

Seminarieuppsatser nr 130

Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i stormfällan efter stormen Gudrun med hjälp av satellitdata

Tomas Johansson

2006
Centrum för Geobiosfärvetenskap
Naturgeografi och Ekosystemanalys
Lunds Universitet
Sölvegatan 12
223 62 Lund



Uppskattning av nettoprimärproduktionen (NPP) i
stormfällen efter stormen Gudrun med hjälp av
satellitdata

Tomas Johansson
Magisteruppsats i Naturgeografi och Ekosystemanalys

Handledare:
Lars Eklundh, Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemanalys

Institutionen för Naturgeografi och Ekosystemanalys, Lunds Universitet, 2006

Abstract

On the night between the 8th and 9th of January 2005 one of the worst wind storms Sweden has experienced took place. The storm caused damage to 270 000 ha of forest and $75 \cdot 10^6$ m³ wood. Due to the great areas affected, this event has a significant effect on the forest carbon balance. The aim of this study includes determining the usefulness of MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) NDVI (normalized difference vegetation index) and a LUE-model (light-use efficiency) on estimating change in forest NPP (net primary production) caused by the wind throw Gudrun, as well as to present difficulties and suggestions to overcome these problems. Forest NPP prior to the wind throw (year 2000, 2003 and 2004) was well estimated using the LUE-model, with values comparable to NPP of a similar forest. However, post-disturbance NPP seems to be overestimated, probably due to a variety of reasons. The decrease in NDVI after the storm is not in the expected range, with the higher values probably caused by non-removed vegetation (dead and alive) in the wind throw sites. The spatial resolution of 250 m for MODIS data makes it difficult to find pure pixels, i.e. pixels containing only wind throw sites. Pixels will be mixed to some extent, representing both wind throw areas and forest, hence increasing NDVI from that of a pure wind throw pixel. A constant value of the light-use efficiency was used for all the years in this study, which introduces large uncertainty to the results. The value used was calculated for a mature forest, and thus not appropriate for a wind throw area. Thus, a constant value of the light-use efficiency can further contribute to a high NPP after the storm. The method of estimating NPP should be able to give more accurate results if a carefully estimated light-use efficiency is to be used, and if the NDVI values are corrected for non-photosynthetic vegetation.

Sammanfattning

Skogarna på den norra hemisfären har en betydande roll i den globala kolbalansen på grund av deras förmåga att agera som kolkälla. En annan aspekt som gör de intressanta är deras känslighet för tänkbara kommande klimatförändringar där en möjlig följd är ökad störningsfrekvens. Störningar (som bland annat innefattar storm, insektsangrepp och brand) påverkar skogens kolbalans genom att minska upptaget och öka utsläppen av kol. En framtida ökad störningsfrekvens kan göra att skogen som tidigare var en kolsänka istället blir en källa för atmosfäriskt kol. I Sverige är storm en av de naturliga störningar som har störst påverkan på skogen, och natten mellan den 8 och 9 januari 2005 härjade stormen Gudrun som är en av de värsta stormarna som Sverige upplevt i modern tid. 270 000 ha skog drabbades och $75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ virke förstördes. På grund av de stora arealer som drabbades har denna händelse en betydande påverkan på skogens kolbalans.

Vegetationens upptag av kol från atmosfären bestäms av nettoprimärproduktionen (NPP), vilken är en viktig variabel att bestämma vid uppskattningar av kolbalansen. Ett sätt att uppskatta NPP med hjälp av satellitdata är att använda NDVI (*normalized difference vegetation index*) och en enkel LUE-modell (*light-use efficiency*). NDVI är ett vegetationsindex som används för att få en uppfattning om vegetationens egenskaper och hälsotillstånd, och i denna studie användes tidsserier från MODIS (*moderate resolution imaging spectroradiometer*) NDVI med 250 meters upplösning från 2000 till 2005. LUE-modellen är en metod som bygger på antagandet att växternas upptag av kol är proportionell mot mängden absorberat PAR (*photosynthetically active radiation*), $NPP = \epsilon \times \text{absorberat PAR}$. PAR är det ljus som växterna absorberar och använder som energi vid fotosyntesen och mängden absorberat PAR kan erhållas med hjälp av NDVI. ϵ är en effektivitetskonstant som beskriver vegetationens utnyttjande av ljus. I syftet med detta arbete ingår att utvärdera huruvida det är möjligt att använda medelupplösande MODIS NDVI och LUE-modellen för att uppskatta förändring i skogens NPP orsakad av stormen Gudrun, samt belysa och ge förslag på åtgärder för möjliga problem.

Skogens NPP före stormen Gudrun uppskattas väl och värdena är jämförbara med de för en liknande skog. Emellertid verkar det som att NPP efter stormen är överskattat, vilket kan ha sin grund i ett antal olika saker. NDVI-värdena, och följaktligen NPP, sjunker inte så mycket efter stormen som man skulle kunna vänta sig. Detta skulle kunna förklaras av påverkan av i stormfällena kvarliggande vegetation, död som levande. MODIS-data har en rumslig upplösning på 250 meter, och det kan vara svårt att hitta rena pixlar (bara stormfälle). En blandning av skog och stormfälle kan höja NDVI något jämfört med en helt ren pixel med stormfälle. Vidare har effektivitetskonstanten i LUE-modellen en stor betydelse i detta fall då ett konstant värde användes för alla år, även efter stormen. Värdet som användes är framtaget för en barrskog och kan därmed inte sägas vara adekvat för ett stormfälle. Detta bidrar ytterligare till ett högt NPP. Om metoden skall användas bör ett mer lämpligt värde på ϵ tas fram för den sparsamma vegetationen i ett stormfälle, och NDVI justeras för mängden icekfotosyntetiserande vegetation. Med dessa åtgärder bör mer korrekta uppskattningar av NPP vara möjliga.

Innehållsförteckning

Abstract	i
Sammanfattning	iii
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Störningars påverkan på skogens kolbalans.....	1
1.3 Satellitbaserad fjärranalys och NPP	2
1.4 Kyotoprotokollet.....	3
1.5 Syfte	3
2 Teori.....	5
2.1 Fjärranalys.....	5
2.1.1 Elektromagnetisk strålning	5
2.1.2 Atmosfären.....	6
2.1.3 Markytan.....	6
2.1.4 Spektrala egenskaper och signatur	6
2.1.5 Sensor	7
2.1.6 Varför fjärranalys?.....	8
2.2 Vegetationsindex	8
2.3 NDVI och storm	10
2.4 Fotosyntesen.....	11
2.5 NPP	12
3 Material och metod.....	13
3.1 Studieområde.....	13
3.2 Material	13
3.2.1 SPOT.....	13
3.2.2 MODIS.....	14
3.2.3 PAR	14
3.2.4 CORINE.....	15
3.2.5 Fältdata.....	15
3.3 Klassificering av stormfällan	15
3.3.1 Klassificering av skog.....	16
3.3.2 Klassificering av stormfällan	16
3.3.3 Utvärdering av klassificering	16
3.4 Geometrisk korrektion av klassificeringsresultat	17
3.5 NDVI	17
3.5.1 Extrahering av tidsserier	17
3.5.2 Säsongsanpassning	18
3.6 fAPAR.....	19
3.6.1 Linjär transformation	19
3.6.2 Framtagning av dagliga värden	20
3.7 PAR.....	20
3.8 NPP	21
3.9 Extrapolering av förändringen i NPP	21
3.10 NDVI och rumslig upplösning	22
3.11 Programvara	23

4 Resultat	25
4.1 Klassificering av stormfällan	25
4.2 Kontroll av PAR.....	26
4.3 NDVI	26
4.4 NPP	27
4.5 Extrapolering av förändringen i NPP	30
4.6 NDVI och rumslig upplösning	31
5 Diskussion	33
5.1 Klassificering av stormfällan	33
5.2 NDVI och <i>f</i> APAR.....	33
5.2.1 MODIS.....	33
5.2.2 Oröjda stormfällan.....	34
5.2.3 Ickefotosyntetiserande vegetation	36
5.2.4 Rumslig upplösning.....	38
5.3 LUE-modellen och NPP	38
5.4 Extrapolering av förändringen i NPP	41
5.5 Framtiden och framtida studier	41
6 Slutsats	45
Referenser	47

1 Introduktion

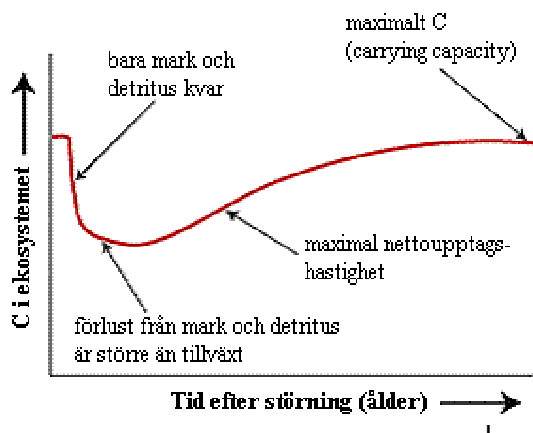
1.1 Bakgrund

Skogen är en viktig del i den globala kolbalansen. Särskilt skogarna på den norra hemisfären har en betydande roll globalt sett eftersom de håller stora mängder kol lagrat både i vegetationen och i marken, och på grund av att de kan agera som en kolsänka för atmosfäriskt CO₂. De är även viktiga med tanke på deras möjliga känslighet för tänkbara kommande klimatförändringar, där ökad störningsfrekvens kan vara en följd. Störning på skog är en process som orsakar oförutseende förluster av skogens biomassa eller på annat sätt sänker skogens värde. Till skogsstörningar räknas bland annat stormhändelser, insektsangrepp, brand, och avverkning. Störningar påverkar både skogens upptag och utsläpp av kol, och med ökad störningsfrekvens finns risken att skogarna omvänds till att bli kolkällor istället för kolsänkor (Kauppi *et al.*, 2001). Detta gör det viktigt att studera de mekanismer som kontrollerar kolbalansen i skogen.

Störning är en av de mekanismer som har potential att kraftigt påverka kolbalansen. I Sverige är brand, insektsangrepp och storm de naturliga störningar som har den största påverkan på skogen och ett exempel på en störnings dramatiska effekter kunde ses i januari 2005. Natten mellan den 8:e och 9:e januari drog stormen Gudrun fram och satte sina tydliga spår. Med vindhastigheter runt 35 m s⁻¹, som var de största uppmätta sedan man började med dessa typer av mätningar, orsakade stormen omfattande skador med ca 75 · 10⁶ m³ omkullvällt skog (framförallt planterad granskog) på en areal av ca 270 000 ha (Alexandersson & Ivarsson, 2005; Fridh, 2006). I en litteraturstudie av Schelhaas *et al.*, (2003) undersöktes naturliga störningar i Europeiska skogar under 1800- och 1900-talet. De naturliga störningarna orsakade mellan perioden 1950-2000 skador på 35 · 10⁶ m³ skog, och av dessa var stormar ansvariga för 53 %. Detta ger ett extra perspektiv på den fruktansvärda förödelse som orsakades av stormen Gudrun.

1.2 Störningars påverkan på skogens kolbalans

Direkt efter störning är ackumuleringen av kol ofta lägre än nedbrytningshastigheten, och skogen agerar som en kolkälla istället för en kolsänka. Detta kommer med tiden att jämnas ut och så småningom blir upptaget större än nedbrytningen allteftersom vegetationen återhämtar sig. Ett generellt exempel på störningars påverkan på mängden kol i ett ekosystem kan ses i figur 1.1.



Figur 1.1. Ett exempel på kolpool i ett ekosystem efter störning över tid. Efter Kauppi *et al.*, 2001.

En sådan omfattande händelse som stormen Gudrun påverkar självklart både upptaget och avgivandet av kol i skogen, och måste därför ha en stor påverkan på balansen hos kolcykeln. Flera studier som undersökt hur skogen påverkas efter storm pekar på en förändring där skogen byter från att ha varit en kolsänka till att bli en kolkälla en period efter storm. Knohl *et al.* (2002) fann att en skog i den ryska taigan två år efter stormtillfället släppte ut mer kol under perioden juli och oktober än en normal boreal skog tar upp under ett helt år. Träden på denna lokal lämnades kvar (men avlägsnas ofta i västra Europa), och artikeln betonar den påverkan de kvarlämnade träden har på den totala respirationen. Stormfällda träd som avlägsnas används som material till olika produkter och kolet kommer att bindas upp för en tid. Den tid som kolet binds upp beror på produktens kvalitet. Stormfällda träd används ofta till produkter med låg kvalitet varvid kolet i dessa produkter snabbare återvänder till atmosfären, än om träden använts till produkter med hög kvalitet (Knohl *et al.*, 2002). Faktorer som efter storm påverkar kolcykeln är således mer än bara det viktiga upptaget av kol. Emissionerna orsakade av heterotrof respiration (markandning från rötter och mikroorganismer) kommer att bero på om träden avlägsnas eller ej, och om de tas bort kommer användningen av densamma avgöra hur lång tid det tar innan kolet återvänder till atmosfären från den temporära kolpoolen som träprodukter innebär.

Det är tydligt att storm har en stor påverkan på skogens kolbalans och därför är det viktigt att effektivt kunna uppskatta effekterna av störningar som storm på kolbalansen.

1.3 Satellitbaserad fjärranalys och NPP

Nettoprimärproduktionen (NPP) är en viktig variabel att bestämma i studier av den globala kolbalansen eftersom den bestämmer vegetationens upptag av atmosfäriskt kol. Det har blivit allt vanligare att använda data från satellitburen fjärranalys för att beräkna och modellera NPP. Detta beror till stor del på att man med satellitdata tidseffektivt kan studera större områden än vid fältundersökningar och dessutom göra det till en lägre kostnad. När man arbetar med fjärranalys får man dock tänka på att användning av resultat, och jämförelser med beräkningar baserade på fältundersökningar bör ske med viss försiktighet (Markon & Peterson, 2002; Paruelo *et al.*, 1997). Metoder för att med satellitdata uppskatta NPP har testats och utvärderats i flera studier. Särskilt en metod baserad på arbetet av Monteith (1977), som bygger på ett antagande att växternas fotosyntetiska bildning av kol är proportionell mot absorberad mängd fotosyntetiskt aktivt ljus, har vigts stort intresse då denna har visat sig ge goda resultat (se t ex Field *et al.*, 1995; Ruimy *et al.*, 1994). I och med att uppskattning av NPP kan göras i stort sett enbart med data från satellitbaserad fjärranalys ges en stor möjlighet att täcka in och estimeras NPP för väldigt stora områden. Det vore därmed tilltalande att försöka uppskatta förändringarna i NPP efter storm med satellitdata. Om en sådan användning visar sig möjlig kan det på många sätt underlätta arbetet med att uppskatta förändring i NPP då tid och monetära resurser ej tillåter mätningar i fält.

1.4 Kyotoprotokollet

Eftersom nettoprimärproduktionen är en viktig del vid uppskattningar av kolbalansen kan en metod att snabbt och med god säkerhet estimeras NPP leda till att kraven från Kyotoprotokollet lättare uppfylls. 1997 träffades en överenskommelse mellan flera av världens länder för att minska människans påverkan på klimatet. I överenskommelsen sägs att de länder som godkände förslaget, mellan perioden 2008-2012 skall minska sina utsläpp av växthusgaser med ca 5 % jämfört med 1990 års nivå. Denna överenskommelse är Kyotoprotokollet, vilket trädde i kraft 2005 (Regeringskansliet, 2005). I protokollet ingår även att de länder som ratificerat (däribland Sverige) skall rapportera hur skogens kollager förändras, det vill säga om skogen avger kol till atmosfären eller inte. Effekterna av storm borde således inkluderas om korrekta estimeringar skall göras.

1.5 Syfte

Målet med detta arbete är att undersöka om det med medelupplösande (250 m) data från satellitbaserad fjärranalys och en LUE-modell (*light-use efficiency*) är möjligt att detektera förändringar i skogens kolupptag (NPP) orsakade av stormen Gudrun, och i så fall försöka uppskatta magnituden av dessa förändringar. Möjlig problematik kopplad till metoden skall presenteras, samt förslag på åtgärder till densamma såväl som andra tänkbara metoder.

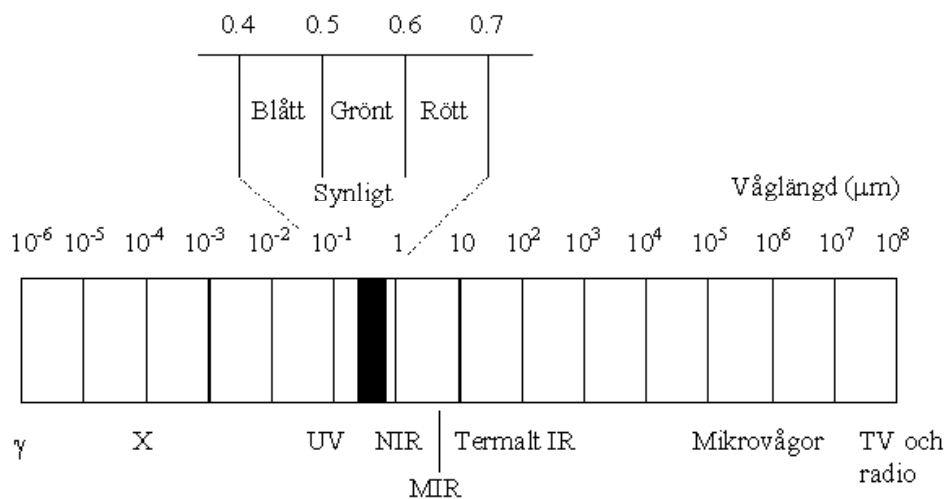
2 Teori

2.1 Fjärranalys

Fjärranalys är vetenskapen att på avstånd insamla data, och studera ett objekt, område eller händelse (Campbell, 2002). Ofta görs detta med hjälp av en sensor ombord på ett flygplan eller en satellit. Fjärranalys kan vara ett mycket kraftfullt redskap inom många olika områden. Det kan användas till exempel för kartering av markanvändning, väderobservationer, eller för att studera vegetationens egenskaper. Nedan kommer grundläggande teori för den fjärranalys som bygger på elektromagnetisk strålning att beskrivas. Det finns andra tekniker som också skulle kunna innefattas i begreppet fjärranalys (instrument som laser och radar), men då det i detta arbete är den första typen av fjärranalys som kommer användas är det teorin för denna som kommer att beskrivas.

2.1.1 Elektromagnetisk strålning

Den största källan till elektromagnetisk energi, eller strålning, för oss på jorden är solen (Campbell, 2002; Lillesand, 2004). En del av den emitterade strålningen från solen utgörs av det för oss synliga ljuset ($\sim 0.4\text{-}0.7\ \mu\text{m}$). Men det synliga ljuset är bara en sorts elektromagnetisk strålning, om än så viktig, och utgör endast en liten del av det elektromagnetiska spektrat. Resterande del utgörs av strålning som ligger utanför det synliga ljusets våglängdsområde och består bland annat av radiovågor, värme, och ultraviolett strålning. Alla objekt, utom de vid den absoluta nollpunkten, emitterar elektromagnetisk strålning. Dessutom reflekterar objekt strålning som utsänts av andra objekt. Det är denna strålning, både emitterad och reflekterad, som en sensor ombord på en satellit registrerar. Strålningen inom det elektromagnetiska spektrat brukar inom fjärranalysen särskiljas med hjälp av våglängden, även om det inte finns någon egentlig klar gräns när en region slutar och en annan börjar. En vanlig indelning av det elektromagnetiska spektrat kan ses i figur 2.1.



Figur 2.1. Elektromagnetiskt spektrum. Efter Lillesand (2004).

2.1.2 Atmosfären

Strålningen måste innan den registreras av en sensor passera atmosfären (Campbell, 2002; Lillesand, 2004). Strålning som passerar genom atmosfären kommer att påverkas. Detta sker främst genom spridning och absorption, men även genom brytning. Nettoeffekten av atmosfären kommer att bero på atmosfärens förhållanden, hur långt strålningen färdas i atmosfären, och strålningens våglängder. Spridning gör att strålningen får en ny riktning genom att den studsar mot partiklar eller stora molekyler i atmosfären. Strålning direkt från solen, som inte reflekterats eller emitterats från jorden, kan alltså spridas och registreras av sensorn som reflektans från jordens yta. Likaså kan reflekterad strålning från jordytan spridas i atmosfären så att den inte registreras av sensorn. Med absorption menas att strålningen förlorar energi till atmosfärens beståndsdelar och därmed tunnar ut strålningen. Brytning böjer strålningen vid kontakt med två atmosfäriska lager av olika densitet. Gemensamt för dessa tre är att de på något sätt kommer att påverka strålningen och den signal som sensorn till slut registrerar. Därför bör en korrigering genomföras för att erhålla den korrekta reflektansen från jordens yta.

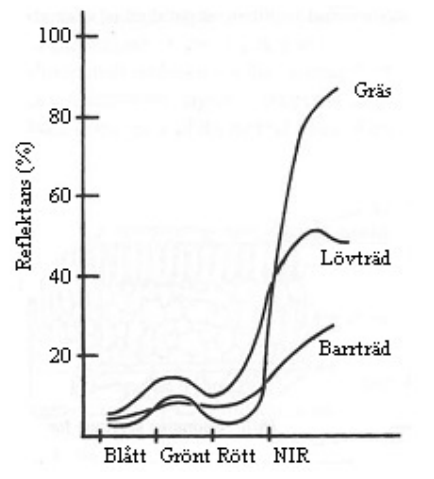
2.1.3 Markytan

Mot ett objekt inkommande strålning kan antingen reflekteras, absorberas, eller transmittas (Campbell, 2002; Lillesand, 2004). Hur stor del av strålningen som kommer att påverkas av respektive process beror på objektets uppbyggnad och egenskaper, våglängden, samt vinkeln på den inkommande strålningen. När strålning reflekteras mot ett objekt studsar den tillbaka i en ny riktning. Reflektionen kan antingen vara direkt (spekulär) eller diffus (isotropisk). Vid direkt reflektion kommer nästan all inkommande strålning att reflekteras åt samma håll. Detta uppstår när ytan på objektet är slät relativt till våglängden. Om ytan däremot är ojämn i relation till våglängden kommer strålningen att spridas mer eller mindre jämnt i alla riktningar. En perfekt diffus reflektor (Lamberts yta) är lika ljusstark oberoende av tittvinkel. Det är ofta antaget att en yta är Lambertsk men i verkligheten är det sällan fallet, utan reflektansegenskaperna varierar med våglängd, vinkeln på det instrålade ljuset (illuminationsvinkeln), och tittvinkel. För att korrigera reflektansen efter dessa faktorer har en matematisk modell tagits fram, BRDF (*bidirectional reflectance distribution function*). En BRDF beskriver hur reflektansen varierar med alla kombinationer illuminations- och tittvinklar för en given våglängd. Absorption innebär att objektet tar upp en del av strålningens energi och därmed tunnar ut strålningen. Den del av strålningen som varken reflekteras eller absorberas transmittas. Vid transmittans passerar strålningen genom objektet utan påverkan.

2.1.4 Spektrala egenskaper och signatur

Ett objekts spektrala egenskap bestämmer, som nämnts ovan, hur mycket som reflekteras och absorberas i de olika våglängdsband (spektral signatur) (Campbell, 2002). Objektens spektrala signaturer gör att vi uppfattar dem som olika, och kan skilja dem åt vid tolkning av fjärranalysdata. Vi säger att de har olika färger. Vegetation till exempel, uppfattas som grön på grund av att den reflekterar mycket av strålningen inom det gröna våglängdsbandet (G, $\sim 0.5-0.6 \mu\text{m}$). Det är klorofyllet i den levande vegetationen som reflekterar det gröna ljuset, men även absorberar mycket av det röda ljuset (R, $\sim 0.6-0.7 \mu\text{m}$). Signifikativt för vegetation är även en hög reflektans inom det nära infraröda våglängdsbandet (NIR, $\sim 0.7-1.3 \mu\text{m}$). Reflektansen i NIR

varierar dock för olika typer av vegetation och beror till största delen på lövens struktur och tjocklek. Det är alltså möjligt att skilja på olika vegetationstyper, och även olika arter (se figur 2.2).



Figur 2.2. Fyra olika generella reflektanskurvor med stora skillnader i nära infraröd reflektans vilket möjliggör separation. Från Campbell (2002).

I ett skogsbestånd finns ett antal parametrar som påverkar reflektansen (Ardö, 1998). Det har visat sig att reflektansen i de synliga, nära infraröda, och mellaninfraröda våglängdsbanden generellt minskar med ökad ålder, biomassa, krontäthet, och densitet. Undervegetationen har också möjlighet att påverka reflektansen men dess betydelse beror på kronans täthet. I ett bestånd med gles krona kommer undervegetationen att påverka reflektansen mer än i ett bestånd med tät krona. Reflektansen från kronan i en barrskog är inte så hög varvid en mindre tät krona, eller utglesning av beståndet kan komma att öka reflektansen då undervegetationen har en relativt hög reflektans.

Andra faktorer som påverkar reflektansen i ett skogsbestånd är till exempel bladvinklar, bladens fördelning, lövverkets geometri, typ av jordmån och dess egenskaper, bark, grenar, stam, bakgrundsreflektans (jord och berg), underliggande vegetation (typ och densitet) (Ardö, 1998).

2.1.5 Sensor

En sensor kan vanligtvis registrera strålningen i ett antal olika våglängdsband, till exempel inom de för oss synliga ljusintervallen som vi uppfattar som blått (~0.4-0.5 μm), grönt (~0.5-0.6 μm), eller rött (~0.6-0.7 μm) (Lillesand, 2004). Andra vanliga våglängdsband för sensorer är NIR (~0.7-1.3 μm), MIR (~1.3-3 μm), och termalt IR (>3-14 μm). Exakt inom vilka våglängdsintervall som strålning registreras varierar från sensor till sensor, och beror på syftet. Grundtanken är dock att ha så smala band som möjligt. Våglängdsbandens omfång för en sensor kallas spektral upplösning. Vidare finns radiometrisk och rumslig upplösning. Den radiometriska upplösningen beskriver den minsta nivåskillnad i signalen som registreras, och den rumsliga upplösningen talar om hur små objekt som kan ses i bilden. Med en hög rumslig upplösning är det lättare att få en representativ spektral signatur för en vegetationstyp

till exempel, medan lägre rumslig upplösning oftare leder till att spektral information från flera olika vegetationstyper registreras och en blandad information erhålls i stället.

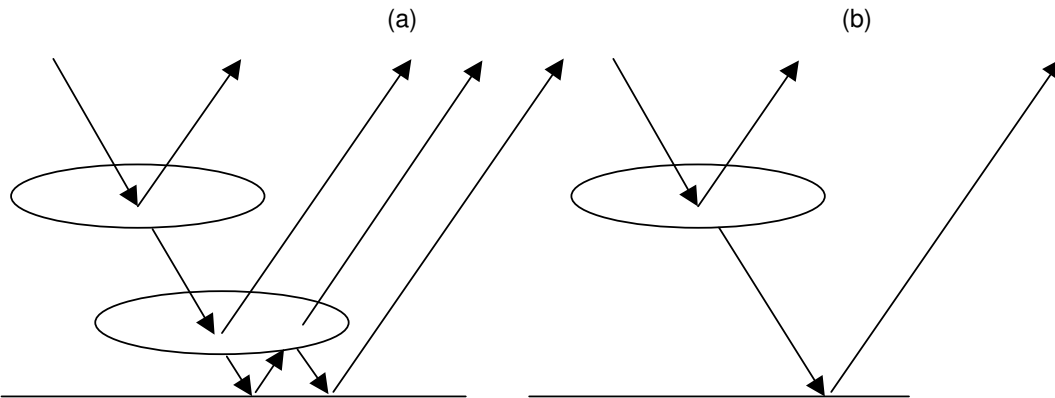
2.1.6 Varför fjärranalys?

En styrka med satellitbaserad fjärranalys är att studier av stora områden kan ske effektivt både kostnadsmässigt och tidsmässigt, då man till stor del kan minska behovet av datainsamling i fält. Samtidigt är det numera ofta möjligt att studera fjärranalytisk data över längre kontinuerliga tidsperioder. Som exempel kan nämnas att sensorn AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) har varit i bruk i över 20 år, vilket gör att data från sensorer som denna är ett väldigt kraftfullt verktyg vid bland annat förändringsstudier.

2.2 Vegetationsindex

Vegetationsindex används som ett mått för att beskriva vegetationens egenskaper och hälsotillstånd (Campbell, 2002; Lillesand, 2004). Ett antal satellitbaserade vegetationsindex är framtagna genom olika kombinationer av spektrala våglängdsband för en så bra registrering av dessa egenskaper som möjligt och för att minimera effekterna av externa faktorer (t ex jord). Flertalet undersökningar har gjorts för att undersöka dessa index relation till ett antal vegetationsparametrar och ekologiska variabler, så som bladyteindex (*leaf area index*, LAI) vilket är mängd bladyta per enhet markyta, procentuell marktäckning av vegetation, primärproduktion, och säsongparametrar, och det har ofta visats en god korrelation. Vegetationsindex har därför ett stort användningsområde och nyttjas i talrika sammanhang.

Utmärkande för vegetation är egenskaperna i de röda och nära infraröda våglängdsbanden med en kraftig absorption i det röda och hög reflektans i nära infrarött. Reflektansen i det nära infraröda beror på, som tidigare nämnts bladens struktur och tjocklek. Bladet absorberar lite eller ingenting av denna strålning, men däremot transmitteras den del som inte reflekteras ner genom bladet till underliggande blad eller marken. Om vegetationen har flera bladlager kommer alltså reflektansen i nära infrarött vara större än om bara ett lager blad finnes, se figur 2.3. Detta har lett till en framställning av olika vegetationsindex som använder de röda och nära infraröda våglängdsbanden. Det omvända förhållandet i reflektans mellan dessa båda våglängdsband för levande vegetation är särskilt effektivt då man använder kvotbaserade vegetationsindex.



Figur 2.3. Principen för hur blad reflekterar och transmitterar strålning där (a) med två bladlager kommer att reflektera en större mängd än (b) som har ett lager. Bladen reflekterar även på undersidan.

Två vanliga kvotbaserade vegetationsindex som utnyttjar de röda och nära infraröda våglängdsbanden är SR (*simple ratio*) och NDVI (*normalized difference vegetation index*). Dessa index beräknas enligt följande:

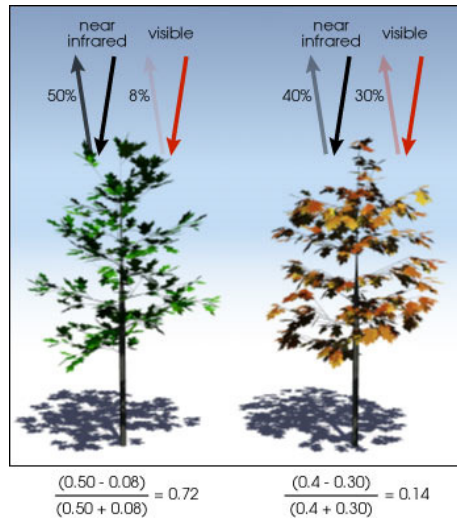
$$SR = \frac{NIR}{R} \quad (2.1)$$

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2.2)$$

där NIR och R är den av sensorn registrerade reflektansen i det nära infraröda respektive röda våglängdsbandet. Båda index ger ett högt värde vid vegetationsförekomst, och tack vare egenskaperna i NIR kan man även få ett mått på vegetations täthet.

Det vanligast förekommande och mest använda indexet är NDVI. Det hjälper till att kompensera för skillnader som kan uppstå med varierande solvinkel och atmosfäriska effekter, varför det är att föredra framför det mer enkla SR (Lillesand *et al.*, 2004). Emellertid är NDVI känsligt för markytans olika komponenter och dess optiska egenskaper. Till exempel kan områden med liknande täckningsgrad, men med olika jordmån ge olika värden på NDVI. En mörk jordmån som torv ger ett högre NDVI än en ljusare som sand (Myneni & Williams, 1994).

NDVI ger värden mellan -1.0 och 1.0 och områden med vegetation ger värden större än 0 , vanligen mellan 0.1 och 0.6 (Lillesand, 2004), se figur 2.4. NDVI över 0.6 beror på densiteten grön vegetation. Negativa NDVI-värden fås till exempel av vatten, snö, eller moln där reflektansen i det synliga röda ljuset är högre än i det nära infraröda. Berg i dagen och jord kan ge NDVI-värden runt noll då reflektansen i stort sett är lika stor i både rött och nära infrarött.



Figur 2.4. Principskiss för beräkning av NDVI och förhållandet mellan frisk (vänster) och skadad, eller sparsam (höger) vegetation. Från Earth Observatory, NASA (2006).

Användningen av NDVI har visat sig stor inom ett antal områden, så som klassificering av markanvändning (Evans *et al.*, 1993), uttagning av säsongparametrar (Jönsson & Eklundh, 2002), härledning av vegetationens biofysiska egenskaper (Sellers *et al.*, 1994), samt uppskattning av nettoprimärproduktionen och vegetationens tillstånd (Myneni *et al.*, 1997; Paruelo *et al.*, 1997).

2.3 NDVI och storm

Vegetationsindex kan vara ett bra verktyg vid förändringsstudier. Genom att studera NDVI för samma lokal men från två olika tidpunkter kan man identifiera områden som genomgått en förändring i marktäcke. Skiftet kan till exempel vara styrt av människan som ändrat användningen av åkerarealer, eller orsakad av en stokastisk process så som storm. Genom enkel visuell tolkning av de båda bilderna kan man se områden som förändrats från den ena tidpunkten till den andra, och genom att skapa en differensbild ($\text{bild}_1 - \text{bild}_2$) är det möjligt att avbilda förändringen i en bild.

Vid en storm kan träden antingen knäckas i stammen eller brytas upp ur marken, så kallade rotvältor. Om trädet knäcks dör det på grund av att transporten av vatten och näringsämnen bryts, men om trädet bryts upp ur marken är det fortfarande möjligt att en del av rötterna inte slits upp och att trädet på så vis kan upprätthålla en liten del av fotosyntesen. När ett träd dör förändras till en början bladens eller barrrens struktur, på grund av den minskade vatten- och näringstillgången varpå bladet eller barret till slut faller av. I och med att bladets struktur förändras brukar reflektansen i det nära infraröda våglängdsbandet minska följt av en än större minskning när bladen faller av (LAI minskar). Allteftersom mängden klorofyll i bladen minskar kommer reflektansen i det röda våglängdsbandet att öka på grund av att bladen absorberar mindre. Dessa förändringar i reflektans leder till att NDVI för ett stormfälle kommer att vara lägre än för skog. Klassning av stormfället med satellitdata kan därmed göras med bruk av NDVI tack vare de klara skillnaderna i värde före och efter storm. Även

förändringen i nettoprimärproduktionen skulle då kunna relateras till de uppkomna skillnaderna i NDVI.

När träden faller kommer emellertid mer än bara trädens lövverk att påverka reflektansen och NDVI från ett stormfälle. Trädens stammar och grenar kommer att utgöra en del av den totala reflektansen, likaså undervegetationen och marken.

2.4 Fotosyntesen

Fotosyntesen är den process hos gröna växter som omvandlar koldioxid och vatten till för växten viktiga kolhydrater (Schlesinger, 1997). Fotosyntesen äger rum i kloroplasterna och det är klorofyllet i kloroplasterna som tar upp solljuset, vilket används för att driva den fotosyntetiska processen. Absorptionen av ljus är den första delprocessen av två vid bildandet av kolhydrater. I den andra delprocessen tas koldioxid upp från atmosfären och socker bildas. Den övergripande reaktionen för fotosyntesen kan ses nedan (Schlesinger, 1997).



Det är inte allt solljus som kan användas av växterna och det som absorberas av klorofyllet, den energigivande delen befinner sig inom våglängdsintervallet 0.4-0.7 μm . Ljuset inom detta intervall kallas därför fotosyntetiskt aktivt, eller PAR efter engelskans *photosynthetically active radiation*. Anledningen till att ljuset inom detta intervall används för att driva fotosyntesen är troligen att solljuset har sin största intensitet i detta våglängdsområde. Att det ljus som är synligt för det mänskliga ögat råkar sammanfalla med PAR är förmodligen ingen slump utan även det en följd av solljusets intensitet i detta intervall.

PAR är alltså det ljus som är tillgängligt för växterna att tillgodogöra sig, men allt absorberas inte. Mängden PAR som absorberas av växterna beror på vatten- och näringstillgång, och den del av PAR som absorberas kallas APAR (*absorbed photosynthetically active radiation*). APAR och således fraktionen absorberat PAR ($fAPAR$) styrs dock främst av den totala täckningsgraden av träd och lövarean (Myneni & Williams, 1994). $fAPAR$ fås genom:

$$fAPAR = \frac{APAR}{PAR} \quad (2.4)$$

och är ett mått på hur stor andel PAR vegetationen absorberar. $fAPAR$ är en viktig komponent i storskalig modellering av produktivitet och kolbudget. Flertalet studier har visat på ett linjärt, eller nära linjärt samband, mellan NDVI och $fAPAR$ (Sellers *et al.*, 1994; Myneni & Williams, 1994).

$$fAPAR = aNDVI + b \quad (2.5)$$

Detta samband är oberoende av skalan. Det betyder att pixlar av olika storlek, med samma NDVI-värde har samma värde på $fAPAR$. Det har också visats att det kan vara oberoende av pixelheterogeniteten (vegetationens täckningsgrad i pixeln, lövarea, och

variationer i lövens placering och optiska egenskaper). Det kan fastställas att förhållandet $fAPAR-NDVI$ är linjärt i de flesta fall, med undantag för områden med hög reflektans från den underliggande jorden vilket sänker NDVI men höjer $fAPAR$ (Myneni & Williams, 1994). $fAPAR$ kan följaktligen erhållas från NDVI, vilket är viktigt då $fAPAR$ har en betydande påverkan på fotosyntesen, kolupptaget, och evapotranspirationens hastighet (Asner *et al.*, 1998).

2.5 NPP

Fotosyntesen reglerar nettoprimärproduktionen (NPP) vilken definieras som skillnaden mellan totalt kolupptag genom fotosyntesen och förluster från autotrof respiration (växternas andning) (Schlesinger, 1997).

$$NPP = GPP - R_A \quad (2.6)$$

NPP är summan av nettoprimärproduktionen ovan (ANPP) och under jord (BNPP) (Schlesinger, 1997). NPP är emellertid inte ekvivalent med tillväxt då en del kommer att gå förlorat till herbivorer, och en del samlas som döda växtdelar på marken. Att i fält uppskatta, eller mäta NPP är problematiskt, men väl beprövade metoder finns för att mäta NPP ovan jord. Traditionellt uppskattas ANPP genom direkta mätningar av tillväxten från skördad och uppsamlad vegetation. Vid beräkning av NPP för större arealer har tekniken med fjärranalys öppnat för effektiva metoder och flera försök att globalt uppskatta NPP har genomförts (se t ex Field *et al.*, 1995).

Monteith (1977) fann att nettoprimärproduktionen ovan jord av olika sorters gröda i Storbritannien uppvisade liknande linjära samband med mängden uppfångat ljus under växtsäsongen. Uttrycket nedan härstammar från hans arbete.

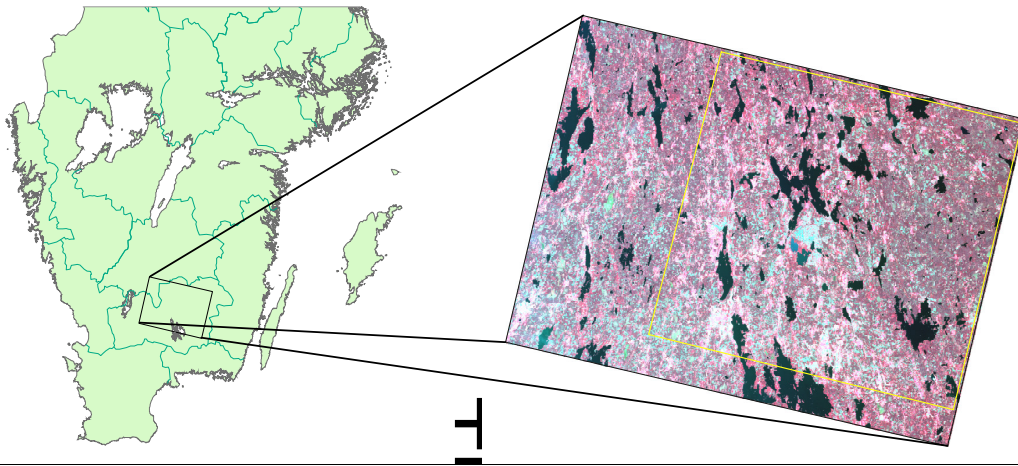
$$NPP = APAR \varepsilon \quad (2.7)$$

I uttrycket är ε en parameter som beskriver hur effektivt det uppfångade ljuset används uttryckt i mängd producerat kol/enhet absorberat PAR. Sambandet har blivit känt som LUE-modellen efter engelskans *light-use efficiency*, och har sedan uppkomsten använts i flertalet studier (se t ex Paruelo *et al.*, 1997; Piñeiro *et al.*, 2006). LUE-modellen bygger på ett antagande att växternas upptag av kol är proportionellt mot mängden absorberat PAR och att $fAPAR$ kan uppskattas utifrån fjärranalys. Stora arbetsinsatser har lagts ner på att ta fram värden på ε . Dessa har bland annat summerats av Ruimy *et al.* (1994). Studier har även gjorts för att förstå effekterna av miljöfaktorer som vatten- och näringstillgång, och temperatur på ε (Runyon *et al.*, 1994). Generellt kan sägas att variationer i ε över tid främst beror på temperatur och vattentillgång (Potter *et al.*, 1999), men även mängden kväve i vegetationen kan påverka ljus användningseffektiviteten (Medlyn, 1998). Det har även observerats en negativ trend mellan årlig inkommande strålning (PAR) och ε , där ökande inkommande strålning ger lägre värden på ε (Medlyn, 1998; Still *et al.*, 2004). Då mängden inkommande PAR generellt sjunker med ökande latitud kan värdet på ε relateras till latituden. Av detta följer att exempelvis denna studies undersökningsområde, som ligger på en hög latitud, har relativt låg inkommande strålning och därmed ett högt värde på ε .

3 Material och metod

3.1 Studieområde

Området som valdes att studera ligger i Kronobergs län med Växjö som central punkt, och kan ses figur 3.1 markerad med gul ram. Studieområdet är ca 5.3 x 5.3 mil stort. Asa försökspark täcks in av området och ligger den norra delen. Det utvalda studieområdet är ett av de områden där förödelsen efter stormen Gudrun är som störst, varför det ansågs vara ett lämpligt område att studera. Stora delar av studieområdet består av granskog, men i sydväst förekommer även i stor grad jordbruksmark för att mot nordost övergå till ett mer homogent skogslandskap. Insamlingen av utvärderingspunkter genomfördes i området norr om Växjö eftersom andelen skogsareal där är något större än i södra delen.



Figur 3.1. Till vänster, en ruta som markerar utbredningen av en satellitscen från SPOT. Till höger ses satellitscenen med gul ram som visar studieområdet. Det ljus turkosa området i mitten under den H-formade Helgasjön är Växjö.

3.2 Material

3.2.1 SPOT

Klassificeringen av stormfällan gjordes med hjälp av två scener från satelliten SPOT 5 (Satellite Probatoire d'Observation de la Terre). SPOT 5 är en fransk satellit och har varit i bruk sedan 2002 (Spot Image, 2004). Sensorn registrerar data i fyra spektrala band (grönt, rött, nära infrarött, samt mellan-infrarött) och har en rumslig upplösning på 10 meter (tabell 3.1). SPOT 5 har en vridbar sensor, vilket gör det möjligt att få täckning över ett specifikt område omkring var tredje dag. Scener som användes vid klassificeringen var registrerade 2004-09-23 och 2005-09-07.

Tabell 3.1. Spektrala kanaler SPOT 5.

Kanal	Spektralt område	Våglängdsband (μm)
1	Grönt	0.50-0.59
2	Rött	0.61-0.68
3	Nära infrarött	0.78-0.89
4	Mellan infrarött	1.58-1.75

3.2.2 MODIS

MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) är ett instrument ombord på satelliten TERRA. MODIS togs i bruk första gången 1999 och är designad för övervakning av land, hav, och atmosfär mot forskningsapplikationer (Justice *et al.*, 1998).

Som grund för beräkningar av NPP i denna studie användes en NDVI-produkt från MODIS (med beteckningen MOD13Q1) med 250 meters rumslig upplösning. Det använda datasetet spänner över perioden 2000 till 2005. Tillsammans med NDVI-data från sensorn AVHRR finns det tillgång till ett kontinuerligt dataset på över 20 år vilket gör att data är lämplig för tid- och förändringsstudier. Scenerna som användes täcker delar av norra Europa från mellersta Sverige (Gävle) i norr till Frankrike i söder, och väst-östlig utbredning från Storbritannien till och med Polen.

MOD13Q1 är en 16-dagars kompositprodukt genererad på en per pixelbasis. Detta betyder att registreringar från 16 dagar används vid skapandet av ett pixelvärde i en scen (Huete *et al.*, 2002). Detta sextondagarsintervall gör att det över ett år skapas 23 kompositscener. Som indata för att producera NDVI används reflektansdata som är korrigerad för atmosfäriska effekter, så som spridning, absorption av ozon, och aerosoler (Vermote *et al.*, 2002). De spektrala band som används vid beräkning av NDVI är det röda (0.620-0.670 μm) och det nära infraröda (0.841-0.876 μm).

Indata genomgår ett filter som väljer ut molnfria observationer registrerade så nära nadir som möjligt (Huete *et al.*, 2002). Kompositen kan sedan skapas med hjälp av tre olika metoder. Vilken som används beror på hur många observationer som finns, samt kvaliteten på dessa. Den enklaste metoden, MVC (*maximum value composite*), väljer det högsta registrerade pixelvärdet och låter detta representera perioden på 16 dagar. Den andra, CV-MVC (*constraint-view angle – maximum value composite*), är en utökad MVC-teknik. Här jämförs de två högsta registrerade NDVI-värdena och observationen med den lägsta tittvinkeln får representera 16-dagarsperioden. Tredje, och sista metoden är BRDF-C (*bidirectional reflectance distribution function composite*). Detta är en något mer komplicerad metod men som anses ge det bästa resultatet. Observationer från alla band används, förutsatt att de är av god kvalitet, och interpoleras till nadir-ekvivalent reflektans med hjälp av en BRDF-modell. Utifrån de interpolerade värdena beräknas sedan NDVI. Minst fem molnfria observationer behövs för denna metod. Data som användes i denna studie är komponerade med den andra metoden, CV-MVC.

Med NDVI-produkten från MODIS medföljer även kvalitetsdata (QA, *Quality Assurance*) med samma karaktäristik som NDVI-data. QA beskriver kvaliteten på NDVI-data och är representerad som värden mellan 0 och 15, där 0 är perfekt kvalitet och 15 i praktiken är obrukbar. Som referens för kvalitetsdata användes "VI Usefulness Index" (MODIS VI User Guide).

3.2.3 PAR

PAR-data som användes vid beräkning av NPP i denna studie är inte uppmätta i fält utan en produkt av mesoskalig strålningsmodellering (STRÅNG). Modellen, som täcker Skandinavien är framtagen och körs av SMHI (Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut) varifrån data är hämtad (SMHI, STRÅNG, 2006). Data

extraherades från en databas genom inmatning av tidsintervall, temporal upplösning, samt koordinater för den önskade lokalen. Den hämtade datan valdes med koordinaterna för Asa, och täcker in perioden 2000-2005 med en daglig temporal upplösning. PAR modelleras som *photosynthetic photon density* i enheten mol m⁻², och behöver räknas om till MJ m⁻² d⁻¹ för att kunna användas vid beräkningen av NPP.

Ytterligare PAR-data är uppmätta halvtimmesvärden från fluxtorn i Asa försökspark, norr om Växjö. Tillgänglig data innehöll värden från april till och med juni år 2004. Dessa data användes enbart som kontroll och validering av modellerad PAR-data och inte för beräkning av NPP.

3.2.4 CORINE

Europeiska kommissionen initierade 1985 CORINE (*Co-ordination of Information on the Environment*), vars syfte är att samla information om miljön (Nunes de Lima, 2005). Detta har resulterat i bland annat CLC (*CORINE Land Cover*) som är marktäckedata för de ingående länderna i Europeiska Unionen. Databasen är framtagen genom klassificering av satellitbilder och har 44 klasser. Ansvariga för CLC är EEA (*European Environment Agency*). CLC som användes i denna studie var i rasterformat med 250 meters upplösning.

3.2.5 Fältdata

Fältarbete genomfördes i maj 2006 med syfte att insamla data för utvärdering av stormskadeklassificeringen. Inför den första fältdagen placerades fem kvadratiske testytur ut inom undersökningsområdet. Positionen på dessa valdes subjektivt över områden som alla innehöll stormskadade områden för att dessa säkert skulle bli representerade i utvärderingsdata. Testytorna skulle även innehålla andra typer av markanvändning för att få utvärderingsdata så väl fördelat som möjligt. Testytornas storlek var 1000 x 1000 meter. Inom varje testyta slumpades tio kontrollpunkter ut. När punkterna besöktes i fält registrerades marktäckets på en yta om ca 10 x 10 meter, vilket är den rumsliga upplösningen i SPOT-data som användes vid klassificeringen. Marktäckets kunde antingen vara stormfälla eller övrigt (allt annat än stormfälla). Det alternativ som var övervägande i ytan valdes, och det noterades även om det fanns synbara tecken på recent avverkning av skog då det avverkade området vid tiden för registrering av satellitbilden troligen var skog. Stormskadade områden var emellertid dåligt representerade i utvärderingsdata efter den första dagens insamling, varför ännu en dag planerades. För den andra dagen valdes en mer stratifierad metod. Mindre kvadratiske testytur sattes ut över stora stormskadade områden. Antalet testytur som placerades ut var fyra och storleken på dessa var 250 x 250 meter. Inom vardera testyta slumpades tio punkter. Totalt besöktes 85 kontrollpunkter under de två dagarna. 5 kontrollpunkter kunde aldrig besökas på grund av otillgänglig terräng, varför antalet besökta punkter blev 85 och inte 90.

3.3 Klassificering av stormfällan

Initialt i denna studie genomfördes en klassning av stormfällan. Anledningen till att denna klassning utfördes var att möjliggöra identifiering av stormfällda områden i de mer grupplösta NDVI-data från MODIS. Den låga rumsliga upplösningen i data

från MODIS utgör ett hinder om enbart visuell kontroll tillämpas för att hitta lämpliga stormdrabbade ytor. En klassning av stormfällan underlättar således avsevärt detta arbete.

3.3.1 Klassificering av skog

Klassificeringen av skog utfördes med hjälp av 2004 års SPOT-scen och en övervakad klassificeringsmetod (*Gaussian Maximum Likelihood*, ML-klassning) användes. Metoden baseras på träningsytor som användaren definierar. Ett antal träningsytor valdes ut för varje markanvändningsklass, i detta fall två stycken (skog och övrigt). Träningsytorna, som innehåller klassernas spektrala signatur, skall vara unika för klassen samtidigt som de skall representera klassens hela spektrum. Vid användning av ML-klassning antas att spridningen av klassernas spektrala signatur är normalfördelad (Lillesand *et al.*, 2004), och härmed kan den statistiska sannolikheten att en pixel tillhör en viss klass räknas ut med hjälp av träningsytorna. Detta görs för varje klass och pixel, och klasstillhörigheten bestäms av den största sannolikheten.

3.3.2 Klassificering av stormfällan

Vid klassning av stormfällan i studieområdet användes en metod baserad på NDVI. De två scenerna för 2004 och 2005 från SPOT användes och NDVI beräknades enligt ekvation 2.2 för respektive år, där SPOT-kanal 3 är NIR och kanal 2 är R. Differensen mellan de två åren beräknades sedan och resultatet visar alla områden som förändrats åt något håll, det vill säga fått mer eller mindre grönska. För att hitta förändringsområden som inte kunde härledas till naturliga variationer definierades gränsvärden. Efter visuell kontroll mot 2005 års SPOT-scen valdes ett undre (0.17) och övre (0.80) gränsvärde för vad som i skog kunde betraktas som förändring orsakat av storm. Områden drabbade av stormen visade sig men även jordbruksmark som ändrat användning från ett år till ett annat visades eftersom dessa får ett högt förändringsvärde. Detta kan undvikas om tillgång till marktäckedata finns. Den tidigare utförda klassningen av skog användes i en överlagring för att eliminera de områden, främst åkermark, som inte är av intresse för detta arbete. Resultatet visade förändringar i skog, främst orsakade av stormen, men även avverkade områden.

För att reducera antalet solitära pixlar som blivit felklassade genomfördes en medianfiltrering. Denna metod beräknar medianvärdet för alla pixlar i filterfönstret, vilket sedan sätts på centumpixeln. En sådan filtrering jämnar ut bilden men kanter bevaras. Efter visuell komparation valdes storleken på filterfönstret till 5 x 5 pixlar eftersom detta ansågs ge det bästa resultatet.

3.3.3 Utvärdering av klassificering

Med hjälp av den i fält insamlade datan utvärderades klassningen av stormskador med de tre måtten objektsnoggrannhet, klassningsnoggrannhet samt det statistiska måttet kappa. Objektsnoggrannheten beskriver sannolikheten att en slumpvis vald punkt i verkligheten är korrekt karterad i bilden medan klassningsnoggrannheten beskriver sannolikheten att en slumpvis vald punkt i bilden är rätt karterad. Den statistiska parametern kappa fungerar som ett mått på om de klassade punkterna är korrekta på grund av sanna förhållanden eller av slumpen (Eklundh, 2003). Ett kappavärde på 0 betyder att man lika gärna slumpvis kunde ha placerat ut klasstillhörighet, och ett

värde på 1 visar på maximal överensstämmelse mellan utvärderingsdata och klassning (perfekt noggrannhet).

3.4 Geometrisk korrektion av klassificeringsresultat

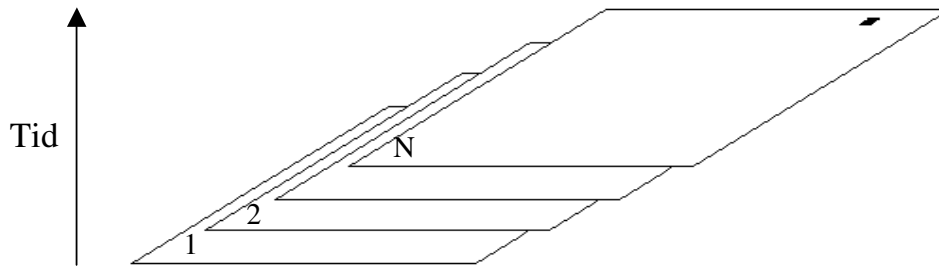
Klassningen av stormfällan användes för att i MODIS-scenerna lokalisera de stormdrabbade områdena. För att detta skulle vara möjligt krävdes en geometrisk korrigerings (geokodning) av klassningsresultatet. SPOT-scenerna, och sålunda klassningen, har referenssystemet RT 90, eller rikets nät, medan MODIS har en sinusoidal projektion.

Vid en geometrisk korrigerings insamlas kontrollpunkter från den bild som skall korrigeras och från den bild till vilkens referenssystem den första bilden skall anpassas (Eklundh, 2003). Med hjälp av dessa kontrollpunkter kan en transformation hittas. Kontrollpunkterna utgörs vanligen av kända punkter i de båda bilderna, så som vägmärken, sjö- och havskanter, eller andra tydliga objekt. I detta fall då den rumsliga upplösningen på 250 meter i MODIS-data omöjliggjorde identifiering av vägar användes sjöar. Karteringen av stormfällan överlagrades således med ett data-skikt visandes sjöar. 12 kontrollpunkter mättes in utspridda över hela bildens utbredning i den mån sjöarnas placering tillät det, och första graden polynomtransformation (affin transformation) användes. Resamplingen av punktvärdena gjordes med en närmsta granne-metod. Denna metod använder värdet för den närmsta otransformerade pixeln till den transformerade pixeln. Transformationens totala RMS-fel blev 0.35 (ca 88 m). En tumregel är att RMS-felet inte bör överstiga en halv pixel.

3.5 NDVI

3.5.1 Extrahering av tidsserier

Med hjälp av den geokorrigerade stormskadeklassningen, och i viss mån fältarbetet, lokaliserades stormfällan i MODIS-data. Primärt identifierades stormfällan med så stor area som möjligt varpå motsvarande MODIS-pixel i centrum för stormfället valdes ut. Stora stormfällan valdes för att hela MODIS-pixeln skulle täckas av stormfället. Dessa pixlar anses visa NDVI för områden med en så hög täckningsgrad av stormfälle som möjligt. 16 pixlar i MODIS ansågs ha tillräckligt stor andel stormfälle i sig och togs ut. Även om dessa pixlar inte är helt ”rena” (enbart stormfälle) kommer de för enkelhetens skull hädanefter att refereras till som ”stormpixlar”. Efter att en pixel med tillräckligt stort stormfälle funnits användes ett program (curve4) för att extrahera data för alla år (2000-2005) för just denna pixel, se figur 3.2, och skapa en tidsserie. Även kvalitetsdata togs ut på samma sätt.



Figur 3.2. NDVI från MODIS (MOD13Q1). Varje scen innehåller NDVI-värden (I) för tidpunkten t . En pixel med stormhändelse identifieras och värden för denna pixel hämtas från varje scen, (t_i, I_i) , $i = 1, 2, \dots, N$ varvid en tidsserie erhålls för denna pixel. Efter Jönsson & Eklundh, 2004.

Förutom de 16 mer homogena stormpixlarna valdes 7 pixlar ut som bedömdes innehålla en liten till relativt stor andel stormfälle. Stormen Gudrun var en osedvanligt kraftig storm som orsakade skador över stora områden, där vissa enskilda områden är så pass stora att de täcker flera pixlar i MODIS. En betydande del av de enskilda områdena är dock inte så stora men påverkar ändå i olika utsträckning en pixels NDVI, varför 7 sådana heterogena pixlar valdes ut för att undersöka om förändringar i NDVI och NPP är synliga i dessa pixlar. Dessa pixlar kommer fortsättningsvis att refereras till som "blandpixlar". Eftersom det huvudsakliga intresset för studien ligger i att undersöka så rena pixlar som möjligt visades stormfällen ansågs det tillräckligt att använda endast 7 pixlar med en mer blandad pixelinformation.

3.5.2 Säsongsanpassning

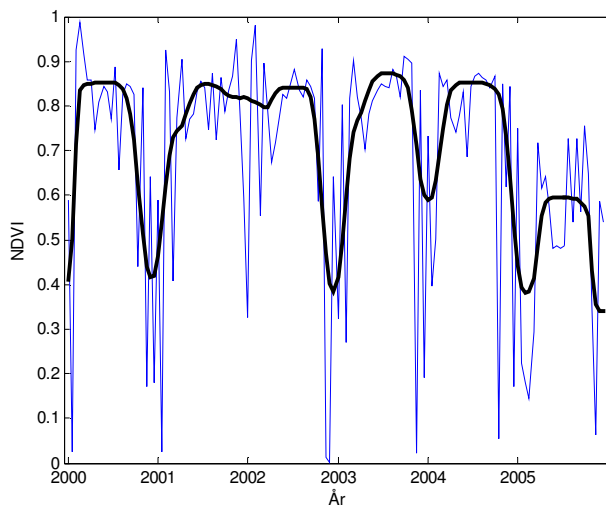
Trots att ingående data till MODIS VI är korrigerade för bland annat atmosfäriska effekter finns det fortfarande problem som ej kan undvikas. Kompositen kan alltså vara belagd med brus i form av bland annat rester av moln och aerosoler, och för att ur tidsserier kunna extrahera säsongrelaterad data kan man skapa utjämnande funktioner som representerar data. NDVI-data justerades med programmet TIMESAT (Jönsson & Eklundh, 2004), genom att lokala asymmetriska Gaussiska funktioner anpassades (Jönsson & Eklundh, 2002). Enkla lokala icke-linjära funktioner passas in på ett antal punkter, och de lokala funktionerna används sedan för att skapa globala funktioner som beskriver variationen i NDVI med vegetationssäsonger. Ett exempel på en säsongsjusterad tidsserie kan ses i figur 3.3.

Vid inpassningen av utjämnande funktioner användes extraherad kvalitetsdata för att tilldela NDVI-data vikter (tabell 3.2). För att fastställa vikterna användes "VI Usefulness Index" (MODIS VI User Guide). Värden 0-4 på kvalitetsdata beskrivs enligt MODIS VI User Guide som perfekt respektive godtagbar kvalitet varvid NDVI-värdet används opåverkat vid inpassningen. 5-10 tillskrivs vara under godtagbar till marginell kvalitet. NDVI-värdets betydelse vid inpassningen viktas ner något. 11-15 är så låg kvalitet att värdena inte är användbara, och får således vikten 0.

Tabell 3.2. Viktning av kvalitetsdata.

Undre gräns	Övre gräns	Vikt
0	4	1.0
5	10	0.7
11	15	0.0

Det visade sig vara svårt att få en bra säsongsanpassning för åren 2001 och 2002 på grund av snö och mycket brus i data orsakat av atmosfäriska effekter. Ofta anpassades en kurva med alldeles för höga värden mellan säsongerna 2001 och 2002. Alternativt så skapades enbart en säsong över de två åren vilket inte kan anses tillfredställande (figur 3.3). På grund av systematiken i felet är åren 2001 och 2002 avlägsnade och används ej vid fortsatta beräkningar. Data ansågs emellertid tillräcklig med de kvarvarande fyra åren.



Figur 3.3. Tidsserie NDVI för åren 2000-2005 från MOD13Q1 (blå kurva) med säsongsjusterad kurva anpassad i programmet TIMESAT. Notera problematiken mellan 2001 och 2002. Brus och för höga värden i rådata gör att ingen riktig säsongsdipp hittas mellan åren.

3.6 fAPAR

3.6.1 Linjär transformation

Flera studier har visat på ett linjärt samband mellan NDVI och *f*APAR, däribland Sellers *et al.* (1994) som fann att *f*APAR kan uppskattas genom en linjär transformation från NDVI under förutsättning att man känner två ändpunkter. Dessa kan fastställas utifrån NDVI genom att beräkna 98-percentilen och 5-percentilen. 98-percentilen för NDVI antas representera ett maximalt ljusutnyttjande (*f*APAR \approx 95 %), på toppen av växtsäsongen, medan 5-percentilen representerar ett minimalt värde på *f*APAR (så nära noll som möjligt), till följd av liten eller ingen aktivitet i fotosyntesen.

Med hjälp av de framtagna ändpunkterna kan sedan *f*APAR framställas genom en linjär transformation från säsongsjusterad NDVI-data enligt ekvation 3.1 (Olofsson & Eklundh, 2006)

$$fAPAR = 0.95 \frac{NDVI - NDVI_{5,b}}{NDVI_{98,s} - NDVI_{5,b}} \quad (3.1)$$

där NDVI är säsongsjusterat NDVI som skall transformeras, $NDVI_{5, b}$ är femte percentilens värde för bar marks NDVI och $NDVI_{98, s}$ är värdet för nittiåttonde percentilens NDVI för skog. Anledningen till att femte percentilen beräknades från NDVI för bar mark var för att erhålla ett så lågt värde som möjligt eftersom detta skall representera ett $fAPAR$ så nära noll som möjligt. Nittiåttonde percentilen beräknades för skog då den skall motsvara maximalt $fAPAR$. Dess NDVI-värde var 0.88 och femte percentilens NDVI-värde var 0.07.

3.6.2 Framtagning av dagliga värden

$fAPAR$ är framtaget från MOD13Q1 och får därmed samma typiska egenskaper som NDVI-data. Den temporala upplösningen kommer således att vara 16 dagar med en rumslig upplösning 250 meter. Ett värde i data representerar då en yta på 250 x 250 meter och en tidsrymd på 16 dagar. PAR-data som används i denna studie är däremot modellerad dagligen, vilket gör att även NPP kommer att beräknas dagligen. Två alternativ finns då för behandling av $fAPAR$ -data. Antingen kan man låta varje $fAPAR$ -värde representera en hel 16-dagarsperiod, det vill säga att alla 16 dagar får samma $fAPAR$ -värde, eller så kan man genom en interpolation ta fram 15 nya värden mellan varje ursprungligt värde $fAPAR$ för att erhålla data dagligen. I denna studie valdes det senare alternativet. Mellan varje värde $fAPAR$ på position i och $i+1$ gjordes en linjär interpolation där 15 nya värden genererades och fördes in i datasetet. Antalet dagar per år kontrollerades mot PAR-data för att få korrekt antal dagar och samma antal värden i båda data. Av den orsaken varierade antalet interpolerade värden i slutet på varje år.

3.7 PAR

Daglig PAR-data från 2000 till 2005 extraherades ur STRÅNG-databasen från SMHI. STRÅNG, en mesoskalig stålningmodell, som modellerar olika sorters strålning över Skandinavien producerar även PAR, då som *photosynthetic photon density* (PPD) i mol m^{-2} . Data extraheras ur databasen för en vald position som bestäms genom inmatning av ett koordinatpar. Koordinaterna för Asa flux-torn valdes (57.17° N, 14.80° E), varvid data för den valda tidsperioden och punkten interpoleras fram genom en bilinjär metod.

Vid beräkning av NPP enligt ekvation 2.7 används ϵ , vilket är ett mått på hur effektiv fotosyntesen är. Den beskriver hur mycket kol som bildas per mängd instrålat ljus (g C MJ^{-1}). På grund av enheten på ϵ så behöver PAR-data räknas om till $MJ m^{-2} d^{-1}$ för att kunna användas vid framtagning av NPP. Detta görs genom:

$$PAR = \frac{(PPD \cdot N_A) \cdot \frac{hc}{\lambda}}{1000000} \quad (3.2)$$

där N_A är Avogadros konstant ($6.02 \cdot 10^{23}$), h är Plancks konstant ($6.63 \cdot 10^{-34}$ J s), c är ljusets hastighet ($3 \cdot 10^8$ m s^{-1}), och λ är våglängden. Uttrycket $\frac{hc}{\lambda}$ bestämmer

energimängden för en foton vid en viss våglängd. Om man antar att strålningen i PAR (0.4-0.7 μm) är kontinuerlig, lika mycket inkommande ljus i alla våglängder, kan medianvåglängden användas som är 0.51 μm (Oke, 1987).

PAR från flux-torn i Asa erhålls som *photosynthetic photon flux density* (PPFD) uppmätt varje halvtimme i enheten $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, och täcker i stort sett perioden april till juni år 2004 (juliansk dag 92 till 190). För att ta fram PAR i $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ görs beräkning enligt samma metod som ovan, men först efter att halvtimmesvärdena summerats till dagliga värden. Värden uppmätta på natten användes inte vid summering.

PAR från Asa användes sedan för att kontrollera säkerheten i modellerat PAR. Data från Asa innehöll 99 hela dagar och sträckte sig från dag 92 till 190. Samma tidsperiod togs ut ur modellerat PAR och en korrelationsanalys genomfördes för att kontrollera överensstämmelsen.

3.8 NPP

För uppskattning av nettoprimärproduktionen används ekvation 2.7. Mängden absorberat PAR, som behövs för att kunna beräkna NPP erhålls genom multiplicering av PAR med f_{APAR} (se ekvation 2.4).

Ljuseffektivitetsparametern ϵ är i denna studie hämtad från Lagergren *et al.*, (2005), som modellerade variationen i ϵ över tiden. Denna variation beror generellt på temperatur och vattentillgång, men för kallare klimat är det främst temperaturen som är avgörande. Vid modelleringen av ϵ användes därför en beräknad säsongsfaktor baserad på temperatur och frosthändelser. Även ett årligt värde på ϵ togs fram vilket beräknades från uppfångat PAR och uppmätt NPP. Vid beräkning av årligt NPP visade det sig att ett modellerat ϵ ej gav bättre resultat jämfört med ett konstant ϵ (Lagergren *et al.*, 2005). Gamon *et al.* (1995) fann liknande resultat, varför det kan anses adekvat att använda ett konstant ϵ i denna studie. Variationen i NPP över säsongerna kommer därmed inte att bli helt korrekt modellerad, men det årliga NPP kommer inte att divergera nämnvärt från NPP beräknat med ett varierande ϵ .

Det årliga värdet på effektivitetsparametern som beräknades i Lagergren *et al.* (2005) och användes i detta arbete är $\epsilon = 0.71 \text{ g C MJ}^{-1}$.

3.9 Extrapolering av förändringen i NPP

NPP beräknas ovan för ett antal utvalda pixlar och ger således en uppfattning om hur stor förändringen kan vara för ett specifikt område som pixeln utgör. För att få en bild av hur stor förändringen i NPP är för den hela stormdrabbade ytan i Sverige och Danmark utfördes en extrapolering av resultaten. Detta gjordes genom att beräkna en generell förändring i NPP som sedan utökades till en area beräknad utifrån ett antal uttagna MODIS-pixlar över Sverige och Danmark som ansågs innehålla en förändring orsakad av stormen.

Extraheringen av pixlar med förändring gjordes automatiskt med hjälp av ett för ändamålet framtaget skript som kördes i Matlab. Tio scener för varje år lästes in. De tio scenerna var samma för varje år och är tagna för den period under året då NDVI når sina högsta värden. Den valda perioden sträcker sig från april till början av september (juliansk dag 97 till 241). Åren som användes är samma som för övriga beräkningar, det vill säga 2000, 2003, 2004, och 2005. För att på ett enkelt sätt göra uttagningen av förändringspixlar beräknades medelvärden för de tio scenerna varje år. Medelvärden över ett satt tröskelvärde ansågs representera hög växtlighet så som skog. Om periodens medelvärde för år 2005 var större än detta tröskelvärde hade ingen förändring ägt rum i denna pixel. När samtliga medelvärden för åren före stormen var större än tröskelvärdet, samt 2005 års medelvärde var mindre beräknades differensen mellan tröskelvärdet och 2005 års medelvärde. Enbart om differensen var större än ett andra tröskelvärde valdes pixeln ut som en möjlig stormskadepixel. De båda tröskelvärdena sattes efter kontroll av de tidigare uttagna 16 storm- och 7 blandpixlarna. För ett antal av dessa pixlar beräknades medelvärden över den aktuella perioden. Dessa medelvärden låg sedan till grund vid fastställandet av det första medelvärdet som sattes till 200. Det andra tröskelvärdet bestämdes med hjälp av några pixlar med synbart liten förändring i NDVI för att på så sätt försäkra sig om att en så stor del som möjligt av de presumtiva stormskadepixlarna togs med vid den automatiska uttagningsprocessen. Det andra tröskelvärdet sattes till 5.8.

För att eliminera de förändringsområden som inte inträffat i skog maskades sådana pixlar bort med hjälp av marktäckedata (CLC 2000) från CORINE. I och med att Norge ej omfattas i CORINE-data och MODIS-scenerna ej täcker Finland kommer således enbart pixlar från Sverige och Danmark att tas med.

Den CORINE-data som användes vid överlagringen hade först genomgått en omklassning där alla klasser utom skog togs bort. Överlagringen med uttagna förändringspixlar från MODIS resulterade då i att enbart pixlar med förändring i skog visades. För att möjliggöra en sådan överlagring projicerades omklassad CLC-data till sinusoidal projektion i vilken MODIS-data är representerad i.

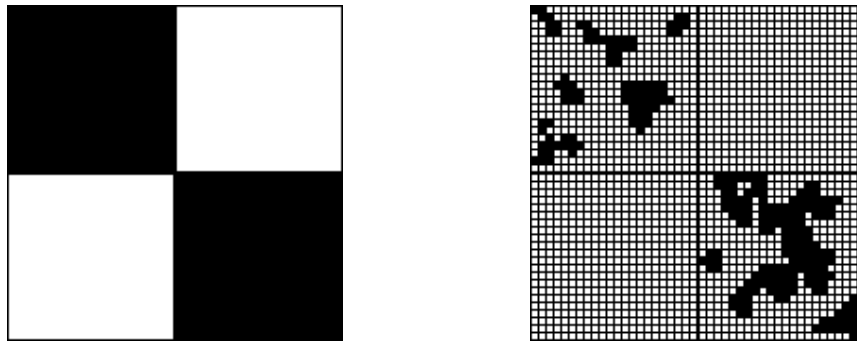
3.10 NDVI och rumslig upplösning

Den rumsliga upplösningen för en sensor påverkar den spektrala informationen som registreras. En hög rumslig upplösning innebär att det är lättare att få en bra spektral signatur för det område man är intresserad av. Motsatsen gäller då för en låg rumslig upplösning; det kan vara svårt att få en ren signatur för skog till exempel. Signalen kan ofta vara en blandning av olika vegetationstyper.

MODIS NDVI som användes i denna studie har en rumslig upplösning på 250 meter vilket är en relativt låg upplösning. Det är inte orimligt att tro att pixlarna innehåller blandad information, särskilt för områden med stormfällan. Även om den totala ytan stormfälld mark är stor behöver inte de enskilda ytorna vara så stora. NDVI-värdet i en MODIS-pixel över ett stormfälle kan därmed säkerligen vara påverkat av omkringliggande skog. NDVI-värdena för stormfällan skulle således kunna vara något högre i MODIS-data än de egentligen är.

En pixelaggregering av 2005 års SPOT-data genomfördes för att undersöka om en lägre rumslig upplösning kan ge högre NDVI-värden för stormfällen. Detta gjordes för en så stor yta som möjligt (4.4 x 4.2 mil) inom området för stormklassningen. Aggregeringen av pixlar utfördes för de röda och nära infraröda banden. Det betyder i det här fallet att pixelstorleken ändrades från 10 meter till 250 meter. Vid aggregeringen beräknades ett medelvärde för de ingående pixlarna som sedan sattes i den nya 250-meterspixeln. NDVI beräknades därefter både för 10 och 250 meter (NDVI₁₀, NDVI₂₅₀).

NDVI₂₅₀ överlgrades med stormskadeklassningen för att på så sätt ta ut de pixlar som innehåller någon andel stormfälla (NDVI_{250, s}). 2678 250-meterspixlar valdes ut, och för varje stormdrabbad pixel i NDVI_{250, s} finns det i NDVI₁₀ över motsvarande yta 625 pixlar. Dessa togs ut genom att NDVI₁₀ överlgrades med NDVI_{250, s}. Av dessa 625 pixlar är det inte alla som kommer att visa stormfälla. En del kan till exempel vara skog eller åker. På grund av detta gjordes ytterligare en överlagring mellan stormskadeklassningen och dessa 10-meterspixlar. För varje pixel i NDVI_{250, s} fanns nu ett antal 10-meterspixlar (NDVI_{10, s}), se figur 3.4. Medelvärdet av de uttagna 10-meterspixlar beräknades och korrelationen testades.



Figur 3.4. Principskiss för kontroll av den rumsliga upplösningens påverkan på NDVI. Svart pixel indikerar stormfälla i 250 (vänster) och 10 (höger) meters upplösning (NDVI_{250, s} respektive NDVI_{10, s}). Medelvärdet av de uttagna 10-meterspixlarna för varje 250-meterspixel beräknades och jämfördes med värdet i 250-meterspixeln.

3.11 Programvara

Ett antal olika programvaror har använts under arbetets gång. ArcGIS och ArcView (ESRI Inc) användes för GIS-arbetet samt till kartframställning och presentation. Transformationer av koordinater i samband med fältarbete gjordes med programmet Gtrans (Lantmäteriet). PCI Geomatica (PCI, Inc) användes för skapandet av marktäckedata visandes skog, för lokalisering av stormfällerna i MODIS-data, samt för projicering av CLC-data. Uttagning av tidsserier, samt säsongjustering av densamma utfördes med programmen Curve4 (Eklundh) och TIMESAT (Jönsson & Eklundh, 2004) respektive. GIS-programmet IDRISI (Clark, Inc) användes för aggregering av SPOT-scenen. Analyser och beräkningar utfördes med Matlab (The Mathworks, Inc) och Excel (Microsoft Corporation).

4 Resultat

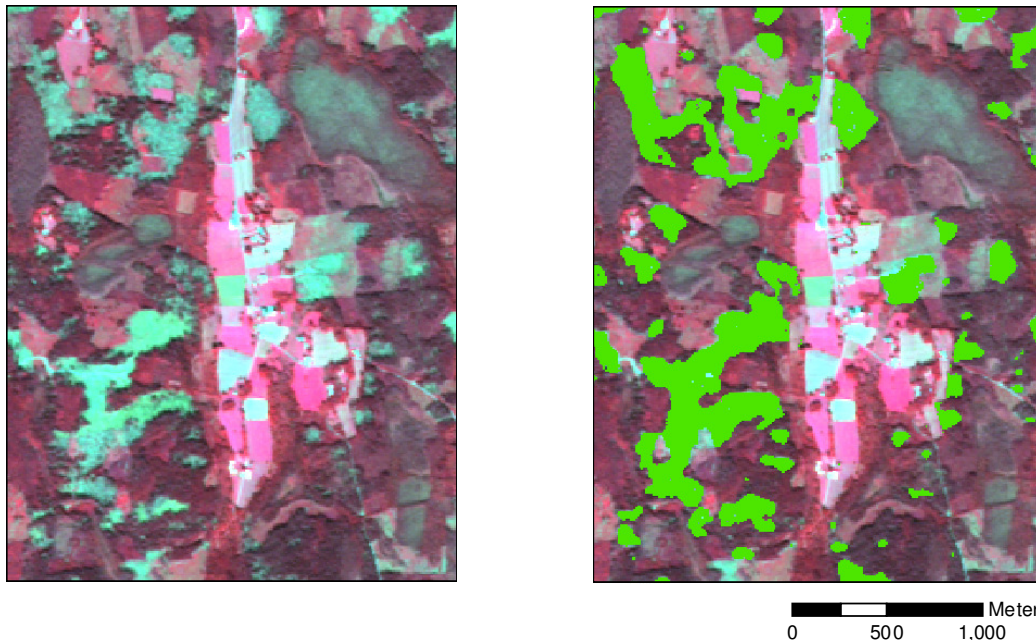
4.1 Klassificering av stormfällan

Utvärderingen av stormskadeklassificeringen gav ett totalt kappa-värde på 0.78, och en total objekts- och klassningsnoggrannhet på 89 respektive 90 % (tabell 4.1). Klassningen ger en relativt hög total noggrannhet, och i synnerhet kappa för klassen stormfälla har ett högt värde vilket är tillfredställande.

Tabell 4.1. Objektsnoggrannhet (A), klassningsnoggrannhet (B), samt kappa för klassificeringen av stormfällan med SPOT-data.

	A (%)	B (%)	Kappa
Stormfälla	83	95	0.89
Övrigt	95	85	0.70
Totalt	89	90	0.78

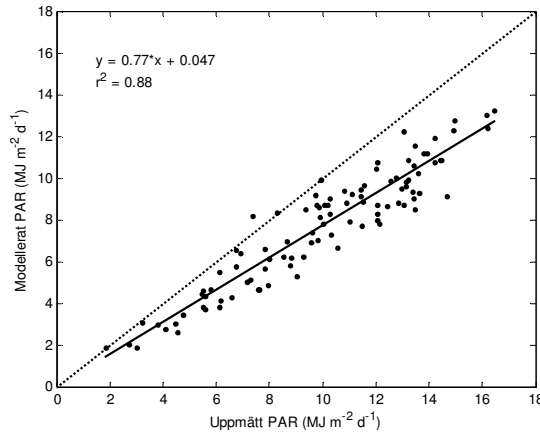
Metoden ger bra täckande ytor och fångar även väl upp små drabbade områden. Figur 4.1 visar en mindre del av 2005 års SPOT-scen med resultatet av klassningen presenterat som täckande ytor i klart grön färg till höger. Det kan ses att de klart turkosa stormfällan i sydväst fångas upp i klassningen. Även de mindre uppenbara områdena så som de mer mörka och spräckliga uppe i det nordvästra hörnet kommer med. I samma område kan dock ses en liten överskattning av stormfälld yta.



Figur 4.1. Utsnitt av SPOT-scen från 2005 med stormfällan i mörkt fläckigt till ljus turkost. Till höger ses klassningsresultat markerade med grönt.

4.2 Kontroll av PAR

För att kontrollera tillförlitligheten på modellerat PAR från SMHI jämfördes dessa med uppmätt PAR. Det i fält uppmätta PAR härstammar från flux-torn i Asa och modellerat PAR är extraherat från SMHIs strålningsmodell med koordinater för Asa. Data är signifikant korrelerade ($r^2 = 0.88$), men det modellerade PAR tenderar att vara något underskattat (medelskillnad = $2.28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) med ökande differens med ökande PAR (figur 4.2).

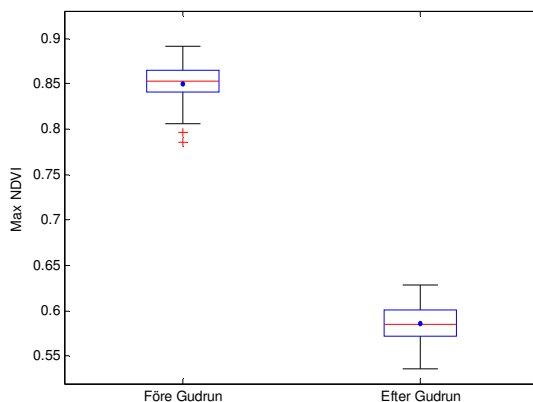


Figur 4.2. Uppmätt PAR från Asa fluxtorn mot modellerat PAR från SMHI med regressionslinje. Prickad linje visar förhållandet 1:1.

4.3 NDVI

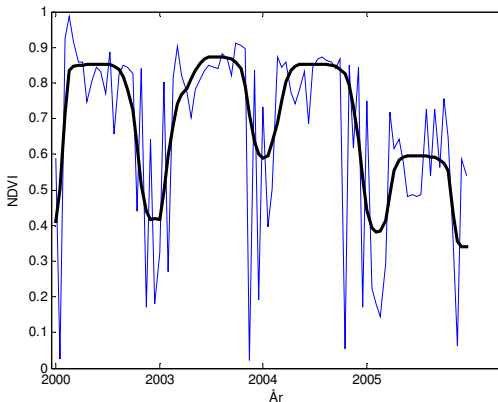
NDVI är en indikator på vegetationens hälsotillstånd, samt hur mycket vegetation det finns. Maximalt NDVI för ett år, som representerar ett skede när säsongen når sin kulmen, påverkar starkt årligt NPP. En jämförelse av maximalt NDVI mellan olika år är ett enkelt sätt att få en uppfattning om hur vegetationens tillstånd förändras.

Årligt maximalt MODIS NDVI efter att säsongjustering med TIMESAT är genomförd för alla utvalda pixlar ligger före stormen mellan 0.79 och 0.89 med ett medel på 0.85. År 2005, det vill säga efter stormen ligger maximalt NDVI mellan 0.54 och 0.63 för stormpixlarna (figur 4.3), och mellan 0.66 och 0.76 för blandpixlarna. Medelvärdet för det maximala NDVI 2005 är 0.59 och 0.70 för stormpixlarna respektive blandpixlarna.

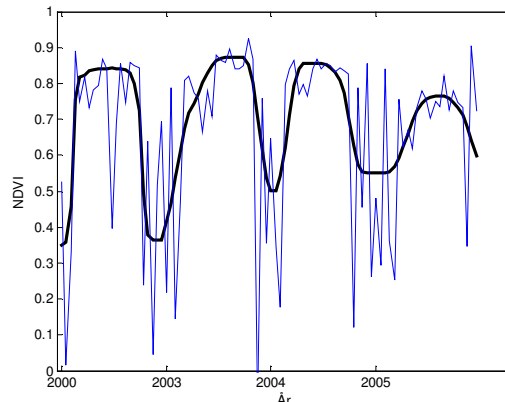


Figur 4.3. Boxplot visandes maximalt NDVI för de sexton stormpixlarna före (2000, 2003, och 2004) och efter (2005) stormen. Boxen visar övre och undre kvartilen, samt medianen. Punkten i boxen visar medelvärdet. Stavarna visar utbredningen i data och plus-tecknen visar på avvikande värden. Spridningen inom grupperna är liten, vilket betyder liten variation både mellan pixlarna och mellan olika år (före Gudrun).

Råa NDVI-data från MOD13Q1 varierar något från dag till dag, särskilt under vinterhalvåret. Detta beror troligen på att förekomsten av moln är hög under denna tid på året och att NDVI påverkas av atmosfäriska effekter, snö, och varierande solvinklar. Detta brus tenderar att höja justerat NDVI mellan växtsäsongerna. Exempel på råa NDVI-data kan ses tillsammans med säsongsjusterade kurvor i figur 4.4 a och 4.4 b för en typisk stormpixel respektive blandpixel.

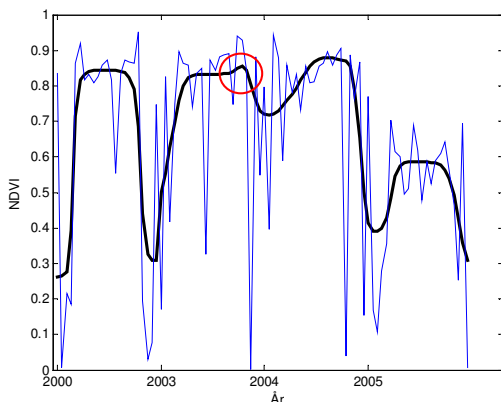


Figur 4.4 a. Råa NDVI-data från MOD13Q1 för en stormpixel tillsammans med utjämnad kurva anpassad i TIMESAT. Observera att åren 2001 och 2002 är borttagna.



Figur 4.4 b. Råa NDVI-data tillsammans med utjämnad kurva för en blandad pixel. Observera att åren 2001 och 2002 är borttagna.

Efter att NDVI säsongsjusterats i TIMESAT sågs att nedgången mellan växtsäsongerna 2001 och 2002 var för högt i så gott som alla punkter. Valet gjordes då att ta bort dessa två år. Den justerade kurvan är även hög mellan några andra år (se exempel i figur 4.5) men i ett fåtal pixlar och inte lika systematiskt som mellan 2001 och 2002 varför detta tilläts passera.

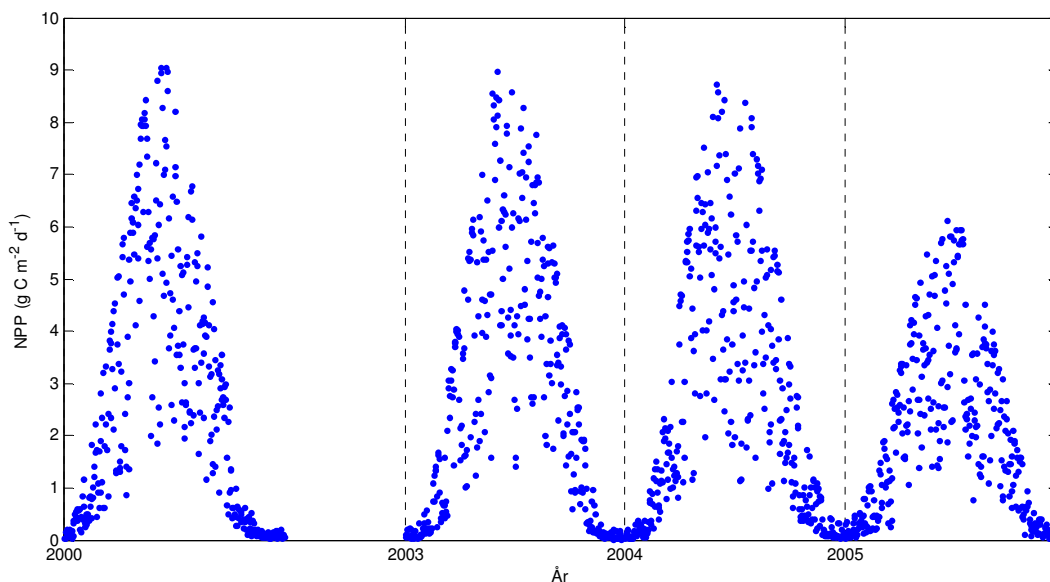


Figur 4.5. Råa NDVI-data tillsammans med säsongsjusterad kurva. Tre mer eller mindre felaktiga värden i slutet på säsongen 2003 som ej viktats ner har skapat en puckel i utjämnad kurva (se cirkelmarkering), och som följt en förskjutning av nedgången på hösten. För mycket brus under vintern har dessutom orsakat för hög anpassning mellan växtsäsongerna 2003 och 2004. År 2001 och 2002 är borttagna.

4.4 NPP

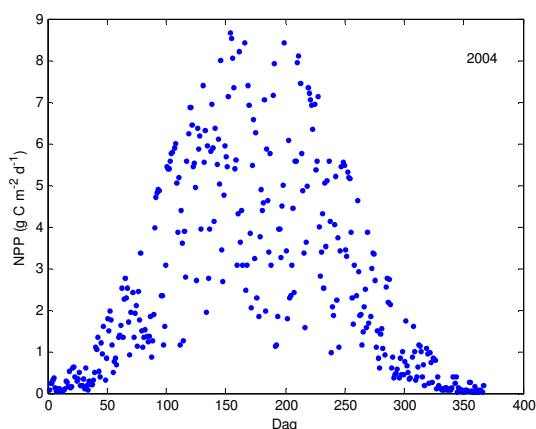
Nettoprimärproduktionen beräknades på daglig basis baserat på interpolerade $fAPAR$ -värden och modellerat PAR från SMHI. För ϵ användes 0.71 g C MJ^{-1} hämtat från Lagergren *et al.* (2005). I figur 4.6 ses ett exempel på daglig NPP beräknat för storm-

pixel 1. Som mest uppnår NPP före stormen ett värde runt $8-9 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, medan det efter stormen knappt går upp till $6 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

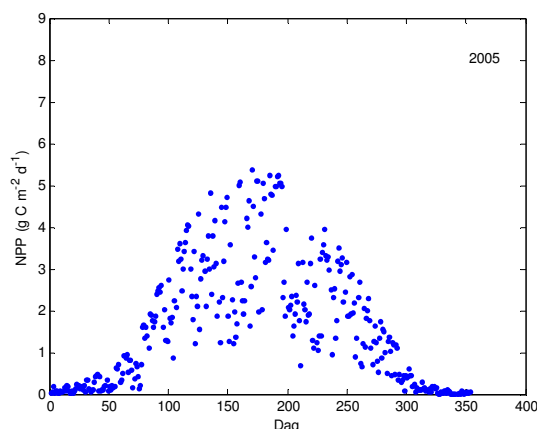


Figur 4.6. Beräknat dagligt NPP för åren 2000, och 2003-2005 för stormpixel 1.

Figur 4.7 a och 4.7 b visar dagligt NPP för stormpixel nummer fyra, vilket är en pixel som uppvisar en av de största förändringarna. Maximalt NPP är 2004 $8.68 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Det dagliga NPP för 2005 är som störst $5.39 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

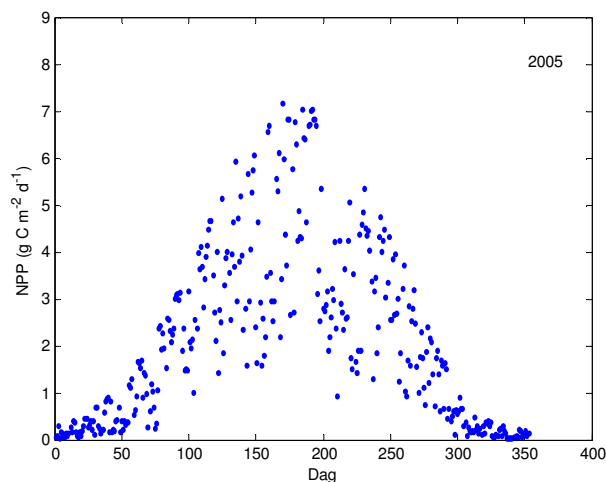


Figur 4.7 a. NPP för stormpixel nummer 4 år 2004.



Figur 4.7 b. NPP för samma stormpixel år 2005.

Dagligt NPP 2005 för en av blandpixlarna kan ses i figur 4.8. Maximalt NPP för detta år är $7.16 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Största värdet på dagligt NPP under säsongen år 2004 för denna pixel är $8.44 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. I alla pixlar är det generellt en stor spridning i dagligt NPP, och särskilt under växtsäsongen där NPP kan variera från $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ till nästan $9 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ åren före stormen. Denna variation i NPP återspeglar de dagliga variationerna i PAR.



Figur 4.8. NPP för blandpixel nummer 1 år 2005.

Tabell 4.2 och 4.3 visar totalt årligt NPP för de 16 stormpixlarna respektive de 7 blandpixlarna åren före stormen, samt för år 2005 då stormen inträffade. För åren före stormen varierar det årliga NPP för alla pixlar mellan 900 och 1072 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$, bortsett från två värden under 900. Generellt är NPP för 2003 något högre än 2000 och 2004 med merparten av värdena över 1000 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$. Annars uppvisar data inga större variationer eller anomalier. För 2005 varierar årligt NPP mellan 577 och 726 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$ för stormpixlarna, och årligt medel är 658 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$ (tabell 4.4). För blandpixlarna varierar årligt NPP 2005 mellan 756 och 863 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$ med ett medel på 795 $\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$ (tabell 4.4). Som minst ses en förändring i NPP på 12 % från medelvärdet för åren före stormen till 2005.

Tabell 4.2. Årligt NPP ($\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$) för de 16 stormpixlarna för åren före stormen (2000, 2003, 2004) och året för stormen (2005). Inom parentes visas den procentuella förändringen från medelvärdet före stormen.

Pixel	2000	2003	2004	2005
1	973	1008	961	697 (29 %)
2	965	1029	1000	709 (29 %)
3	982	1036	923	643 (34 %)
4	927	1023	978	577 (41 %)
5	954	1056	982	603 (40 %)
6	995	1037	971	666 (33 %)
7	969	1020	974	659 (33 %)
8	961	985	936	615 (36 %)
9	972	1034	982	667 (33%)
10	946	988	868	653 (30 %)
11	966	1021	900	650 (32 %)
12	967	1053	971	726 (27 %)
13	929	1015	959	691 (29 %)
14	967	939	935	686 (28 %)
15	984	1030	922	635 (35 %)
16	980	1040	952	652 (34 %)

Tabell 4.3. Årligt NPP ($\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$) för de sju blandpixlarna åren före stormen och året för stormen. Inom parentes visas den procentuella förändringen från medelvärdet före stormen.

Pixel	2000	2003	2004	2005
1	992	951	875	766 (18 %)
2	981	1072	989	798 (21 %)
3	988	1030	966	810 (19 %)
4	921	977	983	804 (16 %)
5	973	1014	940	863 (12 %)
6	962	917	981	756 (21 %)
7	934	1035	982	771 (22 %)

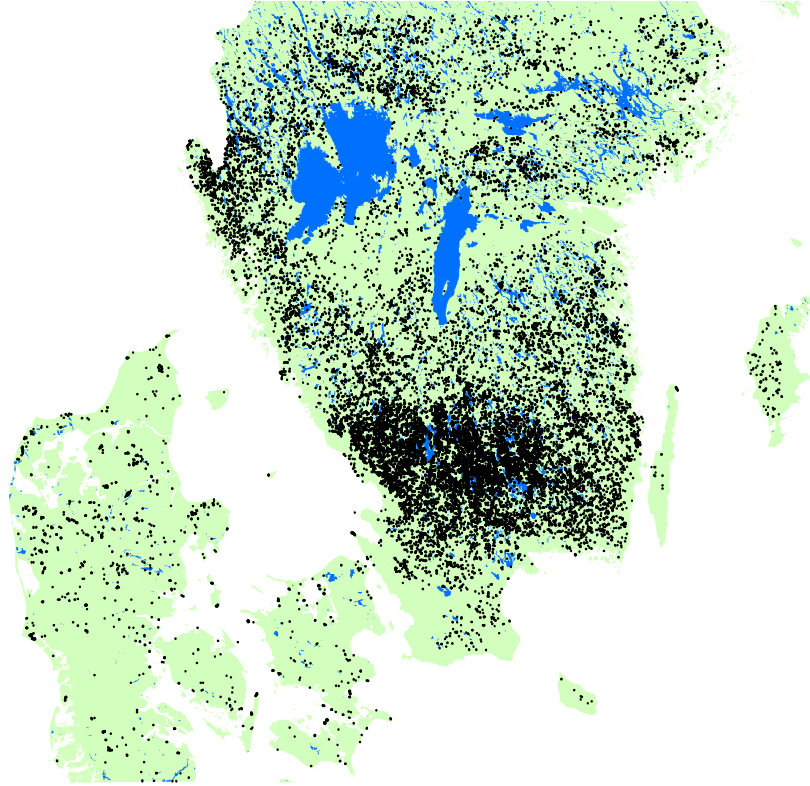
Den generella trenden med något högre årligt NPP för 2003 beror på högre värde av PAR och därmed APAR för detta år jämfört med 2000 och 2004 (tabell 4.4).

Tabell 4.4. Årligt medelvärde för APAR ($\text{MJ m}^{-2} \text{år}^{-1}$) och NPP ($\text{g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$) för de 16 stormpixlarna (APAR_s , NPP_s) respektive sju blandpixlarna (APAR_b , NPP_b). Inom parentes visas medelförändring i % från medel före stormen.

År	APAR_s medel	APAR_b medel	NPP_s medel	NPP_b medel
2000	1359	1359	965	965
2003	1436	1408	1019	1000
2004	1339	1351	951	959
2005	927 (33 %)	1120 (18 %)	658 (33 %)	795 (18 %)

4.5 Extrapolering av förändringen i NPP

Om man antar att ett medelvärde av de årliga medel-NPP för åren före stormen ur tabell 4.4 representerar ett "normalt" årligt NPP för skog i Skandinavien kan man göra en grov uppskattning av den totala förändringen i NPP över Skandinavien. Det årliga "normala" NPP blir då $978 \text{ g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$, och förändringen från det "normala" till efter stormen kommer att vara $320 \text{ g C m}^{-2} \text{år}^{-1}$, eller $3.20 \text{ t C ha}^{-2} \text{år}^{-1}$. Extrahering av pixlar med förändring i skog ur MODIS-data visade på en total area av 217 650 ha för Sverige och Danmark, med 208 163 ha enbart över Sverige. Den rumsliga fördelningen av dessa pixlar kan ses i figur 4.9. En extrapolering av förändringen i NPP till den totala ytan ger en minskning från 2.13 till $1.43 \cdot 10^6 \text{ t C år}^{-1}$ på grund av stormen, vilket innebär en förändring med $0.70 \cdot 10^6 \text{ t C år}^{-1}$. Bara för Sverige kommer förändringen i NPP att vara $0.67 \cdot 10^6 \text{ t C år}^{-1}$.



Figur 4.9. Automatiskt uttagna förändringsområden i skog (total stormdrabbad area) över Sverige och Danmark markerad med svart.

4.6 NDVI och rumslig upplösning

Vid jämförelse mellan 10-meterspixlarna och de aggregerade 250-meterspixlarna framkommer att $NDVI_{250, s}$ är något högre än medelvärdet för de motsvarande uttagna pixlarna i $NDVI_{10, s}$ (medelskillnaden är ca 0.1). Ett linjärt samband finns ($r^2 = 0.48$) som säger att 48 % av variationen i $NDVI_{250, s}$ kan förklaras av variationer i $NDVI_{10, s}$. Det finns således en risk att även MODIS NDVI kan vara något för högt i de stormdrabbade områdena, vilket i sin tur kommer att generera ett NPP som är för högt. Om medelskillnaden 0.1 används och dras bort från NDVI för en dag i september vid den ungefärliga tiden för registreringen av SPOT-bilderna, kommer NPP för de 16 stormpixlarna den dagen i medel minska från 1.41 till 1.13 $g C m^{-2} d^{-1}$.

5 Diskussion

5.1 Klassificering av stormfällan

Klassificering av stormfälla med SPOT-data utfördes med en metod baserad på skillnader i NDVI. Totalt kappa för karteringen är 0.78 och individuellt kappa för klassen stormfälla är 0.89. Noggrannhetsutvärderingen av de karterade stormfällorna baserades på de 85 punkter som insamlades i fält. Förhållandevis många av dessa punkter hamnade i kantzoner mellan skog och storm (eller kalhygge), vilket kan ha bidragit till en något lägre noggrannhet. Kantzoner innebär alltid ett problem vid klassificering av markanvändning eftersom en pixel i detta fall kommer att innehålla spektrala signaturer från både skog och stormfälla (blandad pixel). Vid en analys med skillnader i NDVI kan en sådan pixel då hamna utanför ett valt förändringsintervall. Karteringen av skog som gjordes kommer också att drabbas av tveksamheter runt kantonerna vilket ökar den totala osäkerheten vid dessa områden. Precisionen i GPSen som använts vid uppsökandet av punkterna i fält introducerar en osäkerhet, vilken blir extra stor vid dessa kantzoner.

Enligt en del rekommendationer för noggrannhetsutvärderingar bör det totala kappa vara minst 0.85, och kappa för de enskilda klasserna vara 0.70 (Thomlinson *et al.*, 1999). Minimivärden för noggrannhetsutvärderingar beror dock på användningen av klassningen och kan därmed variera. Det totala kappa för klassningen når inte upp till det rekommenderade minimivärdet, men kappa för klassen stormfälla är väl över det rekommenderade värdet. Eftersom det endast är klassen stormfälla som är av intresse i detta arbete är det totala kappa av mindre betydelse. Även efter en visuell utvärdering av resultatet kan klassningen ses som klart acceptabel. Även om en del mindre områden har överskattats, samtidigt som ett antal andra har underskattats något är detta inget som har en större avgörande roll för det fortsatta arbetet. Uttagningen av stormskadade skogspixlar i MODIS-data kan inte sägas ha påverkats negativt av de mindre över- och underskattningarna.

Geokodningen som genomfördes för att inpassa klassningsresultatet med MODIS-data gav ett RMS-fel på 0.35, eller 88 meter. Det är ett stort fel men är mindre än en halv pixel i MODIS. Vid uttagningen av kontrollpunkterna är det svårt att hitta den exakta motsvarande punkten i data med 250 meters upplösning till en vald punkt i data med 10 meters upplösning. Detta gör att RMS-felet kan bli högt trots att transformationen av bilden vid en visuell komparation ser bra ut.

5.2 NDVI och fAPAR

5.2.1 MODIS

För att generera en MODIS kompositscen kan tre olika tekniker användas; ett BRDF-schema, en utökad maxvärdeteknik, eller ett enkelt maxvärde. Data i detta arbete är producerade med den andra metoden, utökad maxvärdeteknik. De olika metoderna ger olika bra resultat, och vid studier på pixelnivå kan resultatet påverkas av använd kompositmetod. BRDF-metoden skall till exempel justera för olika observationsvinklar men är begränsad i användningen på grund av kravet på minst fem molnfria observationer. Som ett resultat av detta är det mesta av bruset i kompositbilderna orsakade av effekter från olika observationsvinklar, och en del rester från moln och

aerosoler (Huete *et al.*, 2002). Detta kan leda till missbedömningar av till exempel längden och toppen på växtsäsongen. Förekomsten av moln är vanligast på hösten och vintern och det är även då som bruset i NDVI-data är som störst. Epiphany och Huete (1995) visade på stora variationer i NDVI beroende på sensorns observationsvinkel, med högre NDVI om mätningar utförs med solen bakom sensorn och lägre NDVI när sensorn pekar mot solen. MVC-metoden, som väljer det högsta värdet, har visat sig välja mätningar utanför nadir och därmed högre NDVI-värden än motsvarande nadirmätning (TBRS, 2002). Denna metod används dock endast som sista utväg om inte någon av de andra metoderna kan användas. Den utökade maxvärdestekniken jämför de två högsta NDVI-värdena och väljer det med den lägsta tittvinkeln eftersom en större tittvinkel ofta ger ett högre NDVI. Denna metod har setts reducera tittvinkeln, och således skapa jämnare NDVI både spatialt och temporalt (Huete *et al.*, 2002). Oavsett använd metod kommer fel att finnas i data, särskilt då bara en pixelregistrering finns för en 16-dagarsperiod. I detta arbete utfördes en säsongjustering av råa NDVI-data med TIMESAT vilket kommer att reducera betydelsen av dessa fel.

Vid justering av kurvor i TIMESAT försöktes att inte passa kurvorna för högt i topparna, då råa NDVI-data kan vara för höga på grund av sensoriska vinkeleffekter. Detta begränsar problemen med återstående kompositrelaterat brus något men slutligt NDVI kan ändå påverkas, se figur 4.3. Dock ska man komma ihåg att ett avvikande värde efter säsonganpassning för en tidpunkt inte avgör tillförlitligheten och användandet vid en analys likt denna, utan det är tidsserien som helhet som är det intressanta. Det dagliga NPP för puckelns toppunkt i figur 4.3 kan komma att avvika något eftersom NDVI-värdet i detta fall kan vara ungefär 0.2 högre än det hade varit om nedgången efter säsongen börjat tidigare. Vid en jämförelse med beräknat NPP för det "egentliga" lägre NDVI-värdet med samma inkommande PAR kommer uppskattningen av NPP från kurvan den dagen att vara 36 % högre. Detta är en betydande skillnad vid jämförelser på daglig basis, men sett över hela året kommer betydelsen av ett enskilt avvikande värde avsevärt att minska och kanske vägas upp av en motsatt förskjutning. Ett osäkert värde faller inte hela serien.

NDVI-produkten MOD13Q1 är en kompositbild framtagen på pixelbasis, där varje pixel får antingen ett värde från en dag under 16-dagarsperioden eller ett beräknat värde från flera dagar från samma period. Följaktligen kan man inte veta vilken dag som slutligen gett värdet i en pixel, och data har en inneboende 16-dagars osäkerhet. Vid interpolering av $fAPAR$ anses värdet i varje pixel representera dag ett i sextondagarsperioden. Detta kan introducera ett litet fel vid beräkning av $APAR$ då en skillnad på 16 dagar mellan $fAPAR$ och PAR kan uppstå. Detta fel anses dock vara mindre eller likvärdigt som om samma $fAPAR$ använts för hela sextondagarsperioden.

De höga NDVI-värdena i MODIS (~0.8 före stormen och ~0.6 efter stormen) beror på att MODIS-data är atmosfärskorrigerade, vilket höjer NDVI med ca 0.2. Emellertid har det uppenbarats att MODIS NDVI kan vara något överskattat. Detta kan bero på att överkorrigering för atmosfärisk spridning orsakar en konstgjort låg röd reflektans och därmed höga NDVI-värden (Cheng *et al.*, 2006).

5.2.2 Oröjda stormfällan

Reflektansen i rött och NIR brukar efter storm öka respektive minska på grund av minskad mängd klorofyll och förändrad struktur på döende blad följt av minskad

mängd blad. Detta leder således till ett lägre NDVI. Den registrerade förändringen före stormen till efter stormen i NDVI är för stormpixlarna runt 0.2, vilket kan tyckas vara en liten förändring med tanke på den förödelse stormen Gudrun orsakade. Värdena är dock registrerade samma år som stormen rasade och röjningsarbetet i de drabbade områdena hade ännu inte fortskridit så långt. Det kan vara så att de fallna träden låg kvar i många av områdena.

Emellertid kan för ett fåtal pixlar en negativ trend skönjas i råa NDVI-data under växtsäsongen 2005. NDVI-värdena sjunker något med tiden. Denna trend är dock för liten för att vara synlig efter i TIMESAT utförd säsongjustering. Orsaken till denna svaga negativa trend kan vara att röjning av området sker under säsongen.

Ett öröjt stormfälle innebär att det finns en möjlighet att finna träd med intakta rötter som kan ta upp vatten och transportera till kronan. Ett antal stående träd som klarat sig oskadda från stormen är också rimligt att vänta sig. Vid storm kan träden antingen knäckas i stammen eller slitas upp med rötterna. På grund av den milda vintern var det vid tiden för stormen ingen tjäle och marken var väldigt blöt (SMHI, 2005). Detta kan ha orsakat att många träd inte knäcktes utan slets upp ur marken. Under fältarbetet noterades också att rotvältor inte var någon ovanlig syn. Träd med rotvältor torde rimligtvis ha en del av sina rötter hela som kan bidra till att transportera vatten för att hålla fotosyntesen aktiv. Det behövs inte mycket för att hålla uppe systemet och bibehålla en viss fotosyntes. Trädens tålighet kan illustreras med hjälp av följande exempel. Vid ringbarkning av ett träd så dödas det på grund av att näringstransporten till rötterna bryts. Om en liten bit missas vid processen så kan den kvarvarande barken fungera som en brygga vilket är tillräckligt för att trädet skall fortsätta leva. Träd har alltså en stor förmåga att klara sig trots svåra förhållanden.

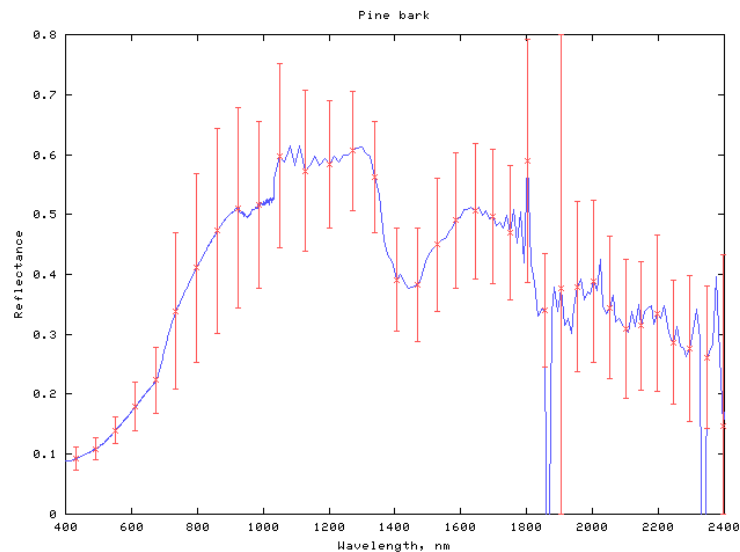
Under fältarbetet sågs även stormfällan som fortfarande, mer än ett år efter stormen, inte var röjda. En del träd i dessa vindfällan hade fortfarande gröna delar kvar. Om vatten- och näringstransporten i dessa träd brutits helt på grund av stormen skulle träden ha förlorat barren under den efterföljande säsongen. Att finna gröna delar mer än ett år efter stormen betyder således att en viss fotosyntes fortfarande är aktiv. Öröjda områden med en bibehållen fotosyntes, om än betydligt decimerad, kommer att påverka NDVI. Detta kan då vara en av orsakerna till ett något högt värde på NDVI efter storm.

Det är känt att barrskog generellt har en lägre reflektans än en lövskog. Den låga reflektansen i barrskogen kan bland annat bero på kronans form och att barr absorberar mer av strålningen än löv. En barrskogs kronyta är dessutom mer ojämn än för en lövskog, och med en ojämn yta ökar skuggade partier varvid reflektansen blir lägre i alla våglängder. Olika form på kronan resulterar i olika reflektansvärden, och en konisk form (gran) har setts ge lägre reflektans än en ellipsoidformad krona (löv) eftersom en ellipsoidformad krona tillåter en större del av kronan att bli solbelyst och därmed reflektera mer (Rautiainen, 2005). Man kan då tänka sig att en nedfallen gran kommer att få en något större solbelyst grön yta än en stående gran, och således en något högre reflektans från trädets gröna delar. Detta gäller dock enbart så länge som barren är gröna och sitter kvar på trädet. Vid en jämförelse på trädnivå kan skillnaden i reflektans bli betydande, men skulle även kunna påverka reflektansen för ett större område genom att positivt justera NDVI så länge som barren är gröna. Den totala effekten på den uppmätta reflektansen och NDVI bör dock vara mindre än den från

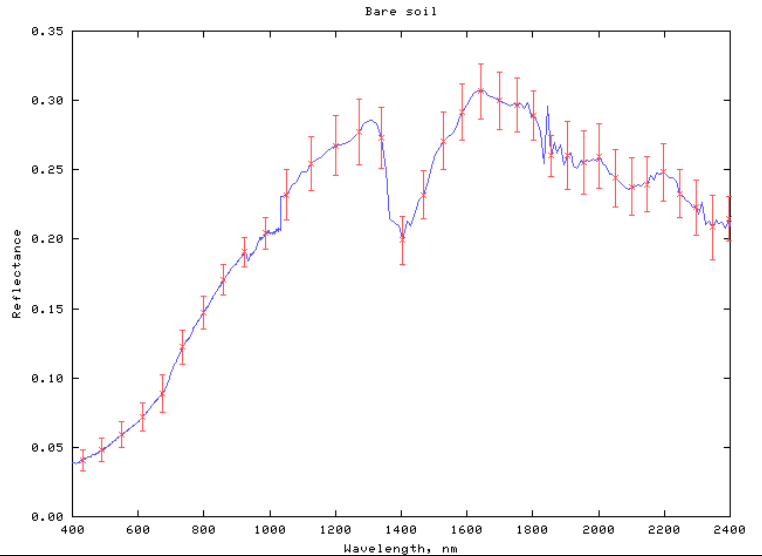
jorden och undervegetationen eftersom LAI kommer att sjunka och mer inkommande strålning kommer att träffa och reflekteras från markytan.

5.2.3 Ickefotosyntetiserande vegetation

En annan orsak till det höga NDVI efter stormen kan vara reflektans från stam och grenar. Lang *et al.* (2002) har mätt upp reflektans från bland annat stammens bark av gran och tall samt bar mark i Estland och Sverige (se figur 5.1 a och b). Områden med bar mark som uppmätts är bland annat kalhyggen, vilket kan ses som likvärdigt med röjt stormfälle. Barmarks-områdena består således av jord, rester av döda växtdelar med mycket sparsam vegetation. Reflektanskurvan för bark är inte helt olik den för kronan, och reflektansen i NIR för tallens bark är ungefär i samma storlek som för ett tallbestånd. Barken kan alltså påverka NDVI för en pixel genom att hålla det uppe. Vid ett oröjt stormfälle då de flesta träderna positionerat sig i ett något mera horisontellt läge torde trädens stam och grenar utgöra en betydande del av den totala reflektansen från en stormfälld pixel. Det inte obetydliga inslaget av stam och grenar skulle då kunna leda till en positiv justering av NDVI. För framställning av MODIS NDVI används rött och nära infrarött med våglängdscentrum 0.65 och 0.86 μm respektive (Vermote *et al.*, 2002). Ur figur 5.1 a kan i dessa våglängder utläsas en ungefärlig reflektans på 45 % i NIR och 20 % i R, vilket kommer att ge ett relativt högt NDVI på 0.38.



Figur 5.1 a. Uppmätt reflektanskurva (medelvärde och varians) av bark från tallstam (Lang *et al.*, 2002).



Figur 5.1 b. Uppmätt reflektanskurva (medelvärde och varians) av bar mark (Lang *et al.*, 2002).

Den i några pixlar synliga svaga negativa trenden i råa NDVI som antas bero på röjning av stormfällena kan i viss mån grovt illustreras av figurerna 5.1 a och b, där 5.1 a får representera ett öröjt stormfälle och 5.1 b ett röjt stormfälle. Reflektansen ur figur 5.1 b för MODIS våglängdscentra i NIR och R utläses till ca 17 % respektive 8 %, vilket ger ett NDVI på 0.36. För ett öröjt stormfälle är det dock mer än bara barken som påverkar reflektansen. Gröna växtdelar (både fotosyntetiserande och ickefotosyntetiserande), marken, och undervegetationen bidrar alla till den totala reflektansen och kan höja NDVI något. NDVI från avläst reflektans i figur 5.1 b visar emellertid att även den bara marken för ett kalhygge, eller röjt stormfälle, kan vara relativt högt. Den svaga negativa trenden i råa NDVI-data är således mest trolig att bero på röjning av stormfällena.

Asner *et al.* (1998) använde en kombinerad metod med fältmätningar tillsammans med en strålningsmodell för att kvantifiera bland annat mängden PAR som absorberas av stammar i busk- och trädvegetation. Studieområdet var savann och buskmark med träd, buskar, och örter. Med modellen fann de att närvaron av ickefotosyntetiserande vegetation (t ex stam och döda växtdelar) hade en signifikant effekt på vegetations-taketets $fAPAR$. För träd med LAI som var mindre än 3.0 ökade stamytan $fAPAR$ med 10 till 40 %. Vidare såg man ingen skillnad i absorption av PAR mellan stam och lövmaterial. Liknande resultat fann Gamon *et al.* (1995) som med fältmätningar gjorda för tre olika vegetationstyper i Kalifornien (gräs-, busk- och skogsmarker) visade att sambandet mellan NDVI och $fIPAR$ är starkt för många olika grader av heterogena vegetationstak, men först efter korrigering för död biomassa. PAR absorberas av ickefotosyntetiserande vegetation och med uppskattningar av $fAPAR$ från NDVI finns då en risk att beräkning av NPP överskattas.

Resultaten från Asner *et al.* (1998) och Gamon *et al.* (1995) gäller för andra ekosystem än det som studerats i detta arbete men torde ändå ge en uppfattning om en eventuell problematik. Särskilt för ett stormfälle med stor reduktion i LAI, då en stor del av reflektansen kommer att utgöras av ickefotosyntetiserande vegetation i form av stammar och grenar (både döda och levande) som absorberar PAR och därmed

påverkar uppskattningen av NPP. Storleksförhållandet i $fAPAR$ mellan fotosyntetiskt aktiv vegetation respektive ickefotosyntetiserande vegetation, det vill säga hur stor del av $fAPAR$ som utgörs av respektive del, kan därför påverka det linjära sambandet mellan NDVI och $fAPAR$. Det betyder att sambandet mellan NDVI och det faktiska $fAPAR$ för ett oröjt stormfälla eventuellt inte är så starkt linjärt som för den tidigare skogen.

5.2.4 Rumslig upplösning

Det höga NDVI från MODIS efter stormen, kan delvis även bero på den rumsliga upplösningen på 250 m, då mer än den spektrala signaturen från stormskadade områden syns i scenerna. Även om den totala drabbade arean efter stormen är stor så kan de enskilda områdena vara relativt små och utspridda. Det blir då svårt att i en pixel enbart få med ett område drabbat av stormen. Stormpixlarna i denna studie togs ut där de klassade stormfällena var så stora som möjligt för att på så sätt minska mängden blandad pixelinformation. Emellertid är det så att ett stort område klassat som stormfälla inte nödvändigtvis behöver representera en yta där vartenda träd ligger ner. Stormfällena i klassningen togs ut med ett intervall i NDVI-förändringen, vilket innebär att både rena stormfällor samt mixade områden togs ut. Dock är chansen större att inom ett stort område stormfälla hitta MODIS-pixlar med så ren information som möjligt. Trots detta kommer även dessa pixlar att innehålla blandade spektrala signaturer påverkade av omkringliggande skog, och därmed få ett något högre NDVI än för en helt ren pixel. För att testa detta genomfördes en pixelaggregering med SPOT-scenen från 2005. Jämfört med originalscenen blev NDVI för den aggregerade scenen något högre för de stormskadade områdena, och visade på en positiv korrelation. Medelskillnaden blev ca 0.1. Förhållandet testades på SPOT-data, och även om en enkel metod användes torde det ge en indikation på ett generellt rådande förhållande. Således kan även MODIS NDVI vara något höga, vilket bör tänkas på vid jämförelser av NDVI med olika rumsliga upplösningar.

En metod som hade gett mer konkreta svar hade varit att direkt jämföra beräknat NDVI för SPOT med MODIS NDVI. En direkt jämförelse är dock inte möjlig på grund av de båda sensorernas radiometriska skillnader. För att en jämförelse skall kunna göras behöver SPOT-data kalibreras för de radiometriska skillnaderna samt atmosfärskorrigeras med en metod likvärdig den för MODIS.

5.3 LUE-modellen och NPP

LUE-modellen bygger på antagandet att det från satellitbaserat NDVI linjärt går att uppskatta $fAPAR$, och således även NPP. Detta under förutsättning att ingen stress påverkar ekosystemet. Tillämpligheten i vegetationsindex som indikatorer av NPP är till stor del grundad på empiriska resultat från horisontellt homogena vegetationstak. Efter en storm kommer dock vegetationstaket att vara mer heterogent. En syn är att stress reducerar vegetationens förmåga att absorbera PAR, och således sänker NDVI, medan ϵ förblir relativt konstant. Andra studier pekar på att NPP för stressad vegetation inte kan uppskattas enbart från NDVI på grund av variationer i ϵ (Gamon *et al.*, 1995).

I denna studie har ett årligt värde på ϵ användes till skillnad mot ett ϵ som varierar över säsongen. Eftersom beräkningar av NPP främst jämfördes på årlig basis ansågs det inte nödvändigt att använda ett säsongsvariande ϵ . Skulle man analysera förändringar över säsongen i NPP hade ett varierande ϵ varit att föredra. Här användes ett ϵ inte bara konstant över säsongen utan över alla år, vilket introducerar en felkälla. Det bör även nämnas att det använda ϵ är beräknat för en barrskog i Norunda, mellersta Sverige, baserat på PAR vilket för denna lokal är något lägre jämfört med undersökningsområdet i detta arbete. Det är känt att ϵ varierar över året, och även från år till år (se t ex Ahl *et al.*, 2004). Modellerings av ϵ utförd av Lagergren *et al.* (2005) visade på variationer i årliga värden mellan 0.57 och 0.71 g C MJ⁻¹ för tre år. Värdet 0.71 som användes i denna studie är något högt jämfört med resultat från andra studier, och kan bero på att PAR absorberat av undervegetationen ej är inkluderat vid framtagandet av ϵ . Goetz och Prince (1996) tillskrev i sin rapport värden varierande från 0.12 till 0.64 g C MJ⁻¹ för boreal gran, och Runyon *et al.* (1994) fann för barrskogar värden på ϵ mellan 0.13 och 0.66 g C MJ⁻¹.

LUE-modellen med ett konstant ϵ ger bra uppskattningar av NPP så länge som skogen förblir en skog. I och med att stormen har rasat och den tidigare skogen nu har blivit ett stormfälla ändras förutsättningarna, både vad gäller som tidigare nämnts uppskattningen av $fAPAR$ från NDVI och användandet av ett konstant ϵ . När skogen försvinner förändras otvivelaktigt värdet på ϵ , vilket troligen kommer att sjunka på grund av en förändrad och mer sparsam vegetation.

Med ett konstant ϵ är de synliga förändringarna i NPP endast en produkt av förändringar i NDVI. ϵ är en känslig parameter och för att korrekt uppskatta årligt NPP med satellitbaserade vegetationsindex så som NDVI krävs noggrant framtagna värden på ϵ som varierar mellan åren. Eftersom ϵ med stor sannolikhet är artspezifikt (Ahl *et al.*, 2004) kan dessutom ett spatialt varierande ϵ användas som då fastställs baserat på artsammansättning, men även ålder och störning/stress.

Den årliga nettoprimärproduktionen för skogsområdena är innan stormen jämn med liten variation mellan åren, och då beroende på mängden PAR. NPP före stormen ligger mellan ca 950 och 1000 g C m⁻² år⁻¹ vilket är i paritet med beräkningar av Lagergren *et al.* (2005) för en blandad barrskog i mellersta Sverige (tabell 5.1). NPP i tabell 5.1 är beräknade med uppfångat PAR (skillnaden mellan uppmätt PAR över lövtaket och uppmätt PAR under lövtaket) och en effektivitetskonstant, $\epsilon = 0.71$. PAR_u är jämförbart med APAR i tabell 4.3. Studieområdet i Lagergren *et al.* (2005) är beläget längre norrut (ca 36 mil) varvid PAR är litet lägre, och följaktligen även absorberat eller uppfångat PAR. Detta är troligen en av orsakerna till att NPP-värdena är något lägre än för de utvalda punkterna i detta arbete.

Tabell 5.1. Uppfångat PAR (PAR_u) och beräknat NPP från Lagergren *et al.* (2005).

År	PAR _u	NPP
1997	1348	957
1998	1070	760
1999	1323	939

Ett problem med utvärderingen av NPP-beräkningarna är att de inte kunnat bedömas utifrån fältuppmätta data från studieområdet. Uppskattning av NPP från fältmätningar hade varit ovärderligt för validering av resultaten. Jämförelse görs nu istället mot en liknande skog men som är lokaliserad på en högre latitud. Det betyder således att det mellan de två områdena är skillnader i bland annat ljusförhållanden, jordmån, och undervegetation. Dessutom kan ingen jämförelse göras med andra stormfällen då det saknas information och studier om hur storm påverkar NPP och kolbalansen. Detta faktum gör det uppenbart svårt att validera de beräknade värdena på NPP efter stormen.

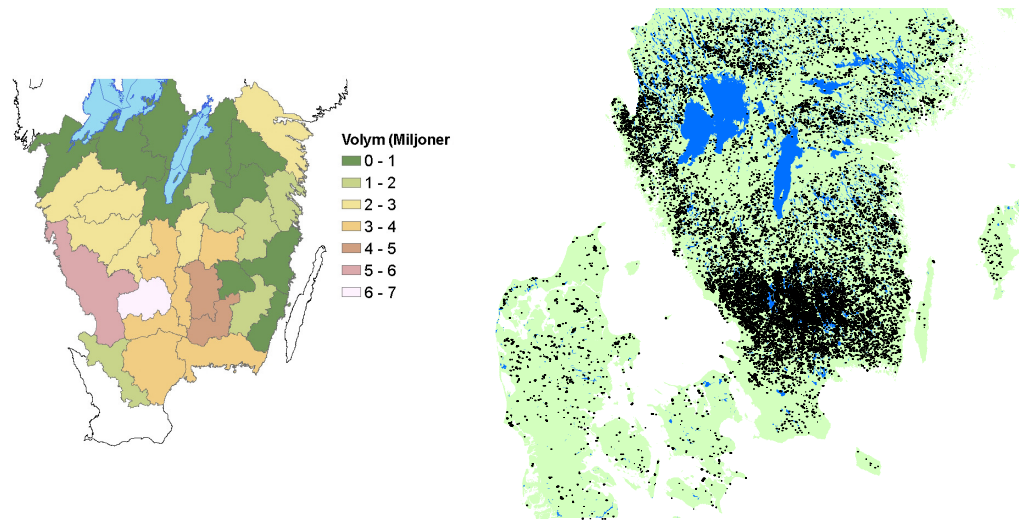
Årligt NPP sjunker med ca $300 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ till året efter stormen. Det kan tyckas mycket att två tredjedelar av NPP före stormen bibehålls, och förmodligen är det en något övervärderad siffra. En del av det höga NPP torde kunna tillskrivas att en del träd fortfarande har en viss aktiv fotosyntes. Som tidigare nämnts så finns det säkerligen träd med intakta rötter som för upp vatten och näring till barr som är fotosyntetiskt aktiva. Detta syns i NDVI och i NPP. En annan möjlig bidragande orsak är undervegetationen, vilken kan synas i luckor som inte täcks av träden. I och med att träden faller kommer andelen undervegetation som blir solbelyst att öka jämfört med före stormen då skogen var intakt, och således kommer reflektansen från undervegetationen att vara högre jämfört med före stormen. Undervegetationen som före stormen till stor del inte var synlig i NDVI och NPP kommer nu visa sig och hålla upp NPP. Effekten av undervegetationen på NPP efter stormen kommer att bero på hur tät skogen var och hur stor del av marken i stormfället som täcks av de nedfallna träden. Efter röjning kommer marken att vara omrörd och uppbruten med liten eller ingen vegetation, och då kommer jorden i marken tillsammans med rester av omhändertagna träd vara det som mest påverkar NDVI. Så småningom kommer primära arter att avancera och inleda den sekundära successionen varvid vegetation med fotosyntes kommer att synas i NDVI.

Om man bortser från att ett konstant ϵ använts kan en stor del av problemet med uppskattningen av NPP troligen härledas ur det faktum att områdena inte är röjda från fallna träd, vilket försvårar en analys baserad på NDVI-data. I de flesta länder i Europa är det brukligt att efter storm röja områdena för att sedan återplantera (Knohl *et al.*, 2002), men det görs inte i alla länder av olika orsaker. I Ryssland till exempel sker röjning inte i samma utsträckning eftersom de stormdrabbade markerna ofta är väldigt otillgängliga, vilket även gör det svårt att utföra mätningar i fält. För att göra korrekta uppskattningar av kolbalansen krävs då en annan fungerande metod. Lämpligt vore då att kunna beräkna NPP för oröjda stormfällen med fjärranalytisk data. Om sådana beräkningar skall vara möjliga måste noggranna uppskattningar av ickefotosyntetiserande vegetations påverkan på NDVI genomföras för att kunna korrigera för dessa effekter.

I denna studie är det bara skogens upptag av kol som uppskattas. Dock påverkas även markrespirationen efter en storm vilken inte är behandlad här. Studier pekar på ökad respiration en tid efter storm vilket tillsammans med det minskade upptaget kan leda till stora emissioner från den skog som tidigare var en sänka för kol (Knohl *et al.*, 2002; Lindroth *et al.*, opublicerad). Lindroth *et al* uppskattade den totala emissionen av kol till följd av stormen Gudrun till ca 3 miljoner ton på årsbasis.

5.4 Extrapolering av förändringen i NPP

Genom att ta ut pixlar i MODIS-data som uppvisade förändring i skog hittades en total stormdrabbad area för Sverige och Danmark. Denna blev 217 650 ha för de båda länderna och 208 163 ha för Sverige. I figur 5.2 ses de automatiskt uttagna förändringsområdena tillsammans med uppskattning av volym skadad skog gjord av Skogsstyrelsen (2005). Om en jämförelse mellan de båda tillåts kan konstateras att uttagningsmetoden fångar upp den rumsliga fördelningen bra. En stor del av de uttagna pixlarna ligger i och runt Kronobergs län där även mängden volym skadad skog är stor. Områdena runt Vättern är måttligt drabbade med liten volym skadad skog och dessa områden har få uttagna pixlar med förändring i figuren till höger.



Figur 5.2. Till vänster ses volym skadad skog (Skogsstyrelsen, 2005), och till höger ses automatiskt uttagna förändringsområden i skog (total stormdrabbad area) över Sverige och Danmark. Generellt är det bra överensstämmelse mellan de automatiskt uttagna områdena och Skogsstyrelsens uppskattning.

Enligt försiktiga uppskattningar är den totala arean drabbad av stormen i Sverige ca 270 000 ha (Alexandersson & Ivarsson, 2005). Metoden tillämpad i detta arbete fångar därmed inte upp hela ytan och uppskattar arean i Sverige fel med ca 23 %. Detta beror sannolikt på tröskelvärdena som är fastställda baserade på de 16 plus 7 pixlarna som är använda för beräkning av NPP. Dessa utvalda pixlar kan inte representera hela spektrat av förändring i NDVI före till efter stormen, varvid det är troligt att tröskelvärdet för den beräknade differensen som användes för att välja ut pixlar med förändring (se avsnitt 3.9) är något för högt.

5.5 Framtiden och framtida studier

Generellt sett saknas det information och kunskap om hur störningar påverkar kolbalansen, och särskilt knapphändig är kännedomen kring storm och dess effekter. Fortsatt forskning inom detta område är således av stor vikt. Korrekta uppskattningar av skogens kolbalans (lokalt och globalt) kräver observationer och mätningar inte bara över ideala områden med hög produktion, utan även för områden drabbade av störningar, samt för successionen och återhämtningen som följer efter störning. Dessa behövs även för att fullfölja kraven från Kyotoprotokollet och rapporteringen av

skogens status som kolkälla eller kolsänka. En förutsättning för att uppskattning av NPP för stormfällan och den efterföljande återhämtningen skall kunna göras med hjälp av satellitdata är dock en fungerande och tillförlitlig metod. Metoden som användes i detta arbete visade sig vara belagd med en del osäkerheter och problem vilket gör den olämplig för direkt användning. Dessa problem behöver först åtgärdas. Alternativt kan andra metoder testas och utvärderas.

En anledning till att NDVI och följaktligen NPP efter storm är högt kan vara problemet med absorption av PAR för ickefotosyntetiserande vegetation vid oröjda stormfällan. Då detta kan innebära ett mer icke-linjärt samband mellan NDVI och $fAPAR$ är det en fråga som behöver adresseras om korrekta beräkningar av NPP skall göras. En metod att uppskatta mängden ickefotosyntetiserande vegetation bör tas fram för att kunna korrigera förhållandet mellan NDVI och $fAPAR$. En korrektionsmodell skulle kunna skapas baserad på uppskattningar i fält för ett antal typiska stormfällan.

Möjligheten att använda andra vegetationsindex kan också undersökas. Xiao *et al.* (2004) föreslog för uppskattning av GPP användandet av indexet EVI (*enhanced vegetation index*) som förutom reflektansen från de röda och nära infraröda använder det blå våglängdsbandet. Med hjälp av EVI uppskattas $fAPAR$ för den fotosyntetiskt aktiva vegetationen med en linjär funktion. $fAPAR$ antas då bestå endast av PAR absorberat av den fotosyntetiskt aktiva delen av vegetationen. PAR absorberat av döda växtdelar, stam, och grenar, som inte används i fotosyntesen är således inte inkluderat. Genom att skilja på dessa två komponenter är det möjligt att göra en mer rättvis uppskattning av GPP eller NPP.

En stor del i det höga NPP efter stormen utgörs troligen av att ett konstant ϵ användes vid beräkningarna. Ett alternativ skulle kunna vara att använda PRI (*photochemical reflectance index*) framtaget med smala våglängdsband vid 0.53 och 0.70 μm för att erhålla ϵ (Drolet *et al.*, 2005). PRI har setts kunna spåra förändringar i den dagliga xantofyllcykeln som hjälper växterna att anpassa sig till olika starkt ljus. Över längre tidsperioder har indexet även visat sig följa klorofyllhalten och således den fotosyntetiska aktiviteten. Xantofyllnivån förändras med rådande förhållanden och kan ses som en indikator för fotosyntesens nedgång under stress. En möjlighet finns således att kunna använda fjärranalytiskt PRI för att estimeras ϵ . Användning av PRI har även funnits effektivt för estimering av NEE (*net ecosystem exchange*) (Fuentes *et al.*, 2006), vilket direkt kan ge en bild av områdets funktion som kolkälla eller kolsänka. Det är även möjligt att från NEE erhålla NPP. Genom att föra in PRI i ekvation 2.7 kan ett samband för NEE fås.

$$NEE = f(PRI) \cdot APAR \quad (5.1)$$

Försök som har genomförts har visat på korrelation mellan PRI och ϵ (Barton & North, 2001; Drolet *et al.*, 2005), även om Barton & North (2001) såg att svår stress hade en negativ påverkan på förhållandet. Om NDVI används vid framtagandet av APAR bör detta göras med en viss försiktighet med tanke på de ovan nämnda problem och tveksamheter relaterade till NDVI för ett stormfälle. Tänkbart kan då vara att använda EVI och PRI tillsammans.

$$NEE = f(PRI) \cdot f(EVI) \cdot PAR \quad (5.2)$$

Inga försök har gjorts med dessa båda index (EVI och PRI) för stormfällen. Det är således osäkert huruvida de kan prestera bättre än det i denna studie använda NDVI. Med tanke på de metodbaserade problem som uppenbarats i detta arbete är det dock av intresse att undersöka andra möjligheter att uppskatta NPP efter storm i skog.

En intressant och relevant fråga ur flera aspekter är om vi i framtiden kan förvänta oss fler kraftiga stormar med efterföljande skador som Gudrun. En orsak till att skadorna på skogen blev så omfattande efter stormen Gudrun är att kraftiga stormbyar drog fram över skogrika områden. En annan betydande anledning utgörs av att marken var otjälad och väldigt blöt till följd av den milda vintern. I ett framtida klimat kan sådana vintrar förväntas bli vanligare till följd av ökad medeltemperatur och ändrade nederbördsmonster, varför även skogsskador orsakade av storm kan bli vanligare. Ökad frekvens av väderextremer, så som starka vindar kan också vara tänkbart (Kundzewicz *et al.*, 2001; SMHI, 2005). Om det med en klimatförändring följer ökade stormskador kommer det att bli än viktigare att snabbt och effektivt kunna uppskatta förändringar i skogens kolbalans. För att göra detta kan satellitdata spela en avgörande roll.

6 Slutsats

I detta arbete har undersökts möjligheten att med medelupplösande satellitdata estimerar förändringen i NPP efter storm. Det har gjorts med en LUE-modell och tids-serier av NDVI-data från MODIS med 250 meters spatial upplösning. Modellerad PAR-data har erhållits från SMHI. Slutsatser dragna från arbetet listas nedan.

- Generellt är NDVI en bra indikator på skogens hälsotillstånd och en klar nedgång ses efter stormen Gudrun. Emellertid är NDVI efter stormen något för högt och återspeglar inte till fullo den minskade mängden levande vegetation. De faktorer som mest påverkar och höjer NDVI i detta fall är troligen ickefotosyntetiserande vegetation, jord, samt en effekt av den spatiala upplösningen hos MODIS-data. Undervegetationen bidrar även till det höga NDVI.
- Ett linjärt förhållande mellan NDVI och $fAPAR$ finns och är fastställt i flera studier. För ett oröjt stormfälle är det dock mer osäkert hur detta förhållande ser ut. Den ickefotosyntetiserande vegetationens absorption av PAR kan verka för ett mer icke-linjärt samband. Genom att använda EVI skulle man kunna komma runt detta problem.
- Uppskattningen av NPP före stormen är jämförbara med värden för en liknande skog. Däremot är NPP efter stormen överskattat. Detta har troligen sin grund i att NDVI efter stormen är för högt, samt att ett konstant ϵ använts.
- En försiktig uppskattning av den totala stormdrabbade arean i Sverige och Danmark gjord med hjälp av MODIS-data visar att 217 650 ha skog skadades, varav 208 163 ha i Sverige. Betraktad som en ny metod ger den ett acceptabelt resultat. En mindre justering av metoden kan troligtvis ge en bättre uppskattning.

Resultaten visar som väntat god uppskattning av NPP före stormen, men något sämre efter stormen. Om satellitbaserat NDVI och LUE-modellen skall användas krävs för att göra korrekt estimering av NPP efter storm ett noggrant beräknat ϵ för stormfallet. Dessutom bör NDVI korrigeras för ickefotosyntetiserande vegetation, så som stam, grenar, och döda växtdelar eftersom detta kommer att påverka det linjära förhållandet mellan NDVI och $fAPAR$. Den möjliga användningen av andra satellitbaserade index så som EVI och PRI bör också undersökas och utvärderas.

Referenser

- Ahl D. E., Gower S. T., Mackay D. S., *et al.*, (2004), Heterogeneity of light use efficiency in a northern Wisconsin forest: implications for modeling net primary production with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 93:168-178.
- Alexandersson H. & Ivarsson K., I., (2005), Januaristormen 2005, Faktablad nr 25. SMHI.
- Ardö J., (1998), Remote sensing of forest decline in the Czech Republic. *Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institutioner*, avhandlingar 135. Lund University Press. ISBN 91-79-66-528-4.
- Asner G. P., Wessman C. A. & Archer S., (1998), Scale dependence of absorption of photosynthetically active radiation in terrestrial ecosystems. *Ecological Applications*, 8:1003-1021.
- Barton C. V. M. & North P. R. J., (2001), Remote sensing of canopy light use efficiency using the photochemical reflectance index: Model and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 78:264-273.
- Campbell J. B., (2002), Introduction to Remote Sensing, third edition. Taylor & Francis, London and New York. ISBN 0-415-28294-2.
- Cheng Y., Gamon J. A., Fuentes D. A., *et al.*, (2006), A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: A comparison of field, AVIRIS and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103:369-378.
- Drolet G. G., Huemmrich K. F., Hall F. G., *et al.*, (2005), A MODIS-derived photochemical reflectance index to detect inter-annual variations in the photosynthetic light-use efficiency of a boreal deciduous forest. *Remote Sensing of Environment*, 98:212-224.
- Eklundh L., (red.), (2003), Geografisk informationsbehandling, metoder och tillämpningar. Tredje reviderade upplagan. Formas, Stockholm. ISBN 91-540-5904-6.
- Epiphanio J. C. N. & Huete A. R., (1995), Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa. *Remote Sensing of Environment*, 51:351-360.
- Evans D. L., Zhu Z. & Winterberger K., (1993), Mapping forest distributions with AVHRR data. *World Resource Review*, 5:66-71.
- Field C. B., Randerson J. T. & Malmström C. M., (1995), Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51:74-88.
- Fridh M., (2006), Stormen 2005 – En skoglig analys. Skogstyrelsen, Meddelande 1.
- Fuentes D. A., Gamon J. A., Cheng Y., *et al.*, (2006), Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*, 103:312-323.
- Gamon J. A., Field C. B., Goulden M. L., *et al.*, (1995), Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5:28-41.
- Goetz S. J. & Prince S. D., (1996), Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78:149-179.
- Huete A., Didan K., Miura T., *et al.*, (2002), Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83:195-213.

Justice C. O., Vermote E., Townshend J. R. G., *et al.*, (1998), The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36:1228-1249.

Jönsson P. & Eklundh L., (2002), Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40:1824-1832.

Jönsson P. & Eklundh L., (2004), TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers and Geosciences*, 30:833-845.

Kauppi P., Sedjo R., Apps M., *et al.*, (2001), Technological and economical potential of options to enhance, maintain, and manage biological carbon reservoirs and geo-engineering. In: *Climate change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton J. T., Ding Y., Griggs D. J., *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. s. 308, 311.

Knohl A., Kolle O., Minayeva T. Y., *et al.*, (2002), Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology*, 8:231-246.

Kundzewicz Z. W., Parry M. L., Cramer W., *et al.*, (2001). Europe. In: *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [McCarthy J. J., Canziani O. F., Leary N. A., *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. s. 650.

Lagergren F., Eklundh L., Grelle A., *et al.*, (2005), Net primary production and light use efficiency in a mixed coniferous forest in Sweden. *Plant, Cell and Environment*, 28:412-423.

Lillesand T. M., Kiefer R. W. & Chipman J. W., (2004), Remote sensing and image interpretation, fifth edition. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA. ISBN 0-471-45152-5.

Lindroth A., Grelle A., Klemedtsson L., *et al.*, (opublicerad), Stora koldioxidemissioner i Gudruns spår.

Markon C. J. & Peterson K. M., (2002), The utility of estimating net primary production over Alaska using baseline AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 23:4571-4596.

Medlyn B. E., (1998), Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology*, 18:167-176.

Monteith J. L., (1977), Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B*, 281:277-294.

Myneni R. B. & Williams, D. L., 1994, On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 49:200-211.

Myneni R. B., Keeling C. D., Tucker C. J., *et al.*, (1997), Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386:698-702.

Numes de Lima M. V. (ed), (2005), CORINE Land Cover updating for the year 2000, IMAGE2000 and CLC2000, Products and Methods. European Commission, Joint Research Centre (DG JRC), Institute for Environment and Sustainability (IES), Land Management Unit, Italy. ISBN 92-894-9862-5.

Oke T. R., (1987), Boundary layer climates, second edition. Routledge, London och New York. ISBN 0-415-04319-0.

Olofsson P. & Eklundh L., (2006), Estimation of absorbed PAR across Scandinavia from satellite measurements. Part II: modelling and evaluating the fractional absorption. Presenterat för *Remote Sensing of Environment*. Opublicerad.

- Paruelo J. M., Epstein H. E., Lauenroth W. K., *et al.*, (1997), ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78:953-958.
- Piñeiro G., Oesterheld M. & Paruelo J. M., (2006), Seasonal variation in aboveground production and radiation-use efficiency of temperate rangelands estimated through remote sensing. *Ecosystems*, 9:357-373.
- Potter C. S., Klooster S. & Brooks V., (1999), Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales. *Ecosystems*, 2:36-48.
- Rautiainen M., (2005), The spectral signature of coniferous forests: the role of stand structure and leaf area index. *Dissertationes Forestales 6*, The Finnish Society of Forest Science. ISBN 951-651-105-8.
- Ruimy A., Saugier B. & Dedieu G., (1994), Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99:5263-5283.
- Runyon J., Waring R. H., Goward S. N., *et al.*, (1994), Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect. *Ecological Applications*, 4:226-237.
- Schelhaas M.-J., Nabuurs G.-J. & Schuck A., (2003), Natural disturbance in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biology*, 9:1620-1633.
- Schlesinger W. H., (1997), Biogeochemistry: an analysis of global change, second edition. Academic Press, London, UK. ISBN 0-12-625155-X.
- Sellers P. J., Los S. O., Tucker C. J., *et al.*, (1994), A global 1° by 1° NDVI data set for climatic studies. Part 2: The adjustment of the NDVI and generation of global fields of terrestrial biophysical parameters. *International Journal of Remote Sensing*, 15:3519-3546.
- Still C. J., Randerson J. T. & Fung I. Y., (2004), Large-scale plant light-use efficiency inferred from the seasonal cycle of atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 10:1240-1252.
- Thomlinson J. R., Bolstad P. V. & Cohen W. B., (1999), Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: steps toward validating global map products. *Remote Sensing of Environment*, 70:16-28.
- Vermote E. F., El Salaeous N. Z. & Justice C. O., (2002), Atmospheric correction of the MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83:97-111.
- Xiao X., Hollinger D., Aber J., *et al.*, (2004), Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89:519-534.

Internetkällor

- Earth Observatory, NASA, (2006).
<http://earthobservatory.nasa.gov/>, 2006-08-15.
- Lang M., Kuusk A., Nilson T., *et al.*, (2002), Reflectance spectra of ground vegetation in sub-boreal forests. Tartu Observatory, Estonia.
<http://www.aai.ee>, 2006-08-03.
- MODIS VI User Guide.
http://tbrs.arizona.edu/project/MODIS/UserGuide_doc.php, 2006-06-12.
- Regeringskansliet, (2005), Internationellt klimatsamarbete.
<http://www.regeringen.se/sb/d/3188/a/34463>, 2006-08-18.

Skogsstyrelsen, (2005), Stormens omfattning.
<http://www.skogsstyrelsen.se/minskog/templates/Page.asp?id=17055>, 2006-10-09.

SMHI, (2005), Blir det mer stormskador i framtiden?
http://www.smhi.se/sgmain/loppedel/050112_storm.htm, 2006-09-06.

SMHI, STRÅNG, (2006).
<http://produkter.smhi.se/strang>, 2006-07-25.

Spot Image, (2004).
http://www.spotimage.fr/html/_php, 2006-07-04.

TBRS (Terrestrial Biophysics & Remote Sensing Lab), (2002). MODIS VI product (algorithm) description.
http://tbrs.arizona.edu/cdrom/VI_Intro/VI_MOD_VI_Prod.html, 2006-08-13.

Lunds Universitets Naturgeografiska institution. Seminarieuppsatser. Uppsatserna finns tillgängliga på Naturgeografiska institutionens bibliotek, Sölvegatan 12, 223 62 LUND.

Serie startade 1985.

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

Report series started 1985.

79. Ullman, M., (2001): El Niño Southern Oscillation och dess atmosfäriska fjärrpåverkan.
80. Andersson, A., (2001): The wind climate of northwestern Europe in SWECLIM regional climate scenarios.
81. Laloo, D., (2001): Geografiska informationssystem för studier av polyaromatiska kolväten (PAH) – Undersökning av djupvariation i BO01-området, Västra hamnen, Malmö, samt utveckling av en matematisk formel för beräkning av PAH-koncentrationer från ett kontinuerligt utsläpp.
82. Almqvist, J., Fergéus, J., (2001): GIS-implementation in Sri Lanka. Part 1: GIS-applications in Hambantota district Sri Lanka : a case study. Part 2: GIS in socio-economic planning : a case study.
83. Berntsson, A., (2001): Modellering av reflektans från ett sockerbetsbestånd med hjälp av en strålningsmodell.
84. Umegård, J., (2001): Arctic aerosol and long-range transport.
85. Rosenberg, R., (2002): Tetratermmodellering och regressionsanalyser mellan topografi, tetraterm och tillväxt hos sitkagran och lärk – en studie i norra Island.
86. Håkansson, J., Kjörling, A., (2002): Uppskattning av mängden kol i trädform – en metodstudie.
87. Arvidsson, H., (2002): Coastal parallel sediment transport on the SE Australian inner shelf – A study of barrier morphodynamics.
88. Bemark, M., (2002): Köphultssjöns tillstånd och omgivningens påverkan.
89. Dahlberg, I., (2002): Rödlistade kärlväxter i Göteborgs innerstad – temporal och rumslig analys av rödlistade kärlväxter i Göteborgs artdataarkiv, ADA.
90. Poussart, J-N., (2002): Verification of Soil Carbon Sequestration - Uncertainties of Assessment Methods.
91. Jakubaschk, C., (2002): Acacia senegal, Soil Organic Carbon and Nitrogen Contents: A Study in North Kordofan, Sudan.
92. Lindqvist, S., (2002): Skattning av kväve i gran med hjälp av fjärranalys.
93. Göthe, A., (2002): Översvämningskartering av Vombs ängar.
94. Lööv, A., (2002): Igenväxning av Köphultasjö – bakomliggande orsaker och processer.
95. Axelsson, H., (2003): Sårbarhetskartering av bekämpningsmedels läckage till grundvattnet – Tillämpat på vattenskyddsområdet Ignaberga-Hässleholm.
96. Hedberg, M., Jönsson, L., (2003): Geografiska Informationssystem på Internet – En webbaserad GIS-applikation med kalknings- och försurningsinformation för Kronobergs län.
97. Svensson, J., (2003): Wind Throw Damages on Forests – Frequency and Associated Pressure Patterns 1961-1990 and in a Future Climate Scenario.
98. Stroh, E., (2003): Analys av fiskrättsförhållandena i Stockholms skärgård i relation till känsliga områden samt fysisk störning.

99. Bäckstrand, K., (2004): The dynamics of non-methane hydrocarbons and other trace gas fluxes on a subarctic mire in northern Sweden.
100. Hahn, K., (2004): Termohalin cirkulation i Nordatlanten.
101. Lina Möllerström (2004): Modelling soil temperature & soil water availability in semi-arid Sudan: validation and testing.
102. Setterby, Y., (2004): Igenväxande hagmarkers förekomst och tillstånd i Västra Götaland.
103. Edlundh, L., (2004): Utveckling av en metodik för att med hjälp av lagerföljdsdata och geografiska informationssystem (GIS) modellera och rekonstruera våtmarker i Skåne.
104. Schubert, P., (2004): Cultivation potential in Hambantota district, Sri Lanka
105. Brage, T., (2004): Kvalitetskontroll av servicedatabasen Sisyla
106. Sjöström, M., (2004): Investigating Vegetation Changes in the African Sahel 1982-2002: A Comparative Analysis Using Landsat, MODIS and AVHRR Remote Sensing Data
107. Danilovic, A., Stenqvist, M., (2004): Naturlig föryngring av skog
108. Materia, S., (2004): Forests acting as a carbon source: analysis of two possible causes for Norunda forest site
109. Hinderson, T., (2004): Analysing environmental change in semi-arid areas in Kordofan, Sudan
110. Andersson, J., (2004): Skånska småvatten nu och då - jämförelse mellan 1940, 1980 och 2000-talet
111. Tränk, L., (2005): Kadmium i skånska vattendrag – en metodstudie i föroreningsmodellering.
112. Nilsson, E., Svensson, A.-K., (2005): Agro-Ecological Assessment of Phonxay District, Luang Phrabang Province, Lao PDR. A Minor Field Study.
113. Svensson, S., (2005): Snowcover dynamics and plant phenology extraction using digital camera images and its relation to CO₂ fluxes at Stordalen mire, Northern Sweden.
114. Barth, P. von., (2005): Småvatten då och nu. En förändringsstudie av småvatten och deras kväveretentionsförmåga.
115. Areskoug, M., (2005): Planering av dagsutflykter på Island med nätverkanalys
116. Lund, M., (2005): Winter dynamics of the greenhouse gas exchange in a natural bog.
117. Persson, E., (2005): Effect of leaf optical properties on remote sensing of leaf area index in deciduous forest.
118. Mjöfors, K., (2005): How does elevated atmospheric CO₂ concentration affect vegetation productivity?
119. Tolleback, E.,(2005): Modellering av kväveavskiljningen under fyra år i en anlagd våtmark på Lilla Böslid, Halland
120. Isacson, C., (2005): Empiriska samband mellan fältdata och satellitdata – för olika bokskogsområden i södra Sverige.
121. Bergström, D., Malmros, C., (2005): Finding potential sites for small-scale Hydro Power in Uganda: a step to assist the rural electrification by the use of GIS
122. Magnusson, A., (2005): Kartering av skogsskador hos bok och ek i södra Sverige med hjälp av satellitdata.
123. Levallius, J., (2005): Green roofs on municipal buildings in Lund – Modeling potential environmental benefits.
124. Florén, K., Olsson, M., (2006): Glacifluviala avlagrings- och erosionsformer I

- sydöstra Skåne – en sedimentologisk och geomorfologisk undersökning.
125. Liljewalch-Fogelmark, K., (2006): Tågbuller i Skåne – befolkningens exponering.
 126. Irminger Street, T., (2006): The effects of landscape configuration on species richness and diversity in semi-natural grasslands on Öland – a preliminary study.
 127. Karlberg, H., (2006): Vegetationsinventering med rumsligt högupplösande satellitdata – en studie av QuickBirddata för kartläggning av gräsmark och konnektivitet i landskapet.
 128. Malmgren, A., (2006): Stormskador. En fjärranalytisk studie av stormen Gudruns skogsskador och dess orsaker.
 129. Olofsson, J., (2006): Effects of human land-use on the global carbon cycle during the last 6000 years.