserna ska få tillräckligt antal ytor. Ett systematiskt, eller slumpmässigt, urval av referensytor är dock att föredra om man ska använda ytorna för en objektiv utvärdering av skattningsresultatet.

Vid insamling av fältdata för validering av visuell tolkning kan det vara lämpligt att totalkartera begränsade områden. Detta ger möjligheter att utvärdera hur mycket man både överskattar och underskattar de tolkade objekten. Man bör därför fältkartera inte bara ytor där objekt har hittats, men också sådana där inga objekt har hittats vid tolkningen.

6.3. Vegetationskartering med laserdata

Trädhöjdsraster

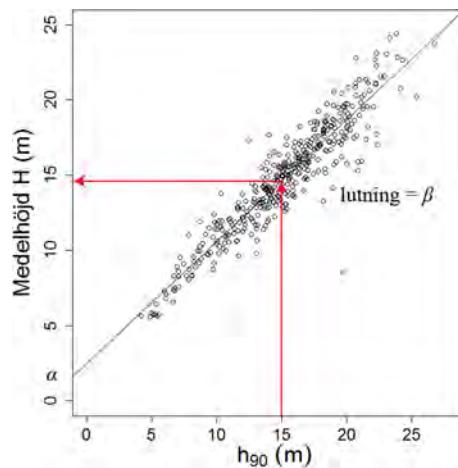
Ett bra underlag för fortsatt visuell tolkning av laserdata kan fås genom att i små gridceller (t.ex. 1×1 eller 2×2 m) beräkna höjden för den högsta laserträffen över marken och färgkoda detta data. Om denna produkt bara ska användas för tolkning behövs ingen kalibrering mot fältdata. *Trädhöjdsraster* av detta slag säljs av flera företag som levererar laserdatabearbetningar.

Beräkning av metriker för vegetationen

För att få mått från laserdata som kan användas vid statistisk skattning av vegetationsdata så beräknar man först höjden över markmodellen för alla laserreturer; detta kallas ibland att data har *normaliserats*. Därefter kan olika mått som karakteriserar vegetationen beräknas på punktmolnet av normaliserade data. Dessa beräkningar görs vanligen för gridceller i rasterade data, men kan också göras för segment som representerar trädkronor eller för hela bestånd. Exempel på vanliga mått som används är höjdpercentiler (h) och vegetationskvot (V). Med vegetationskvoten avses den andel av laserreturerna från rasterrutan som härrör från vegetationen dividerat med det totala antalet laserreturer från rasterrutan. Med t.ex. höjdpercentil 90 (h_{90}) för en rasterruta avses den höjd i meter för vilken 90 % av laserreturerna från vegetationen finns under höjden och 10 % finns ovanför. Statistiska mått som beräknas för laserpunktmolnet för att sedan användas i skattningar av vegetationsparametrar brukar kallas *metriker*. När man använder denna typ av mått för att karakterisera trädvegetationen, så väljer man ofta att inte ta med laserreturer från området närmast marken, t.ex. upp till 2 m höjd, eftersom detta kan påverkas mycket av buskvegetation.

Rasterskattningar med stöd av metriker från laserdata och fältmätta referensytor

När man använder statistiska mått enligt ovan för hela rasterrutor så brukar det kallas areabaserade metoder. Om man t.ex. vill skatta trädvegetationens höjd över ett större område med hjälp av laserdata så beräknar man först ett samband där höjden enligt fältmätningarna på provytor skattas som en funktion av relevanta lasermetriker för samma provytor, t.ex. h_{90} (Figur 6.5). Därefter kan trädens medelhöjd skattas för alla rasterrutor där det finns laserdata som är registrerade under samma förhållanden. En enkel funktion för att skatta trädhöjden H från lasermåttet h_{90} skulle om sambandet är linjärt kunna se ut så här: $H = a_0 + a_1 * h_{90}$, där a_0 och a_1 är parametrar som skattas med ett program för regressionsanalys. Den beskrivna metoden är grunden för de laserskattningar som idag sker operationellt inom skogsbruket. Utöver att flera större skogsföretag gör denna typ av skattningar så sker för närvarande också en rikstäckande skoglig skattning av detta slag i Skogsstyrelsens och SLU:s regi. De data som används är Lantmäteriets laserskanning samt riksskogstaxeringens fältytor.



Figur 6.5. Illustration av ett funktionssamband mellan lasermetriken h_{90} och trädmedelhöjd mätt på fälttytor (från Nordkvist m.fl. 2013).

Dagens lasersystem för terrestra tillämpningar använder bara en våglängd, oftast nära infrarött ljus (1064 nm). Intensitetsinformationen som registreras är inte heller alltid tillförlitlig. Det är därför främst vegetationens tredimensionella struktur som kan mätas då enbart laserdata används. Exempel är vegetationens höjd och slutenhet, samt i viss utsträckning även andra mått som förekomst av buskar under kron-tak, eller bladyteindex (Sohlberg 2006). I en studie i Halland skattade Holmgren m.fl. (2008) trädens och buskskiktets kronslutenhet ned till 3 dm ovan mark med ett medelfel om 6 %.

För att erhålla mer information om artgrupper behövs vanligen också multispektral information (se nedan). Ett undantag från detta är dock när laserdata skannats så tätt att olika trädskronor kan särskiljas. I detta fall finns det förutsättningar att i viss utsträckning skilja olika trädslag baserat på kronform (Holmgren 2004).

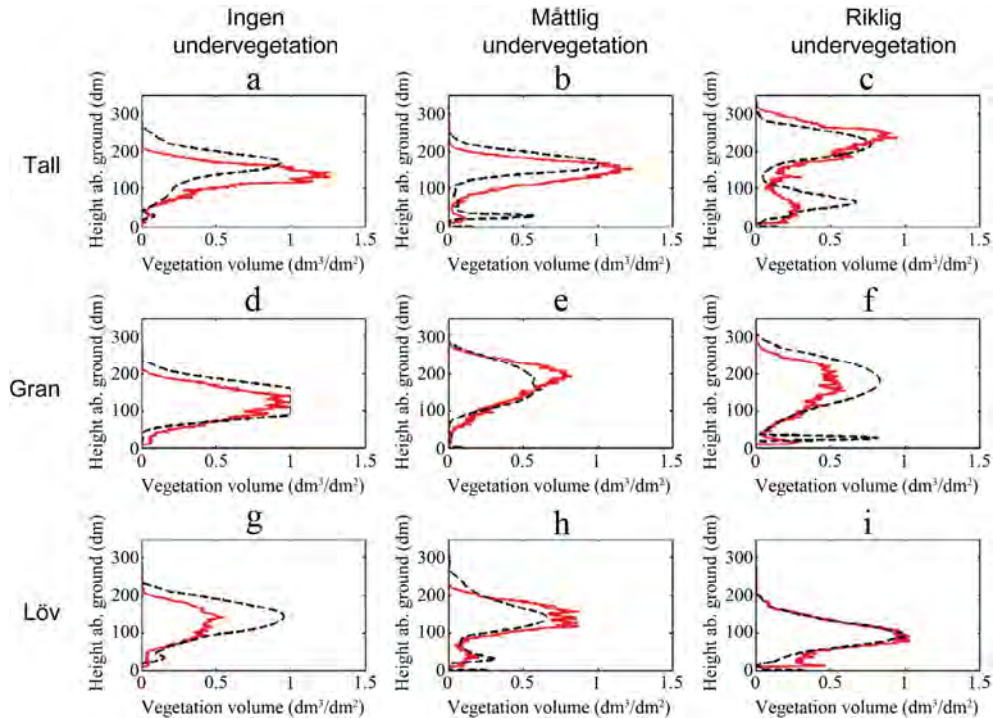
Kartering av enskilda träd

Då laserdata skannats tillräckligt tätt kan de flesta enskilda träden karteras automatiskt. I en studie (Persson m.fl. 2002) hittades ca 70 % av alla träd i laserdata med en täthet om ca 5 punkter / m²; resultat av detta slag är dock beroende på typen av skog. Företrädesvis så är det små träd under större trädskronor som missas. Med mer avancerade analysmetoder som letar efter träd även under krontaket kan fler av dessa undertryckta träd karteras automatiskt (Reitberger 2009, Lindberg m.fl. 2014). Ytterligare förbättringar när det gäller att hitta undertryckta träd och buskar under ett krontak kan fås om man använder vågformslaserdata. Det är dock svårt att hitta alla träd med bildanalysmetoder och för att kompensera för de träd som inte upptäcks måste statistiska metoder användas (Holmgren m.fl. 2010, Breidenbach m.fl. 2010).

Skattning av vertikal vegetationsstruktur

I en studie gjord inom EMMA-programmet visar Lindberg m.fl. (2012) att skogsvegetationens vertikala struktur kan skattas med laserdata (Figur 6.6). Studien är gjord på 68 provtytor med 12 m radie som är stratifierade så att tytor med olika

mycket buskar och småträd under de uppvuxna träden, liksom olika typer av skog, ingår i materialet.



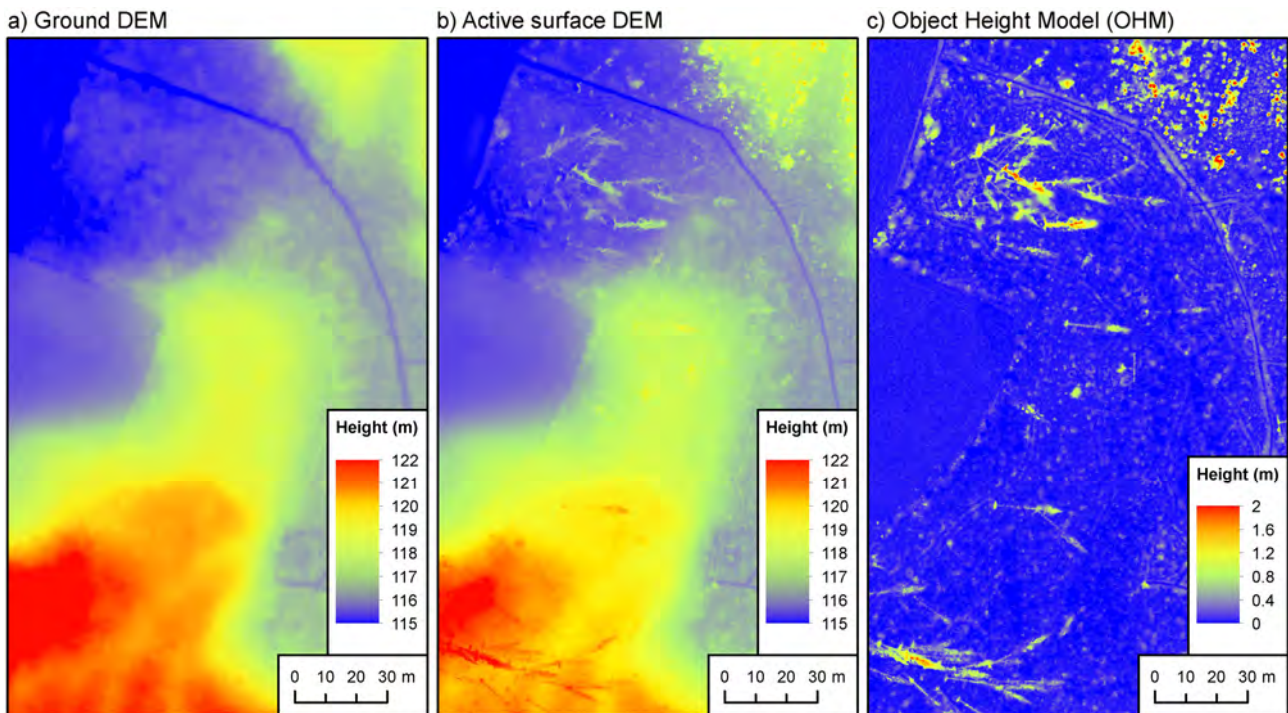
Figur 6.6. Vegetationens vertikala struktur modellerad från fältdata (svarta streckade linjer) samt laserdata (röd heldragen linje). Exempel för provtyr med 12 m radie med olika dominerande trädslag och olika mängd undervegetation. Från Lindberg m.fl. (2012).

I denna studie jämfördes även vilken bearbetningsnivå för laserdata som bäst skattade vegetationens vertikala struktur. Bäst resultat erhöles när hela den returnerade vågformen användes och data dessutom kompenserades för det faktum att vegetationen i de övre skikten skymmer vegetationen i de undre vid laserskanning från ovan. De punktdata som lasersystemet genererade gav sämst resultat, men var ändå användbara för ändamålet.

Upptäckt av objekt under krontak – exemplet vindfällda träd

Flygburna laserskannerdata kan även ge viss information om objekt på marken. Olika försök har t.ex. gjorts för att kartera vindfällda träd. Nyström (2014) identifierade objekt nära marken genom att först ta fram två markmodeller med olika egenskaper: en ”styv” markmodell som främst visar de större variationerna i terrängen och en mer ”elastisk” markmodell som även innefattar objekt nära marken. När den styva markmodellen sedan subtraheras från den elastiska, så framträder många av de vindfällda träden tydligt, Figur 6.7. I ett andra steg kunde också 38 % av de vindfällda träden identifieras automatiskt genom att jämföra en digital mall som liknar en liggande trädstam med varje tänkbart läge i skillnadsbilden och identifiera de lägen där mallen hade högst korrelation med data i skillnadsbilden. Lindberg m.fl. (2013) utvecklade en liknande metod för att automatiskt hitta liggande träd direkt i det digitala punktnolnet istället för via rasterade data och

kunde med samma material som Nyström använde identifiera 41 % av alla lig-gande träd, men hittade även fler falska träd. Vid aggregering till 40 × 40 m rutor, hittades minst ett vindfällt träd i 77 % av de rutor som enligt fältdata innehöll vindfällda träd. Av de 40 × 40 m rutor som enligt fältdata inte innehöll vindfällda träd, markerades 34 % felaktigt att innehålla vindfällda träd. De flesta av dessa felaktigt markerade rutor omfattade dock vägar och diken som felaktigt markerats som vindfällda träd i mallanpassningen. Motsvarande visuella studier beskrivs i kapitel 6.8 i denna rapport.



Figur 6.7. Bearbetningar för att hitta vindfällda träd till vänster: vanlig markmodell; mitten: en elastisk markmodell som även innefattar objekt nära marken; till höger: i en skillnadsbild mellan de två markmodellerna framträder vindfällda träd och andra objekt nära marken. Laserdata är från år 2007 efter stormen Per. Från Nyström 2014.

Kartering av vegetationsförändringar med laserskannerdata

Ofta finns det ett behov att följa vegetationens utveckling över tiden. Ett sätt är att göra karteringar vid två tidpunkter och sedan jämföra dessa. Om man subtraherar två digitala kartprodukter med varandra så får man dock en skillnadsprodukt som visar såväl alla förändringar som summan av felen i respektive kartprodukt. Om man främst är intresserad av att veta var i landskapet som vegetationen förändrats mest så kan det istället vara enklare att subtrahera laserdata i form av vegetationsmetriker vid respektive tidpunkt från varandra. Relationen mellan vegetationens egenskaper och lasermetriker, t.ex. mellan en viss percentil i laserdata och vegetationens medelhöjd, varierar dock med flera faktorer som t.ex. årstid, flyghöjd och sensortyp. I synnerhet är utvecklingen då det gäller lasersensorer så snabb att man inte kan förutsätta att det är samma instrument som kommer att användas vid en framtida upprepade mätning. Inom EMMA-programmet har vi därför visat hur la-

sermått från två olika tillfällen kan normaliseras till varandra med hjälp av så kallad histogrammatchning (Nyström m.fl. 2013). När lasermått anpassats till varandra på detta sätt så kan en skillnadsbild som visar områden med förändringar (exempelvis hyggen, röjningar) framställas. Eftersom histogrammatchningen bygger på att fördelningen för alla gridceller för ett lasermått vid den ena tidpunkten anpassas till fördelningen för motsvarande område vid den andra tidpunkten, så kommer dock inte den genomsnittliga förändringen i landskapet mellan två tidpunkter att framträda i skillnadsbilden.

I samma studie (Nyström m.fl. 2014) undersöktes även hur väl ny trädvegetation vid trädgränsen kan skattas med laserdata från två tidpunkter. 29 provytor om 113 m² glest bevuxna (5–100 stammar / yta) med fjällbjörkar som var 1,5–2,5 m höga behandlades så att antingen alla träd eller hälften av träden togs bort mellan två laserskanningar. Av de förändrade ytorna klassades alla ytor där alla stammar tagits bort som förändrade. Av de ytor där hälften av stammarna tagits bort klassades 77 % som förändrade. Dessa resultat visar att laserdata från två tidpunkter kan användas för att övervaka utglesningsprocesser i trädskiktet, exempelvis vid röjning eller fjällbjörkmätarangrepp, men också den omvända processen med igenväxning med träd p.g.a. upphörd hävd eller varmare klimat.

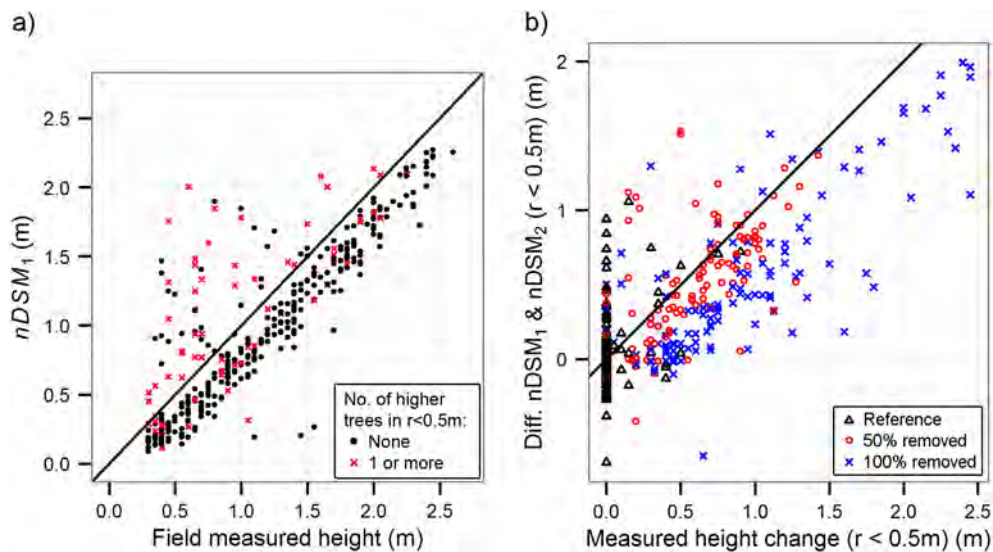
I ett annat experiment (Nyström m.fl. 2013) undersöktes i vilken utsträckning igenväxning av albuskar på övergiven betesmark (Figur 6.8) kunde upptäckas med flygburen laserskanning.



Figur 6.8. Albuskar på igenväxande betesmark använda vid kontrollerat försök med att mäta förändring med flygburen laserskanning från två tidpunkter. Från Nyström (2014).

Gräset i betesmarken var ca 1 m högt. Trots det kunde höjden för träd som t.o.m. var lägre än gräset mätas, dock så blev höjdmätningen enligt laserskanningen några dm för låg, vilket sannolikt beror på att markmodellen hamnade ett par decimeter över den verkliga marken på grund av det höga gräset (Figur 6.9a). För nästa skanning togs sedan en tredjedel av träden bort och ytterligare en tredjedel kapades till hälften. Skillnaden för träd som är mer än ca en halv meter höga kan då mätas. (Fig. 6.9b). Om analysen begränsas till träd som är mer än 1 m höga och där 1/3 tas bort helt och 1/3 tas ned till hälften, och 1/3 är oförändrade referensträd, så kunde 88 % av träden automatiskt klassas rätt mellan klasserna förändrade / inte förändrade när

laserdata från två tidpunkter jämfördes. Vid försöket användes mycket täta laserdata (ca 50 retur / m²), vilket dock inte är realistiskt tätt givet den snabba utvecklingen på laserskannerområdet. I detta fall så lyckades det således att med tät laserskanning från två tidpunkter att automatisk upptäcka ny trädvegetation på ett tidigt stadium, vilket är svårt med andra fjärranalystekniker. Sannolikt så skulle full vågformsdata vara ännu bättre för detta ändamål. Det ska dock observeras att det ofta varit svårt att kartera buskmarker i den nationella laserskanning som Lantmäteriet gjort. Under vilka förutsättningar som laserskanning kan användas för detta behöver därför studeras vidare.



Figur 6.9. Höjddata för små alträd på en igenväxande betesmark i högt gräs. X-axlarna visar fältmätningar och Y-axlarna visar laserdata. a) Mätning av trädhöjd vid en tidpunkt; b) skillnader mellan två laserskanningar då även 1/3 av träden tagits bort (blå symboler) och 1/3 av träden klippts ned till hälften (röda symboler). Från Nyström (2014).

6.4. Vegetationskartering med kombination av laserdata och satellitbilder

För rikstäckande vegetationskarteringar har främst satellitbilder med 10–30 m pixlar från jordresurssatelliter som SPOT och Landsat använts. Satelliternas sensorer registrerar reflekterat solljus i flera våglängdsband. Ett antal studier har gjorts för att undersöka i vilken utsträckning kombinationen av spektrala data från satellitsensorer och 3D-data från laserskanning kan förbättra automatiserade vegetationsklassningar.

I en studie i Remningstorp i Västergötland (Nordkvist m.fl. 2010) användes 519 fototolkade provytor för klassning av sex skogsklasser enligt indelningen i Lantmäteriets databas Svenska Marktäckedata. Resultaten i Tabell 6.1 visade att klassningsresultatet var 10 % bättre när laserdata och multispektrala satellitdata från SPOT 5 kombinerades jämfört med när enbart satellitdata användes. Resultaten visar också att enbart laserdata inte är bättre än enbart satellitdata om uppgiften är att skilja ut vissa typer av skog som t.ex. lövskog. I en uppföljande studie över ett större område i Gävleborgs län (Nordkvist m.fl. 2012) användes 490 flygbildstolk-

ade referensytor, samt 260 flygbildstolkade oberoende valideringsytor. I denna studie förbättrades den totala klassningsnoggrannheten med 14 procentenheter när spektrala data från SPOT 5 kombinerades med data från den nationella laserskanningen (Tabell 6.2). Dessa resultat visar således på en väsentligt förbättrad vegetationsklassning när laserdata kombineras med satellitdata, särskilt för klasser som definieras av skogens höjd. Att enbart använda laserdata kan dock inte rekommenderas om även klassning av vegetationstyp, t.ex. områden med lövskog, ska göras.

Tabell 6.1. Klassningsnoggrannhet (% rätt klassade referensytor vid korsvalidering) för klassning av GSD Marktäckes skogsklasser med enbart SPOT-multispektrala satellitdata, enbart laserdata, samt kombinationen av dessa, för flygbildstolkade referensytor i Remningstorp, Västergötland (från Nordkvist m.fl. 2010).

Data	Hygge 0–2 m	Ungskog 2–5 m	Barr- skog 5–15 m	Barr- skog > 15 m	Bland- skog > 5 m	Lövskog > 5 m	Total klassnings- noggrannhet (%)
SPOT	84,2	50,0	51,4	83,8	27,1	53,6	67,1
Laser	61,4	69,2	58,1	75,2	27,1	26,1	59,0
SPOT+	89,5	61,5	74,3	89,3	37,3	72,5	77,6
Laser							

Tabell 6.2. Klassningsnoggrannhet (% rätt klassade valideringsytor) för GSD Marktäckes skogsklasser med enbart SPOT 5 multispektrala satellitdata, enbart laserdata från Lantmäteriets skanning, samt kombinationen av dessa, för flygbildstolkade ytor i Gävleborgs län (från Nordkvist m.fl. 2012).

Data	Hygge 0–2 m	Ungskog 2–5 m	Barr- skog 5–15 m	Barr- skog > 15 m	Bland- skog > 5 m	Lövskog > 5 m	Myr	Total klassnings- noggrannhet (%)
SPOT	55,8	66,7	29,8	57,0	63,6	70,7	76,9	55,8
Laser	41,9	83,3	63,8	77,4	36,4	17,1	84,6	58,5
SPOT +	76,7	100	66,0	72,0	27,3	65,9	69,2	70,0
Laser								

Vegetationskartering med kombinationen laserdata och satellitdata, för tillämpning inom NILS

De ovan redovisade resultaten som uppnåtts vid automatiserad vegetationskartering med kombinationen av laserdata och satellitdata har motiverat ett metodutvecklingsprojekt, där möjligheterna att kartera 5 × 5 km-rutorna i inventeringen Nationell Inventering av Landskapet i Sverige (NILS) undersöks. NILS-inventeringen bygger på ett stickprov om 631 st 1 × 1 km stora rutor över hela landet som flygbildstolkas manuellt (<http://www.slu.se/nils>). Runt om 1 × 1 km-rutan har man lagt en 5 × 5 km-ruta i syfte att fånga information om landskapets sammansättning. Eftersom 5 × 5 km-rutan täcker en 25 gånger större areal än 1 × 1 km-rutan är det nödvändigt med en mindre arbetskrävande metodik. Följande dataskikt tagits fram inom projektet:

- Förhandtolkning av markslag, t.ex. semiakvatisk mark och betesmark, via tolkning i fotogrammetrisk arbetsstation, med fastighetskartans indelning som grund.

- Rasterskikt med trädhöjd, skattat med regressionsanalys från NH-laserdata med Riksskogstaxeringens provytor som referens.
- Rasterskikt med kronslutenhet, skattat med regressionsanalys från NH-laserdata och satellitbilder för att kompensera för avvikande samband i lövrika områden som skannats vintertid, alternativt kan kronslutenheten skattas med flygbildstolkning,
- Rasterskikt som visar öppen mark respektive skogsmark, baserat på skattningarna av höjd och slutenhet
- Vegetationsklassning av den skogsklädda marken baserat på satellitdata med riksskogstaxeringens provytor eller flygbildstolkning som referens.
- Vegetationsklassning av den öppna marken baserat på satellitdata med provytor som valts subjektivt med flygbildstolkning i fotogrammetrisk arbetsstation som referens.
- Kartering av nya hyggen med satellitbilder från flera tidpunkter.

Tabell 6.3 visar ett exempel på resultat från en klassning med ovanstående metodik. I detta fall har rikstaxytor endast använts för trädhöjdsfattningen, men de kan användas även för skattning av trädslag och kronslutenhet.

Tabell 6.3. Resultat för klassning av NILS 5 × 5 km-ruta i Halland med laserdata, satellitdata och flygbildstolkade referensytor. Tabellen baseras på en separat utvärderingstolkning med klasserna enligt tolkningen som kolumner och enligt den automatiska klassningen som rader.

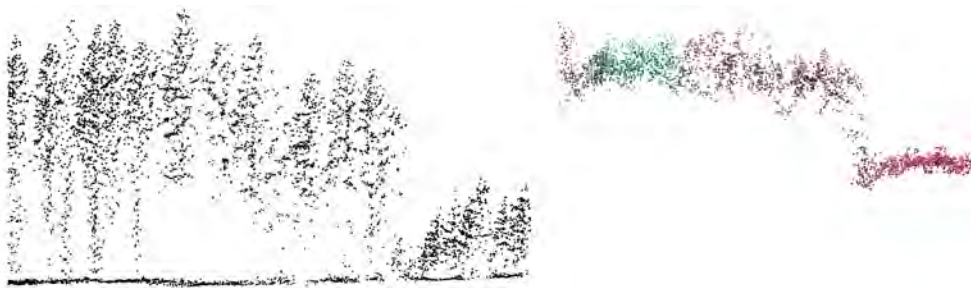
	Löv	Barr	Buskar	Avverkat	Gräs/ örter	Ris	Vatten	% rätt
Löv	20	5				1		76
Barr	5	43						89
Buskar	2		7			1		70
Avverkat				4	1			80
Gräs/örter			3		9			75
Ris		1				9		90
Vatten							5	100
% rätt	74	87	70	100	90	81	100	83

Höjdsfattning av grundtyevägd medelhöjd med lasermått och med riksskogstaxeringens provytor hade i försöken ett medelfel på 1,4 m utvärderat mot flygbildstolkade höjder, vilket måste anses mycket bra eftersom det finns fel både vid mätningen i flygbilder och beräkning av höjder i rikstaxytorna. Skattning med stöd av flygbildsmätta tolkade data utvärderat mot samma ytor visade sig ge ett medelfel på 1,1 m.

6.5. 3D-punktmoln från digital fotogrammetri

Den nationella laserskanningen är än så länge att betrakta som en engångsföreelse. Däremot har Lantmäteriet ett omfattande program för regelbunden flygfotografering av hela Sverige, där stora delar av landet fotograferas så ofta som vartannat år. Vanliga tvådimensionella flygbilder, t.ex. ortofoton, är dock svåra att tolka automatiskt, eftersom betraktningens vinkel, liksom därmed även effekten av trädens skuggor, varierar med läget i bilden. Numera sker dock flygfotografering med digital kamera, vilket har gett förbättrade möjligheter att automatiskt framställa

3D-ytmodeller som visar höjden för mark, byggnader eller krontak. Figur 6.10 visar profiler av 3D-matchpunkter från dels digitala flygburna laserdata, dels digital fotogrammetri. Som framgår av figuren beskriver 3D-matchningspunkter från digital fotogrammetri främst krontakets övre delar och avspeglar inte vegetationens vertikala struktur lika bra som laserskannerdata. Det är därför även svårt att automatiskt ta fram en markmodell i skogsterräng med digital fotogrammetri, utan istället används lämpligen den markmodell som Lantmäteriet tagit fram från laserskanning. Inom EMMA har 3D-ytmodeller framställts från flygbilder med programvaran MATCH-T från företaget INPHO. I nästa steg kan en kronhöjdsmodell tas fram genom att markhöjden för respektive rasterruta subtraheras från ytmodellen (Figur 6.11). Bland fördelarna med att använda 3D-data från digital fotogrammetri märks datats tillgänglighet och aktualitet och att även färg från flygbilderna finns tillgängligt.



Figur 6.10. Profil för samma skogsparti med flygburna laserdata (vänstra bilden) och punktmoln från 3D-matchning av digitala flygbilder från Lantmäteriet (högra bilden). Bilderna är framtagna av Jonas Bohlin, SLU.



Figur 6.11. Principen för framställande av krontaksmodellen (CHM). Modellen utgör en subtraktion av markmodellen (DEM) från ytmodellen (DSM) och anger vegetationens normaliserade höjd över markytan (Bild från Ann-Helen Granholm, SLU).

Med 3D-data från digitala flygbilder kalibrerade med fältmätta referenssytor kan trädens höjd skattas med mindre än 10 % medelfel (Bohlin m.fl. 2012). Eftersom en kronhöjdsmodell framställd med digital fotogrammetri har samma egenskaper oavsett läge i bilden så kan höjdinformationen i den användas för automatisk segmentering av vegetation med olika höjd (Granholm m.fl. 2014).

6.6. Kartering och skattning av fjällvegetation

Det finns ett stort intresse att följa vegetationsförändringar i fjällvärden främst på grund av klimatförändringarna, men fjällvegetationen påverkas också av bl.a. turism, bete av älg och ren, samt insektsangrepp från främst fjällbjörkmätare. Dessutom gör de långa avstånden till vägar att det är extra viktigt att utveckla fjärranalysmetoder för övervakning av fjällen. Vegetationen i fjällen är också starkt mosaikartad vilket gör det extra svårt att använda visuell flygbildstolkning för objektiv övervakning av vegetationen (Heiskanen m.fl. 2008). Ett flertal studier där användning av satellitbilder, flygburna laserdata, samt digital fotogrammetri utvärderats för kartering av fjällvegetation har därför gjorts i Abiskofjällen under senare år och redovisas här samlat.

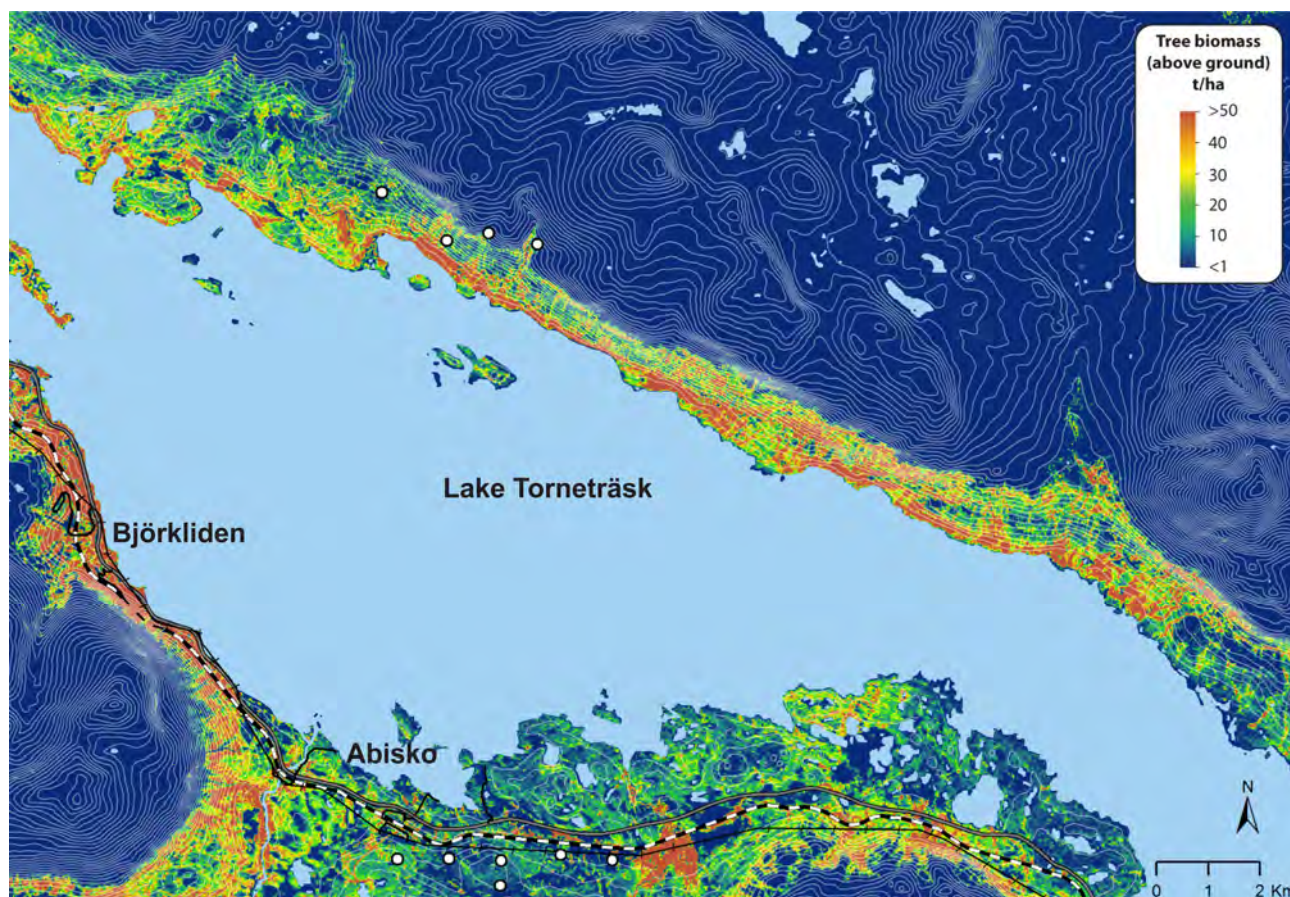
Skattning av fjällbjörkskogens höjd, slutenhet och biomassa med laserskanning respektive digital fotogrammetri

I ett testområde vid trädgränsen ovanför Stordalen, 6 km öster om Abisko, utvärderades hur väl fjällbjörkskogens höjd, slutenhet och biomassa kan skattas med två typer av laserdata: dels täta laserdata med 6,1 retur / m², registrerade med en helikopterburen laserskanner från 500 m höjd; dels en testflygning för lantmäteriets nationella skanning från 1740 m höjd som hade 1,4 retur / m². Skattning och utvärdering gjordes med 73 systematiskt utlagda provytor med 10 m radie (Nyström m.fl. 2012). I en senare studie utvärderades även användningen av punktmoln från digital fotogrammetri (Nordkvist m.fl. 2014) med samma fältmaterial. Bilderna var tagna med Lantmäteriets första digitalkamera Z/I DMC från 4800 m höjd. Som markreferens användes Lantmäteriets nya höjdmodell. Som framgår av resultaten i tabell 6.4 skattas fjällbjörkskogens höjd nästan lika bra med digital fotogrammetri som med laserskanning.

Tabell 6.4. Skattningsnoggrannhet för regressionsskattning av fjällbjörkskogens trädhöjd, kronslutenhet och biomassa inom provytor om 314 m² för tre olika datatyper, tät och gles laserskanning, samt 3D-punktmoln från matchning med digital fotogrammetri.

Skattad variabel	Medelfel (RMSE %)		
	Tät laserskanning 6,1 punkter / m ²	Gles laserskanning 1,4 punkter / m ²	Fotogrammetri Z/I DMC 4800 m
Trädhöjd	8,8 %	9,5 %	11,0 %
Kronslutenhet	16,8 %	18,7 %	26,1 %
Biomassa	18,7 %	21,2 %	29,0 %

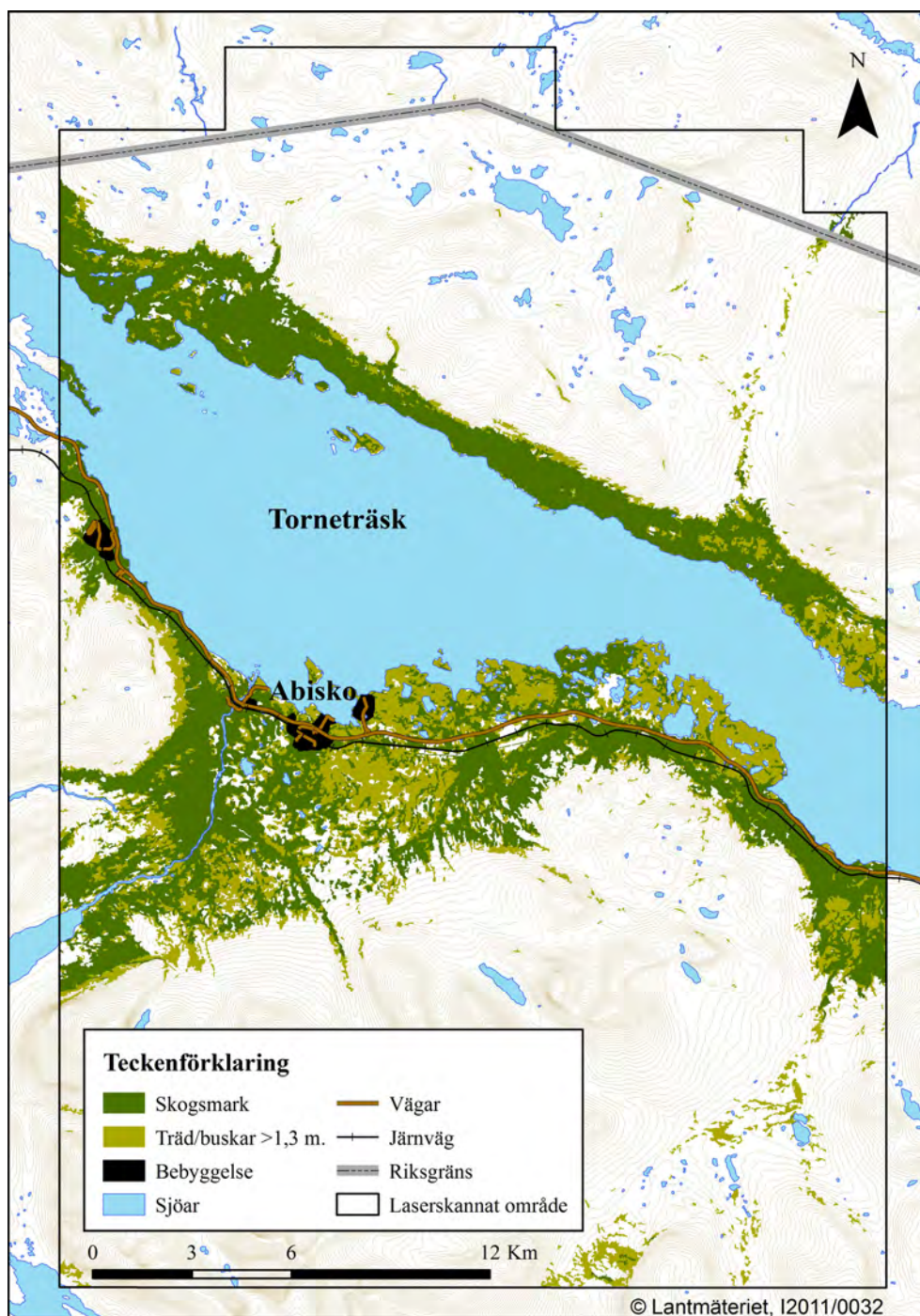
Skattningarna av fjällbjörkskogens kronslutenhet och biomassa blir dock klart sämre med digital fotogrammetri. Skillnaderna i skattningsresultat mellan de två olika täta laserskanningarna är dock marginell för samtliga tre variabler. När väl ett funktionssamband mellan provytedata och sensordata är etablerat kan en yt-täckande kartering göras för de områden där likadana samband mellan fältdata och sensordata finns. Figur 6.12 visar en skattning av trädbiomassa över ett större område kring centrala delar av Torneträsk.



Figur 6.12. Skattning av biomassa fjällbjörk kring Torneträsk vid Abisko, baserad på laserskannerdata från Lantmäteriet och regressionssamband med fältmätta provtytor. Bild från Karin Nordkvist, SLU.

Kartering av skogsmarksareal enligt FAO

Den internationella skogsmarksdefinitionen som används av FN-organet FAO innebär att skog definieras som trädbevuxna områden som potentiellt kan ha träd som är minst 5 m höga och en kronslutenhet om minst 10 %. Skogsområdet skall täcka minst 0,5 ha och inte vara smalare än 20 meter. Mindre trädlösa områden som till exempel skogsbilvägar inkluderas dock i skogsmarksarealen. För Sveriges del innebär detta att mycket, men inte all, fjällbjörkskog räknas som skogsmark i den internationella statistiken. Eftersom Riksskogstaxeringen inte taxerar fjällbjörkskog i fält så är dock skattningarna av hur stora områden som berörs osäkra. För närvarande laserskannar Lantmäteriet hela fjällkedjan och möjligheten att skatta fjällbjörkskogens höjd och slutenhet (Tabell 6.4) erbjuder därför ett sätt att få mer exakta uppgifter om skogsmarksarealen. Detta har även visats i ett examensarbete vid SLU där Lindgren (2012), använde Lantmäteriets laserskanning i Abisko-området och klassade 172 ytor med fjällbjörkskog med avseende på om de uppfyllde FAO:s krav på skogsmark eller inte. Klassningsnoggrannheten blev 92 %. För hela det laserskannade området gjordes en karta, där kraven för minsta areal införts (Figur 6.13).



Figur 6.13. Kartering av områden med fjällbjörkskog som uppfyller (mörkgrönt), eller inte uppfyller (ljusgrönt) FAO-kriteriet för skogsmark, baserat på laserskannerdata från Lantmäteriet och 172 fältmätta referensytor med skog över 1,3 m. Från Lindgren 2012. Laserdata från Lantmäteriet i2014/764.

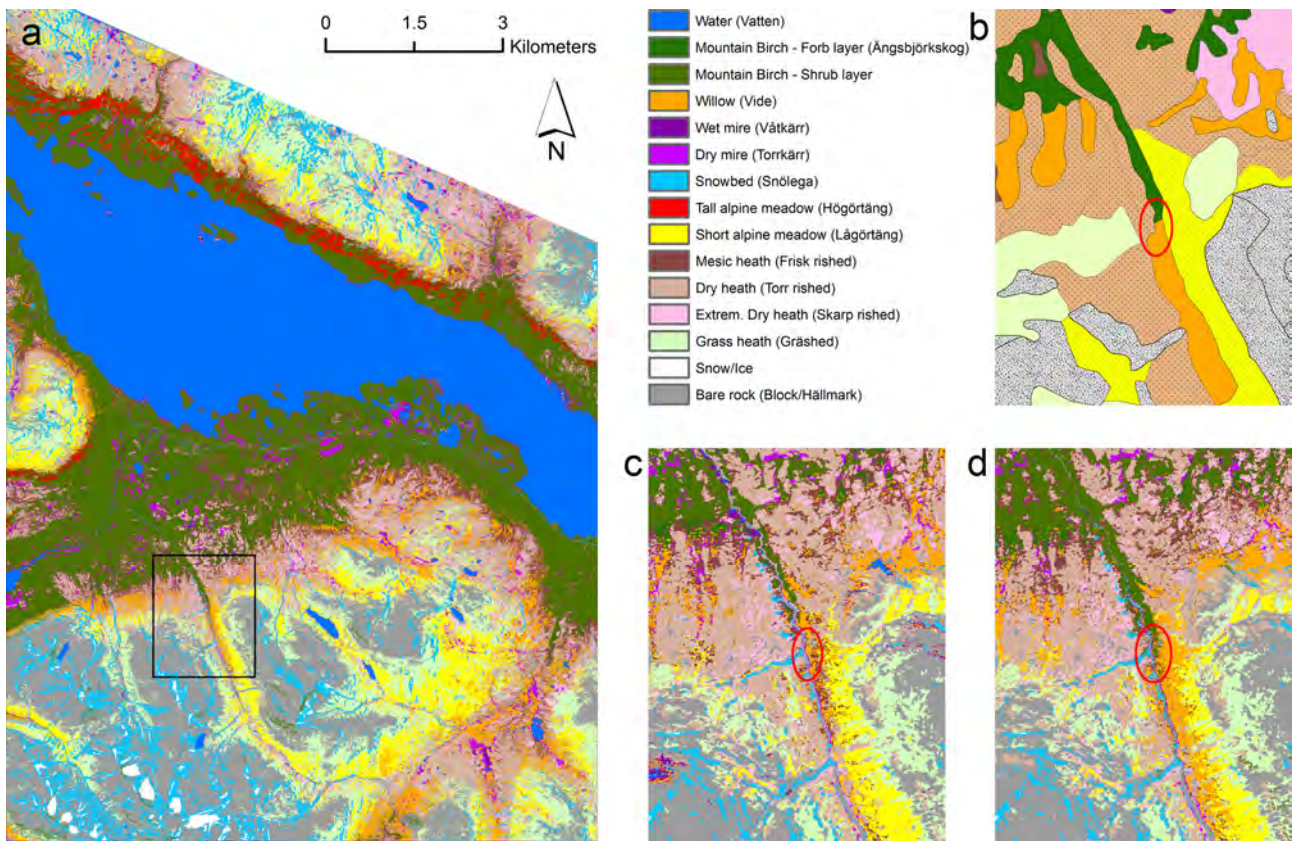
Vegetationskartering i fjällen med satellitdata kombinerat med laserskanning

Satellitbilder är väl lämpade för automatiserad kartering av vegetationen ovan trädgränsen (Reese 2011). Det är dock motiverat att undersöka i vilken utsträckning de nya möjligheterna att erhålla 3D-data från laserskanning eller digital fotogrammetri ytterligare kan förbättra vegetationsklassningar av detta slag, särskilt på grund av att spektralt överlapp (t.ex. mellan vide och frisk rished) försvårar klassningen. Vid användning av data över terrängens topografi tillsammans med satellitbilder förbättrades klassningsnoggrannheten med ca tio procentenheter. Terrängdata har dock hittills tagits från den äldre markmodellen med 50 m rasterrutor som har en skala som bättre stämmer med satellitdata. Under 2014 pågår ett forskningsprojekt om möjligheterna att använda nya laserbaserade markmodeller tillsammans med SPOT- och Landsat-satellitdata för förbättrad klassning av fjällvegetation. Användningen av 3D-punktmoln från laserskanning förbättrade klassningarna ytterligare något (Tabell 6.5; Reese m.fl. 2014).

Tabell 6.5. Klassningsnoggrannhet (%) för klassning av fjällvegetation med olika kombinationer av satellitdata, terrängvariabler, laserdata från Lantmäteriet (från Reese m.fl. 2014).

Vegetationsklass	Satellit	Satellit + terräng	Satellit + terräng + laser	Laser
Blockmark	100	100	100	38
Gräshed	25	88	88	0
Skarp rished	67	67	100	0
Torr rished	80	72	88	72
Frisk rished	17	33	75	10
Örtäng	0	33	0	0
Våtmark	54	62	62	23
Vide	0	33	50	0
Fjällbjörk	81	90	89	89
Total klassnings- noggrannhet (%)	64,1	74,6	76,2	55,8

Framförallt förbättrade laserskanningen karteringen av videbuskage när den kombinerades med satellitdata (Figur 6.14). Andelen laserreturer från vegetationen (vegetationskvoten) har använts som ett täthetsmått och på grund av intresset för förbättrad klassning av den lägre växande vegetationen har laserdatamått med ett lågt höjdröskelvärde (0,2 m ovan marken) använts. Sannolikt skulle förbättringen med laserdata bli ännu större med en flerstegsprocess där skog/icke-skog klassats först och där fjällvegetationen sedan klassats i ett andra steg.



Figur 6.14. (a) Karta över Abiskoområdet producerad från kombinationen satellitdata + terrängvariabler + laserdatapunktmoln; och (b) närbild där fjällvegetationskartan visas; (c) klassning av satellit + terrängdata; och (d) klassning av satellit + terräng + laserdatapunktmoln. Området inringat i rött visar förbättrad klassning av fjällbjörk och vide med hjälp av laserdata (punktmoln). Laserdata från Lantmäteriet i2014/764.

6.7. Visuellt tolkning av naturvårdsvariabler i laserpunktmoln och markmodeller från laser-skannerdata

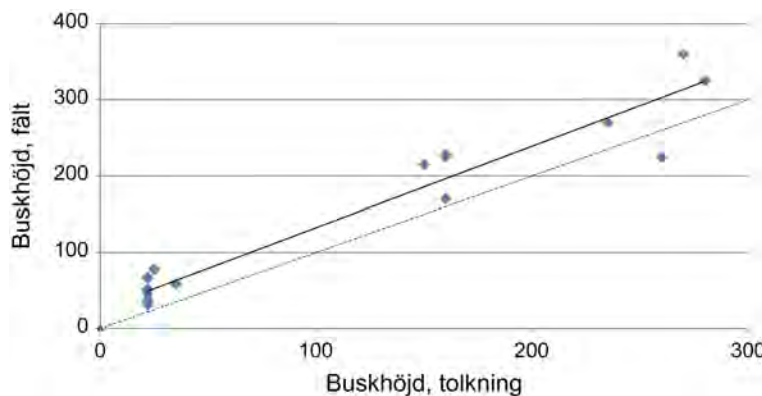
Större delen av Sveriges yta täcks av träd, vilket gör att flera av de egenskaper inom vegetationen under krontaket som modern naturvård kräver kunskaper om inte går att studera med flygbilds- och satellitbildsbaserad teknik. Tack vare lasertechnikens egenskaper, där en stor del av markytan och lägre vegetation kan registreras även genom ett krontak, kan visuell tolkning i laserdata användas för att samla viktig tilläggsinformation till en traditionell flygbildsbaserad vegetationskarta. Den mänskliga hjärnan är bra på att tolka bilder och visuell tolkning behövs fortsatt och behöver också utvecklas vidare för nya datatyper som 3D-punktmoln. Därför har visuell tolkning av laserdata ingått som en del inom EMMA-programmet.

Inom EMMA har vi undersökt vilken typ av information om nycklegenskaper i vegetationen och på markytan som kan tolkas visuellt i laserdata. Det källmaterial som har använts är högupplösta laserdata från TopEye (10–30 punkter / m²) och Lantmäteriets rikstäckande lågupplösta laserdata (< 1 punkter / m²). Bearbetning av

laserpunktmolnet samt visuell tolkning har utförts i programvaran Quick Terrain Modeler 7.1.7 (Applied Imagery, Skånes m.fl. 2011).

Resultaten visar att det går att tolka olika strukturer visuellt. Tolkningsbarheten beror på en rad olika faktorer och varierar kraftigt mellan högupplösta och lågupplösta data. Andra viktiga faktorer är tätheten på krontak från buskar och träd, om detta domineras av barrträd eller lövträd samt när under året som registreringen har skett. Förbearbetningen av laserpunktmolnet är också viktig, inte minst måste den markmodell som används för normaliseringen av vegetationsdatat ska vara anpassad för det aktuella ändamålet. Hur terrängen avbildas i markmodellen är beroende av vilken bearbetningsmetod och vilka parametrar som används. Om markmodellen är för grovt generaliserad eller inte stämmer väl i höjddled kommer inte heller lågväxt vegetation eller strukturer nära markytan att avbildas korrekt.

Vid jämförelser mellan höjdmätning av buskar och block i normaliserade laserpunktmoln och motsvarande mätningar i fält tenderar objekt i laserdata vara något lägre (Figur 6.15). Det är inte helt lätt att i detalj göra en sådan jämförelse eftersom man använder sig av helt olika mätmetoder och det är därmed svårt att dra slutsatsen om markmodellen är något för hög, eller om man av någon anledning gör en annan bedömning vid mätning i fält. Detta innebär att jämförelser mellan fältmätta strukturer och motsvarande strukturer i laserpunktmolnet inte kan kräva ett strikt 1:1-förhållande.



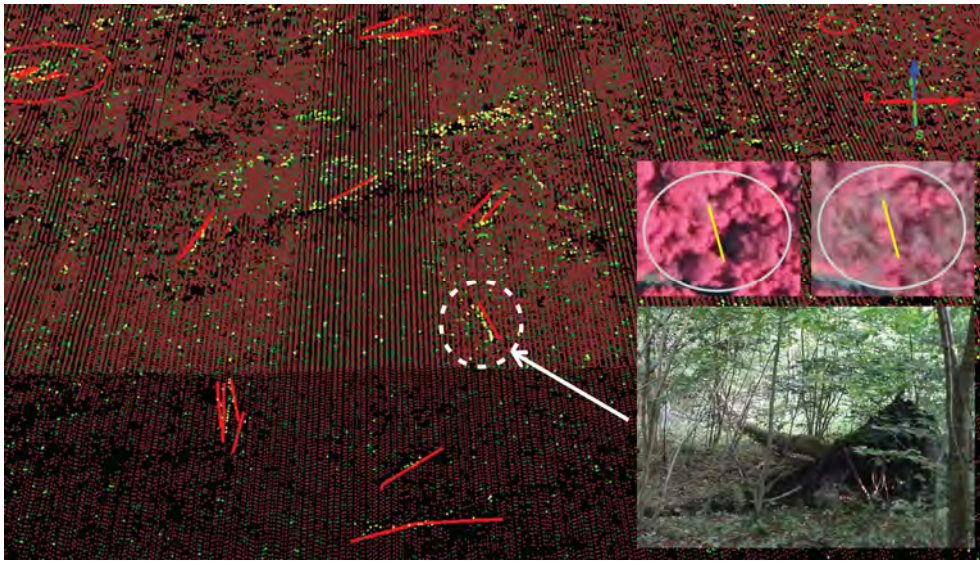
Figur 6.15. Höjduppskattningen i fält är något högre än den i enklare skattning i laserdata.

Liggande död ved ur punktmolnet

Det är angeläget för naturvården att inte bara kartera naturtyper utan att också kunna bedöma det aktuella områdets kvaliteter och förutsättningar för bevarande av biologisk mångfald, t.ex. inom Natura 2000 eller för uppföljning av miljökvalitetsmålen (Naturvårdsverket 2005). En sådan kvalitetsfaktor är i många sammanhang förekomsten av död ved.

Svårigheten att tolka data under krontaket har alltid varit ett stort problem för den flyg- och satellitbildsbaserade vegetationskarteringen. När det gäller laserdata är förutsättningarna betydligt bättre att se ner igenom ett trädskikt och fånga detaljer nära markytan som t.ex. liggande död ved. Denna möjlighet förbättras ytterligare om data registrerats tidigt på säsongen, om trädslagssammansättningen domineras av lövträd, samt när laserdata är täta.

I lövskog och särskilt vid tidig registrering kan förhållandevis smala och små objekt identifieras under krontak. Liggande träd framträder med varierande tydlighet i det filtrerade laserpunktmolnet, även i relativt glesa data som Lantmäteriets NH-data (med 0,5 punkter / m²) där alla punkter > 3 m från markytan har filtrerats bort (Figur 6.16). Röda linjer i bilden är liggande döda träd vars positioner verifierats i fält. En anledning till att kullfallna träd är så pass väl synliga i dessa lågupplösta data är att fältskiktet i området var lågt vid registreringsstillfället och att buskar inte förekommer annat än i begränsade områden. Ytterligare en anledning kan vara att fallande träd skapar luckor i krontaket och därmed öppnar upp för bättre registrering av laserreturer.

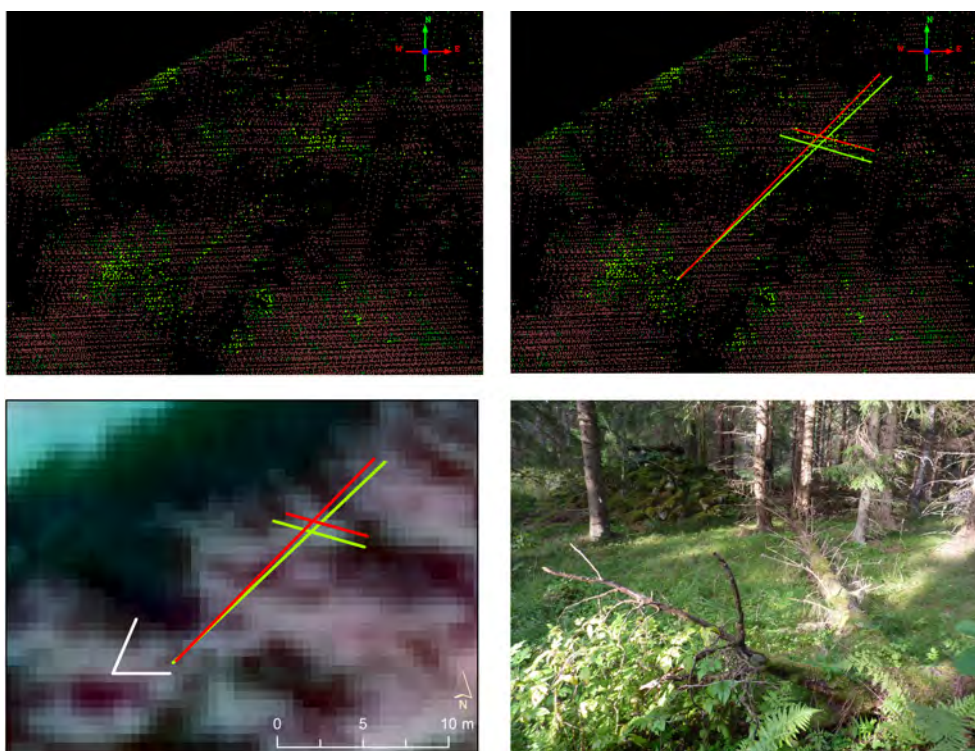


Figur 6.16. Kullfallna träd i lövskog syns tydligt i laserpunktmolnet trots den låga upplösningen (0,5 punkter / m²) tack vare att registreringen skett i början av april innan lövverket utvecklats. Laserdata från Lantmäteriet i2014/764.

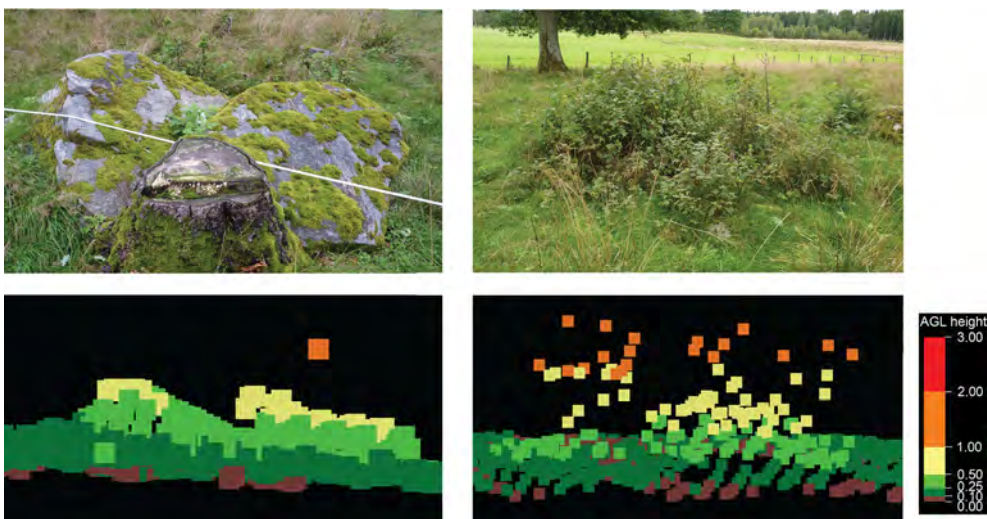
De största problemen att tolka lågupplösta data finns i tät barrskog. Om man ändå vill försöka tolka liggande döda träd under tätare barrdominerad skog krävs högupplösta data. I dessa kan man tolka en stor andel av de döda träden trots att de är täckta av överstående träd och trots att de ligger nedbäddade i fältskiktet (Figur 6.17).

Block och buskar ur punktmolnet

Laserreturer från block och buskar hamnar vanligen ovan markmodellen. Man kan i öppen miljö ofta se skillnad på om en mindre punktsvärm är ett block, eller om det är en buske (Figur 6.18). Laserreturer från buskar tenderar att vara mer utspridda och med punkter från flera olika höjdintervall, medan blocken ofta syns som mer massiva ytor som är tomma i mitten.

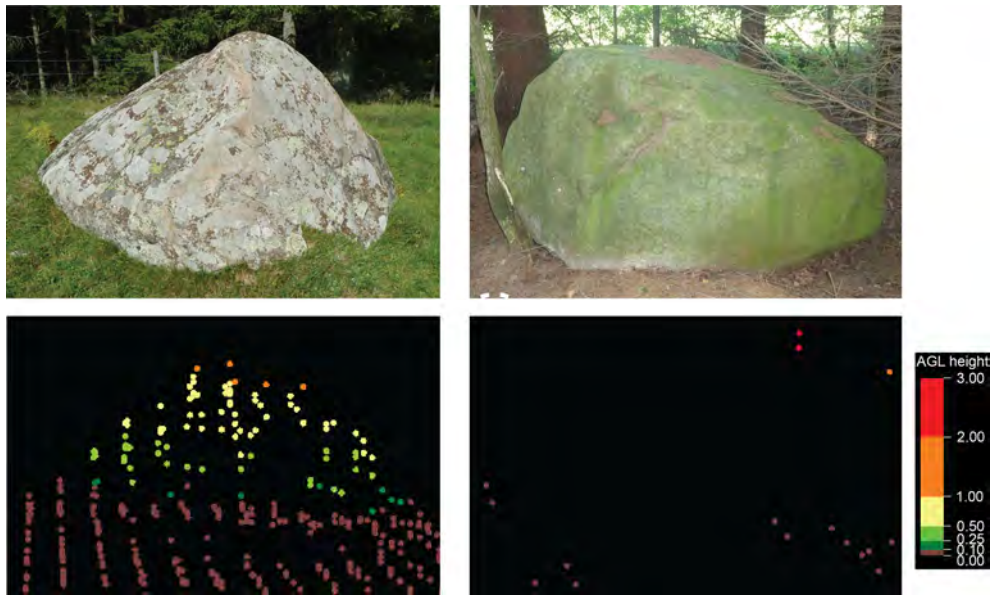


Figur 6.17. Under barrträd i tätare skog syns kullfallna träd endast i högupplösta laserdata. Detta exempel är från Remningstorp 2010 i 30 punkter / m². De röda strecken i undre bilden t.v. motsvarar fältinmätta strukturer och de gröna strecken motsvarar strukturer tolkade i laserpunktmolnet. Vit vinkel indikerar fotopunkt för nedre bilden t.h. Flygbild från Lantmäteriet.



Figur 6.18. Med täta laserdata och öppen miljö går det ofta att skilja mellan buskar och block. Om strukturerna är låga och små så blir det betydligt svårare.

Under tät barrskog är det, till skillnad från i öppen terräng, mycket svårt att identifiera block eller andra objekt ovanför markytan (Figur 6.19). Den begränsade genomsläppligheten i en tät barrskog gör att endast ett fåtal träffar registreras och att signalen från ett block blir mycket svag och omöjlig att tolka.



Figur 6.19. Det är stor skillnad mellan hur block kan tolkas i öppen miljö (ovan till vänster) eller i tät barrskog (ovan till höger). I öppen miljö är blocket väldigt tydligt medan det under den täta barrskogen är helt omöjligt att identifiera.

Förekomsten av buskar och låga träd är generellt en effekt av glest trädskikt (Figur 6.20), och syns därmed ofta även i stereofotograferade flygbilder. Men vissa skogstyper kan ha en mer eller mindre tät buskvegetation som inte syns genom krontaket och denna är av flera skäl intressant att kunna kartlägga. Dessutom innebär stereobildernas centralprojektion att även förhållanden i öppna miljöer kan skymmas av ”lutande” träd (höjddelplacering) och skuggor. Undervegetation kan vara en naturlig del av skogstyper på mark med högre bonitet, men kan även, t.ex. i trädbärande hagmarker och igenväxningsskogar utgöra en indikation på alltför lågt betestryck eller pågående igenväxning. Uppslag av gran i lövskog kan också indikera successiv utveckling av en beståndstyp som på sikt hotar dess bevarandestatus. Det är därför angeläget att kunna kartera utbredning av buskar och låga träd och detta utgör redan idag en viktig – om än problematisk – variabel inom t.ex. NILS och Natura 2000-basinventering. Figur 6.20 visar hur vissa områden i punktsvärmen har betydligt tätare buskvegetation än andra (orange-röda punkter). I dessa lägen kan man inte längre tolka enskilda buskar utan får avgränsa täta eller glesa busksområden. Den bruna färgen motsvarar fältskikt < 10 cm. Detta stämmer väl med fältrekognoserade data i området där den dominerande delen av fältskiktet i tallskogen var mycket lågt, dels som en effekt av fältskiktstyp med smalbladiga gräs, ris och mossor, men även som en effekt av den tidiga registreringstidpunkten.

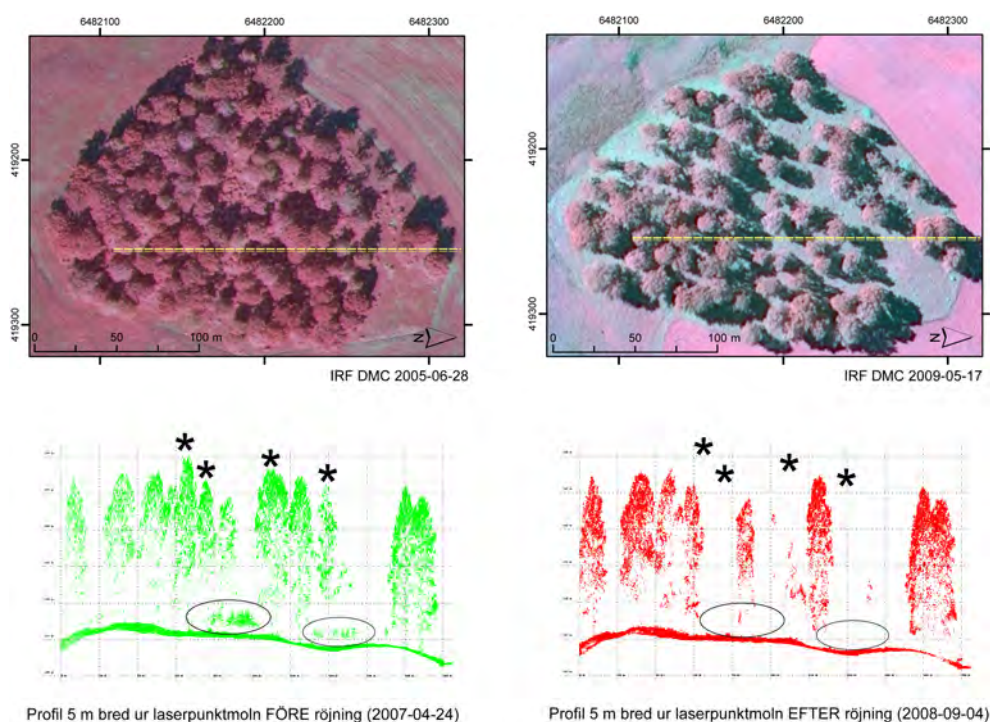


Figur 6.20. Utsnitt ur laserpunktmoln från Lantmäteriets nationella laserskanning, där alla punkter > 3 m från markytan har filterats bort. Här framträder tydligt partier med tät undervegetation, främst tall- och lövsly. Undervegetationen är naturligt glesare under tätare skog (foto t.v.) men i glesare skog (foto i mitten) och i öppna gläntor (foto t.h.) kan buskar och unga träd slå upp och bli marktäckande. Laserdata från Lantmäteriet i2014/764.

Tolkning av förändring över tid i laserpunktdata

Det är av stort värde att kunna följa igenväxningens effekter i detalj, men även att kunna studera resultaten av restaureringsåtgärder i öppna och trädbärande gräsmarker. Med tillgång till digitala flygbilder från upprepade tillfällen kan man se hur hävden ökar eller minskar och hur igenväxning sker i gläntor och öppen mark. Men man har fortsatt problem att studera detta i detalj och under träd, dels p.g.a. krontakets skymmande effekter, men också p.g.a. skuggor och lägesförskjutning som medför att man har svårt att överblicka fält- och buskskikt i detalj över hela ytan. Man kan till skillnad mot laserdata inte heller vrida och vända på flygbilden utan är bunden till lodbild.

Figur 6.21 visar vilket detaljerat stöd man kan få i bedömningen av restaureringseffekter där profiler genom en hagmark visar hur buskskiktet har försvunnit men också att vissa träd helt har tagits bort mellan två registreringar med laserdata. Detta sätt att vända och vrida på punktmolnet, samtidigt som man kan välja ut profiler av valfri bredd och sedan visa dem från sidan, är användbara verktyg för en planerare eller handläggare på en myndighet, men skulle även kunna fungera som ett utmärkt arbetsverktyg för den enskilde markägaren.

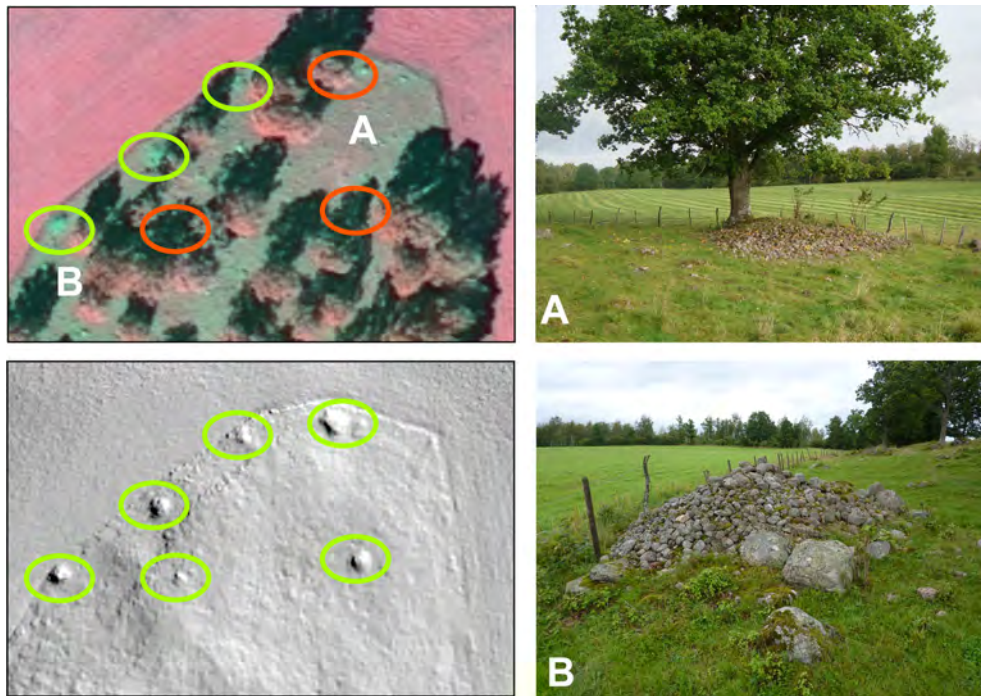


Figur 6.21. Samma trädbärande gräsmark registrerad vid IRF-flygbilder och laserdata vid två tillfällen med fyra års mellanrum. Mellan tidpunkterna har en omfattande röjning av buskskikt samt gallring i trädskiktet skett. Ellipser visar att buskvegetation har tagits bort. Asterixer pekar på träd som har gallrats bort. Flygbilder från Lantmäteriet.

Tolkning i markmodellen

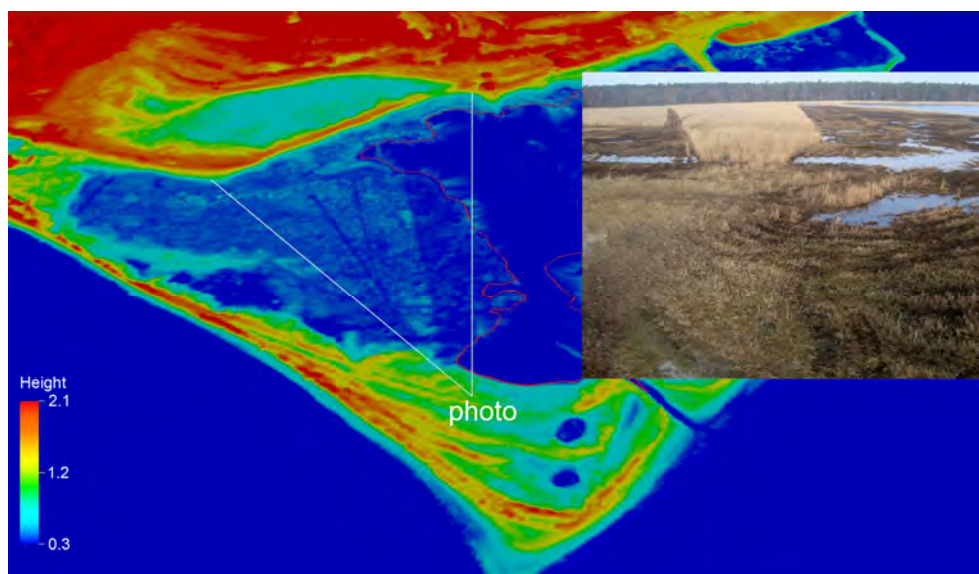
En viktig aspekt att ta hänsyn till är vad som ligger i det normaliserade punktmolnet och vad som hamnar som markyta i markmodellen. Större rösen t.ex. ligger ofta kvar i markmodellen (Figur 6.22), medan enstaka block och toppiga små rösen hamnar i punktmolnet (Figur 6.17 och 6.18). Likaså kan vassar och täta buskage ibland hamna i markmodellen. Det är därför en bra idé att arbeta med punktmoln och markmodell integrerat för att se så bra som möjligt. Om man som användare har möjlighet att ta fram markmodeller själv, kan man testa olika inställningar och på så sätt skapa markmodeller med varierande egenskaper för olika tillämpningar.

Vid tolkning av markmodellens former är ofta en *terrängskuggning* till god hjälp. Detta är en rasterbild där markmodellens höjdvärden räknas om till en skuggad reliefbild. Olika inställningar vid beräkningen av terrängskuggningen kan behöva provas för att få bästa tolkningsbarhet. T.ex. så kan det ge ett bättre resultat om höjdfaktorn förstärks. Hjärnan uppfattar reliefverkan bäst om solen antas komma från nordväst.



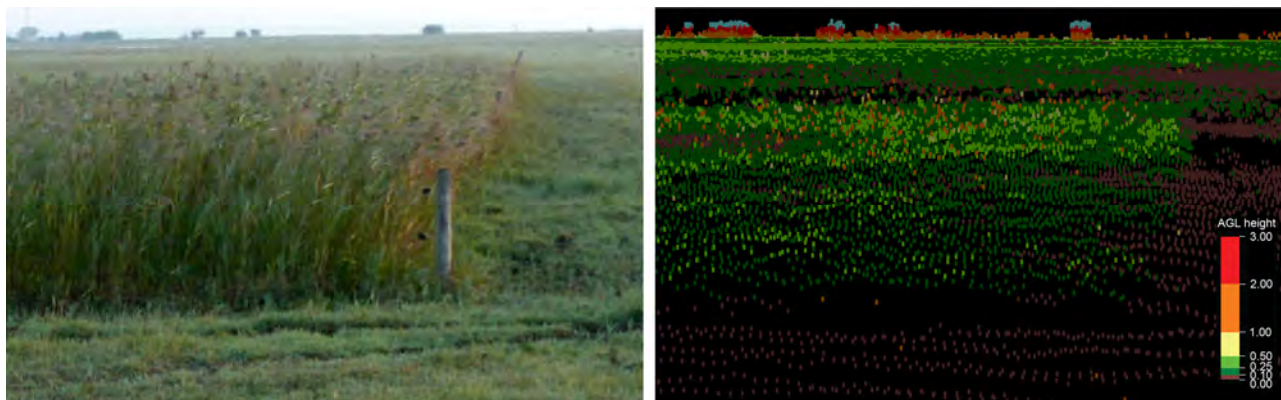
Figur 6.22. Markmodellen från laserdata möjliggör identifiering av odlingsrösen och andra detaljer på markytan som döljs av träd och skuggor i flygbilder. Gröna cirklar = identifierbara rösen och röda cirklar = icke identifierbara odlingsrösen i respektive data. I markmodellen är samtliga rösen enkelt identifierbara till skillnad från de i flygbilden. Flygbild från Lantmäteriet.

Inom EMMA-programmets kuststudie har vi undersökt möjligheten att bedöma förekomst och utbredning av vass i kustområden i Lantmäteriets nationella laserdata (både punktmoln och markmodell). Det preliminära resultatet visar att skillnaden mellan orörd vass och vass som röjts i restaureringssyfte är tydligt synliga i Lantmäteriets markmodell (Figur 6.23). Detta är både spännande och bekymmersamt eftersom det indikerar att markmodellen i vissa lägen anger en markhöjd som inte stämmer. Detta medför fel i såväl filtrering av laserpunktmolnet för kartering av vegetation och strukturer som vid analyser av markmodellen som t.ex. topografiskt fuktighetsindex. Ett av grundproblemen med att hålla vassar utanför markmodellen är det faktum att vass som står i vatten inte får några träffar från markytan då vatten inte reflekterar laserskott från topografiska skannrar. Om vass däremot står på land kan markytan eventuellt återskapas om inte vassen är alltför tät. Lantmäteriet arbetar för närvarande med att manuellt efterreditera markmodellen.

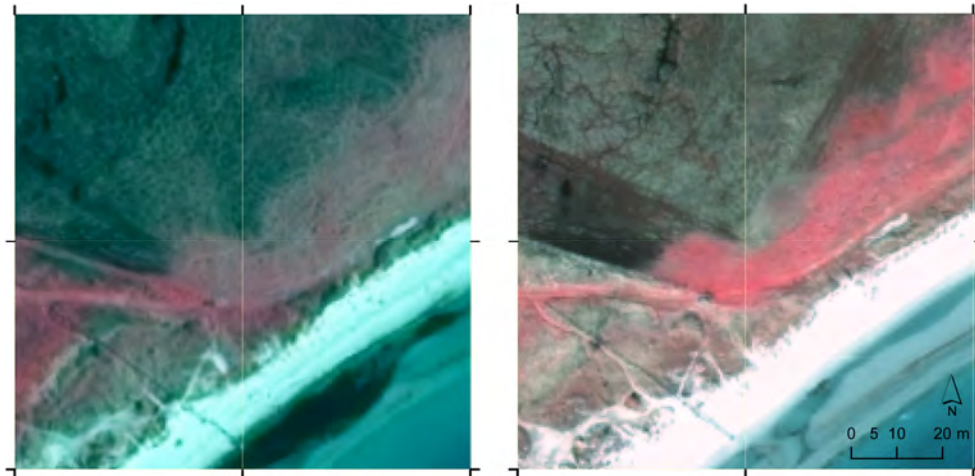


Figur 6.23. Lantmäteriets markmodell med 2 m upplösning. Vinkeln på det infällda markfotografiet är indikerat i perspektivbilden av höjdmollen, som har färgats in så att vassbältet ska vara så framträdande som möjligt. Foto: Helle Skånes.

När nya laserdata som registrerats av AHAB under 2013 normaliserades mot Lantmäteriets nationella markmodell hamnade vissa vassområden inte längre i markmodellen utan kunde "lösas ut" i punktmolnet och därmed studeras med den i projektet utvecklade filtreringsmetodiken (Figur 6.24). Anledningen till att detta vassområde nu kunde filtreras fram ser ut att bero på att området efter det har stängslats av och vassen vuxit sig tät i en begränsad del av ytan (Figur 6.25).

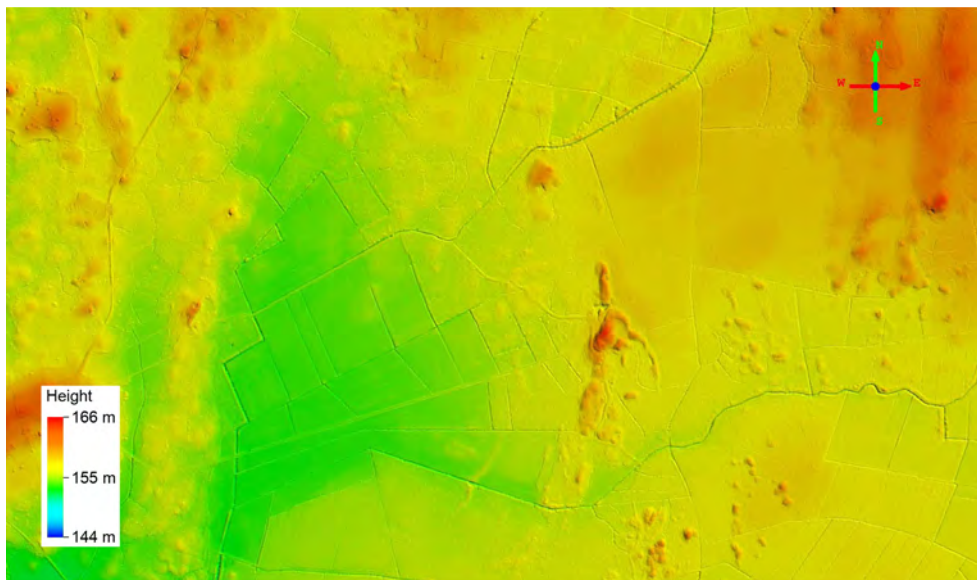


Figur 6.24. Först när vassen har filtrerats ur markmodellen kan den visas som vegetation med höjd över markytan i punktmolnet (AHAB punktmoln från 2013-04-10 normaliserat över NH markmodell 2010). Fältbilden från september 2012. Foto: Helle Skånes.



Figur 6.25. IRF-flygbilder från 2010-06-04 (t.v.) och 2012-05-03 (t.h.). Det röda hårkorset markerar hörnet på det fotograferade vassområdet i Figur 6.24. I bilden ovan t.h. ses den raka linjen mellan uppvuxen fjolårsvass och bearbetat område med tydliga körskador. © Lantmäteriet.

Diken och bäckar framträder väl i laserdata, både i öppen terräng och under kron-tak (Figur 6.26). Likaså syns ofta kolbottnar och andra kulturlämningar, liksom mindre husbehovstäckter. För denna typ av analyser så är det en stor fördel ju tätare laserdata man har tillgång till. Analysmöjligheterna kan också förbättras genom att noggrant bearbeta laserpunktmolnet för detta syfte, bland annat genom framställning av en markmodell, följt av en terrängskuggningsbild som båda är anpassade för ändamålet.

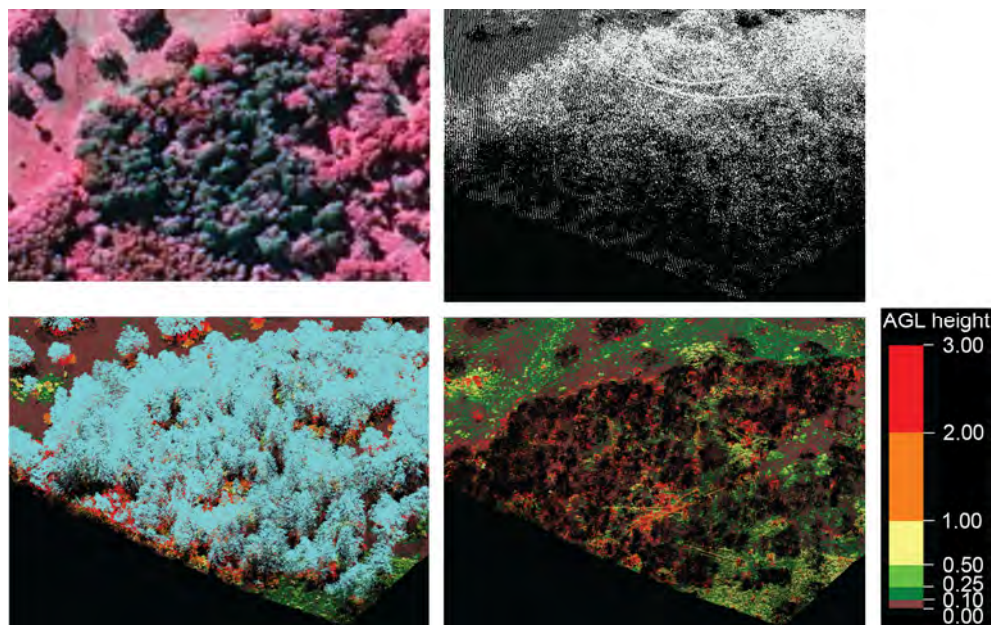


Figur 6.26. Lantmäteriets NH-markmodell över delar av Virestad, Kronobergs län. Området i bilden är mycket platt och består av stora myrområden och gammal myrmark som har dränerats sedan slutet av 1800-talet med syftet att öka odlingsmarken.

6.8. Tekniska aspekter på visuell tolkning i laserpunktmoln

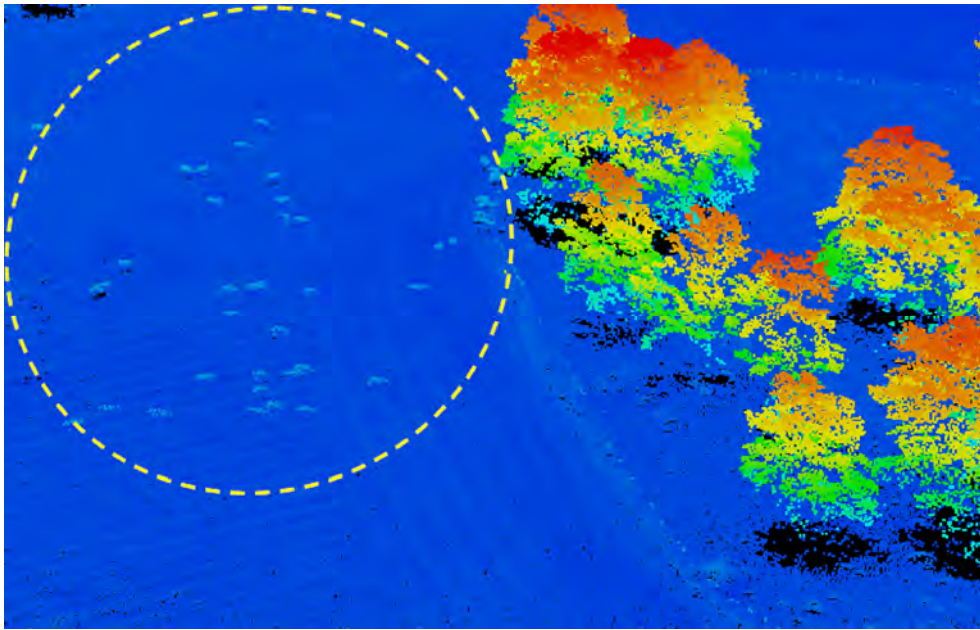
Förberedelser inför visuell tolkning av marknära vegetation i laserpunktmoln

Före visuell tolkning av laserpunktmolnet behöver vissa förberedande bearbetningar göras för att optimera tolkningsbarheten. Punktmolnet normaliseras över en terrängmodell för att ta fram punktens höjd ovanför markytan istället för höjd över havet. Därefter filtreras data i olika höjdintervall som färgläggs för att optimera tolkningsbarheten. Proceduren liknar den för automatiska klassningar (Kapitel 6.3 ovan). Avsikten med denna filtrering är att försöka lyfta fram fält- och buskskiktets karaktär, samt liggande död ved och block som ligger strax ovanför markytan. De intervall som används är: 0–0,1 m för mycket låg vegetation eller moss- och lavdominerat, 0,1–0,3 m för gräs- och risdominerade fältskikt, 0,3–0,5 m och 0,5–1 m för högre fältskikt och låg buskvegetation och 1–2 m respektive 2–3 m för högre buskvegetation. Notera att andra strukturer som liggande död ved och vissa stenblock också uppträder som delmängder i dessa intervall. Slutligen klipptes alla punkter bort som befinner sig högre än 3 m ovan markytan för att på så sätt exponera strukturer nära markytan (Figur 6.27). I vissa lägen, om tät buskvegetation förekommer eller om trädskiktet är lågt och tätt, har filtreringen istället skett ner till 1 eller 2 m ovan markytan, allt i ett försök att vaska fram lägre strukturer på marken.



Figur 6.27. Principer för förbearbetning av laserpunktmolnet före visuell tolkning av marknära objekt. Punktmolnet normaliseras över en detaljerad markmodell ur samma data som punktmolnet för att ge varje punkt en höjd över markytan istället för höjd över havet. Därefter färgas meningsfulla höjdintervall in och slutligen skärs alla punkter över 3 m bort. I vissa områden med tät buskvegetation har punkter över 1 eller 2 m avlägsnats. Denna process ger tolkaren en betydligt bättre möjlighet att tolka än i det obearbetade punktmolnet.

I en del laserdata är detaljrikedomen så stor att de innehåller information av tveksam användbarhet. Exempel på dessa är flygande fåglar som man enkelt kan klippa bort ur punktmolnet. Ett annat exempel är betande djur som inte är lika enkla att sudda bort (Figur 6.28). Denna typ av artefakter måste först identifieras och tolkas och därefter kan de ignoreras eller tas bort ur punktmolnet. Notera att man inte bör räkna antalet djur då en flock som denna, om den uppträder i skarven mellan två stråk, kan vara dubbelt så stor om djuren flyttat sig mellan planets passager och varje djur därmed har registrerats två gånger.



Figur 6.28. Illustration av problematiken med graden av detaljer i laserpunktmoln. I data med hög upplösning (TopEye, 30 punkter / m²) och i odlingslandskapets miljöer kan man behöva bortse från vissa strukturer som uppenbarligen inte bör tolkas, i detta fall en flock betande djur.

Programvaror för visualisering av laserpunktmoln

I takt med att laserdata blivit alltmer tillgängliga och vanliga datorer blir snabba nog att hantera stora mängder data som laserdata utgör, uppstår en marknad av programvaror för betraktning och analys av dessa data. Ofta finns en betalversion med full funktionalitet för mer eller mindre avancerad analys och bearbetning av data medan många av dessa även finns tillgängliga på internet i form av gratis ”titt-skåps”-version med begränsade analysmöjligheter. Det finns en tydlig skiljelinje mellan program som stöder visuella tillämpningar och de som främst möjliggör analyser och klassificeringar av data för fortsatta statistiska bearbetningar. Här nämns endast ett urval av de som är starka när det gäller visualisering av laserpunktmoln i tre dimensioner för visuell tolkning (Tabell 6.6). Arbetsstationer och programvaror för digital fotogrammetrisk 3D-betraktning ges i Bilaga 2.

Tabell 6.6. Översikt över ett urval programvaror som möjliggör analys och/eller betraktning av laserdata i Windows-miljö med ett lämpligt användargränssnitt för en lekman. Se länkar till respektive mjukvaruutvecklare i Bilaga 3.

Program	Mjukvaru-utvecklare	Nivå	Kommentar
Quick Terrain Modeler	Applied Imagery	Analys och tittskåp	Licensierat program under kontinuerlig utveckling. Passar utmärkt för både automatiska och visuella klassningar av laserpunktmoln. Detta program är enkelt att hantera och relativt intuitivt och lättanvänt och har använts vid visuell tolkning i EMMA.
Quick Terrain Reader	Applied Imagery	Tittskåp med viss analys	Detta är en gratisversion av QTM (se ovan) men med begränsade analysfunktioner.
Landscape	DAT/EM	Analys och tittskåp	Licensierad programvara under kontinuerlig utveckling. Här kan stora laserpunktmoln editeras i 3D. Tolkning kan ske i laserpunktmolnet länkat till Summit Evolution (fotogrammetrisk programvara för tolkning av flygbilder i digital 3D). Datafångst kan ske direkt i GIS eller CAD via Summits modul Capture.
FUSION	USDA Forest Service	Analys och tittskåp	Gratis och mycket använd programvara för bl.a. beräkning av metriker i laserdata för skattning av vegetationens egenskaper med tittskåpsfunktion.
Fugro Viewer	Fugro	Främst tittskåp	Detta gratisprogram är enkelt att hantera och relativt intuitivt och lättanvänt. Enklare analysfunktioner omfattar generering av höjdkurvor ur laserdata. Här kan man utforska punktmolndata efter klassningar, flyglinje, träffnummer eller källans ID.

7. Integrerad kartering av land- och vattenmiljö

Idag utförs kartering av land och vattenmiljöer oftast separat från varandra, vilket begränsar möjligheterna att behandla kustzonen som en integrerad övergångszon mellan land och vatten. Samtidigt finns det ett behov att förvalta land- och havsmiljön i kustzonen som en enhet, både inom naturvård, fysisk planering och klimatanpassning av befintlig bebyggelse och infrastruktur. Kustområdet utnyttjas i ökande grad för en lång rad olika aktiviteter, vilket gör att det behövs bra kartunderlag för att minimera konflikter och möjliggöra rätt avvägningar mellan olika intressen. Förändringar på land såsom avverkning eller hårdgjorda ytor ger effekter på kustnära undervattensmiljöer. Sådana förändringar skulle avsevärt lättare gå att identifiera med kartunderlag där kustzonen behandlas som en helhet.

I en delstudie inom EMMA har specifikt undersökts möjligheten att skapa sömlösa kartor över land och grund havsbotten med en kombination av batymetrisk laser, topolaser och flygbilder. Syftet har varit att ta fram en integrerad databas över kustzonen som beskriver såväl akvatiska som terrestra biotoper och illustrera hur integrerade kartor kan tas fram och samt utvärdera deras användbarhet för förvaltning och bedömning av erosionsförhållanden. Studien genomfördes i ett område söder om Åhus i Kristianstads kommun. Huvudresultaten av den integrerade karteringen presenteras i korthet här, medan ytterligare resultat från den akvatiska respektive terrestra karteringen presenteras i kapitel 5 och 6. En fullständig beskrivning av studien finns i rapporten "Laserskanning och digitala flygbilder för miljöövervakning. Kustzonen - tillämpning i Åhus" (Rydell m.fl. 2013).

7.1. Integrerad djup–markmodell

En viktig nyckel till att uppnå ett integrerat perspektiv på övergången mellan kust och hav är tillgången till en djup–markmodell som ger en sömlös bild av terrängen ovanför och under vattenytan. En sådan togs fram inom projektet genom att kombinera Lantmäteriets nationella markmodell med en bottenmodell framtagen från batymetrisk laserskanning med HawkEye II (utförd av AHAB). Båda dessa dataset registrerades under 2010 och har sedan efterbearbetats för att sammanfogas till en gemensam digital modell. Resultatet är spännande men innehåller vissa osäkerheter i anslutning till vattenbryn och i vissa områden på djupare vatten. Detta beror till stor del på ojämn kvalitet på lasermätdata eftersom mätningen till en del genomfördes som injusteringsmätning av ett nybyggt lasersystem. Genom interpolation kan man ändå få en sömlös övergång som är avsevärt mycket bättre än det som tidigare funnits att tillgå. Förhoppningen är att det i framtiden ska vara möjligt att framställa mer detaljerade kartor av denna typ.

Den integrerade djup- och markmodellen visas i Figur 7.1. En sådan modell kan användas för att kartlägga utbredningen av habitat och naturtyper i strandzonen och att göra utsagor kring dagens vegetation och framtida utveckling av miljöer som t.ex. laguner och smala vikar i händelse av stigande eller sjunkande vattennivåer.

Den är även av stort värde för att simulera effekter av havsnivåhöjning, exempelvis erosion och översvämningar, som är väsentligt för arbete med klimatanpassning av bebyggelse och infrastruktur, samt för att studera förändringar av strandzonen för bedömning av erosionsförhållanden och risk för framtida erosion. Slutligen krävs en sådan modell för att man ska kunna göra ortofoton från digitala flygbilder som även omfattar bottenmiljön.



Figur 7.1. Terrängskuggad, integrerad djup- och markmodell över kustområdet vid Äspet i Åhus. Från Rydell m.fl. 2013. Baserat på data över land från Lantmäteriet (i2014/764) och över havet från Hawkeye II systemet. Spridningstillstånd 12-02334 från Sjöfartsverket.

7.2. Integrerad vegetationsdatabas

Den integrerade vegetationsdatabasen bygger på en kombination av: (1) automatisk klassificering av undervattensmiljön med laserdata och digitala IRF-flygbilder (Z/I DMC); (2) visuell och semiautomatisk klassificering av samma flygbilder på land; samt (3) visuell tolkning av bearbetningar av laserpunktmoln och lasergenererad terrängmodell från Nationella markmodellen.

Med flygbilder och batymetriska laserdata var det möjligt att ta fram en botten-typskarta med tre klasser: hårdbotten, bar sand och sand med vegetation (se även kapitel 5.5). Det finns dock några luckor där laserdata saknades, dels i strandkanten och dels på några områden med mörka vegetationstäckta bottenar. För att fylla igen

dessa luckor gjordes en klassning med enbart flygbilder kombinerat med en interpolerad djupmodell. Med denna metod var det möjligt att göra en heltäckande klassificering även över ytorna som saknade laserdata. Anledningen till att data saknades i strandkanten och på några mörka vegetationstäckta bottenavsnitt var att laser-mätningen gjordes som en injusteringsmätning av ett helt nybyggt system. Ett väl injusterat lasersystem ger normalt full täckning över hela mätområdet. Med hjälp av den sammanlagda botten typskartan och djupmodellen avgränsades även naturtyperna Rev och Sublittoral sandbankar enligt Habitatdirektivet (se kapitel 5.6).

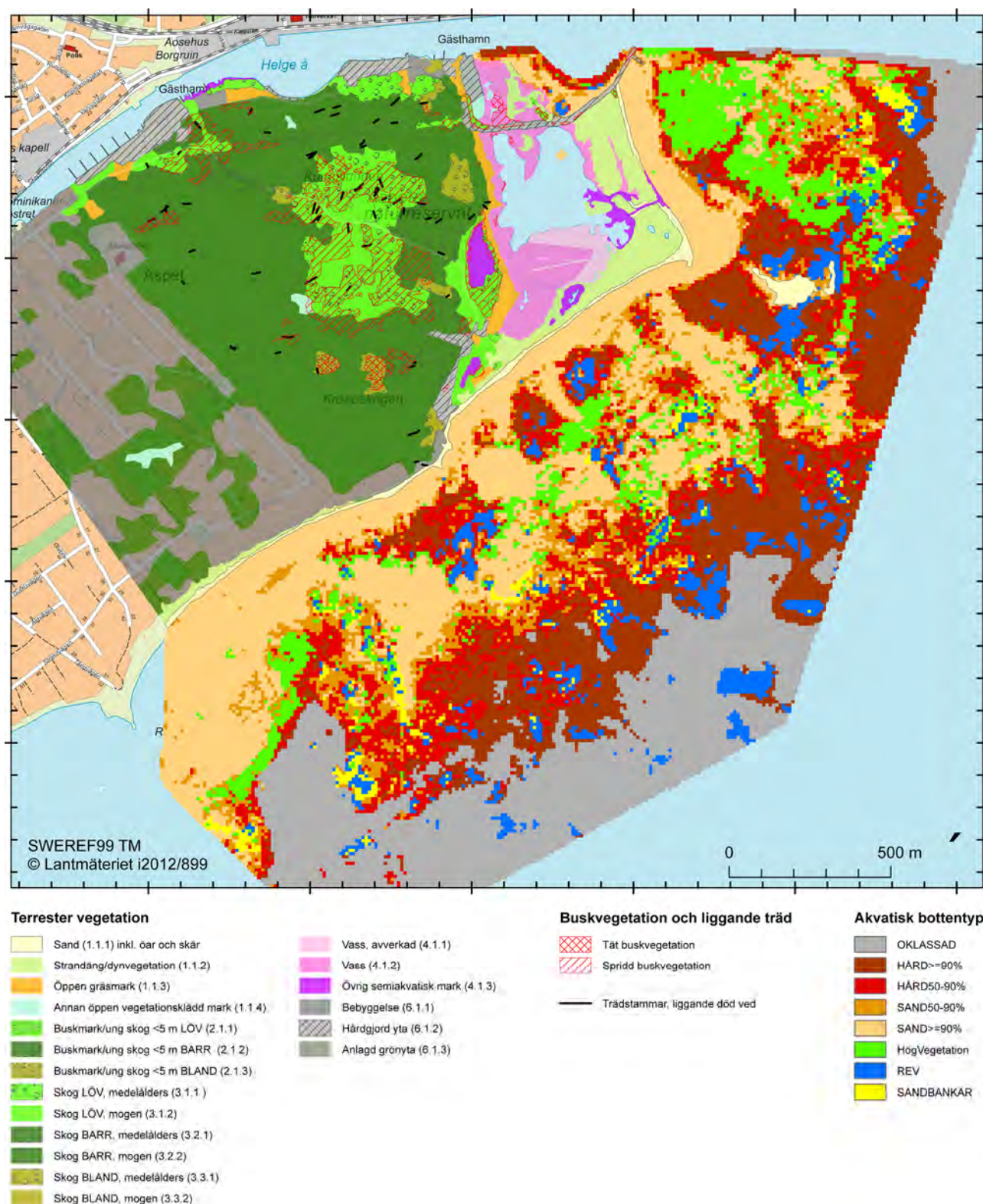
För landmiljön gjordes en traditionell visuell vegetationskartering i digitala IRF-flygbilder. En karta baserad på traditionell klassning saknar emellertid många viktiga uppgifter om vegetationens struktur och egenskaper som i detta projekt har kunnat tolkas visuellt ur det filtrerade laserpunktmolnet. Det fortsatta arbetet var därför att berika denna baskarta med tilläggsinformation, variabler som man bara kan fånga i laserdata (se kapitel 6.7).

Figur 7.2 visar ett utdrag ur den integrerade vegetationsdatabasen som visar såväl terrester som akvatisk vegetation. Denna karta kan jämföras med tidigare separata inventeringar av land- och havsmiljön, där karteringen har utförts med olika metoder och syften, vilket leder till helt olika avgränsningar av vegetations- och naturtyper som inte stämmer överens där hav möter land. En integrerad vegetationsdatabas fyller därför en viktig funktion för exempelvis naturvård och översiktsplanering. Den kan även visa valfritt antal attribut inom vegetationen som kan vara registrerade genom klassificering och tolkning av andra källor än de digitala flygbilderna.

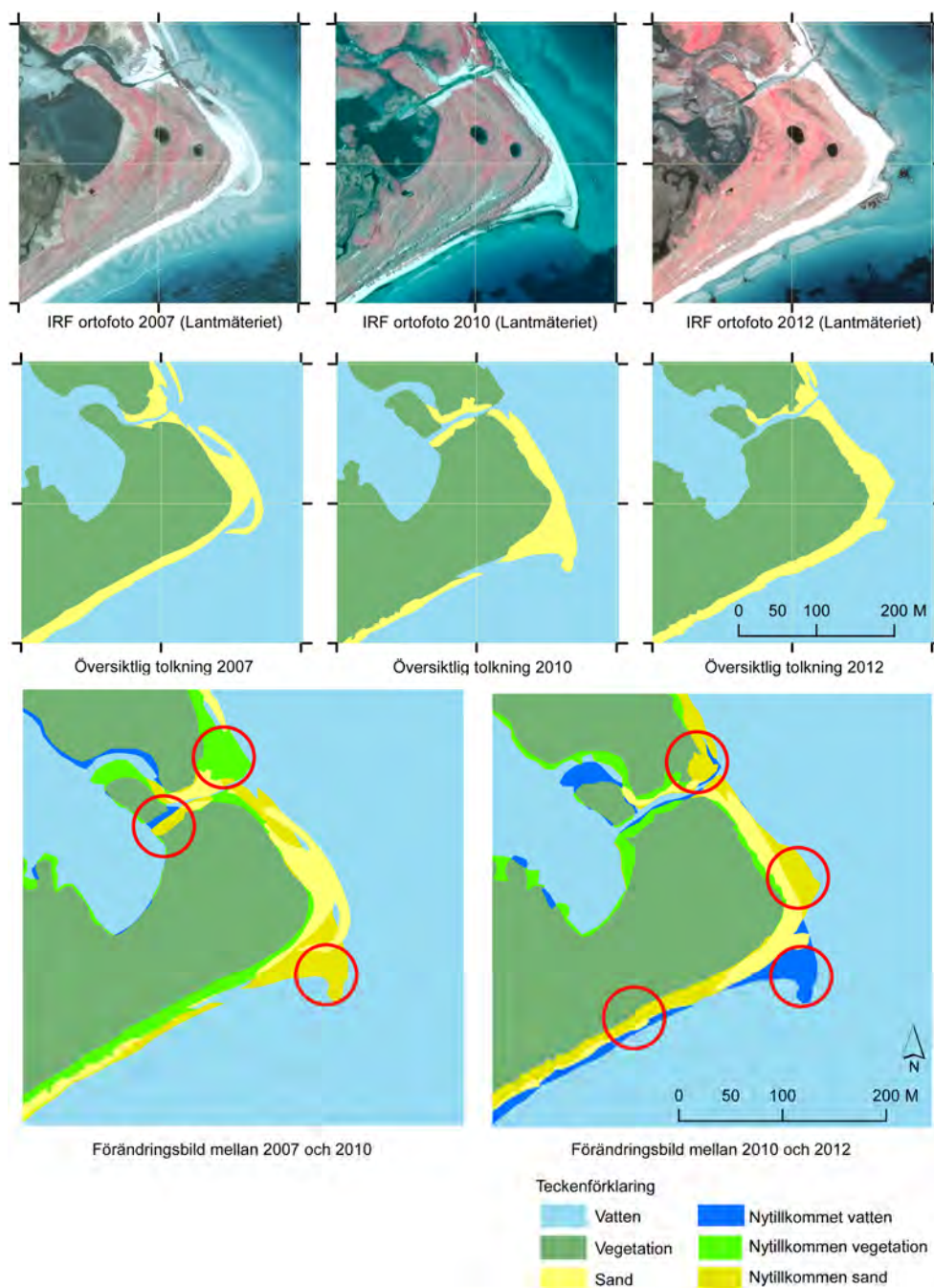
7.3. Övervakning av stranderosion

Stranderosion orsakar på många platser stora skador och medför omfattande ekonomiska förluster. För sådana områden är sedimenttransport en avgörande fråga, både för att klarlägga i vilken utsträckning sedimenten eroderar och ackumuleras men också för att få underlag till åtgärder för att begränsa erosionen. Resultaten från EMMA-projektet visar att det finns förutsättningar att genom ett antal indikatorer översiktligt beskriva förändringar längs kustområden när det gäller erosion och sedimentation såväl på land som i vatten. Dessa indikatorer har tidigare använts vid tolkning av satellitbilder. Genom att kombinera digitala flygbilder och laserskanning bedöms indikatorer på erosion kunna värderas ännu bättre än med satellitbilder.

Förändringar i kustzonen kan direkt eller indirekt indikera erosionskänsliga områden. Förändringar som direkt indikerar erosion eller sedimentation är t.ex. förändringar i batymetri, strandlinjer, dynbildningar och marknivåer på land samt mänskliga aktiviteter som muddring, stabilisering av stränder eller strandnära bebyggelse. Indirekta indikationer på erosionskänslighet är t.ex. förändringar i vegetationstäckning både på land och under vatten. Ett exempel på sådana förändringar visas i Figur 7.3, där en GIS-analys har utförts baserat på digitala flygbilder över ett delområde i Äspet.



Figur 7.2. Sammanlagd karta över vegetation och naturtyper i kustzonen i Äspet, Åhus. Bearbetad efter Rydell m.fl. 2013. Baserat på data över land från Lantmäteriet (i2014/764) och över havet från Hawkeye II systemet. Spridningstillstånd 12-02334 från Sjöfartsverket.



Figur 7.3. Förändringsbilder i kustzonen i Åspet, Åhus. Bearbetad efter Rydell m.fl. 2013.

Av bilderna framgår att det strandnära området har förändrats under den tidsperiod som bilderna omfattar. Vegetation har tillkommit och försvunnit och sandområden har förändrats i storlek och läge. Det bör observeras att det inte går att dra för långtgående slutsatser om förändringar utifrån analysen ovan. Strandlinjens läge måste bedömas utifrån av vattennivån i havet och det krävs kontroll i fält för att verifiera de förändringar som identifierats i flygbilderna. Analysen illustrerar emellertid möjligheten att identifiera förändringar över tiden i strandnära områden.

En intressant modell för övervakning av förändringar inom strandnära områden är ett system med kombination av olika typer av fjärranalys, där metoder väljs beroende på detaljeringsnivå och syfte. För att kostnadseffektivt och översiktligt kunna studera förändringar och utvecklingstendenser av strandnära områden kan satellitbilder användas. Inom bedömda och avgränsade riskområden kan därefter mer detaljerad analys göras med laserskanning och digitala flygbilder.

8. Lästips och slutord

Lästips

För den som vill lära sig mer om grundläggande geografisk informationsteknologi hänvisas till kompendiet av Harrie m.fl. (2013), som kan laddas ned från Lantmäteriets hemsida eller den svenska GIS-läroboken editerad av Harrie (2013). SLU har också ett kompendium om laserskanning för skogliga ändamål som är fritt nedladdningsbart (Nordkvist m.fl. 2013) och som i tillämpliga delar även är av relevans för vegetationskartering med stöd av laserdata. Bland de få böcker som finns om laserskanning kan nämnas Shan & Toth (2009), Heritage & Large (2009), samt Renslow (2012). Det finns många grundläggande läroböcker i fjärranalys som har en tonvikt på analys av satellitbilder men i viss utsträckning är de även tillämpliga på andra fjärranalysdata; oftast går grundläggande rutiner för klassning igenom, men mera sällan skattning av kontinuerliga data. Ett exempel av många sådana böcker är Richards (2013).

Slutord

Tredimensionella data från främst laserskanning erbjuder nya möjligheter för kartering av naturmiljön. Teknikerna för att använda t.ex. kombinationen av den nationella laserskanningen och satellitbilder för karteringar på land, eller skanning med batymetrilaser i kombination med färginformation från satellitbilder eller flygbilder för kartering av grunda bottenar, är så mogna att de bör kunna användas i operationella karteringar. På landsidan utgör den nationella laserskanningen än så länge en engångssatsning, men tredimensionella punktmoln från digital fotogrammetri bör utgöra en god grund för övervakning över tiden.

Samtidigt utvecklas såväl sensorer som sensorbärare snabbt, vilket gör att den utveckling mot tredimensionella data som vi nu ser sannolikt kommer att accelerera ytterligare. På sensorsidan får såväl laserskannrar som digitala flygfotokameror allt större kapacitet, samtidigt som det också sker en utveckling mot mindre och kompaktare instrument. Tredimensionella data kan, förutom från fotogrammetri och laser, även fås genom samarbetet av två radarregistreringar vilket är en teknik som inte behandlats här, men som också ökar i tillämpning, framförallt då satelliter används som sensorbärare. En ytterligare inblick i den pågående tekniska utvecklingen på laserskannerområdet ges i Bilaga 1 till denna rapport.

När det gäller sensorbärare så gör utvecklingen mot små kompakta system att det blir enklare att ta med laserskannrar eller kameror för stereoregistrering i fält, och placera dem på stativ eller fordon, för registreringar från sidan. Samtidigt förväntas även användning av obemannade små modellflygplan med autopilot, så kallade UAV:er, som sensorbärare öka. För flygfotografering och laserregistreringar från flyg sker en diversifiering mot dels enkla system som kan flygas på små plan, dels större system som från allt högre höjd kan registrera allt större områden med bibehållen eller förbättrad datakvalitet. Det finns även allt fler satelliter som registrerar 3D-ytm modeller, såväl från radar som med optiska sensorer riktade i flera riktningar. Sammantaget öppnar detta förväntade ökade flöde av 3D-data upp för

ett nytt framtida synsätt på övervakning där vegetationens utveckling över tiden kan följas med en kombination av modeller och återkommande sensorregistreringar.

9. Källförteckning

- Ball, I.R., Possingham, H.P. & Watts, M. 2009. Marxan and relatives: Software for spatial conservation prioritisation. In: Moilanen, A., Wilson, K.A. & Possingham, H.P. (eds) Spatial conservation prioritisation: Quantitative methods and computational tools. Oxford University Press, Oxford, UK, pp 185–195.
- Bohlin, J., Wallerman, J. & Fransson, J.E.S. 2012. Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high-resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27: 692–699.
- Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T. & Solberg, S. 2010. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based fused airborne laser scanning and multi-spectral data. *Remote Sensing of Environment* 114: 911–924.
- Bäck, A., Berglund, J., Gammal, J. & Haldin, M. 2011. ULTRA – Utveckling av Lidarbaserad Terränganalys för Regional Användning, gemensam slutrapport. Forststyrelsen, Vasa, Finland.
- Chust, G., Grande, M., Galparsoro, I., Uriarte, A. & Borja, Á. 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 89: 200–213.
- Granholm, A.-H., Olsson, H., Nilsson, M., Allard, A. & Holmgren, J. 2014. The potential of digital surface models based on aerial photos for automated vegetation mapping. Manuskript.
- Gruber, M., Ponticelli, M., Ladstädter, R. & Wiechert, A. 2012. Ultracam Eagle, details and insight. In: Proceedings from XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXIX-B1, pp 15–19, doi:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B1-15-2012
- Harrie, L., Andersson, B., Persson C.-G., Horemuz, M., Boberg, A., Olsson, P., Rost, H. & Reshetyuk, Y. 2013. Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik. <http://www.lantmateriet.se/Om-Lantmateriet/Samverkan-med-andra/Handbok-i-mat--och-kartfragor-HMK/HMK-Referensbibliotek/Utbildningsmaterial/Geodetisk-och-fotogrammetrisk-matnings--och-berakningsteknik/>
- Harrie, L. (ed). 2013. Geografisk informationsbehandling: teori, metoder och tillämpningar. Upplaga 6:1. Studentlitteratur, Lund.
- Havs- och vattenmyndigheten. 2012. Manual för uppföljning av marina miljöer i skyddade områden (Version 4.5.4).
- Heiskanen, J., Nilsson, B., Mäki, A.-H., Allard, A., Moen, J., Holm, S., Sundquist, S. & Olsson, H. 2008. Aerial photo interpretation for change detection of

- treeline ecotones in the Swedish mountains. Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, arbetsrapport 242.
- Heritage, G.L. & Large, A.R.G. (eds). 2009. Laser Scanning for the environmental sciences. Wiley-Blackwell, Chichester, U.K.; Hoboken, N.J.
- Holmgren, J. 2003. Estimation of forest variables using airborne laser scanning. Doktorsavhandling, Sveriges lantbruksuniversitet. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 278.
- Holmgren, J. & Persson, Å. 2004. Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment* 90: 415–423.
- Holmgren, J., Johansson, F., Olofsson, K., Olsson, H. & Glimskär, A. 2008. Estimation of crown coverage using airborne laser scanning. In: Hill, R.A., Rosette, J. & Suárez, J. (eds) *Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory*. Edinburgh, UK, pp 50–57.
- Holmgren, J., Barth, A., Larsson, H. & Olsson, H. 2010. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesting machinery. In: Koch, B., Kändler, G. & Teguem, C. (eds) *Proceedings of Silvilaser 2010: 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*. Freiburg, Germany, pp. 327–335.
- HMK. 2013. Bilddata. Handbok i mät- och kartfrågor.
<http://www.lantmateriet.se/Om-Lantmateriet/Samverkan-med-andra/Handbok-i-mat--och-kartfragor-HMK/Aktuella-HMK-dokument/>
- HMK, 2014. Laserdata, luftburen insamling. Handbok i mät- och kartfrågor. 2013 års arbetsdokument. <http://www.lantmateriet.se/Om-Lantmateriet/Samverkan-med-andra/Handbok-i-mat--och-kartfragor-HMK/Aktuella-HMK-dokument/>
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. & Maltamo, M. 2008. Review of methods of small footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1339–1366.
- Kautsky, H., Tulldahl, M., Steinvall, O., Strömbeck, O., Wikström, S. 2010. New Technologies for Benthic Habitat Mapping. Literature study. FOI Teknisk Rapport, FOI-R--3013--SE.
- Lindberg, E., Olofsson, K., Holmgren, J. & Olsson, H. 2012. Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment* 118: 151–161.
- Lindberg, E., Hollaus, M., Mücke, W., Fransson, J. E. S. & Pfeifer, N. 2013. Detection of lying tree stems from airborne laser scanning data using a line template matching algorithm. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, pp. 169–174, doi:10.5194/isprsannals-II-5-W2-169-2013.

- Lindberg, E., Eysn, L., Hollaus, M. & Holmgren, J. 2014. Delineation of tree crowns and tree species classifications from full-waveform airborne laser scanning data using 3D ellipsoidal clustering. Manuskript.
- Lindgren, N. 2012. Klassning av fjällbjörkskog enligt FAO:s definition av skogsmark med hjälp av flygburen laserskanning. Examensarbete, Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU, Arbetsrapport 349.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 482–499.
- Naturvårdsverket. 2005. Död ved i levande skogar. Hur mycket behövs och hur kan målet uppnås? Rapport 5413.
- Naturvårdsverket. 2009. Naturtyper på havets botten baserat på art- och habitat modellering. Rapport 5987.
- Naturvårdsverket. 2010. Uppföljning av skyddade områden i Sverige. Riktlinjer för uppföljning av friluftsliv, naturtyper och arter på områdesnivå. Rapport 6379.
- Nordkvist, K., Granholm, A.-H., Holmgren, J., Olsson, H. & Nilsson, M. 2012. Combining optical satellite data and airborne laser scanner data for vegetation classification. *Remote Sensing Letters* 3: 393–401.
- Nordkvist, K., Granholm, A.-H., Nilsson, M. & Holmgren, J. 2010. Combining optical satellite data and airborne laser scanner data for vegetation classification. In: Koch, B., Kändler, G. & Teguem, C. (eds) *Proceedings of Silviler 2010: 10th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*. Freiburg, Germany, pp. 136–142.
- Nordkvist, K., Sandström, E., Reese, H. & Olsson, H. 2013. Laserskanning och digital fotogrammetri i skogsbruket. Andra upplagan. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för skoglig resurshushållning. Arbetsrapport 407. <http://pub.epsilon.slu.se/10956/>
- Nordkvist, K., Reese, H., Nyström, M., Bohlin, J., Granholm, A.-H. & Olsson, H. 2014. Estimation of mountain birch forest parameters from photogrammetric point cloud data. Manuskript.
- Nyström Sandman, A., Wikström, S.A., Blomqvist, M., Kautsky, H., Isaeus, M. 2013. Scale-dependent influence of environmental variables on species distribution: a case study on five coastal benthic species in the Baltic Sea. *Ecography* 36: 354–363.
- Nyström, M., Holmgren, J. & Olsson, H. 2012. Prediction of tree biomass in the forest–tundra ecotone using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 123: 271–279.
- Nyström, M., Holmgren, J. & Olsson, H. 2013. Change detection of mountain birch using multi-temporal ALS point clouds. *Remote Sensing Letters* 4: 190–199.

- Nyström, M. 2014. Mapping and monitoring of vegetation using airborne laser scanning. Doktorsavhandling, Sveriges lantbruksuniversitet. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2014:9.
- Nyström, M., Holmgren, J., Fransson, J.E.S. & Olsson, H. 2014. Detection of windthrown trees using airborne laser scanning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 30: 21–29.
- Ottoson, L., Ternryd, C.-O. & Torlegård, K. 2004. Svensk fotogrammetri och fjärranalys under 1900-talet. Kartografiska sällskapet, Stockholm.
- Persson, Å., Holmgren, J. & Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68: 925–932.
- Reese, H. 2011. Classification of Sweden's forest and alpine vegetation optical satellite and inventory data. Doktorsavhandling, Sveriges lantbruksuniversitet. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, 2011:86.
- Reese, H., Nyström, M., Nordkvist, K. & Olsson, H. 2014. Combining airborne laser scanning data and optical satellite data for classification of alpine vegetation. *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 27: 81–90.
- Reitberger, J., Schnörr, C.I., Kyzystek, P. & Stilla, U. 2009. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64: 561–574.
- Renslow, M.S. (ed). 2012. Manual of airborne topographic lidar. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Richards, J.A. 2013. Remote Sensing Digital Image Analysis – An introduction. Springer Verlag.
- Rydell, B., Skånes, H., Tulldahl, H.M. & Wikström, S.A. 2013. EMMA – Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images. Kustzonen – tillämpning i Åhus. SGI Publikation 10. Statens geotekniska institut, Linköping.
- Shan, J., Toth, C.K. (ed). 2009. Topographic laser ranging and scanning – principles and processes. CRC Press.
- Skånes, H., Glimskär, A. & Allard, A. 2011. EMMA Visual interpretation of vegetation characteristics in laser data – T1 initial report. Institutionen för skoglig resurshushållning, SLU. Arbetsrapport 314.
- Snickars, M., Gullström, M., Sundblad, G., Bergström, U., Downie, A.-L., Lindgarth, M. & Mattila, J. 2014. Species–environment relationships and potential for distribution modelling in coastal waters. *Journal of Sea Research* 85: 116–125.

- Sohlberg, S., Næsset, E., Hansen, K.H. & Christiansen, E. 2006. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 102: 364–376.
- Steinvall, O., Kautsky, H., Tulldahl, M., Wollner, E. 2012. Feasibility Study for Airborne Fluorescence/Reflectivity Lidar Bathymetry. *Proceedings of Laser Radar Technology and Applications XVII*, SPIE Vol. 8379: 837914-1--13.
- Tulldahl, H.M., Vahlberg, C., Axelsson, A., Karlsson, H. & Jonsson, P. 2007. Sea floor classification from airborne lidar data. *Proceedings of Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing III*, 6750, 675003-675001 -- 675012.
- Tulldahl, H.M. & Wikström, S.A. 2012. Classification of aquatic macrovegetation and substrates with airborne lidar. *Remote Sensing of Environment* 121: 347–357.
- Tulldahl, H.M., Philipson, P., Kautsky, H. & Wikström, S.A. 2013. Sea floor classification with satellite data and airborne lidar bathymetry. *Proceedings of Ocean Sensing and Monitoring V*, SPIE Vol. 8724, 87240B.
- Wikström, S.A., Florén, K. & Isæus, M. 2010. Modellering av bottensubstrat, arter och ekologiska samhällen med data från Lidar. Delrapport inom ULTRA-projektet, AquaBiota Water Research.
- Wikström, S.A., Florén, K. & Isæus, M., in prep. Modelling the distribution of subtidal macrophytes using data from bathymetric lidar. Manuskript.

Bilaga 1: Teknisk utblick

Av Ove Steinvall, FOI

Laserskanning (även kallad lidar – *light detection and ranging* – eftersom det är en avståndsmätande teknik), är en av flera fjärranalystekniker som först utvecklats för militära ändamål. Eftersom den tekniska utvecklingen av nya fjärranalystekniker ofta ligger långt före den civila sidan så ges här en teknisk utblick grundad av erfarenheterna på området inom FOI.

Lidartekniken har nu blivit väl etablerad för kartering och fjärranalys för såväl civila som militära ändamål. En god översikt av system och teknikutveckling liksom tillämpningar av topografisk lidar ges av Shan & Toth (2009). Lidartekniken är idag, trots en avsevärd utveckling under de senaste 10–20 åren, fortfarande en relativt dyr och komplicerad sensorteknik. Den framtida tekniska utvecklingen av lidarsystem kommer att präglas av att göra systemen och deras användning kostnadseffektiva, kompaktare, samt ge dem en utökad funktionalitet.

Kostnadseffektiviteten kommer t.ex. att innebära att systemen måste göras mer autonoma samt kunna användas från obemannade plattformar både över land och hav. Vidare måste prestanda utökas så att mer och bättre data kan samlas in per tidsenhet. Detta medför högre spatial upplösning enskilt eller i kombination med större yttäckningshastighet. Det kompakta utförandet kommer att vara motiverat speciellt med anledning av användning från UAV (Unmanned Aerial Vehicles), UGV (Unmanned Ground Vehicles) och ROV (Remotely Operated Vehicles) / AUV (Autonomous Underwater Vehicles).

Den utökade funktionaliteten innebär att man förbättrar och utökar datainsamlingen med avseende på multispektral förmåga samt bearbetning av hela vågformssvaret från lidarn. Nya typer av matrisdetektorer medger samtidig insamling av avstånds- och passiva data inom det synliga, NIR (700–900 nm), SWIR (900–1700 nm) och IR området (2000–5000 nm). Ökad användning av kombinerade system med passiva och aktiva (lidar) sensorer förutses liksom möjligheter att kombinera både topografiska och batymetriska mätningar med samma system. Man kan även tänka sig att man utför atmosfäriska mätningar med ett framtida multifunktionssystem.

Vid sidan av elastisk detektion (detektion vid samma våglängd som den emitterade) kan man även utnyttja inelastisk spridning i form av fluorescens, Raman-spridning, eller spektral absorption för att kunna utöka klassificerings- och kvantifieringsförmågan av det man avkänner.

Nedan beskrivs kort några utvecklingslinjer inom lidartekniken.

Multispektrala lasersystem

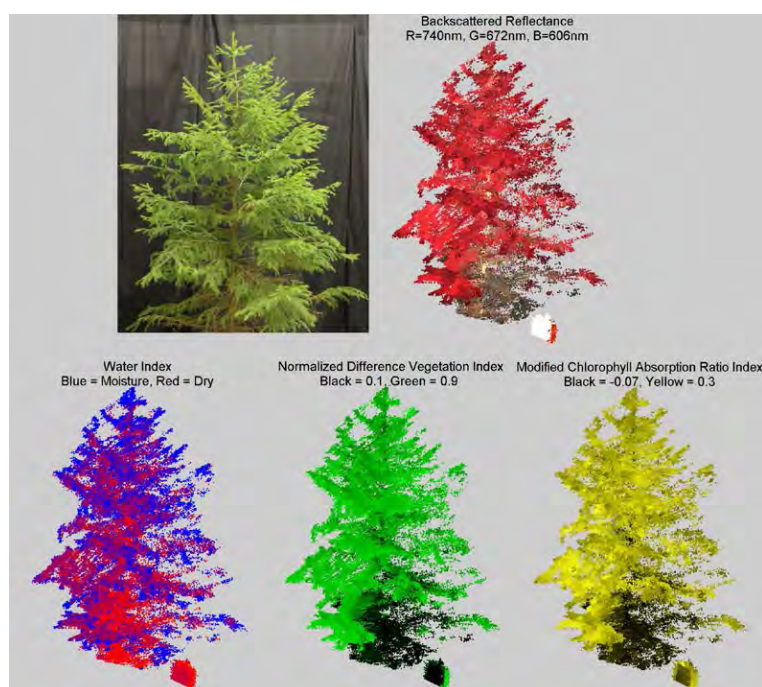
Multispektrala lidarsystem erbjuder nya, unika möjligheter för fjärranalys över land, men är även av intresse för hydrografisk lidar. Lasern emitterar flera våglängder samtidigt och kan kombinera högupplöst vertikal information med spektral information i form av t.ex. den fotokemiska reflexionsfaktorn (PRI) och NDVI

(Normalized Difference Vegetation Index), som är ett värde som från avstånd mäter mängden levande vegetation. Jämfört med det konventionella sättet att kombinera en passiv multi- eller hyperspektral sensor med lidar, ger en ny multispektral lidar bl.a. följande fördelar:

- Genererar reflektionsdata oberoende av solbelysning
- Penetrerar annars skuggade områden där en passiv sensor har svårigheter
- Ger möjlighet att separera träd och buskvegetation från markvegetation.

Förmågan att utföra sådana mätningar kommer att möjliggöra bättre kartläggning av skogens struktur och de processer som är direkt relaterade till fotosyntesen och kommer därför avsevärt förbättra vår förmåga att mäta och kartlägga den markbundna biosfären och förstå kolets kretslopp, marktäckets användning, och den biologiska mångfalden. Hittills har i huvudsak laboratoriemätningar samt teoretisk modellering publicerats inom det område som brukar benämnas MultiSpectral Canopy LIDAR (MSCL) (Woodhouse m.fl. 2011, Morsdorf m.fl. 2009). I detta koncept används 4 laservåglängder (531/550 nm och 690/780 nm) för att samla in PRI and NDVI data. Designstudier för användning av denna lidartyp från rymden pågår i Europa (Jack m.fl. 2011).

Hakala m.fl. (2012) presenterar utformningen av en fullständig-vågforms-lidar baserad på en kontinuumlaser med kontinuerlig avstämbarhet inom det visuella och NIR/SWIR-området (480–2200 nm). Lidarn genererar ett 3D-punktmoln med spektrala, bakåtspridda reflektansdata ur vilka en mängd parametrar om vegetationens tillstånd kan utvinnas; alltifrån klorofyllhalt och vatteninnehåll till PRI och NDVI-index (Figur 1). Den svåraste tekniska utmaningen för multispektral lidar är förmodligen själva laserkällan. Den mest mogna och lämpliga lasern med tillräcklig pulsenergi för att uppnå användning från hög höjd baseras för närvarande på en Nd:YAG-laser som pumpar olika optiskt parametriska oscillator-kristaller (OPO). En sådan laser diskuteras för rymdplacering av en multispektral vegetationslaser (Jack m.fl. 2011a). Andra intressanta lasrar är exempelvis superkontinuumlasern. Denna producerar ett riktat bredbandigt laserljus genom att använda ickelinjära optiska interaktioner i en optisk fiber (se Dudley m.fl. 2006 för en översikt). Frekvensblandningsprocessen exciteras av hög lasertoppeffekt (med puls-toppeffekt på ca 2 – 20 kW) som passerar genom en icke-linjär optisk fiber, varvid ett pulsat, brett laserljusspektrum emitteras. Den kommersiella tillgängligheten av superkontinuumlasertekniken har lett till ett antal tillämpningar bl.a. inom biomedicinsk optik. Emellertid är pulsenergin för en viss färg relativt låg, varför denna teknik måste kombineras med mycket känsliga mottagare (ned till enskilda fotoner) för att kunna användas för fjärranalys över större avstånd.



Figur 1. Ett fotografi av gran och tillhörande 3D-punktmoln som visar olika dataprodukter som utvunnits från det tillbakaspridda svaret från en laboratoriemätning med en multifunktionslidar. För att minska bruset i spektra har i genomsnitt 5-cm voxlar använts. De spektrala indexen har beräknats för varje voxel och resultaten visas i full-3D-punktmoln, som färger för olika index för trädets tillstånd. Från Hakala m.fl. (2012).

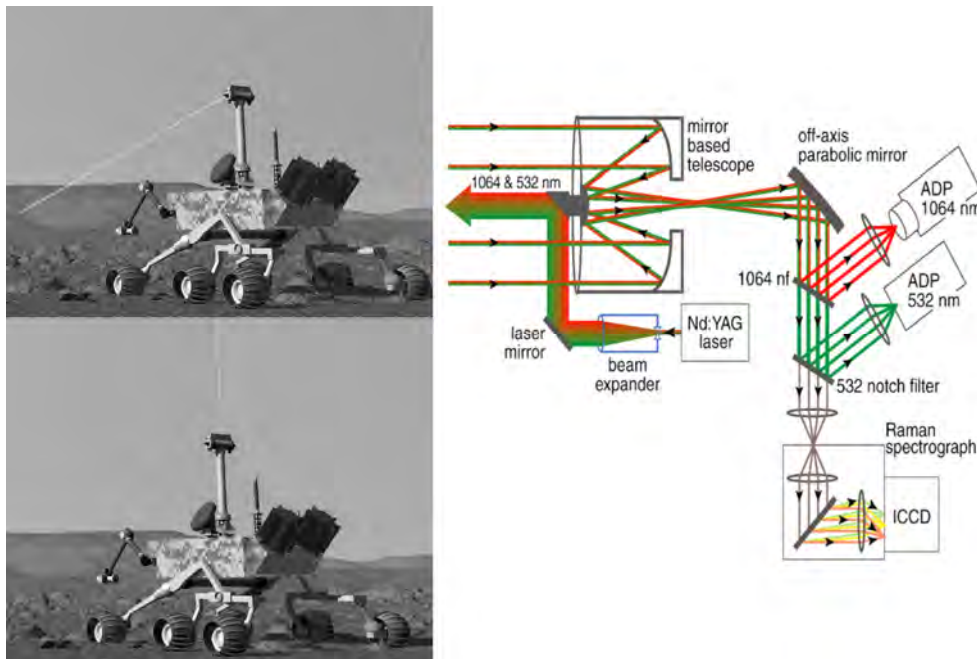
För lidar i hydrografiska tillämpningar erbjuder multispektrala lasrar – företrädesvis inom det synliga våglängdsområdet där vattnets transmission är någorlunda hög – nya möjligheter till att bestämma vattnets inherent optiska egenskaper (Kopilevich & Feigels 2002) liksom bättre möjlighet till bottenklassificering (Tulldahl m.fl. 2013, Steinvall m.fl. 2013). CZMIL, (The Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar) är exempel på ett nytt avancerat lidarsystem för kustnära kartering. Systemet, som kombinerar laser med en hyperspektral kamera samt en digital kamera, kan producera samtidiga högupplösta 3D-data och bilder av stranden och havsbotten på grunda vatten. Avancerade produkter inkluderar kustnära topografi, bentisk klassificering och karaktärisering av vattenkvalitet i både klara och grumliga vatten.

Ett annat exempel på ett avancerat, men ändå kompakt system för kombinerad topografisk och hydrografisk mätning är det svenska AHAB:s (Airborne Hydrography AB) Chiroptera (<http://airbornehydro.com/chiroptera>). Systemet innehåller en laser i det nära infraröda området (1060 nm våglängd) som pulserar vid 400 kHz, en grön (532 nm) laser med 36 kHz pulsrepetitionsfrekvens, samt en 50 megapixel, tre-kanals digital kamera som genererar färgbilder och infraröda bilder.

I en nyligen genomförd studie inom EDA (European Defence Agency) redovisas en översikt av multispektral laserradar och dess tillämpningar för både militära och civila ändamål (Hamoir m.fl. 2011).

Inelastisk lidar

Potentialen för karaktärisering av vegetation med fluorescenslidar har sedan länge påvisats i forskningsstudier men har ännu inte nått någon bred praktisk tillämpning. Tekniken har även använts i studier av föroreningar och t.o.m. insekter och fåglar (Svanberg 2005). Likaså kan Ramantechniken användas för att detektera och identifiera ämnen på molekylnivå. I vissa system kan fluorescens och Ramantechnik förenas. Ett exempel på sådana system är det instrument som utvecklats vid NASA (Abedin m.fl. 2012; Figur 2) för att kartlägga mineraler, organiska ämnen och biogena material, samt utföra atmosfäriska studier av planeter och asteroider.

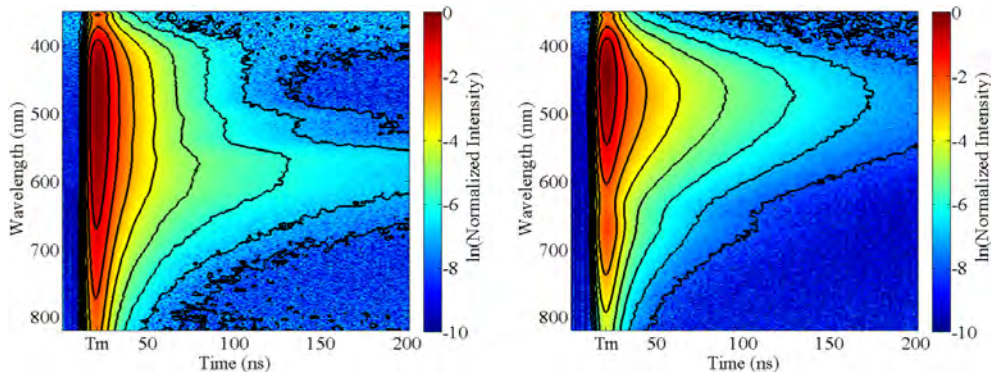


Figur 2. Ett integrerat Raman/Fluorescens Lidarsystem utvecklat av NASA för planetariska studier. Ovan t.v. i land-mode för identifiering av ämnen på ytan och nedan t.v. i atmosfärs-mode för analys av atmosfärens sammansättning och utsträckning. T.h. instrumentets layout. Från Abedin m.fl. 2012.

Laser för analys av vegetation, och då speciellt vegetationstillståndet i form av stress, har analyserats både på laboratorium samt vid fältprov (Edner m.fl. 1995, Chappelle m.fl. 1997, Svanberg m.fl. 1995, Rascher m.fl. 2009). Ett exempel på ett avancerat multifunktions-lidarsystem beskrivs av Weibring m.fl. (2003). Detta har bl.a. använts för mätning av industriella utsläpp av atmosfäriska kvicksilver- och kolväteutsläpp, kartering av vulkaniska svaveldioxidplymer, fluorescens från havsvatten samt för multispektral fluorescens-avbildning av fasaderna på historiska monument liksom för vegetationskartering.

Palombi m.fl. (2013) beskriver ett avancerat lidarsystem för fluorescensmätningar som kombinerat spektral information med tidsupplöst information. Systemet uppges ha 1 ns upplösning i tid och 1 nm i den spektrala dimensionen. Enskilt eller i kombination medger de båda kanalerna en bättre karaktäristik av de fluorescerande ämnena samt tillåter kartläggning av yt- eller volymfördelningen av fluorescensegenskaperna i målet. Figur 3 visar ett exempel på tid-våglängdsspektra från

fluorescensmätningar av två olika objekt: det ena en sandsten som innehåller röda alger och det andra ett stycke glasfiber i epoxiharts.



Figur 3. Tid-våglängdsdiagram för fluorescence uppmätt från två olika prov. Det ena (spektrum t.v.) utgörs av en sandsten som innehåller röda alger och det andra (t.h.) utgörs av ett stycke glasfiber i epoxiharts. Intensitets-skalan är naturlig logaritmisk och normaliserad för varje prov till det maximala värdet i data. Från Palombi m.fl. 2013.

Upptagning av spektra av den typ som illustreras i figur 3 lämpar sig mindre bra för flygburna mätningar, eftersom mättiden är relativt lång i varje mätpunkt (kanske någon minut). Man kan emellertid tänka sig att i ett mobilt system ta en mängd sampel från olika mätpunkter för att kalibrera en mer yttäckande sensor. I framtida system kan man förutse att både excitations- samt emissionskaraktäristik kartläggs för att uppnå bättre klassificering av olika substanser och biotoper med hjälp av inelastisk lidar. En studie av fluorescenssondering av havsmiljön har nyligen bedrivits inom ramen för EMMA-programmet (Steinvall m.fl. 2012). Sammantaget har den tekniska utvecklingen på både datainsamlings- och hanterings-sidan kombinerat med kraftfulla avstämbara laserar och känsliga avbildande sensorer (image intensified I²CCD) lett till utvecklingen av avancerade lidarsystem som på avstånd kan detektera och analysera Raman- och fluorescenssignaler från både mark och hav.

En-foton-detekterande lidarsystem

En av de mer utmanande uppgifterna för lidar-tekniken är att utveckla kostnadseffektiva högkänsliga detektormatriser med hög avstånds-(tids-)upplösning och små pixlar, stora format och höga bildfrekvenser. Denna typ av detektor är avgörande för att minska kravet på snabb scanning och möjliggöra snabb datainsamling över stora områden med samtidig hög rumsupplösning. Högkänsliga detektormatriser kommer också att möjliggöra passiv bildsamling till exempel i SWIR-regionen med utnyttjande av nattstrålning (Night Glow). APD-matriser (Avalanche Photodiode) baserade på kvicksilvertellurid (CMT) utvecklas av flera aktörer, som till exempel Raytheon (Jack 2011, Jack 2012), Sofradir/Leti (de Borniol 2010) och Selex (Ashcroft & Baker 2010). Detektorer baserade på InGaAs och InGaAs/InP TE EBCMOS har också rapporterats (<http://www.sensorsinic.com>; <http://www.raptorphonics>; <http://intevac.com/>).

Raytheon utvecklar linjär-mode-detektorer med en-fotonkänslighet i matriser upp till 256×256 element. Linjär-mode-detektorer uppvisar många fördelar jämfört med de som arbetar i Geiger-mode, vilka ger ett pulssvar oberoende av hur många simultana fotoner som träffar detektorn. Dessa fördelar inkluderar: avsaknad av efterpulsning och dödtid; puls-till-puls tidsupplösning i nanosekundstorlek; samt robust funktion i närvaro av skymmande mål (vegetation, rök etc.) eller objekt med varierande reflektionsförmåga (Marino m.fl. 2009). Raytheon hävdar vidare att så låg mörkerström som 1 elektron / sekund kan uppnås.

Selex (Ashcroft & Baker 2010) har utvecklat en detektor som kan växlas i olika arbetssätt, från detektion inom det termiska våglängdsområdet till passiv eller aktiv avbildning inom SWIR (900–1700 nm). Man har förhoppning om att kunna utveckla en sådan detektor med fullt TV-format (520×640 element).

Fotonräkning med detektormatriser arbetande i s.k. Geiger-mode har använts i olika lidarsystem företrädesvis för militära karteringsändamål (Vaidyanathan m.fl. 2007, Marino m.fl. 2005). Matriser i storlekar om 32×128 element tillverkas nu kommersiellt (Entwistle m.fl. 2012). USA har utvecklat ett lidarsystem som kallas HALOE (High Altitude Lidar Operational Experiment) som används i Afghanistan (med en yta som är ca 1,5 gånger Sveriges) för att kartera hela landet med 20 cm markupplösning på ca 90 dygn om man kunde mäta kontinuerligt utan uppehåll. Man uppger en ytavverkningshastighet på $300 \text{ km}^2 / \text{timme}$, vilket för en transversell upplösning på 20 cm innebär en ekvivalent pulsfrekvens på 2 MHz, vilket är ca 10 gånger högre än vad dagens kommersiella system förmår. Man kan dessutom arbeta från en mycket hög höjd (14 900 m). Figur 4 visar exempel på data samt det flygplan som tillåter insamling från hög höjd.



Figur 4. T.v. ett exempel på dataprodukt från HALOE (High Altitude Lidar Operational Experiment) upptaget från 14 900 m höjd. T.h. Ett flygplan för datainsamling från hög höjd. Från US Army GeospatialCentre, program Buckeye.

Geiger-mode-tekniken har en nackdel innebärande att det ”klick” eller den signal som genereras för varje foton som detekteras inom det armerade tidsintervallet i stor omfattning utgörs av bakgrundsbrus från dagsljus. Detta leder till en hel del efterprocessering innan den färdiga produkten kan levereras med tillräcklig kvalitet.

Fotonräknande matriser har ännu inte vunnit fullt insteg i kommersiella lidarsystem, men så kommer med stor säkerhet att ske när tekniken mognat och priset på detektormatriser sjunkit från dagens nivå. Den stora fördelen med fotonkänslighet är att måttliga lasereffekter kan användas för att täcka stora ytor per tidsenhet. Gei-

ger-mode-tekniken är idag dominerade med avseende på en-fotondetektion och den ger tillsammans med kortpuls laser hög avståndsnoggrannhet (5–10 cm).

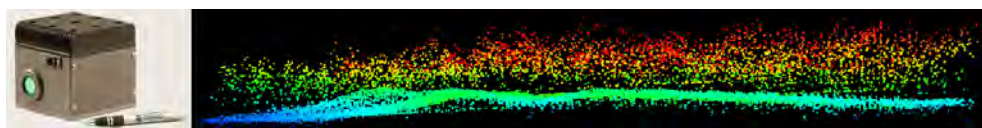
Lidar för obemannade plattformar

Obemannade plattformar förväntas få en allt ökande roll inom bl.a. fjärranalys. För närvarande hålls utvecklingen för civila ändamål något tillbaka innan frågan om obemannade flygfarkoster i civilt luftrum klarlagts. En hel del försöksverksamhet kring UAV och lidar för t.ex. skogskartering pågår (Wallace m.fl. 2012a, Wallace m.fl. 2012b, Lin m.fl. 2011). Phoenix Aerial Systems (<http://www.phoenix-aerial.com/>), har utvecklat och demonstrerat vad som uppges vara världens minsta och lättaste UAV-lidar plattform (figur 5). Den väger totalt 10 kg, varav lidarsystemet (14,4 cm högt, 8,6 cm diameter) bara väger 2 kg. Lasersystemet är en Velodyne HDL-32E-sensor, som sveper 32 laserlinjer över ett 40° vertikalt synfält och genererar 700 000 avståndspunkter per sekund. Sensorn roterar 360° upp till 20 gånger per sekund och ger avstånds- och intensitetsinformation över ett område av 1–100 meter, med en typisk noggrannhet som är bättre än ± 2 cm.



Figur 5. T.v. Ett system som uppges vara världens minsta UAV-lidar utvecklat av Phoenix Aerial Systems. I mitten den 2 kg tunga sensorn och t.h. ett exempel på data (träd plus en del av en idrottsanläggning).

Systemet ovan har kort räckvidd, kanske 100 meter. Det finns dock mycket kompakta sensorer som utnyttjar fokalplanematiser med räckvidder mellan 0,5–1 km för FOV = 3×3 respektive 9×9 grader. Dessa system har utvecklats för obemannade plattformar, inklusive rymdtillämpningar. Ett exempel, benämnt Tiger Eye och utvecklat av Advanced Scientific Concepts i USA, visas i figur 6. Sensorn innehåller en 128×128 InGaAs APD-detektor-matris. En ögonsäker laser med ca 5 mJ pulsenergi och 30 Hz pulsrepetitionsfrekvens medger videotakt. Detta motsvarar en pixeltakt på nära 500 000 / s. Denna teknologi har utvecklats av bl.a. Ball Aerospace för karteringsändamål (Ramond m.fl. 2011). Figur 6 visar ett exempel på kartering vid sidan av själva kamera-enheten.



Figur 6. T.v. 3D-kameran Tiger Eye som levererar intensitets- och avståndsdata med videotakt i formatet 128×128 pixlar. T.h. exempel på karteringsdata över ett skogsparti upptaget med denna typ av sensor. Från Ramond m.fl. (2011).

För mer kvalificerade UAV:er som medger större ytavverkning från högre flyghöjder finns ett antal lidarsystem i klassen 25 kg som kan bäras av medelstora plattformar. Här kan nämnas tillverkare som AHAB (Dragon Eye, se figur 7), Optech (Orion) samt Riegl (RIEGL LMS-Q240i). Dragon Eye har en laser med en pulsrepetitionsfrekvens > 300 kHz, full vågformslagring, samt en noggrannhet < 2 cm från 500 m höjd. Hela systemet vikt är < 25 kg, vilket gör ett system som detta lämpligt för medelstora UAV:er. Skannern är en så kallad Palmer-skanner, som ger ett ellipsoidmönster med infallsvinklar mellan 14° till 20°.

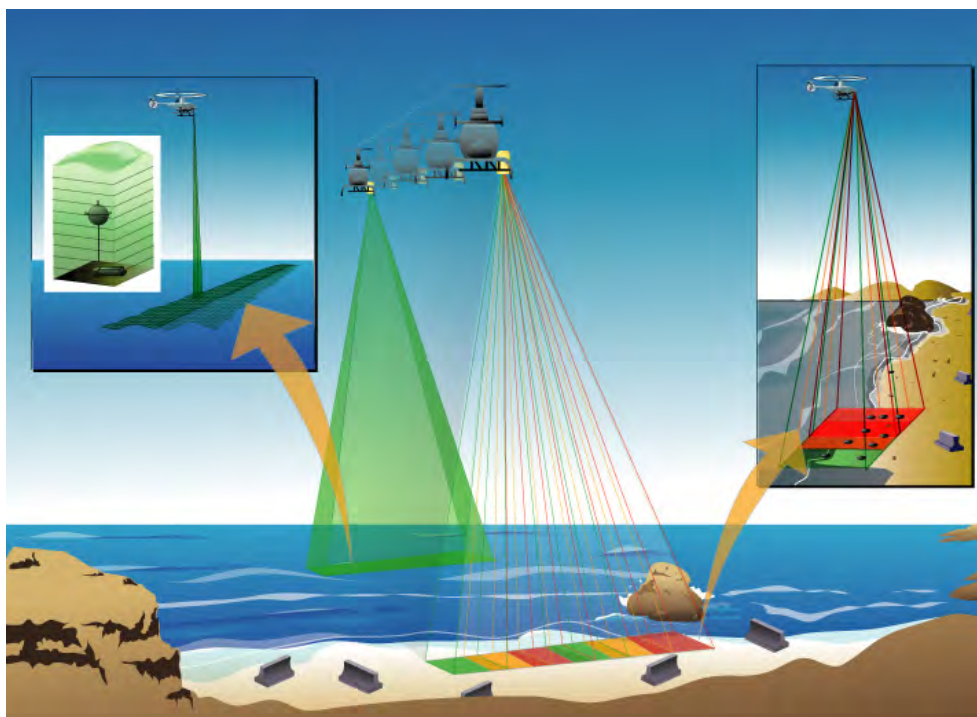


Figur 7. Ett typisk kompakt skannande lidarsystem. Dragon Eye utvecklas av AHAB i Sverige.

Det amerikanska försvaret använder UAV:er utrustade med lidar för militär kartering, inklusive batymetri och mindetektion. Ett system benämnt Buckeye UAS används för kartering i Afghanistan. UAV-plattformen har 10 timmars uthållighet samt arbetar på höjder mellan 900–2400 m över marknivå. Sensorerna utgörs av en 39-megapixel-kamera samt Optechs Orion lidar. Kameran ger ett fotavtryck på marken mellan 3–5 cm och lasern 50 cm. Räckvidden för RF länken som används för flygkontroll samt nedtankning av data är 80 km och datahastigheten är 6 Mbit / sekund.

Hydrografisk lidar från UAV har hittills i huvudsak begränsats till militära system. Dessa har varit och är inriktade på mindetektion och snabb kustnära kartering (REA, Rapid Environmental Assessment). US Navy har under lång tid utvecklat ett UAV buret lidarsystem kallat ROAR (Rapid Overt Airborne Reconnaissance; figur 8). Nyligen har man lagt ett utvecklingsuppdrag på 20 miljoner dollar för en operativ version hos BAE USA. Systemet innehåller en snabbskannande lidar, en 3D-avbildande laserkamera, samt algoritmer för att detektera botten och hotande objekt i vattenvolymen samt på land.

Mycket tyder dock på att den civila användningen av hydrografisk lidar kommer att utnyttja obemannade plattformar. Satellitbilder ger en möjlighet att samla stora geografiska vyer av data, men den tillgängliga informationen från satelliterna kan begränsas bl.a. av den rumsliga och spektrala upplösningen hos sensorn, samt moln m.m. Bemannad flygburen fjärranalys kompletterar satelliter men till en hög kostnad och med restriktioner för flygtillstånd och uthållighet. I vissa typer av operationer är UAV är billigare och mer flexibla att använda än bemannade flygplan. Användning av UAV-plattformar och tillhörande sensorer samordnas med in situ och andra fjärrsensorer, för att karaktärisera kustnära hav för habitatövervakning, övervakning av olyckor och otillåtna utsläpp, resurshantering m.m.



Figur 8. Illustration av användning av UAV-buren lidar för militära tillämpningar innebarande djupkartering, mindetektering samt topografisk sondering. Från US Navy/ROAR.

En typ av obemannade farkoster för uthållig havsobservation är s.k. gliders. Dessa kan också tänkas bära lidarsystem för ett utöka möjligheten och volymtäckningen för kartering av vattenkvalitet samt bottenförhållanden.

Sammanfattningsvis har den tekniska utvecklingen i kombination med ett utökat sonderingsbehov medfört att lidarsystem i ökad utsträckning kommer att användas från obemannade plattformar. Många tekniska framsteg medverkar till att göra detta möjligt t.ex. små kompakta lasrar, bättre detektorer, inte minst i form av fotonkänsliga matriser, men även kraftigt utökad datalagrings- och processeringsförmåga i plattformen. Även datalänkar har fått utökad kapacitet för att sända data till centrala enheter, där fusion med andra data kan ske i nära realtid.

Källförteckning

- Abedin, M.N., Bradely, A.T., Hibberd, J., Refaat, T.F., Ismail S., Sharma, S.K., Misra, A.K., Garcia, C.S., Mau, J. & Sandford, S.P. 2012. Planetary surfaces and atmospheric characterization using combined raman Fluorescence and lidar instrument from rovers and landers. 43rd Lunar and Planetary Science Conference.
- Ashcroft, A. & Baker, I. 2010. Developments in HgCdTe avalanche photodiode technology and applications. Proc. of SPIE, Vol. 7660.
- deBorniol, E., Guellec, F., Rothman, J., Perez, A., Zanatta, J.-P., Tchagaspian, M., Castelein, P., Destéfanis, G., Peyrard, J.C. & Pistone, F. 2010. GgCdTe-based APD focal plane array for 2D and 3D active imaging: first results on a 320x256 with 30µm pitch demonstrator. Proc. of SPIE Vol 7660.

- Chappelle, E.W., Lawrence A.C., McMurtrey, J.E., Kim, M.S. & Daughtry, C.S.T. 1997. Fluorescence: A diagnostic tool for the detection of stress in plants. *Proc. of SPIE Vol. 2959, Remote Sensing of Vegetation and Sea*, doi: 10.1117/12.264261
- Dudley, J.M., Genty, G. & Coen, S. 2006. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Rev. Mod. Phys.* 78: 1135–1184.
- Edner, H., Johansson, J., Ragnarsson, P., Svanberg S. & Wallinder, E. 1995. Remote monitoring of vegetation using a lidar system in spectrally resolving and multi-spectral imaging mode. *EARSeL Advances in Remote Sensing* 3: 198–206.
- Entwistle, M., Itzler, M.A., Chen, J., Owens, M., Patel, K., Jiang, X., Slomkowski, K. & Rangwala, S. 2012. Geiger-mode APD Camera System for Single Photon 3-D LADAR Imaging, *Proc. of SPIE*, Vol. 8375, 83750D.
- Hakala, T., Suomalainen, J., Kaasalainen, S. & Chen, Y. 2012. Full waveform hyperspectral LiDAR for terrestrial laser scanning, *Optics Express* 20: 7119–7127.
- Hamoir, D., Hespel, L., Déliot, P., Boucher, Y., Steinvall, O., Ahlberg, J., Larsson, H., Letalick, D., Lutzmann, P., Repasi, E. & Ritt, G. 2011. Results of ACTIM: an EDA study on spectral laser imaging. *Proc. of SPIE 8186, Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications V*, 81860M (October 05, 2011).
- Jack, J., Rumi, E., Henry, D., Woodhouse, I., Nichol, C. & Macdonald, M. 2011. The design of a Space-borne Multispectral Canopy LiDAR to Estimate Global Carbon Stock and Gross Primary Productivity, *Proc. of SPIE Vol. 8176*, 81761O.
- Jack, M., Chapman, G., Edwards, J., McKeag, W., Veeder, T., Wehner, J., Roberts, T., Robinson, T., Neisz, J., Andressen, C., Rinker, R., Hall, D.N.B., Jacobson, S.M., Amzajerdian, F. & Cook T.D. 2012. Advances in LADAR Components and Subsystems at Raytheon. *Proc. of SPIE Vol. 8353*, 83532F
- Jack, M., Wehner, J., Edwards, J., Chapman, G. 2011. HgCdTe APD-based Linear-Mode Photon Counting Components and Ladar Receivers. *Proc. of SPIE Vol. 8033*, 80330M.
- Kopilevich, Y.I. and Feigels, V.I. 2002. Multispectral lidar sounding of ocean waters, *Proc. of SPIE 4488, Ocean Optics: Remote Sensing and Underwater Imaging*, 51.
- Lin, Y., Hyypä, J. & Jaakkola, A. 2011. Mini-UAV-Borne LIDAR for Fine-Scale Mapping, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8:426-430.
- Marino, R.M. & Davis Jr W.R. 2005. Jigsaw: A FoliagePenetrating 3D Imaging Laser Radar System. *Lincoln Laboratory Journal* 15: 23–36.

- Marino, R., Richardson, M.J. & Garnier, R. 2009. Photon-Counting Lidar for Aerosol Detection and 3-D Imaging. *Proc. of SPIE Vol. 7323*, 73230H.
- Morsdorf, F., Nichol, C., Malthus, T. & Woodhouse, I.H. 2009. Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment* 113: 2152–2163.
- Palombi, L., Alderighi, D., Cecchi, G., Raimondi, V., Toci, G. & Lognoli, D. 2013. A fluorescence LIDAR sensor for hyper-spectral time-resolved remote sensing and mapping. *Optics Express* 21: 14736–14746.
- Ramond, T., Saiki, E., Weimer, C., Applegate, J., Hu, Y., Delker, T., Ruppert, L. & Donley B. 2011. Topographic Mapping Flash Lidar for Multiple Scattering, Terrain, and Forest Mapping, *Proc. of SPIE Vol. 8037*, 803710.
- Rascher, U. et.al. 2009. CEFLES2: the remote sensing component to quantify photosynthetic efficiency from the leaf to the region by measuring sun-induced fluorescence in the oxygen absorption bands. *Biogeosciences* 6: 1181–1198.
- Shan, J. & Toth, C.K. 2009. Topographic laser ranging and scanning – Principles and Processing. CRC Press.
- Steinvall, O., Kautsky, H., Tulldahl, M. & Wollner, E. 2012. Feasibility study for airborne fluorescence/reflectivity lidar bathymetry. *Proc. of SPIE, Vol. 8379*
- Svanberg, S. 2005. Fluorescence spectroscopy and imaging of lidar targets. In: Fujii, T. & Fukuchi, T. (eds) *Laser Remote Sensing*. CRC Press.
- Svanberg, S. 1995. Fluorescence lidar monitoring of vegetation status. *Physic Scripta T58*: 79–85.
- Tulldahl, H.M., Philipson, P., Kautsky, H., Wikström, S.A. 2013. Sea floor classification with satellite data and airborne lidar bathymetry. *Proc. of SPIE Vol 8724*, 8724B.
- Vaidyanathan, M., m.fl. 2007. Jigsaw Phase III: A Miniaturized Airborne 3-D Imaging Laser Radar with Photon-Counting Sensitivity for Foliage Penetration. *Proc. of SPIE, Vol. 6550, Laser Radar Technology and Applications XII*, pp. 65500N.
- Wallace, L.O., Lucieer, A. & Watson, C.S. 2012a. Assessing the feasibility of UAV-based LiDAR for high resolution forest change detection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B7*
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson C. & Turner, C. 2012b. Development of a UAV-LiDAR System with Application to Forest Inventory. *Remote Sensing* 4: 1519–1543.
- Weibring, P., Edner, H. & Svanberg, S. 2003. Versatile mobile LiDAR system for environmental monitoring. *Appl. Opt.* 42: 3583–3594.

Woodhouse, I.H., Nichol, C., Sinclair, P., Jack, J., Morsdorf, F., Malthus, T.J. & Patenaude, G. 2011. A Multispectral Canopy LiDAR Demonstrator Project. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 8: 839–843.

Bilaga 2: Fotogrammetriska arbetsstationer

Av Helle Skånes och Göran Alm, Stockholms universitet

De första digitala fotogrammetriska arbetsstationerna för stereobetraktning av flygbilder använde CRT-skärmar. Dessa var de enda skärmarna som kunde ge 120 Hz uppdateringsfrekvens, vilket är ett grundkrav för att få flimmerfri 3D-bild. På dessa monterades antingen polarisationsfilter, med passiva glasögon, eller aktiva synkglasögon. Efter en skakig inledning med utveckling utan tendens till standarder har marknaden för platta 3D-skärmar utvecklats explosionsartat och nu går dessa att köpa till förhållandevis låga priser. Den vanligaste glasögonformen är NVIDIA:s 3D-vision glasögon med LCD-teknik och synkroniseringsbox som kopplas till datorn via USB-koppling. Det viktigaste man ska tänka på vid köp av 3D-skärmar är betraktningssvinkel (så bred som möjligt) samt ljusstyrka och kontrast (aktiva stereoglasögon tar mycket ljusstyrka) och att uppdateringsfrekvensen ska vara minst 120 Hz. För optimalt arbete krävs dubbla bildskärmar varav en ska vara 3D-kompatibel och den andra helt vanlig för GIS/CAD-applikationen. Dessa båda skärmar måste kunna användas utan att den enklare med lägre upplösning flimrar. Om flimmer skulle uppstå på 2D-skärmen avhjälps detta som regel enkelt genom att skärmen återställs till fabriksinställning via menyknappar på själva skärmen.

Hårdvarukraven är relativt enkla: en bra PC med 64 bitars operativsystem och mycket RAM (minst 6 GB internminne), samt ett grafikkort med minst 1 GB minne som klarar OpenGL och s.k. Quad buffer-teknik. OpenGL är en plattformsoberoende och öppen standard för att kunna rendera 2D- och 3D-grafik och i kombination med Quad-buffrad stereo ges en bättre stereoeffekt genom att använda fyra buffringar istället för traditionella två buffringar (se mer om detta på http://www.nvidia.com/object/quadro_stereo_technology.html). Detta är mycket tekniska beskrivningar, men det är viktigt att användaren köper rätt typ av grafikkort och skärmar som stöder dessa tekniker, annars är det inte säkert att funktionaliteten kan garanteras. För optimal konfiguration hänvisas till respektive mjukvaruleverantör som ofta redovisar vilken hårdvara de rekommenderar och stödjer.

3D-gränssnitt – mjukvara

Kartering från flygbilder sker i dagens fotogrammetriska arbetsstationer genom en integrerad process mellan digitala bilder, en fotogrammetrisk mjukvara och ett GIS- eller CAD-program. Detta gör att flygbildstolkningen numera kräver andra tekniska kunskaper än tidigare, samtidigt som en del moment har blivit mycket enklare. Det är inte säkert att kopplingen mellan avancerade fotogrammetriska system kan ske till valfri GIS-miljö. Detta gäller särskilt så kallade open-source-programvaror. Även här kan fotogrammetriprogramleverantören bäst tala om vilka GIS- eller CAD-program som deras datafångst arbetar mot.

Arbetet med geometrisk orientering av bilderna har blivit enklare eftersom den digitala fotogrammetrin medger goda möjligheter till interaktiv blocktriangulering

(fotogrammetrisk orientering av flera bildstråk i ett block), vilket i sin tur möjliggör framställning av stora sammanhängande ortofoton, ytmodeller och stereo-modeller med sömlösa övergångar, vilket är till stor nytta för all rumslig analys, såväl i GIS som i visuellt stereoarbete. Förbättrad upplösning i den nya generationens digitala flygbilder som beskrivs i kapitel 4 är självklart positiv, men samtidigt innebär detta att bildstorleken blir allt större. Med en bildstorlek på närmare 800 MB (för Ultra Cam Eagle bilder) mot tidigare drygt 300 MB (för DMC bilder) så ställs än större krav på datorkapacitet för att hantera ett större antal bilder i samma block. Flera fotogrammetriska system erbjuder komprimering av filer för enklare och snabbare hantering. Observera dock att dessa format inte alltid är läsbara i andra system varför originalbilder alltid ska säkras i en arkiverad backup. Det är också viktigt att fotogrammetriska bakgrundsdata (orienteringsparametrar) alltid sparas i direkt anslutning till dessa bilder så att de inte går förlorade.

När det gäller orientering så finns primärt två olika typer av flygbildsteknik. Den ena är den som sker i avancerade system och bygger på fotogrammetrisk orientering. Den andra är en enklare form av stereomontage utan fotogrammetrisk orientering till ett känt koordinatsystem. Den största skillnaden mellan dessa båda stereotyper är att den fotogrammetriska orienterar bilderna rent matematiskt så att man kan mäta direkt i dem och digitalisera direkt in i ett ortogonalt koordinatsystem och därmed kan använda insamlade data direkt i en GIS-miljö. Den enklare metoden kan skapa bra stereoupplevelse, men bilderna är bara relativt orienterade utan någon koppling till ett känt koordinatsystem och förblir centralprojicerade och kan inte mätas i. Fotogrammetriska och icke-fotogrammetriska stereoinstrument fanns även i den tidigare analoga miljön (Ottoson m.fl. 2004). Den fotogrammetriska orienteringsmetoden kräver avancerad mjukvara som ofta är kostsamt att investera i, den enklare kräver bara ett enklare stereoprogram, som StereoPhoto Maker (<http://stereo.jpn.org/eng/stphmkr/>), som finns att hämta ner gratis från internet. Det finns andra enklare 3D-viewers på nätet, men dessa har sällan kapacitet att betraktas med hjälp av aktiva glasögon utan är främst begränsade till anaglyf teknik (glasögon med olika färg, typiskt rött och cyan). Anaglyf teknik ger god 3D-upplevelse utan krav på särskild 3D-skärm och kan dessutom skrivas ut på papper. Tekniken är dock tröttande över tid och dessutom har man svårt att se olika nyanser i IRF-bilder i den vanligaste färgkombinationen där det ena glasögat är rött. När det gäller enkel bildtolkning i t.ex. inlärnings- eller kalibreringssyfte utan krav på datafångst så är StereoPhoto Maker ett alldeles utmärkt program. Det kräver ingen installation och genererar mycket god stereoeffekt, även genom aktiva glasögon, om än i sämre upplösning än originalbilderna. Det senare problemet minskar när man har en snabb dator med bra grafikkort och stor minneskapacitet. För stereobetraktning med NVIDIA:s 3D Vision-system krävs ungefärligt samma hårdvarukonfiguration som för mer avancerad digital fotogrammetri i 3D. Kraven på grafikkortets kapacitet och datorns internminne är dock betydligt lägre.

För den som däremot ska tolka med syftet att fånga data och skapa en vegetationsdatabas så räcker StereoPhoto Maker inte. Då behöver man verkligen arbeta med en fotogrammetrisk programvara kopplad till ett GIS eller CAD-system. Vil-

ket system man väljer beror på vilka behov och funktionalitetskrav man har. Exempel på avancerade fotogrammetriska system är:

- *DAT/EM Summit Evolution Professional* (avancerad fotogrammetri) och *LITE* (begränsad fotogrammetri). Detta system erbjuder även viewport-betraktning, vilket innebär att man kan ha flera bildgenerationer öppnade vid samma tillfälle, något som avsevärt underlättar förändringsanalys och övervakning. www.datem.com
- *ERDAS Imagine Photogrammetry* (avancerad fotogrammetri men med begränsad stereo- och datafångstkapacitet) och *Stereo Analyst for ArcGIS* som integreras i *ESRI ArcGIS* (god stereo- och datafångstkapacitet men begränsad fotogrammetri). <http://geospatial.intergraph.com>
- *ESPA 3D*. www.espasystems.fi
- *Delta DPS*. www.vingeo.com
- *SOCET GXP*. www.socetgxp.com

Det finns sammantaget många olika alternativ för den som vill sätta upp en arbetsstation för digital fotogrammetri i 3D och visuell lasertolkning. Av ovanstående kapitel framgår tydligt att detta kräver väl genomtänkt planering kring såväl hårdvara som mjukvara men att det är mycket givande redskap i arbetet med natur- och miljövårdsinriktad landskapsanalys.

Bilaga 3: Länkar

<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html> – länk till *FUSION* som är en fri programvara för att bearbeta laserdata för vegetationsanalys

<http://www.fugroviewer.com/> – fri programvara för att titta på 3D-laserdata

<http://www.lantmateriet.se/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/Om-geodesi/Transformationer/Gtrans/> - programvara för koordinattransformation av 3D-data.

<https://swepos.lantmateriet.se/>

<http://www.lantmateriet.se/Kartor-och-geografisk-information/Hojddata/Fakta-om-laserskanning/>

<http://appliedimagery.com/> – fri och licensierad programvara för att bearbeta och visualisera laserdata

<http://www.datem.com/> – licensierad programvara för hantering av laserdata tillsammans med fotogrammetriska tillämpningar

<http://www.lantmateriet.se/om-lantmateriet/samverkan-med-andra/handbok-i-mat--och-kartfragor-HMK/> – HMK-rapporterna som anger standarder för datainsamling

<http://www.lantmateriet.se/Maps-and-geographic-information/GPS-and-geodetic-surveys/Geodesy/Transformations/Gtrans/> – Lantmäteriets program *Gtrans*, för transformation av datakoordinater

<http://www.nvidia.com> – 3D-grafikkort och stereogränssnitt med glasögon

<http://stereo.jpn.org/eng/stphmkr/> – Gratis ickefotogrammetrisk 3D-mjukvara

Flygburen laser och digitala bilder för kartering och övervakning av akvatisk och terrester miljö

RAPPORT 6633

NATURVÅRDSVERKET
ISBN 978-91-620-6633-8
ISSN 0282-7298

Rapporten uttrycker nödvändigtvis inte Naturvårdsverkets ställningstagande. Författaren svarar själv för innehållet och anges vid referens till rapporten.

Denna rapport sammanfattar resultat från forskningsprogrammet EMMA - Environmental Mapping and Monitoring with Airborne laser and digital images. EMMA-programmet pågick under åren 2009–2013 och finansierades av Naturvårdsverkets miljöforskningsanslag.

Rapporten beskriver metoder för att använda data från flygburen laserskanning för miljöövervakningens och naturvårdens behov av att kartlägga vegetation såväl på land som på grunda havsbottnar.

Resultatet för den akvatiska miljön visar på ett antal tillämpningar som direkt kan omsättas i praktiken. Undersökningar med laser i pilotområden gav till exempel bra resultat vid kartläggning av hårda respektive mjuka bottenar.

Inom EMMA-programmets terrestra delar har data från flygburen laser gett information om markens form, vegetationens höjd, slutenhet och i viss utsträckning även den vertikala skiktningen och fördelningen av vegetationen.

Användningen av färginformation från digitala flygbilder tillsammans med laserdata har undersökts i såväl EMMA-programmets akvatiska som terrestra del och i den terrestra delen har automatiserad användning av tredimensionella punktmoln från matchade flygbilder undersökts.

En ansatt i EMMA-programmet har varit att integrera akvatiska och terrestra miljöer. Detta gjordes i ett pilotområde där resultat från laserskanning kombinerades med tolkning av flygbilder och ett sömlöst kartsikt av kustzonen skapades.



KUNSKAP DRIVER
MILJÖARBETET FRAMÅT

NATUR
VÅRDS
VERKET