

OM VATTENFLÖDET I BOKTRÄD

en analys av data från fältstationen i Sorø

Lina Alleesson

Handledare: Maj-Lena Linderson

Vattenflödesdata har samlats in med "the radial sap flow meter technique" på tolv olika träd på Sorø fältstation under den lövbärande säsongen år 2000 samt på två olika sidor av ett trettonde träd år 2007. Data analyserades här med hjälp av Excel och dess Analysis Toolpack. Eftersom bok sägs ha en ojämn och komplex radiell profil är det lätt att fråga sig om det går att göra samma slags vattenflödesmätningar som på andra träd med enklare radiell profil på bok. Här undersöktes korrelation mellan stamdiameter och vattenflöde samt mellan kronomkrets och stamdiameter. Jämförelse gjordes mellan hela säsongen och utvalda dagar med högre eller lägre inkommande solstrålning. Det gick att se ett samband mellan träddominans och vattenflöde. Under de dagar med mer inkommande solstrålning tycks sambandet starkare mellan kronomkrets och vattenflöde än det mellan stamdiameter och vattenflöde. Med data från det trettonde trädet undersöktes den radiella profilen då data fanns uppmätt på två olika sidor och på tre olika djup. Den radiella komplexiteten visades inte tydligt i studien av vattenflödesdata från skogen i Sorø.

Jag vill tacka Dr. Teis N. Mikkelsen och Ass. Prof. Andreas Ibrom från Risø fältstation för data, Dr. Maj-Lena Linderson för handledning samt Jonas Allesson för hjälp med datorkunskap.

1. Inledning	3
1.1 Introduktion	3
1.2 Syfte och avgränsning	4
2. Bakgrund	4
2.1 Transpiration och kolets kretslopp	4
2.2 Vattenflöde	6
2.3 The radial sap flowmeter technique	8
2.4 Områdesbeskrivning (Sorø)	9
3. Data och metod	11
4. Resultat	12
4.1 Diameter och kronstorlek	12
4.2 Soliga och mulna dagar	15
4.3 Den radiella profilen	17
5. Diskussion	27
6. Slutsats	30
7. Referenser	31

1. Inledning

1.1 Introduktion

I dessa dagar med klimatförändringar som ett av vår världs största hot har landskapsprocessernas del i klimatmodellerandet fått en allt större roll. Att studera flöden i ekosystem ger oss dataset som sedan kan skalas upp med hjälp av modeller till regional och global skala. Speciellt vatten- och kolflödena är av stort intresse då dessa är nära sammanknutna med klimatförändringsperspektivet. Eftersom en stor del av jordens yta täcks av skog, bidrar de till en stor del av det totala energi- och massflödet och eftersom dessa är mindre påverkade av människans hand än jordbrukslandskap, påverkas de mer direkt av klimatförändringar, vilket gör dem till extra intressanta studieobjekt.

Ekosystemets transpiration är en viktig komponent i dess hydrologiska balans och är därmed även en viktig komponent i energibalansen (Chapin et al., 2002). När en växt transpirerar sker även andra ur klimat- och miljösynpunkt intressanta gasutbyten med atmosfären så som koldioxid (CO₂) och ozon (O₃) (Luttschwager & Remus, 2007, Wieser et al., 2003, Chapin et al., 2002). Problemet är att det är svårt att göra mätningar och att modellera transpirationen eftersom den innehåller komplexa processer och är hårt kontrollerade av stomata och andra inre motstånd. Det är känt att vatten i ett träd flödar från rot till topp och vatten- och energibudgeten är därmed bundna till vattenkonduktiviteten i stammen. Ett sätt att uppskatta trädets transpiration är därför att mäta vattenflödet (engelskans sap flow) i splintveden. Detta kan göras genom en mängd olika metoder (bl. a. Cermak et al., 2004) bland annat "the radial sap flowmeter technique" som kommer att diskuteras senare.

I många olika forskningsprogram och, som nämnts, med många olika metoder mäts vattenflöde och transpiration i olika sorters skogar och på olika geografiska platser. I detta arbete kommer främst en bokskog i Sorø på centrala Själland beskrivas, där den ovan nämnda, "radial sap flowmeter technique" används för vattenflödesmätningar. Data kommer från åren 2000 och 2007.

1.2 Syfte och avgränsning

Bokträdet är väldigt känsligt för förändringar i vattentillgångar, både ökade och minskade (Ibrom, 2009). Det kan därför tänkas att klimatförändringar i form av ökad sommartorka eller regnperioder har stor inverkan på just denna art och studier av dess vattenbalans blir mycket intressanta. Det finns emellertid en svaghet med att använda vattenflödet för att skatta bokträdets transpiration; den delen i bokens stam som leder vattnet har ett komplext utseende som varierar radiellt och spatiellt med olika väderlek (Bl. a. Saveyn et al., 2008, Fiora & Cescatti, 2006). Syftet med detta arbete är att, genom en litteraturstudie och genom analys av vattenflödesdata från skogen i Sorø, kvantifiera vattenflödet hos bokträd. På grund av dess annorlunda vattenflödesarea och det faktum att denna typ av mätningar görs i så stor utsträckning är målet att försöka svara på, i) går det trots den radiella ojämnheten att uppskatta att det i en tjockare stam flödar mer vatten? D v s finns det en korrelation mellan stamdiameter och vattenflödet? ii) går denna teori även att applicera på kronstorlek, alltså korrelerar kronstorlek och vattenflöde? Och därmed också diametern och kronstorleken?

2. Bakgrund

2.1 Transpiration och kolets kretslopp

Följande bakgrund är huvudsakligen inspirerad av *Principles of Terrestrial Ekosystem Ecology*, Chapin, Matson och Mooney kapitel 4 och 5.

Att klimatet blir varmare är en följd av att atmosfären får ett tillskott av så kallade växthusgaser. CO₂ är den gas vars koncentration i atmosfären ökar mest idag, av att människorna bränner olika typer av fossila bränslen och av olika feedbackprocesser som sker i naturen. En annan av de huvudsakliga växthusgaserna är vattenånga. Dessa gaser är transparenta för solens kortvågig strålning men absorberar i det långvågiga infraröda spektralområdet som dominerar utstrålningen, vilket leder till uppvärmning av atmosfären och därmed en ökad strålningsemission bland annat nedåt, mot markytan. Andra växthusgaser har samma effekt och värmer upp luften som då kan hålla mer vattenånga och effektiviteten med vilken atmosfären absorberar långvågig strålning ökar. Sådana här feedbackprocesser förklarar klimatets känslighet för ökning av vissa gaser i atmosfären. Uppvärmning accelererar den hydrologiska cykeln och ökar avdunstning och därmed nederbörd på global skala.

Nettostrålningen till ett ekosystem delas upp i tre olika energiutbyten med atmosfären; markvärmeflöde, latent värmeflöde, och sensibelt värmeflöde. Det latent värmeflödet är energin överförd från ekosystemet till atmosfären genom att vatten transpireras från växter eller avdunstar från löv eller från markytan. Detta värmeflöde, som mäts i energienheter, har sin motsvarighet i evapotranspirationen som mäts i massenheter. Värme transporteras bort från ytan genom konvektion och överförs till atmosfären när vattenångan kondenserar och moln formas. Det latent värmeflödet innebär alltså en process som överför vatten från ekosystemet till atmosfären och genom konservering av energi och massa länkas vattnets och energins cykler ihop.

CO₂ är, som nämnts, en annan växthusgas som har en central roll i det globala klimatsystemet. Det är främst CO₂ (eller andra gaser som innehåller kol) som människan släpper ut i atmosfären genom förbränning av fossila bränslen. I fotosyntesen tar växterna upp CO₂ och denna hjälper sedan till att bygga upp organisk massa. Nästan hälften av den organiska massan på jorden är från kol som växter bundit genom att fotosyntetisera. Eftersom människan påverkar och länge har påverkat ekosystemets tillgång till vatten och näringsämnen, luftens gassammansättning och jordytans utseende och eftersom CO₂ spelar den roll det gör för biosfären är det viktigt att vi förstår hur kolets kretslopp regleras av faktorer i vegetation och ekosystem.

Fotosyntesen är den process genom vilken mest kol och kemisk energi kommer in i ekosystemet. Den viktigaste faktorn som reglerar fotosyntesen och därmed kolupptaget i en växt eller i ett blad är tillgången till reaktanter, det vill säga CO₂, vatten och solljus som är de direkta reaktanterna men även tillgången till kväve som krävs för att växten ska kunna tillverka fotosyntesenzymerna. Temperaturen styr reaktionskvoter och är därför också en viktig faktor. Ett blads fotosyntetiserande varierar över ett dygn, en vecka och över en säsong med förändringar i dessa ovan nämnda faktorer. Skillnader i fotosyntetiserande över ett år i hela ekosystem beror dessutom på den totala lövarean och hur lång tid denna lövarea är fotosyntetiskt aktiv. Detta i sin tur beror på marktillgångar, såsom vatten och näringsämnen, klimat samt hur lång tid som gått sedan någon form av störning, till exempel gallring, brand eller storm, inträffat. Precis som den hydrologiska cykeln länkas ihop med energicykeln genom energins och massans konservering, länkas energicykeln och kolcykeln ihop eftersom samma processer styr deras ingång i, överföring inom och utgång ur ekosystemen.

För att växten ska kunna ta upp CO₂ måste klyvöppningar (stomata) i växtens bladceller öppnas. Cellväggarna innuti bladen är täckta av en tunn vattenfilm för att överföringen av CO₂ från luften till insidan av bladet ska gå lättare; detta vatten avdunstar ut genom stomata i processen och det är detta som är transpiration. För att få CO₂ att omvandlas till biomassa måste växten alltså öppna stomata, samtidigt som detta är en väg för vattenförlust. Växten måste alltså avge vatten från bladet, dit den hämtar mer från marken, för att kunna växa sig större. Kvoten hur mycket vatten som förloras till hur mycket CO₂ som absorberas varierar och kan uppgå till så mycket som 400 mol vatten förlorade per mol absorberat CO₂. Växten kompromissar så mellan maximal fotosyntes och minimal vattenförlust och tillgångar till vatten, CO₂, ljus och andra näringsämnen styr hur fördelningen blir.

2.2 Vattenflöde

Vattenflödet i växter drivs av en ångtrycksgradient från bladytan till atmosfären. Vattnet transporteras från marken genom växten till atmosfären längs en vattenpotentialgradient. Det vatten som flödar genom stammen på ett träd ska ersätta det vatten som förloras i transpirationen. Mängden vatten som flödar i stammen beror på vattenkonduktiviteten i individuella transportelement i stammen såväl som på den totala mängden vattenledande trä, splintved. Det finns ett starkt lineärt samband mellan tvärsnittsarean av splintveden och trädets totala lövarea (Chapin et al., 2002). Lutningen på detta samband varierar dock mycket mellan arter och miljöer.

Vattenflödet är ett mått på hur mycket vatten som flödar i trädets stam per tidsenhet. Detta brukar uppskattas från mätningar av vattenflödesdensiteten ("sap flux density", u ; m³m⁻²s⁻¹, se ekvation (1) nedan). Denna kan mätas i en punkt i stammen med en cylinder som sticks in på olika djup beroende på metod. Längden på cylindern ger tvärsnittsarean runt om i stammen vid den punkten och u multiplicerat med denna vattenflödesarea ger trädets vattenflöde (SF ; m³s⁻¹).

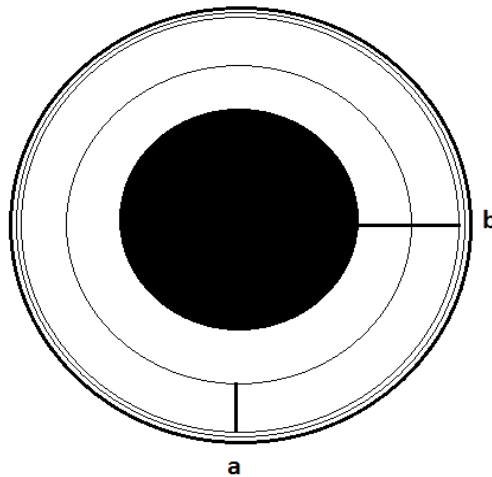


Bild 1. I ett tvärsnitt av stammen syns hur olika längder på mätcylindrar (**a** och **b**) ger olika tvärsnittsareor.

Bild 1 visar en förenklad skiss över stammens tvärsnitt, där den svarta mitten är kärnveden och det vita är splintveden. Utanför splintveden finns floemet vari saven rinner omslutet av den skyddande barken. **a** och **b** är två olika längder på mätcylindrar som därmed ger två olika tvärsnittsareor och med det två olika värden på vattenflödet. I det här fallet skulle längden **b** vara det optimala efter som att den täcker hela splintveden in till kärnveden. Hos bok är det inte givet att splintveden och kärnveden är fördelade som på bilden i jämna cirklar. Det kan finnas in- och utbuktningar, vilket försvårar mätningarna än mer då det inte går att veta om det är splintved över hela tvärsnittsarean (Linderson, 2010).

För att få med hela vattenflödet används ofta längre mätstickor eller flera på olika djup, beroende på metod och trädart. Det är sedan detta totala vattenflöde som används för att uppskatta trädets transpiration. Granier et al. (1990) beskriver hur det genom att vikta träden efter storleksklass går att få en uppskalning till transpirationsnivå. Vattenflödesstudier har visat att det i denna uppskalning kan uppstå flera fel genom att hänsyn inte tas till variationerna i vattenflödesarean i stammen. Bokens vattenflödesarea har som nämnts en komplex struktur. Det antas till exempel ofta att vattenflödet avtar lineärt inåt mitten på stammen. Luttschwager & Remus (2007) beskriver hur det med en funktion baserad på detta antagande går att integrera vattenflödet över hela vattenflödesarean genom att bara använda en mätsticka i den yttersta delen av stammen. Andra studier av bokens radiella profil, det vill säga hur vattenkonduktansen i stammen varierar inåt mitten och med yttre omständigheter, visar att det inte alls är möjligt att generalisera detta antagande. Under speciellt soliga dagar

till exempel, kan den inre delen av splintveden leda mer vatten än den yttre (bl. a. Saveyn et al., 2008), där det generellt antas att den mesta av vattentransporten sker. De dagar då generaliseringen om att vattenflödet avtar lineärt inåt mitten stämmer främst överens visar sig vara då det regnar.

Antagandet att flödesdensiteten är uniform runt om stammen kan alltså vara för grovt. Det betyder att det kan vara otillräckligt att mäta vattenflödesdensiteten genom en enda tvärsnittsarea och därefter integrera runt stammen. Saveyn et al. (2008) beskriver hur de genom en metod med sex mätpositioner i olika väderstreck såg hur denna flödesdensitet varierade runt om stammen. Anledningarna till denna variation kan vara många.

Den radiella variationen kan bero på att vattnet i yttre delen av splintveden har högre mobilitet och är det som först tillmötesgår kronans vattenbehov när transpirationen sätter igång på morgonen. Under soligare dagar då PAR (photosynthetic active radiation) och VPD (vapor pressure deficit) och därmed transpirationen är högre blir vattenbehovet större och behöver kompenseras av att det börjar flöda mer även i inre delar (Ford et al., 2004). Fiora och Cescatti (2006) har en lite annorlunda förklaring till mönstret; att den yttre delen av splintveden är direkt anknuten till kronans topp, alltså dit solens strålar når först. När de sedan räcker längre ner mot kronans bas kommer den inre delen av splintveden, som i sin tur är direkt anknuten till denna del av kronan, igång med att transportera vatten. Oavsett vilken anledningen är till de radiella variationerna, är de ett upphov till problem i uppskalningen från vattenflödesdensiteten i en enda position till vattenflödet för hela trädet. Syftet med vattenflödesmätningar är ofta att skala upp mätningarna till beståndsnivå. Genom att göra detta utan god kunskap om stammens radiella och spatiella variationer och då inte ta med dessa i beräkningarna, kan en överuppskattning av transpirationen på över 100% fås (Ford et al., 2007).

2.3 The radial sap flowmeter technique

Granier (1996) har utvecklat en av metoderna för vattenflödesmätningar; the radial sap flowmeter technique. Denna metod är en av de enklaste och billigaste och därmed väldigt populär. Två cylindriska, aluminiumtäckta, sonder, 2 mm i diameter sticks in i splintveden, den ena 15 cm ovanför den andra. Den övre sonden innehåller en konstantanresistor och värms upp konstant. Den undre sonden är referenssonden och är inte uppvärmd utan behåller

trädets temperatur. Båda sönerna innehåller koppar-konstantan-termoelement och systemet mäter hela tiden temperaturskillnaden dem emellan. Denna temperaturskillnad är omvänt proportionell mot vattenflödesdensiteten kring den övre sonden. På natten när solen inte skiner och VPD är noll eller nära noll försvinner all energi genom konduktion i träet och temperaturskillnaden mellan de båda sönerna är då som störst. När sedan vatten flödar i splintveden, minskar temperaturskillnaden då den uppvärmda sonden förlorar värme till vattnet som strömmar förbi. Genom en empirisk formel (1) går det sedan att räkna ut vattenflödesdensiteten från dessa temperaturskillnader.

$$u = 119 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_u} - 1 \right)^{1,23} \quad (1)$$

där ΔT_0 är den maximala temperaturskillnaden på natten, det vill säga referenstemperaturskillnaden då vattenflödet är lika med noll. ΔT_u är den observerade temperaturskillnaden vid varje tidpunkt under dygnet och $119 \cdot 10^{-6}$ och 1,23 är experimentellt funna koefficienter. Vattenflödet fås av (2)

$$SF = u \cdot SA \quad (2)$$

där SA (m^2) är tvärsnittsarean för den delen av stammen där nålen sitter. Det är som tidigare diskuterat här problem uppstår; splintveden kanske når djupare in i stammen än nålen räcker, som är fallet för bok (generellt är cylindern 20 mm lång) eller når nålen förbi splintveden och in i kärnveden där $u=0$. Genom att känna till trädets radiella profil kompenseras detta för, genom att sätta in mätstickor på olika djup respektive att använda sig av kortare sonder. Sonden mäter ett medelvärde av vattenflödesdensitet över hela sin längd och därför kan det ibland vara bättre att använda sig av kortare nålar, speciellt i fall som till exempel bok där flödet kan variera mycket med radien (bl.a. Saveyn et al., 2008). Det kan även vara en god idé att ha mätstickor på flera ställen runt om stammen med tanke på att splintveden kan vara ojämnt fördelad (Linderson, 2010).

2.4 Områdesbeskrivning (Sorø)

Fältstationen är belägen i en bokskog, Lille Bøgeskov, nära Sorø, Danmark, på $55^{\circ}29'13''N$, $11^{\circ}38'45''E$ med en höjd över havet på 40 m. Bok tros ha dominerat i området sedan 2500 f.

Kr. I skogen förekommer utspridda bestånd av barrträd, främst gran (*Picea abies* L.) men även enstaka träd av andra barrväxtarter såsom europeiskt lärkträd (*Larix decidua* Mill.) (Pilegaard et al., 2003). Av den totala markytan täcks ungefär 20 % av barrträd. I april månad innan träden slår ut domineras undervegetationen av vitsippa (*Anemone nemorosa* L.) och skogsbingel (*Mercurialis perennis* L.) senare under sommaren när solljuset som når in mellan grenarna är snålt består den gröna markväxtligheten främst av gräsplättar.

Beståndet på fältstationen är jämnåriga bokar på 88 år med en medelhöjd på 25 m år 2003; de har troligtvis vuxit runt fyra meter sedan dess (Linderson, 2010). Medeldiametern på stammarna samma år var 38 cm i brösthöjd (1,3 m). Beståndsdensiteten i skogen är 283 stammar (ha)⁻¹ (Pilegaard et al., 2003). Klimatet i Sorø bestäms av det geografiska läget i den norra tempererade zonen. Danmark ligger väster om den europeiska kontinenten, nära Nordsjön där temperaturen påverkas av Nordatlantiska strömmen. Stationen har därmed ett maritimt tempererat klimat, dominerat av västliga vindar och frekvent passerande frontsystem. Som resultat av detta karakteriseras det vanliga vädret av ostadiga somrar och milda, skiftande vintrar. Det inträffar dock även att östliga vindar dominerar och för med sig hårda vintrar och heta somrar.

På stationen finns en 57 m hög mast med ett tvärsnitt på 30 cm · 30 cm för att mäta meteorologiska data såsom atmosfäriskt tryck, vindfart och vindriktning, global strålning, nettostrålning, total och diffus solstrålning, UVB-strålning, PAR, relativ luftfuktighet, luftmark- och bladytetemperatur, värmefflöde från marken, markfuktighet och nederbörd (Pilegaard et al., 2003). Det finns även ett torn som är 24 m högt och har en tvärsnittsarea på 9 m². Kontinuerliga mätningar med instrument som levererar signaler till datasystem såväl som kortare kampanjer och manuella mätningar görs vid stationen. Flödesmätningarna görs på två olika höjder, dels vid 43 m, det vill säga cirka 18 m över lövtaket, och dels vid 4 m, alltså i stamområdet. För vindhastighet, PAR samt luft- och marktemperaturer görs profilmätningar och det finns även system för att mäta profilkoncentrationer av gaser som CO₂, O₃, NO och NO₂. Nederbörd samlas upp över och under lövtaket och på tre träd samlas även stamflödet av nederbörden upp.

Under två år (1999 och 2000) gjordes vattenflödesmätningar med Graniermetoden på 12 stycken träd utspridda på fältstationen. År 2007 och 2008 togs även vattenflödet på ett trettonde träd. Detta sista träd ligger i en glänta med ena sidan, den västliga, mer utsatt för sol under några timmar på eftermiddagen, medan den andra, östliga sidan ligger i skugga. Denna fördelning har gett fler lägre växande grenar på den soliga sidan av trädet. Sonder för

Graniemätningar sattes därför in på tre olika djup (0-2 cm, 2-4 cm, 4-6 cm) på vardera sidan stammen (Dalsgaard, 2008).

3. Data och metod

För att undersöka vattenflödet i Lille Bøgeskov utifrån data som samlades under nämnda år valdes dataset från den lövbärande säsongen; maj-augusti, då träden transpirerar och vattenflödet kan kopplas till detta. På grund av för stor mängd saknad data analyserades bara set från åren 2000 och 2007. År 2000 var datasetet komplett från slutet av maj till slutet av augusti då löven börjar bli gamla och transpirationen och därmed vattenflödet minskar. Under 2007 saknades data för vissa perioder under sommaren och analyser gjordes därför för en kortare period då komplett dataset fanns.

På Sorø fältstation mäts diverse meteorologiska data, däribland den globala strålningen från solen, R_g ($W m^2$). Dagarna grupperade med detta som mått i två kategorier: dagar med mycket sol respektive dagar med lite sol. De tre dagar med högst R_g och de tre med lägst uppmätt R_g valdes ut för jämförelse. De dagar med mest inkommande solstrålning var tredje (JD 155), åttonde (JD 160) och nionde (JD 161) juni och de tre dagar under sommaren 2000 som hade minst inkommande solstrålning var fjärde (JD156) och sjätte (JD 158) juni samt den elfte augusti (JD 224). För att undersöka hur vattenflödet varierar radiellt i stammen i boken, jämfördes sommarens soligaste dagar med de dagar med lägst inkommande solenergi och för glänträdets även den östliga med den västliga sidan. Dessa analyser gjordes med hjälp av Excel och dess Analysis Toolpack. Anledningen till att dagar med olika mängd inkommande solstrålning jämfördes är just som nämnts ovan att bokens radiella profil tros variera med sådana omständigheter.

År 2007 var datasetet inte komplett under hela den lövbärande säsongen. Mätningar av vattenflöde gjordes på ett träd i skogen som ligger i en liten glänta så trädet får olika mängd solljus på de olika sidorna av stammen. Datasetet som analyserats sträcker sig över tiden 13 juli till 31 augusti. Stammens diameter är 57,2 cm. Eftersom vattenflödet mätts på båda sidor av stammen och på tre olika djup är det intressant att jämföra dessa sidor och på så sätt se om den radiella flödesprofilen varierar runt stammen med inkommande solstrålning.

För att undersöka om vattenflödet ökade med trädets storlek plottades detta mot stamdiameter och mot kronomkrets. Elva träd användes för analys av år 2000. Deras kron- och stamomkretsar mättes detta år men när datan användes (år 2009) fattades kronomkretsen för tre av träden; de träd som benämns med numren 5, 6 och 12, mättes därmed nio år efter de andra träden. Eftersom träden troligtvis har vuxit en del under dessa år och eftersom en annan person, och därmed möjligtvis med ett annat tillvägagångssätt, gjorde mätningarna, blir storleksförhållandet mellan träden snedfördelat när dessa tre träd tas med. År 2000 fanns alltså komplett dataset under den växstsäsongen från elva olika träd. Trädens diameter varierade från 35,1 cm till 43,1 cm. Mätningar gjordes på tolv träd men det träd som hade benämningen nummer 4 användes inte i analysen då data saknades för flera dagar under säsongen.

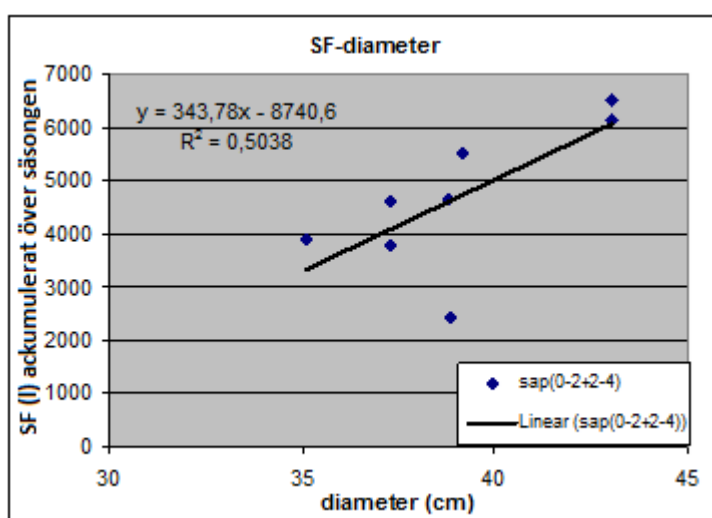
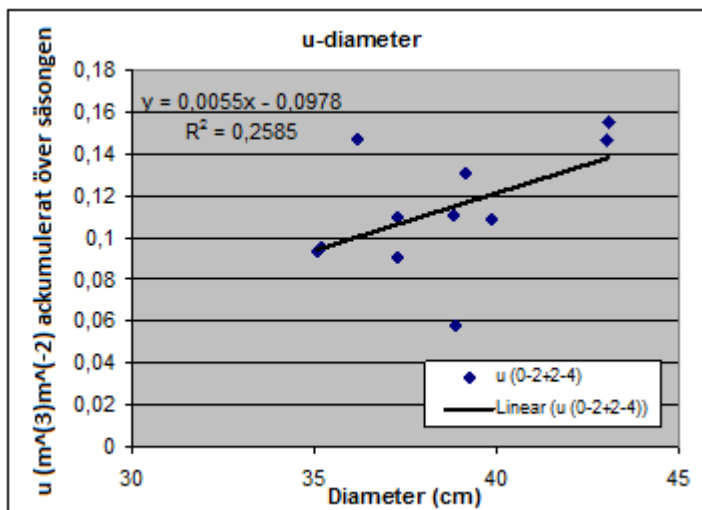
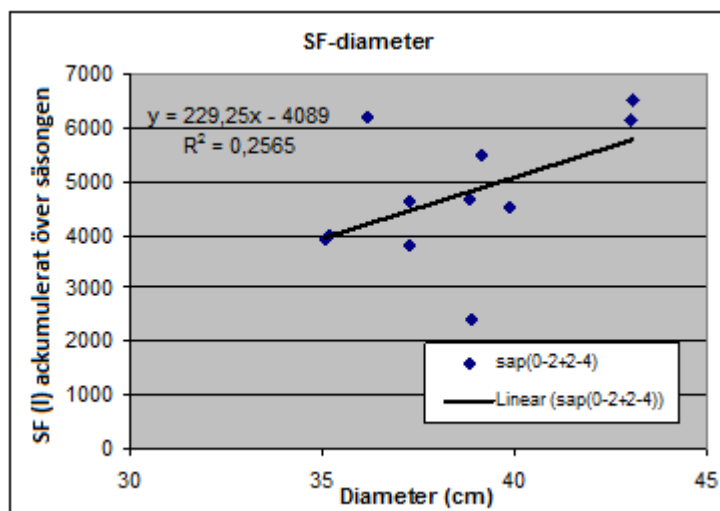
För att få avvikelsen i procent som anges i tabellerna nedan har en linje anpassats i plottarna. Det är alltså medelavståndet till denna linje som beräknats genom att i regressionen i Excels Analysis Toolpack summera de förväntade värdena och summera absolutbeloppen av residualerna samt dividera denna sistnämnda summa med den förra.

Denna avvikelse jämfördes sedan med samma slags avvikelse av det uppmätta vattenflödet från dess medelvärde. Detta gjordes för att undersöka om det går att förenkla vattenflödesmätningar genom att inte behöva ta hänsyn till diameter eller kronstorlek.

4. Resultat

4.1 Diameter och kronstorlek

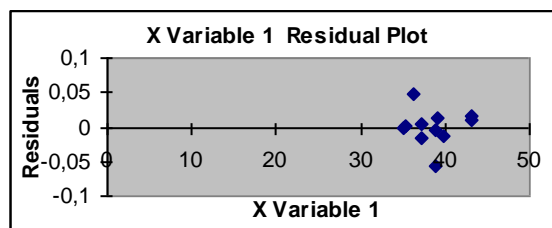
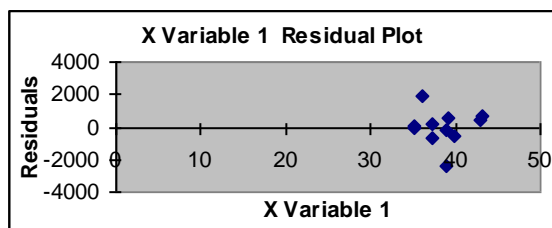
Figur 1 visar det ackumulerade vattenflödet för säsongen 24 maj till 31 augusti år 2000 mot diametern för de olika träden. En anpassad linje är tillagd med dess ekvation och R^2 är utskrivna. Eftersom stammens diameter är med i ekvationen för SF (2) är det logiskt att det finns en korrelation. Därför är u (1) för samma period plottad mot diametern och visar att detta samband inte spelar en för stor roll när träden är ungefär likstora som i det här fallet; R^2 är näst intill samma. För jämförelse med kronstorleksplottar är även vattenflödet plottat mot diametern för enbart de åtta träd vars kronomkretsar mättes år 2000.



I Figur 1 är vattenflödet (övre vänster) respektive vattenflödesdensiteten (övre höger) plottade mot diametern på de elva trädens stammar. I den nedre figuren visas vattenflödet plottat mot diametern för de åtta träd vars kronomkrets mättes år 2000.

Figuren över vattenflödet mot diametern för de åtta träd vars kronomkrets mättes upp år 2000 visar upp ett tydligare beroende än när alla elva träd i undersökningen är medtagna.

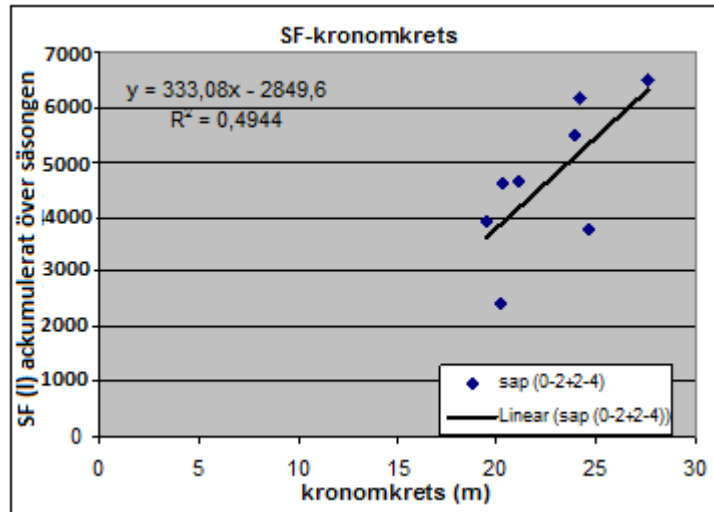
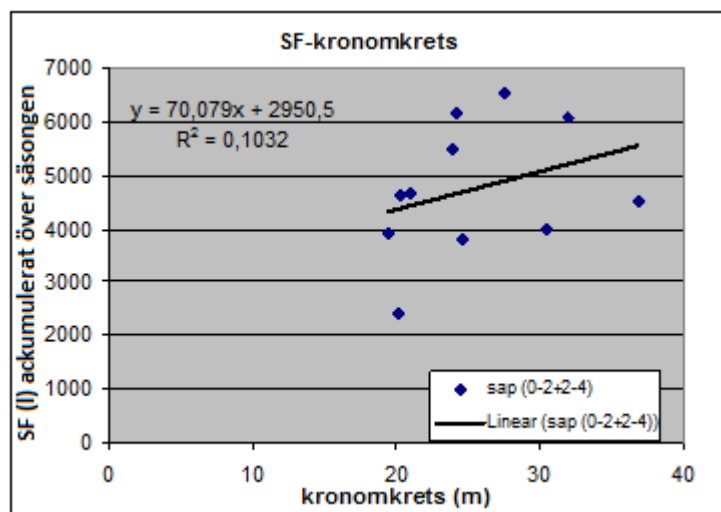
Med en regressionsanalys i Analysis Toolpak i Excel fås samma värden på R^2 som ovan och residualplotterna i Figur 2 för SF och u nedan.



Figur2. Residualplottar för vattenflödet mot diametern (vänster) respektive vattenflödesdensiteten (höger) för träden mot diametern på trädens stammar.

En jämförelse mellan de förväntade värdena och residualerna ger en avvikelse eller ett ”fel” på 14,6% för SF och 14,5% för u . Åter igen visar det sig att de bägge olika fallen med antingen SF eller u inte skiljer sig märkbart åt. Hädanefter kommer bara SF att användas.

Samma undersökning som ovan gjordes för kronomkretsen och vattenflödet. Figur 3 visar vattenflödet mot kronomkretsen för alla de elva träden, alltså även de tre som mättes under år 2009, och för bara de åtta träd med uppmätta kronomkretsar samma år (2000) för vilka vattenflödesmätningarna gjordes. Utseendena på figurerna skiljer sig ganska mycket åt. När bara åtta träd tas med följer de uppmätta värdena trendlinjen mycket bättre.



Figur 3. Vattenflödet plottat mot kronomkretsen på alla de elva träden (vänster), och mot bara de åtta träd vars kronomkrets mättes år 2000 (höger).

Precis som i figurerna över vattenflöde och diameter förbättras värdet på R^2 avsevärt när de tre träden tas ur räkning.

I tabell 1 nedan visas hur avvikelserna R^2 och korrelationen ändras om de tre träd med uppmätt kronomkrets år 2009 tas bort. Precis som observeras ovan märks ett tydligare samband med vattenflödet om bara åtta träd är medräknade; värdena förbättras mer för analys av kronomkrets än av diameter.

Tabell 1 över hur värdena på analysparametrarna förändras om de tre träden vars kronomkrets mättes år 2009 tas bort.

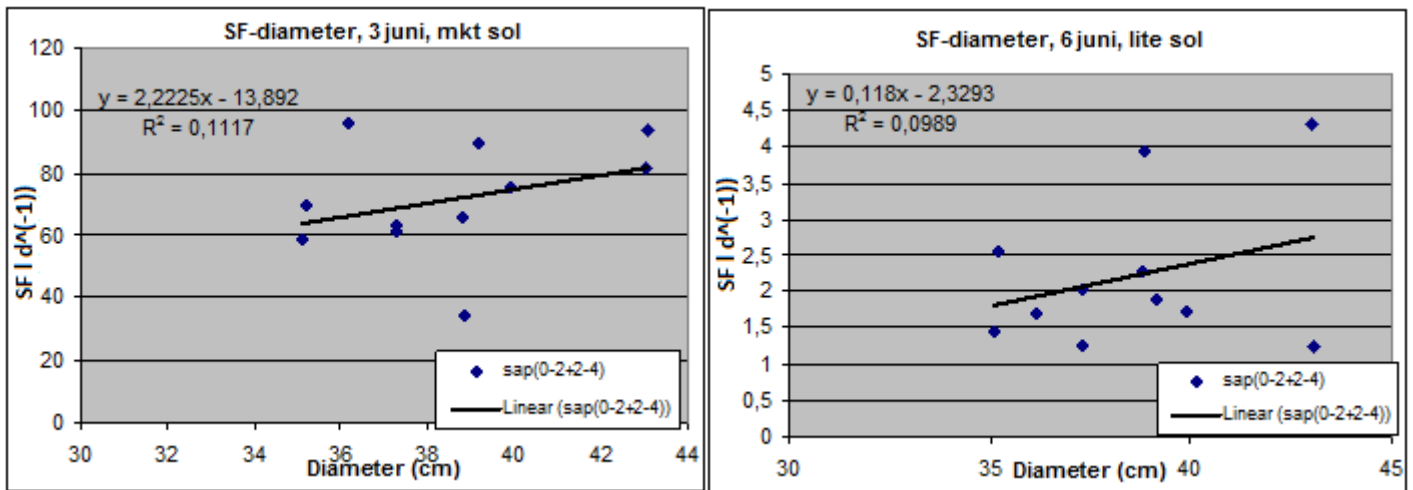
	Avvikelse (%)	korrelation	R^2 / R^2 adjust
SF-diametern (11 träd)	14,6	0,51	0,26 / 0,17
SF-diametern (8 träd)	13,2	0,71	0,50 / 0,42
SF-kronomkr. (11 träd)	20,5	0,32	0,10 / 0,0036
SF-kronomkr. (8 träd)	15,9	0,70	0,49 / 0,41

Korrelationen mellan vattenflödet och stamdiametern samt den mellan vattenflödet och kronomkretsen är samma för de åtta träden och en korrelationsanalys mellan kronomkrets och stamdiameter visar sig vara 0,73 alltså ett ganska högt värde. Samma korrelationsanalys för alla elva träden ger ett betydligt lägre värde men detta är inte ett värde att rätta sig efter då ju tre av trädens kronor är uppmätta hela nio år senare. Stamdiametern är dock uppmätt år 2000 och även för den minskar korrelationen när alla elva träden tas med.

Medelvärde av det totala vattenflödet under säsongen är för de elva träden 4743 l respektive 4691 l utan de tre träd vars kronomkrets mättes senare. Medelavvikelsen av de uppmätta värdena från dessa medelvärden är således 20,4% respektive 21,7% alltså något högre än då hänsyn tas till diameter och kronomkrets.

4.2 Soliga och mulna dagar

Figur 4 visar två plottar med de elva trädens totala vattenflöde mot diametern den tredje respektive den sjätte juni år 2000, dagarna med högst respektive lägst inkommande solstrålning under säsongen. R^2 är ungefär samma de båda dagarna men i figuren för den 3 juni följer de uppmätta värdena den anpassade linjen bättre. Mängden vattenflöde är betydligt mycket mindre under de molnigare dagarna, vilket kan leda till att det blir fel i mätningarna. Denna stora skillnad syns även i figur 5 nedan.



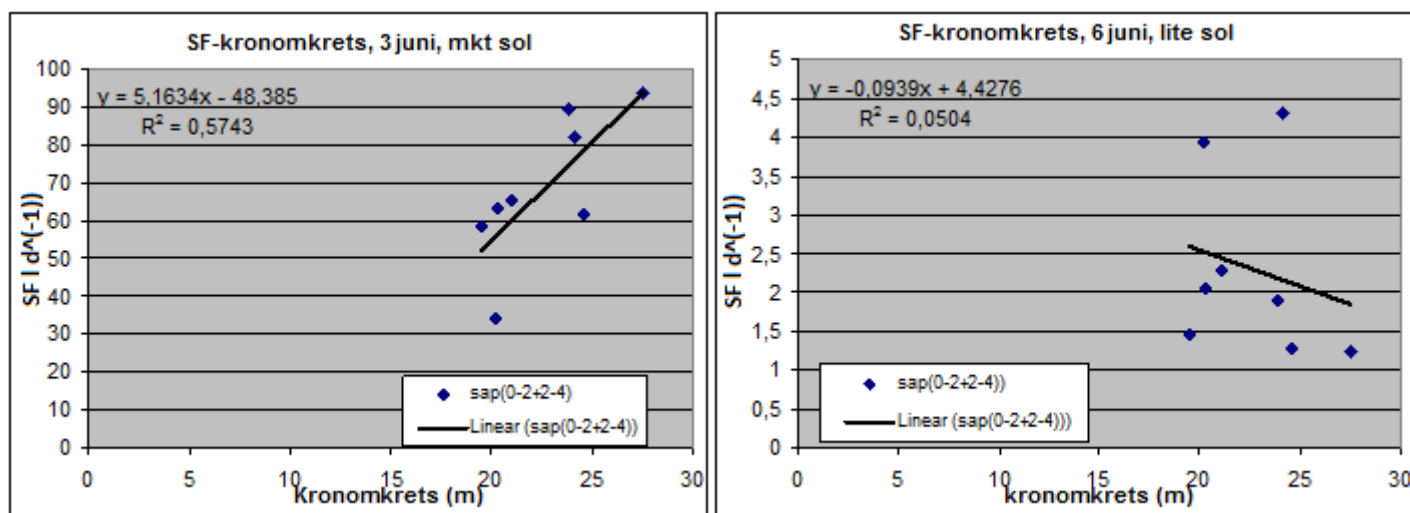
Figur 4. Vattenflödet under en dag mot diametern för trädens stammar under sommarens soligaste (vänster) och minst soliga (höger) dag.

Tabell 2. Regressions- och korrelationsanalys över hur sambandet mellan stamdiameter och vattenflöde förändras med inkommande solstrålning.

datum	Avvikelse (%)	Korrelation	R^2 / R^2 adjust
3 juni (sol)	16,20	0,334	0,112 / 0,013
4 juni (moln)	22,47	0,458	0,21 / 0,12
6 juni (moln)	32,72	0,314	0,10 / -0,0012
8 juni (sol)	16,08	0,415	0,173 / 0,081
9 juni (sol)	13,03	0,457	0,209 / 0,12
11 aug (moln)	20,10	0,625	0,391 / 0,32

Tabell 2 visar korrelations- och regressionsanalys mellan diameter och vattenflöde för alla de elva träden. Avvikelser från den anpassade linjen är något mindre under de soligare dagarna. I övrigt tycks inte sambandet mellan stamdiameter och vattenflöde påverkas av inkommande solstrålning.

Figur 5 visar vattenflödet mot kronomkretsen och skillnaden mellan den soligaste dagen den tredje juni och den minst soliga dagen den sjätte juni. Bara de träd vars kronomkrets var uppmätta år 2000 är med i denna analys då de nyuppmätta kronorna skulle vara en felkälla eftersom träden vuxit under de nio år som passerat.



Figur 5. Vattenflödet mot kronomkretsen den tredje och den sjätte juni.

Figurerna visar att sambandet mellan vattenflöde och kronomkrets är tydligare under dagar med mer inkommande solstrålning. Värdet på R^2 är betydligt högre den tredje juni.

Tabell 3. Korrelations- och regressionsanalys mellan kronomkretsen och vattenflödet för de åtta träd vars kronor uppmättes år 2000.

datum	Avvikelse (%)	korrelation	R^2 / R^2 adjust
3 juni (sol)	14,14	0,757847	0,57 / 0,50
4 juni (moln)	24,12	0,564497	0,32 / 0,21
6 juni (moln)	38,47	-0,22456	0,050 / -0,11
8 juni (sol)	15,62	0,740778	0,55 / 0,47
9 juni (sol)	15,27	0,679904	0,46 / 0,37
11 aug (moln)	20,2	0,672724	0,45 / 0,36

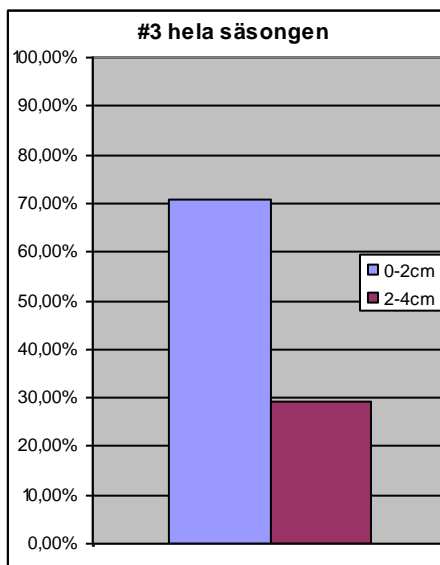
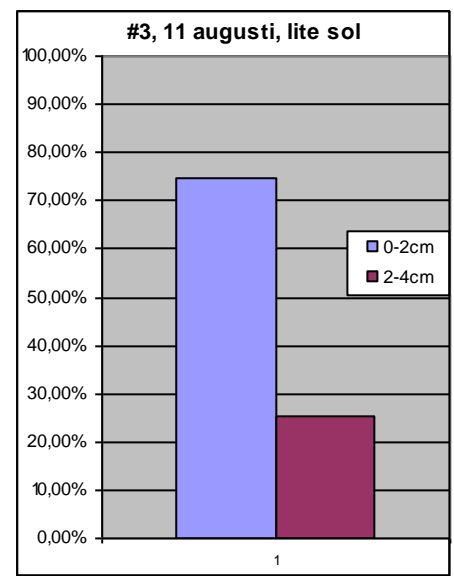
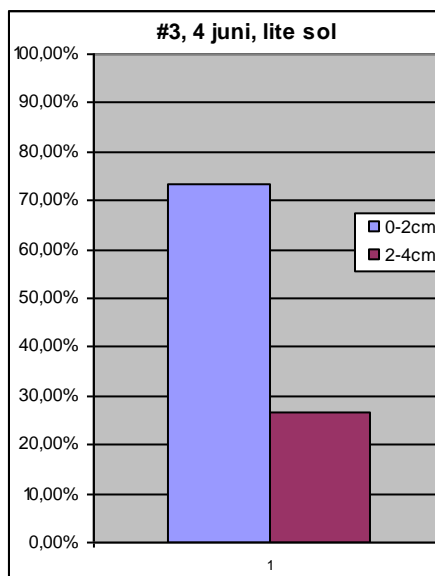
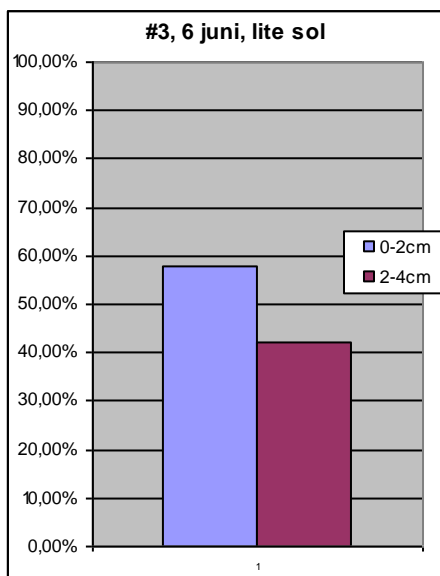
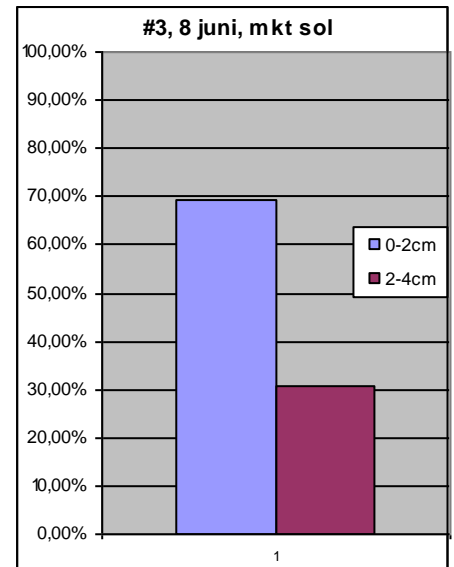
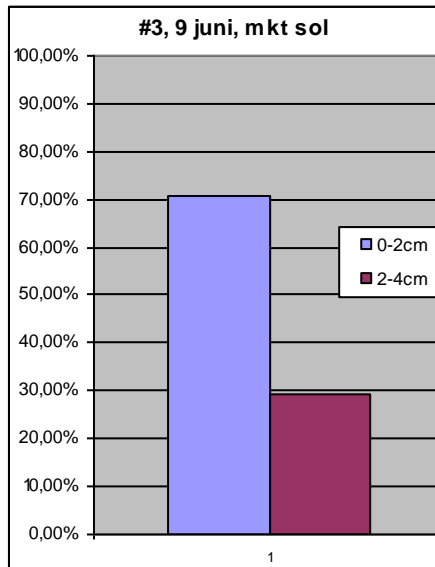
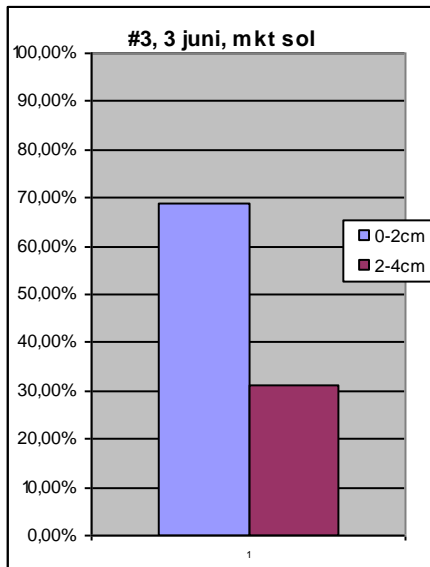
Precis som i Figur 5 verkar det tydligt i Tabell 3 att vattenflödets beroende av kronomkretsen är starkare under soligare dagar

4.3 Den radiella profilen

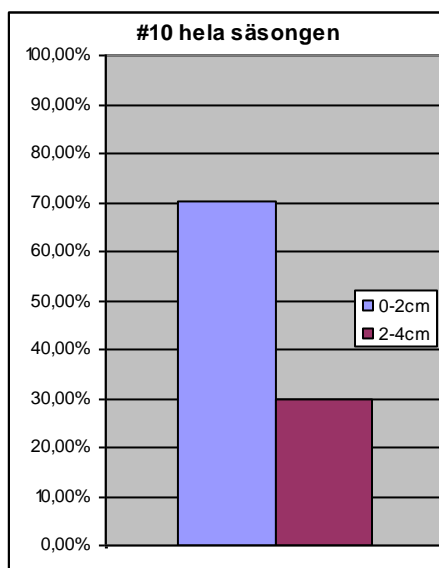
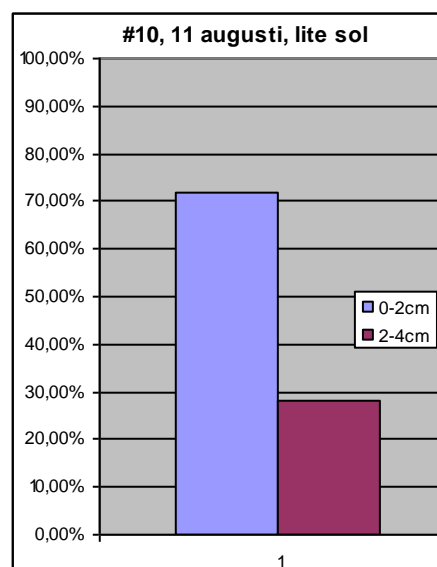
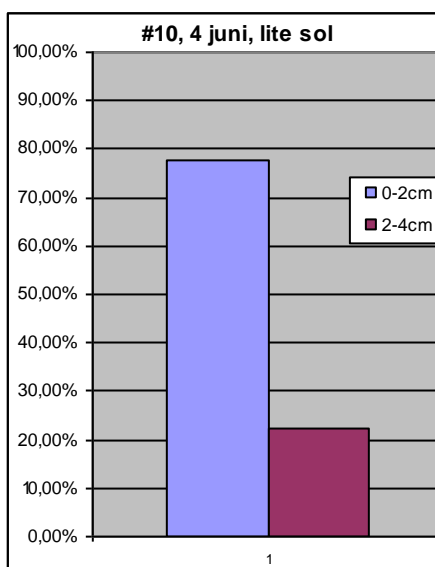
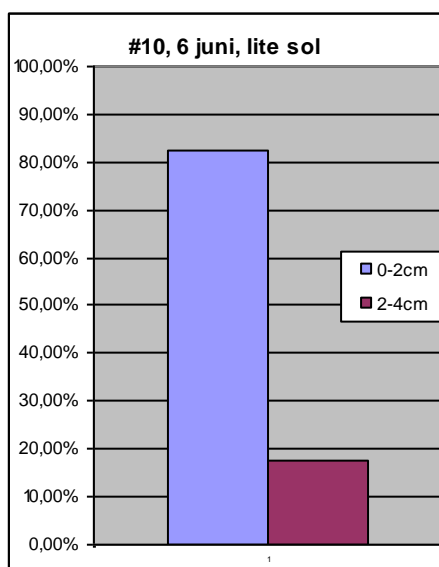
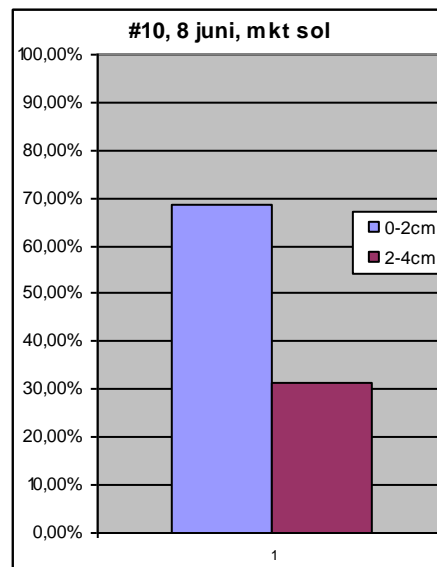
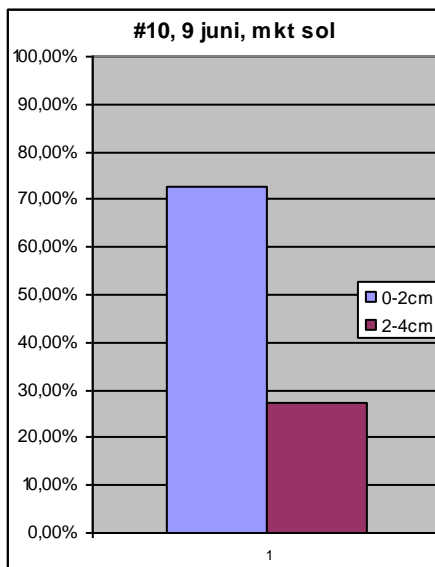
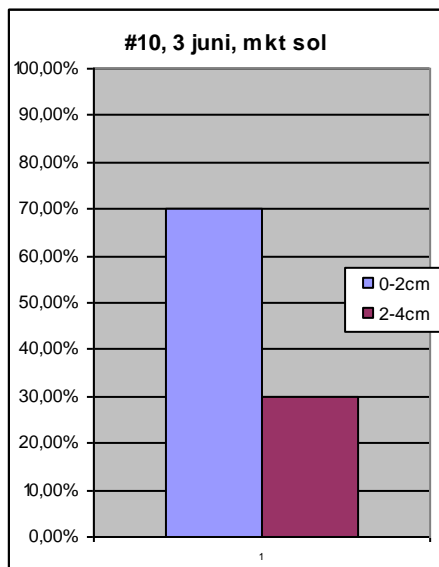
Figur 6a-e visar hur vattenflödet är fördelat över de fyra yttre centimetrarna av stammen för olika träd under olika dagar med olika mycket inkommande solstrålning. Det verkar inte som att en större andel vatten flödar i de inre centimetrarna av splintveden under dagar med mer inkommande solstrålning än under dagar med mindre; däremot tycks det finnas ett mer generellt mönster under dessa soligare dagar. För jämförelse är fördelningen över hela säsongen för samtliga träd medtagen. Det generella mönstret är att de soliga dagarnas fördelning följer fördelningen för hela säsongen. Som nämnts tidigare är det värt att ha i

åtanke att under de dagar då den inkommande mängden solstrålningen är mindre är också mängden vattenflöde i träden betydligt mindre.

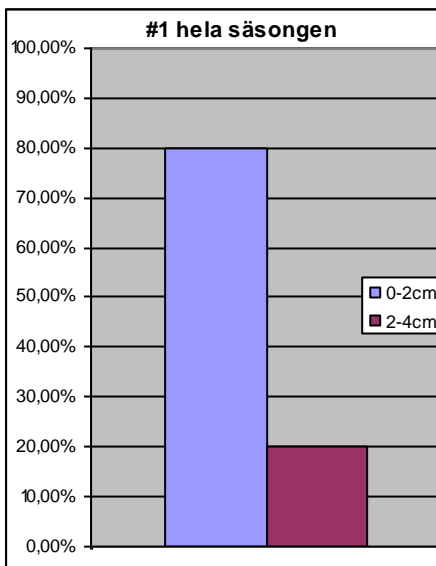
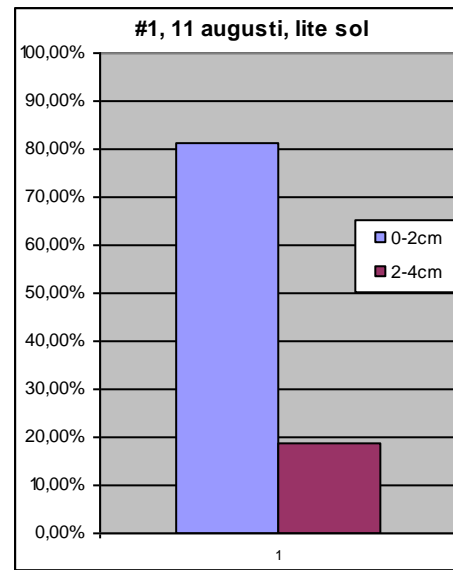
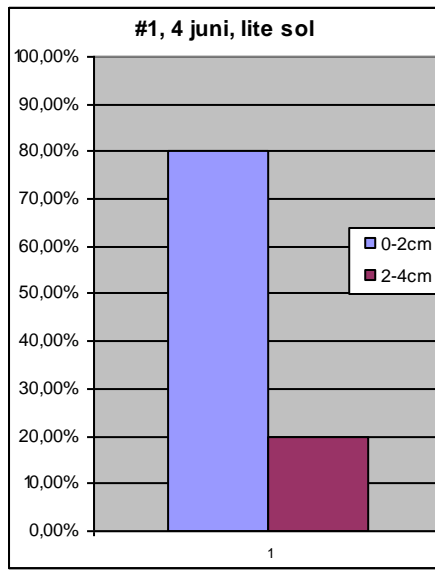
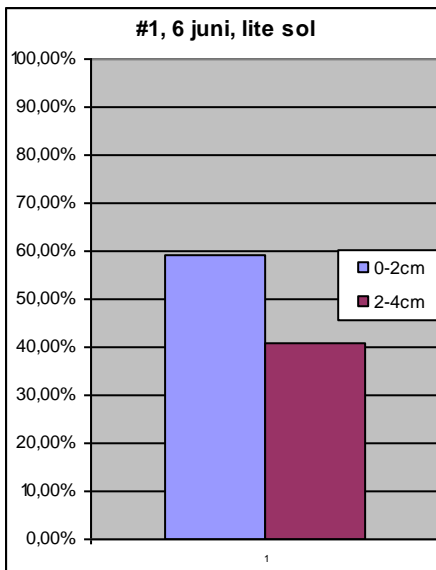
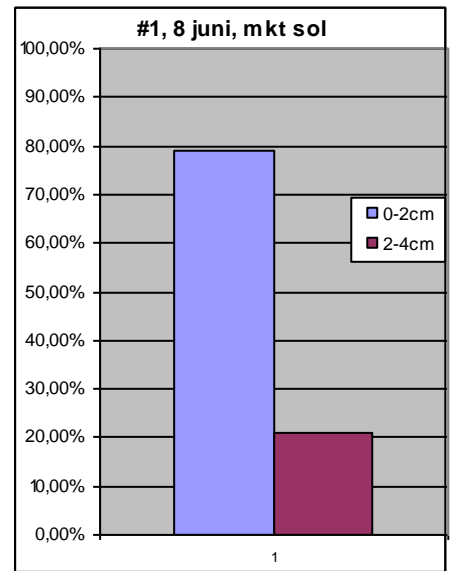
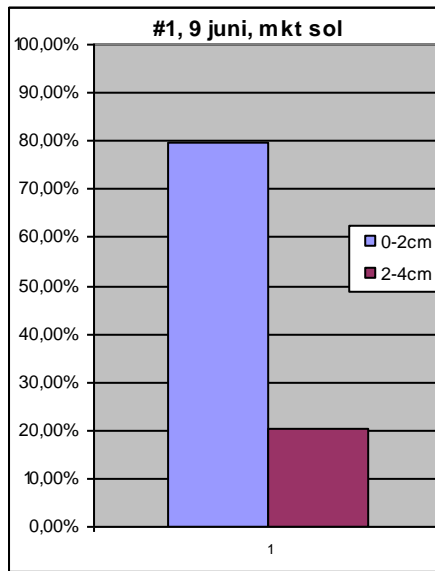
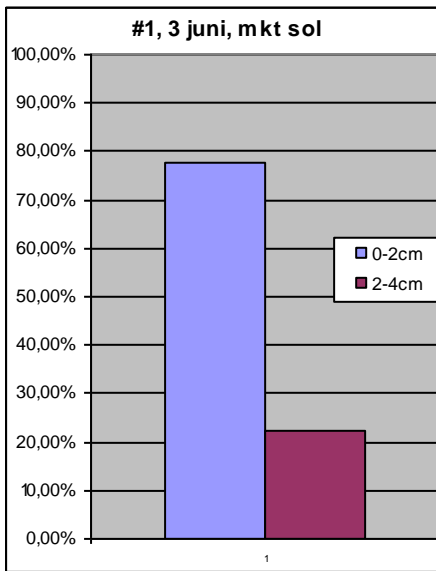
Figur 6a



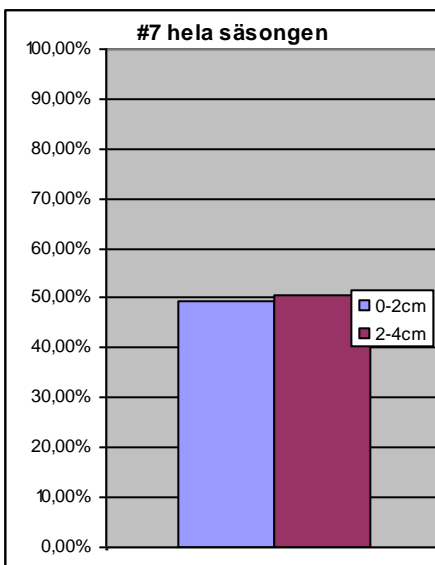
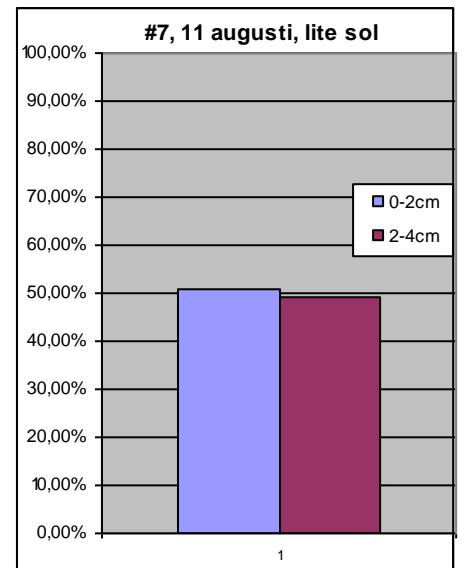
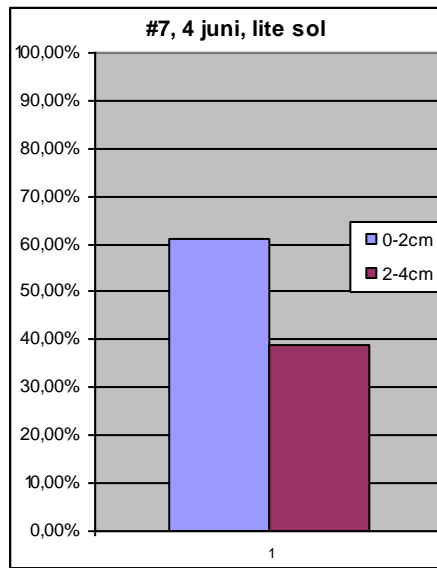
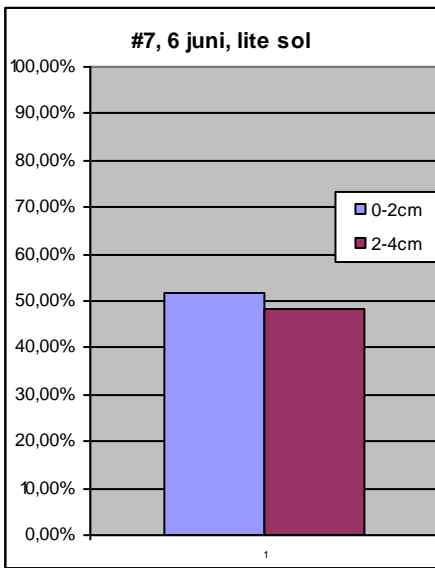
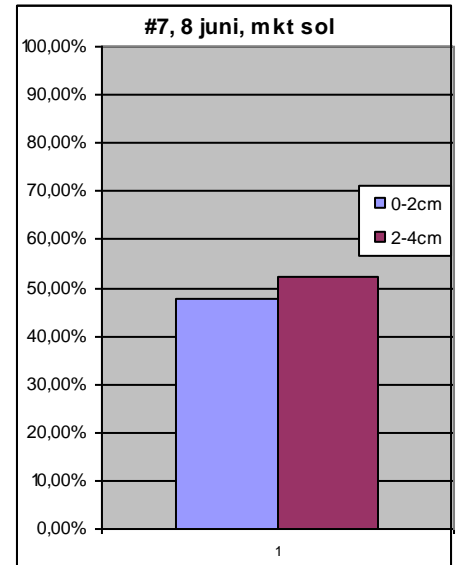
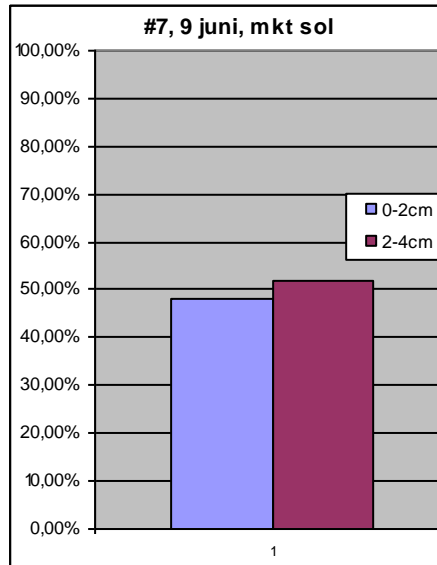
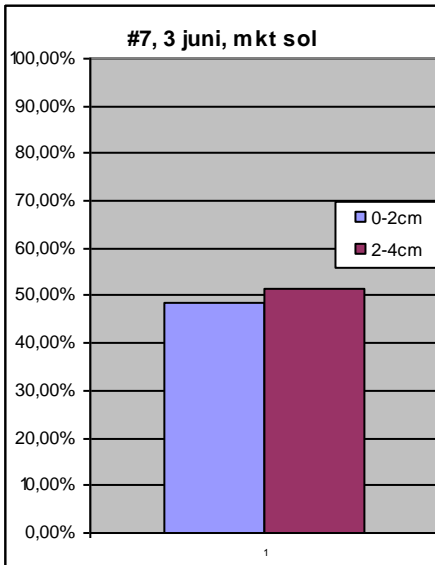
Figur 6b



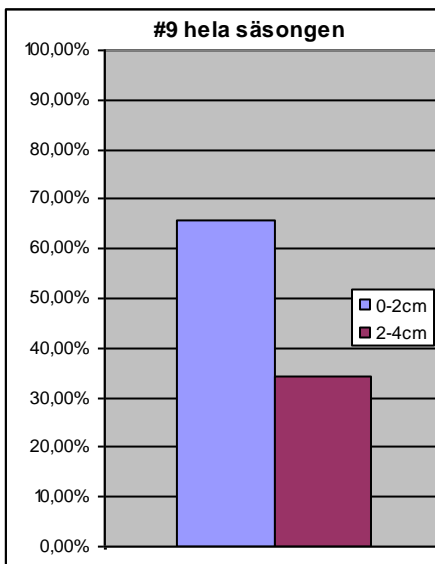
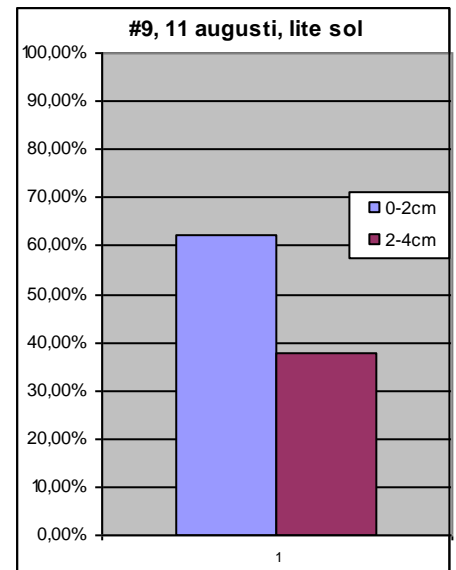
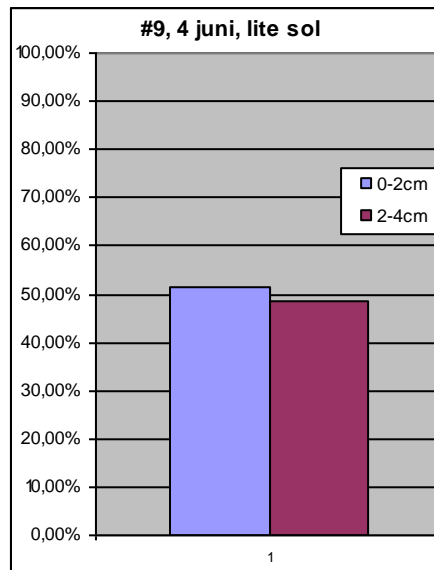
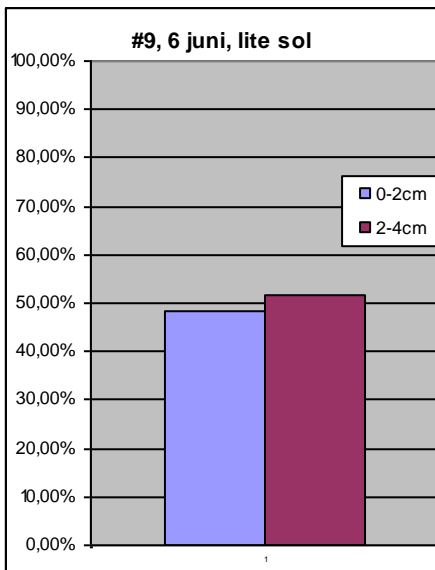
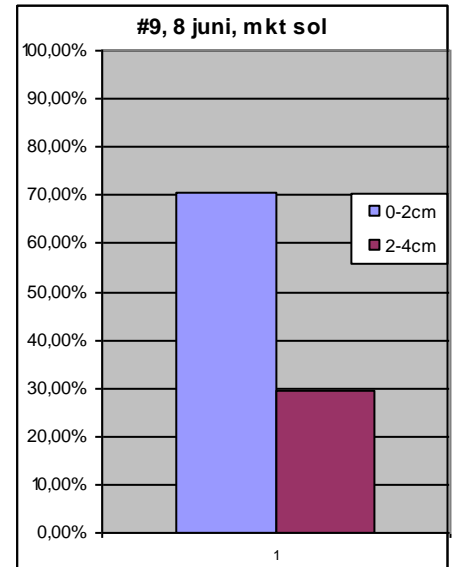
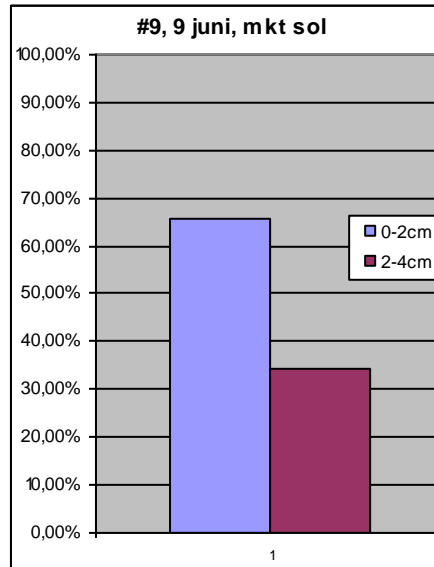
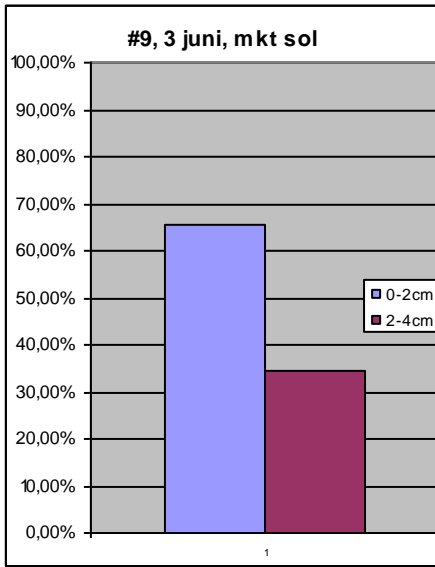
Figur 6c



Figur 6d



Figur 6e

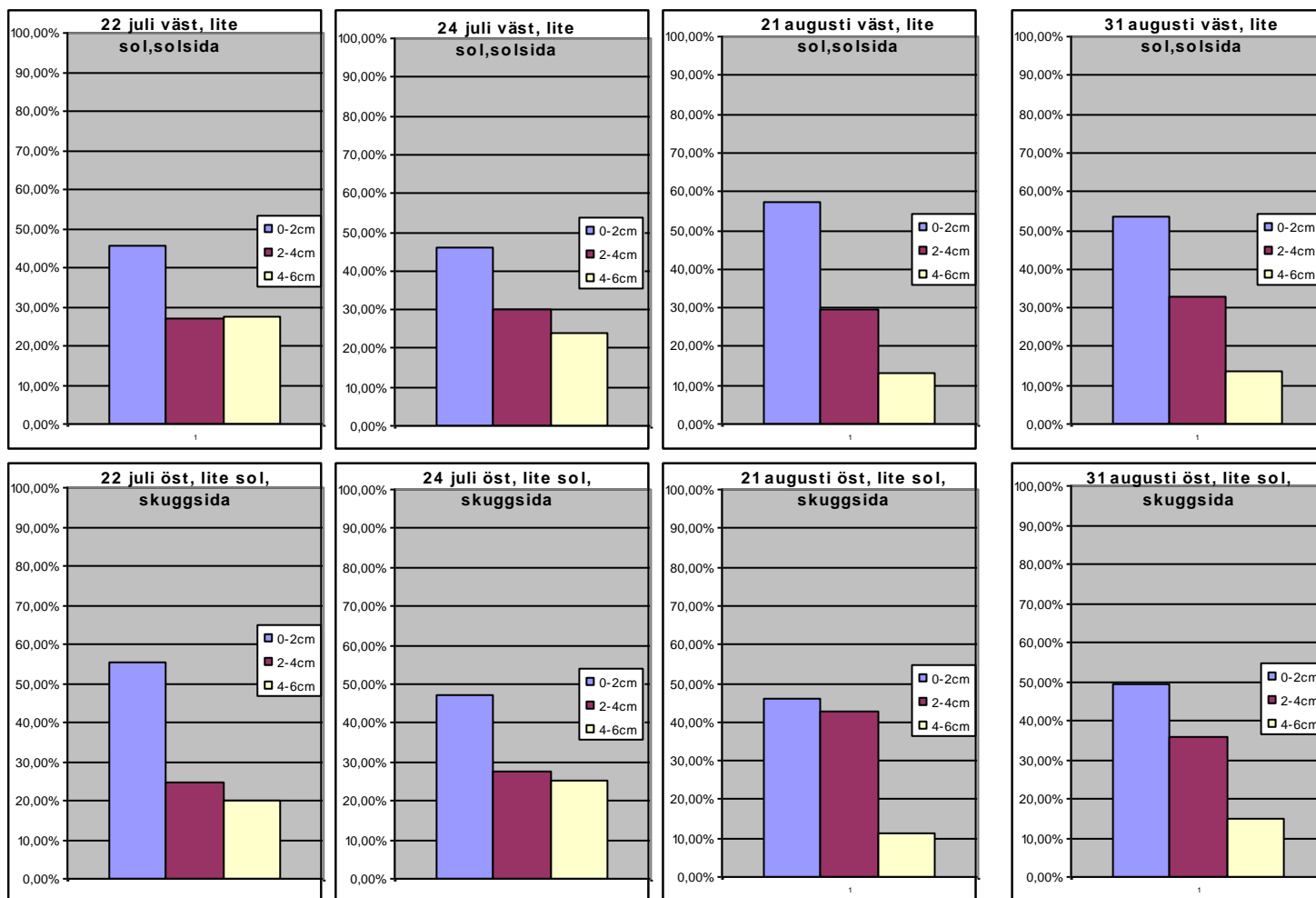


Vattenflödet på de olika djupen i stammen tycks inte variera med solstrålningen, dock varierar mönstren mellan träden.

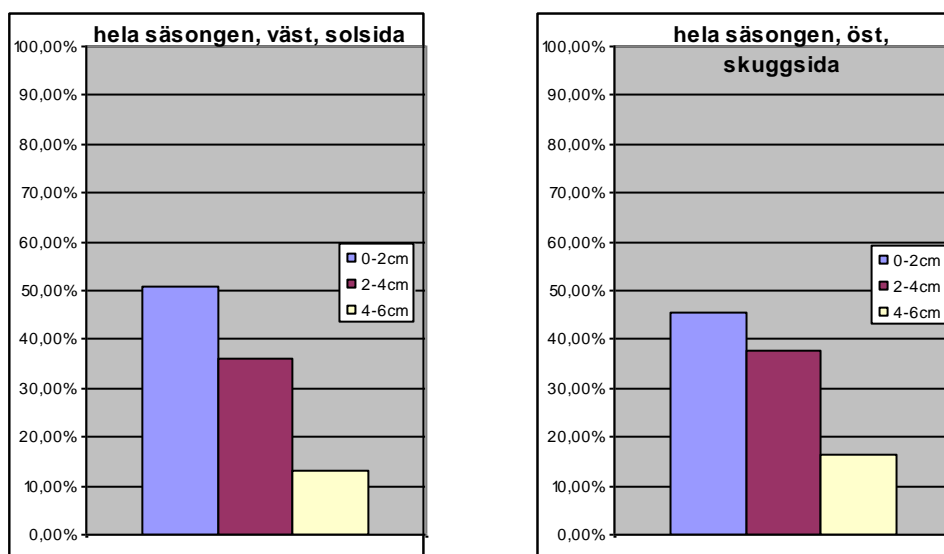
I figur 7 och 8 visas hur vattenflödet är fördelat över de yttre sex centimetrarna av stammen och hur det skiljer sig mellan de olika sidorna hos glänträdet för dagar med mycket respektive litet inkommande solstrålning. Precis som i Figur 6 syns tydligare mönster under dagar med mer solstrålning, och även att de båda sidornas vattenflödesfördelning liknar varandra. Under dagar med mindre inkommande solstrålning verkar vattenflödets fördelning inte uppträda i detta mönster. I Figur 9 ses fördelningen på de båda sidorna över hela säsongen; där tycks samma mönster som under de soliga dagarna visas upp. Under de soliga dagarna är det relativa flödet större i de innersta centimetrarna på den östra, skuggiga, sidan än det är på den västra.



Figur 7. Vattenflödesfördelningen på de båda olika sidorna av stammen under soliga dagar.

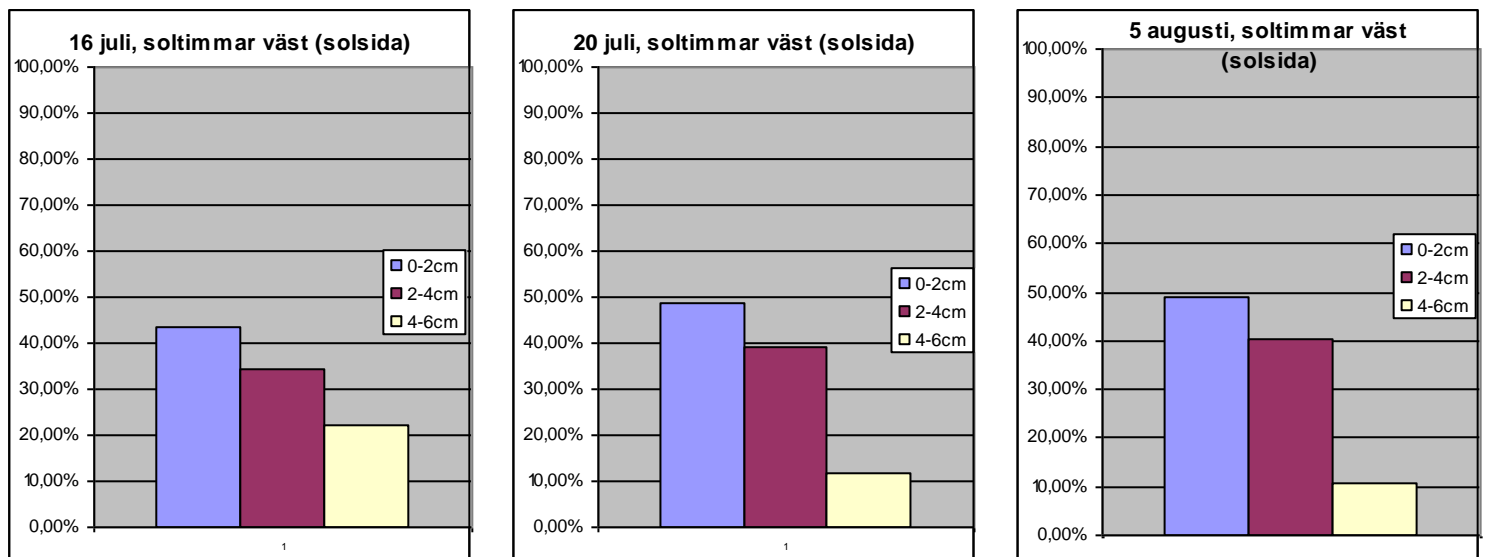


Figur 8. Jämförelse av vattenflödet på de olika sidorna av stammen under säsongens mulnare dagar.

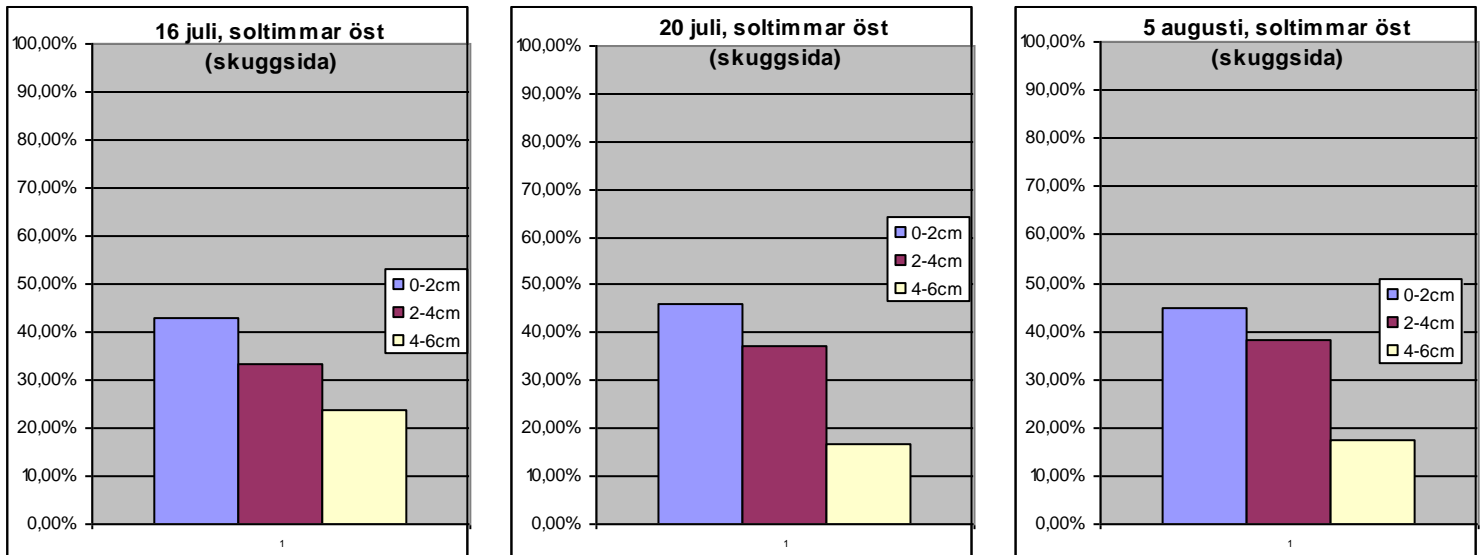


Figur 9. Fördelningen i glänträdets stam över hela säsongen.

Under dagen är trädets västsida extra solbelyst under två timmar på eftermiddagen mellan klockan 13:00 och klockan 15:00. Fördelningen av vattenflödet på de olika sidorna av trädets under dessa så kallade "soltimmar" visas i Figur 10 och 11 för säsongens tre soligaste dagar. Samma mönster visas upp som under hela dagarna med undantag för den 16 juli då det under hela dagen tycks vara en högre andel vattenflöde i de två innersta centimetrarna på båda sidor av trädets medan det under "soltimmarna" verkar avta inåt mitten som under de andra dagarna. På skuggsidan (den östra) av trädets tycks det relativa flödet i de innersta centimetrarna (4-6 cm) vara större än på solsida (den västra).



Figur 10. Fördelningen av vattenflödet på trädets västra sida mellan klockan 13:00 och 15:00.



Figur 11. Vattenflödets fördelning i trädets östra sida som inte är lika solbelyst, mellan klockan 13:00 och 15:00.

5. Diskussion

I de första figurerna (Figur 1 och 3) tycks sambandet mellan vattenflödet och diametern, respektive kronomkretsen vara ganska tydligt om de tre träd som saknade data för kronomkretsen från år 2000 inte är medräknade. Regressions- och korrelationsanalyser av fallen visar även de att sambanden stärks om dessa tre träd tas bort. Framför allt gällande kronomkretsen är denna skillnad betydande. En jämförelse mellan de förväntade värdena och residualerna ger en avvikelse på 15,9% för de åtta trädens kronomkrets och en på ungefär 20,5% när även de nyuppmätta kronomkretsarna är medräknade. Korrelationen mellan kronomkretsen och vattenflödet är ungefär 0,3 när alla de elva träden är med och 0,7 utan de tre nyuppmätta. Det är väntat att korrelationen förbättras om värden tas ur räkning, särskilt om dessa värden är avvikande. Det är inte svårt att gissa att en betydande anledning till denna stora skillnad även är att träden har vuxit under de nio år som gått mellan 2000 och 2009. I detta fall är alltså anledningen till varför värdena avviker känd och går inte att korrigera och det kan därför vara berättigat att ta dessa ur räkningen.

Även för analys av hur vattenflödet beror av diametern bättras korrelationen när de tre träden tas bort. Detta kan som nämnts bero på att något av träden är ett som avviker mycket från vad som förväntas. Värt att minnas är att träden i denna undersökning tillhör samma storleksklass och alltså inte skiljer sig mycket åt i omkrets; det är därför inte förvånande att så lika värden fås och att korrelationen mellan vattenflödet och stammens eller kronans diameter inte blir

högre. Då signifikansen blir lägre med färre mätpunkter är en korrelationsanalys med enbart åtta mätpunkter dessutom inte alltid pålitlig.

Vid jämförelse mellan de uppmätta värdena och ett medelvärde av desamma fås en avvikelse på 20,4% för elva träd och 21,7% för åtta träd. Denna avvikelse är något högre än då hänsyn tas för diameter eller kronomkrets, vilket visar på att det kan vara bra att ta denna hänsyn även när träden är jämnstora.

I jämförelsen mellan extra soliga dagar och dagar med lite inkommande solstrålning (Tabell 2 och Tabell 3) visar resultaten att sambandet mellan stamdiametern och vattenflödet inte tycks förändras märkbart om inkommande solstrålning ökar eller minskar. Samtidigt verkar sambandet stärkas mellan kronomkretsen och vattenflödet om solstrålningen är högre. Detta är intressant eftersom att en större kronomkrets, och därmed ett större antal löv exponerade för solen, gör att trädets vattenflöde ökar. Det indikerar att det är just solenergin på bladen som triggar vattenupptaget i rötterna och flödet i stammen, precis som Chapin et al. (2002) beskriver. Det tyder också på att kronomkrets må vara ett bra mått på dominans bland träd och på antal blad exponerade för sol.

Den radiella profilen hos trädens stammar verkar inte vara direkt styrd av solstrålningen. Figur 6 visar inte upp en generell bild av att det under soliga dagar är en större andel vattenflöde i den inre delen av trädets eller att det under mulnare dagar avtar mer tydligt lineärt inåt mitten av stammen. Tvärtom tycks det under de soligare dagarna vara ett mer generellt mönster medan de mindre soliga dagarna har en mer varierande fördelning. Som tidigare nämnts skiljer sig mängden vattenflöde i stammen nämnvärt mellan soliga och mulna dagar. Att det flödar så lite under mulna dagar kan göra att det slumpar sig så att det är en större andel flöde längre in mot kärnveden men mängden av detta är kanske ändå så liten att det inte går att generalisera. Däremot skiljer sig utseendet på den radiella profilen något mellan träden. Till exempel hos träd nummer tre som är ett dominant, med både störst krona och störst stam, är fördelningen av vattenflödet ungefär 70 % - 30 % för de yttre respektive de inre två centimetrarna oavsett inkommande solstrålning. Träd nummer tio som har en medelstor krona och stam visar ungefär samma mönster som nummer tre och det gör även det träd som har minst krona och stam, nummer ett, fast detta med fördelningen ungefär 80 % - 20 %. För övriga träd i studien ser plottarna liknande ut som dessa nämnda. Två träd skiljer sig dock från de övriga och det är de med numrena sju och nio. Träd nummer sju har ett betydligt större flöde i de två inre centimetrarna än de övriga träden och under de soligare dagarna är det större här än i de två yttre. Detta generella mönster stämmer inte överens med vad Saveyn et

al. (2008) skriver om att den inre delen av splintveden leder mer vatten än den yttre delen under soliga dagar; denna beskrivning stämmer snarare överens med de två träd i studien som skiljer sig från mönstret. Även om dessa träd har ett anorlunda utseende på sina radiella profiler verkar det ändå gå att hitta ett generellt mönster hos dem under just de soligare dagarna precis som hos de övriga träden. Dessa mönster som visas under de soligare dagarna stämmer även överens med fördelningen av vattenflödet som visas i figurerna över hela säsongen för de olika träden. Då det är så lite vattenflöde i stammen under de mulna dagarna, kan det göra att fördelningen slumpar sig lite mer och därför framgår inte samma mönster. Eftersom mätpunkten bara är en på hela stammen och vattenflödesarean hos bok tros ha ett mer komplext utseende än andra trädsorter, går det inte heller att veta om dessa mönster är representativa för hela trädet.

Figur 7, 8, 9, 10 och 11 jämför fördelningen av vattenflödet på två olika sidor av stammen hos trädet som står i en glänta och vars mätvärden togs upp år 2007. Under de soliga dagarna, med undantag för den 16 juli, skiljer sig profilen för den västra, mer solblottade sidan inte märkbart från den för den östra. Det går även att ana en något större andel vattenflöde i de innersta två centimetrarna för den östra sidan, som alltså är den mindre solblottade sidan, under dessa tre dagar. Utseendet skiljer sig inte nämnvärt mellan dagarna med mer inkommande solstrålning. I Figur 8 är trädets radiella profil på de olika sidorna plottade för dagar med mindre sol. Liksom ovan för Figur 6 är mönstren inte lika tydliga under mulnare dagar, inte heller mellan de olika sidorna under en dag och inte mellan dagarna.

Under de soligaste dagarna år 2007, är flödesmönstret i glänträdets under de soligaste timmarna liknande det över hela dagen med avtagande inåt mitten. Den 16 juli är ett undantag. Detta datum har precis som de övriga dagarna ett avtagande flöde inåt under de soligaste timmarna. Sett över hela dagen, tycks det däremot på solsidan flöda mer vatten i de två innersta centimetrarna än i de mellersta. Att mönstren inte är desamma kan bero på att det under något tillfälle denna dag var mulnare. Under de dagar med högst inkommande solstrålning har de inre två centimetrarna på skuggsidan större andel vattenflöde än de två inre centimetrarna på solsidan; detta är även fallet under de timmar med högst inkommande solstrålning. Den komplexa radiella profilen hos bok är inte tydlig i studien men detta kan vara ett tecken på den.

6. Slutsats

I undersökningen om fördelningen mellan den yttersta och den innersta delen av splintveden syns ett tydligare mönster under dagar med mer inkommande solstrålning än under dagar med mindre. Dock verkar inte den inre delen leda större andel vatten under dessa dagar. Den radiella komplexiteten hos bok visas därmed inte tydligt i studien av vattenflödesdata från skogen i Sorø. Av de elva träden har dock två en radiell profil som skiljer sig från de övrigas, med större andel flöde i inre delarna av stammen. Detta är ett tecken på att det inte räcker med en mätpunkt i de yttre centimetrarna; en stor del av flödet kan då missas.

Korrelationen mellan vattenflödet och trädens stamdiameter respektive kronomkrets är inte helt tydlig; det går dock att se att ett samband finns. Eftersom träden i denna studie alla tillhör samma storleksklass samt har samma ålder är det klart att det inte blir några större skillnader i vattenflöde. Även i denna skog med jämnstora träd går det att se att när hänsyn tas till storleken ges ett mindre fel än när ett medelvärde tas och det kan alltså löna sig att beakta stamdiameter och kronomkrets.

Under dagar med mer inkommande solstrålning tycks sambandet mellan vattenflödet och kronomkretsen öka jämfört med under mindre soliga dagar. Detta visar att kronomkretsen med dess mått på antal blad som fotosyntetiserar också är ett bra mått på dominans hos träd och kanske till och med ett bättre mått än stamdiametern. Studien visar att det mellan kronomkrets och stamdiameter finns en korrelation.

7. Referenser

- Chapin III F.S., Matson P., Mooney H., Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology, (2002) kapitel 4 och 5, 71-122. Springer
- Cermak J., Kucera J., Nadezhdina N., Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18 (2004) 529-546
- Dalsgaard, L., Transpiration and water budgets of European beech (*Fagus sylvatica* L.) dominated stands in relation to canopy structure. *Forest and Landscape Research* 39 (2008). Faculty of Life Science, University of Copenhagen
- Fiora A., Cescatti A., Diurnal and seasonal variability in radial distribution of sap flux density: implications for estimating stand transpiration. *Tree Physiology* 26 (2006) 1217-1225
- Ford C., Goransson C., Mitchell R., Will R., Teskey R., Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sapflow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree physiology* 24 (2004) 951-960
- Ford C., Hubbard R., Kloeppel B., Vose J., A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. *Agricultural and Forest Meteorology* 145 (2007) 176-185
- Gessler A., Rienks M., Dopatka T., Rennenberg H., Radial Variation of Sap Flow Densities in the Sap Wood of Beech Trees (*Fagus sylvatica*). *Phyton* 45 (2005)
- Granier A., Bobay V., Gash J.H.C., Gelpe J., Saugier B., Shuttleworth W.J., Vapor flux density and transpiration rate comparison in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 51 (1990) 309-319
- Granier A., Sap flow measurements - using the radial flowmeter technique. *Institute National de la Recherche Agronomique* (1996)
- Granier A., Biron P., Lemione D., Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 100 (2000) 291-308
- Köstner B., Granier A., Cermak C., Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Ann. Sci For* 55 (1998) 13-25
- Luttschwager D., Remus R., Radial distribution of sap flux density in trunks of a mature beech stand. *Ann. For. Sci* 64 (2007) 431-438
- Pilegaard K., Mikkelsen T., Beier C., Jensen N.O., Ambus P., Ro-Poulsen H., Field measurements of atmosphere-biosphere interactions in a Danish beech forest. *Boreal environment research* 8 (2003) 315-333
- Saveyn A., Steppe K., Lemeur R., Spatial variability of sap flow in mature beech (*Fagus sylvatica*) and its diurnal dynamics in relation to microclimate. *Botany* 86 (2008) 1440-1448

Wieser G., Matyssek R., Köstner B., Oberhuber W., Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sap flow measurements. Environmental Pollution 126 (2003) 5-8

Muntliga referenser.

Ibrom A., muntligen (2009)

Lindeson M-L., muntligen (2010)