



---

Sveriges  
lantbruksuniversitet

# Skogsavverkningens påverkan på vattnets strömningsvägar i jorden

The effect of clear-cutting on soilwater  
flowpaths

---

Carolin Haglund



## Referat

### Skogsavverkningens påverkan på vattnets strömningsvägar i jorden

*Carolin Haglund*

Genom avverkning av skog minskar transpirationen och interceptionen från skogsmarken och följden blir en höjning av grundvattennivån, som i sin tur leder till att jordlager närmare markytan mättas. Jordens mättade hydrauliska konduktivitet ökar med minskat avstånd till markytan. Följden av skogsavverkningens effekt på grundvattennivån blir en snabbare och större respons på vattenföringen i bäcken vid ett regn- eller snösmältningstillfälle.

Detta examensarbete undersökte hur grundvattnets strömningsvägar i skogsmark förändras vid skogsavverkning. En modell konstruerades som beskrev hur grundvattennivån och vattenföringen i bäcken var relaterade. Modellen användes vidare för att undersöka skogsavverkningens effekt på grundvattnets strömningsvägar.

Resultatet visade att korrelationen mellan grundvattennivå och vattenföring varierade mellan olika lokaliseringar och att jordens egenskaper samt omgivningens topografi har en tydlig inverkan. Avverkningen medförde en höjning av grundvattennivån med störst inverkan på vattenföringen under lågvattenföring. Större delen av det ökade vattenflödet i jorden transporterades i samma jordskikt som före avverkning, förutom i jordlagret närmast markytan, som fick ett ökat flöde. Dock beror resultatet på hur bra modellen avspeglade de verkliga förhållandena.

Nyckelord: Skogsavverkning, grundvattenflöde, strömningsvägar, hydrologi, grundvattennivå.

## **Abstract**

### **The effect of clear-cutting on soil water flowpaths**

*Carolin Haglund*

Transpiration and interception decrease after clear-cutting, which increases the groundwater level. The higher groundwater level saturates the soil nearer the soil surface. Since the saturated hydraulic conductivity increases towards the soil surface, and the groundwater rise after clear-cutting increases flows increase and there is likely to be a faster and larger runoff response to a rainfall or snowmelt event.

The aim of this master's thesis was to analyze how the groundwater flowpaths change after clear-cutting. First a model that describes the correlation between groundwater level and stream flow was calibrated. The model was then used to analyze the effect on the groundwater levels after clear-cutting.

The results showed that the correlation between groundwater level and stream flow varies spatially and was influenced by soil characteristics as well as the landscape's topography. Clear-cutting resulted in a rise of the groundwater level that was during base flow conditions. The major part of the increased flow was transported in the same soil layer as before clear-cutting but with a slight shift to soil layers nearer the soil surface. However, the results should be interpreted with the model uncertainties in mind.

Keywords: Clear-cutting, groundwater flow, flowpath, hydrology, groundwater level.

Department of Aquatic Science and Assessment, Swedish University of Agricultural Sciences

Vallvägen 3, SE-756 51 Uppsala

ISSN 1401-5765

## Förord

Detta examensarbete har utförts som avslutande del i Civilingenjörsprogrammet miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och omfattar tjugo veckors arbete. Examensarbetet har utförts på institutionen för vatten och miljö vid Sveriges lantbruksuniversitet i Uppsala.Handledare har varit Rasmus Sörensen och ämnesgranskare har varit Kevin Bishop, båda tillhörande Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet. Examinator var Allan Rodhe på Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

Dessa veckor har gått fort och mycket intressant har hänt på vägen. Först vill jag tacka Claudia Teutschbein för hennes arbete med sammanställning av mätningar från tidigare år. För konstruktion av kartor över studieområdet vill jag tacka Jan Seibert, Stockholms universitet, och Jakob Nisell, SLU. Jag vill också passa på att tacka Karin Eklöv, Mattias Winterdahl, Martin Erlandsson och Teresia Wällstedt, SLU, för att de har lyssnat på alla mina frågor och gett mig stöd i mina funderingar. Både min handledare Rasmus Sörensen och min ämnesgranskare Kevin Bishop har varit till stor hjälp under arbetets gång och ett varmt tack till er för möjligheten att kunna fördjupa mina kunskaper inom området.

Slutligen vill jag tacka Julia Paraskova och André Spans för otroligt trevligt sällskap på SLU under dessa veckor. Även ett stort tack till de personer som förgyllt min fritid.

Carolin Haglund

Uppsala, feb 2009

Copyright © Carolin Haglund och Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet.

UPTEC W 09 033, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2009.

## Populärvetenskaplig sammanfattning

*Carolin Haglund*

Skogsavverkning sker framförallt vintertid, då marken är frusen, för att minska dess negativa inverkan på skogsområdet. Avverkning av skog medför att transpirationen och interceptionen minskar genom att skogen reducerats. Transpiration utgör trädens avdunstning av vatten till luften. Regn som fastnar på träd kallas interception. Den minskade vattenavgången leder till att mängden vatten i marken ökar efter skogsavverkning och som följd stiger grundvattennivån i jorden.

Jordens egenskaper, så som jordpartiklarnas storlek och sammansättning, varierar i naturen. Vattnet transporteras i hålrum mellan jordpartiklarna i marken då de är fyllda med vatten. I moränjordar, typiska för svenska skogslandskap, ökar vanligen jordens förmåga att transportera vatten ju närmare markytan vattnet befinner sig. Vattnet transporteras i första hand från högre till lägre marknivåer. Nederbörden som infiltreras, rinner ner i jorden och bidrar till att vattenmagasinet i marken fylls på, vilket leder till att grundvattennivån stiger. En enskild vattenpartikel rör sig långsamt och det är bara grundvattnet närmast bäcken som når fram vid ett tillskott av vatten från nederbörd eller snösmältning.

Målet med detta examensarbete var att undersöka hur vattnets strömningsvägar i jorden förändras vid skogsavverkning. Genom att undersöka hur grundvattennivån samspelar med vattenföringen i den avvattande bäcken, konstruerades en modell som beskriver detta samspel. Modellen skapades utifrån mätningar, före avverkning, av grundvattennivån och vattenföringen i bäcken, det vill säga hur mycket vatten som rann i bäcken. Mätningar visade att vattenföringen i bäcken ökade efter skogsavverkning. Ökningen adderades till vattenföringen före avverkning och med hjälp av modellen undersöktes skogsavverkningens effekt på grundvattnets strömningsvägar i jorden.

Försöksområdet var indelat i två områden där det ena avverkats helt och det andra avverkats till en tredjedel. Ett referensområde, där skog fortfarande växer, har sparats för att fungera som en jämförelse vid beräkning av avverkningens effekt. Områdena ligger sex mil väster om Umeå och två förgreningar till Balån rinner igenom områdena. Vattenföringen i bäckarna mättes i en konstruerad damm vid försöksområdenas utlopp. Grundvattennivån i jorden mättes i grundvattenrör som var utplacerade i rader vinkelrätt mot bäcken. Kontinuerliga och manuella mätningar skedde i grundvattenrören i två rader för varje försöksområde.

Vattnets strömningsvägar i jorden berodde starkt av jordens egenskaper och topografin, höjdskillnader, i observationsplatsens omgivning. Samspelet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken varierade för olika observationsplatser, och perioder på året. Resultaten från mätningarna visade att grundvattennivån hade höjts i förhållande till avrinningen i bäcken under året, vilket påverkade modellens anpassning.

Avverkning av skogen medförde en ökad magasinering av vatten i jorden och en förhöjd grundvattennivå, vilket medförde till ökad vattenföring i bäcken. Störst effekt observerades vid låg vattenföring i bäcken till följd av att jorden mättes i ytligare jordskikt med en ökad förmåga att transportera vatten. Den ökade vattenföringen innebär att mer vatten måste transporteras i den mättade jorden. Den största ökningen av vattentransporten i jorden skedde i de ytliga jordskikten, cirka 1-2dm tjockt, som

transporterade mest grundvatten även före avverkning. Där grundvattennivån varierade i stor omfattning i jordprofilen, transporteras ökningen av den framrunna volymen grundvatten i fler jordskikt, främst i jordskikt närmare markytan.

Grundvattennivåns variation i jorden, efter indelningen av avstånd till bäcken, verkade inte ha påverkats nämnvärt av avverkningen. Då medelvärden för grundvattennivån i områdena N och S, före och efter avverkning, undersöktes vid olika vattenföringsklasser observerades en höjning av medelvärdet för grundvattennivån vid hög- och lågvattenföring.

# INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1. INLEDNING .....	1
2. TEORI .....	2
2.1. VATTNETS TRANSPORTVÄGAR I MARKEN .....	2
2.1.1. Strömningens drivkrafter .....	2
2.1.2. Jordens betydelse för vattentransport .....	2
2.1.3. Vattnets hastighet .....	2
2.2. SKOGSAVVERKNING .....	3
2.2.1. Avverkning av skogsområden .....	3
2.2.2. Skogsavverkningens inverkan på vattnets förekomst.....	3
2.3. STUDIER PÅ VATTNETS TRANSPORT I MARKEN .....	3
3. MATERIAL OCH METODER.....	4
3.1. OMRÅDESBESKRIVNING .....	4
3.2. BEARBETNING AV FÖRSÖKSOMRÅDET .....	7
3.3. MÄTNINGAR.....	8
3.3.1. Grundvattenmätningar .....	8
3.3.2. Vattenföringsmätningar .....	11
3.4. BERÄKNINGAR .....	11
3.4.1. Kalibrering av grundvattennivå.....	11
3.4.2. Grundvattennivåns samverkan med vattenföringen i bäcken.....	12
3.4.3. Ny tidsserie för grundvattennivå .....	12
3.4.4. Framrunnen volym grundvatten i jorden.....	12
3.4.5. Skogsavverkningens effekt på strömningsvägar .....	13
4. RESULTAT.....	14
4.1. KALIBRERING AV GRUNDVATTENNIVÅ .....	14
4.2. GRUNDVATTENNIVÅNS SAMVERKAN MED VATTENFÖRINGEN I BÄCKEN.....	14
4.3. NY TIDSSERIE FÖR GRUNDVATTENNIVÅ .....	17
4.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN I JORDEN.....	18
4.5. SKOGSAVVERKNINGENS EFFEKT PÅ STRÖMNINGSVÄGAR.....	21
4.5.1. Skogsavverkningens effekt på grundvattennivån .....	24
5. DISKUSSION .....	25
5.1. KALIBRERING AV GRUNDVATTENNIVÅ .....	25
5.2. GRUNDVATTENNIVÅNS SAMVERKAN MED VATTENFÖRINGEN I BÄCKEN.....	25
5.3. NY TIDSSERIE FÖR GRUNDVATTENNIVÅ .....	27
5.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN I JORDEN.....	27
5.5. SKOGSAVVERKNINGENS EFFEKT PÅ STRÖMNINGSVÄGAR.....	27
6. SLUTSATS .....	29
7. REFERENSER .....	30
Appendix A. Kalibrering av grundvattennivå .....	32
Appendix B. Grundvattennivåns samverkan med vattenföringen i bäcken .....	35
Appendix C. Ny tidsserie för grundvattennivån.....	38
Appendix D. Framrunnen volym grundvatten i jorden .....	45
Appendix E. Topografiskt tvärsnitt för varje transekt.....	47
Appendix F. Skogsavverkningens effekt på strömningsvägar .....	50
Appendix G. Frekvensfördelning över grundvattennivån före och efter avverkning.....	51
Appendix H. Modellerad grundvattennivå före och efter avverkning.....	53



## 1. INLEDNING

Sveriges landareal består till 55 % av skog, och skogen utgör en viktig del av landets naturresurser. Skogen angränsar till många vattendrag och sjöar och det finns en risk för att miljön blir starkt påverkad av skogsindustrin. Avverkning i skogsområden medför en förändring av marken. Skogsavverkningen sker framförallt vintertid då marken oftast är frusen. De tunga skogsmaskinerna kan innebära en risk för spårbildning samt kompaktering av marken, främst då marken inte är frusen. Följden kan bli att vattendrag och organismer påverkas genom ett ökat tillskott av bland annat organiskt och partikulärt material, som båda transporterar bland annat näringsämnen och tungmetaller, och på så vis orsakar förändrad vattenkemi i vattendraget (Ring m fl., 2008b).

I och med att skogen avverkas minskar transpirationen och interceptionen vilket medför att grundvattennivån stiger. Höjningen av grundvattennivån gör att ytliga jordlager snabbare mättas vid ett regn- eller snösmältningstillfälle (Grip & Rodhe, 2003). Den hydrauliska konduktiviteten i en moränjord ökar vanligen mot markytan (Lundin, 1982), vilket ger en stor ökning av grundvattenflödet när grundvattennivån stiger mot markytan.

Flera studier undersöker kopplingen mellan vattenföring i bäcken och grundvattennivå vid naturliga förhållanden i svenska skogslandskap (Bishop, 1991; Bishop m fl., 1998; Rodhe, 1989; Seibert m fl., 2003). Dessa studier visar att på ett längre avstånd från bäcken finns det en viss fördröjning av responsen på infiltrerat regn- eller smältvatten kopplat till vattenföringen i bäcken. Vid ett tillskott av vatten mättas jorden närmare markytan och dessa jordlager har en större förmåga att transportera vatten snabbt till bäcken. Den infiltrerade vattenpartikeln förflyttar sig sakta men skapar en ökad potentialskillnad till vattenpartiklarna närmast bäcken.

Målet med detta examensarbete var att undersöka hur grundvattnets strömningsvägar i jorden förändras vid skogsavverkning. Undersökningen skedde i två försöksområden, där det ena avverkats delvis och det andra avverkats helt. Ett tredje område, referensområde med skog, ligger uppströms det delvis avverkade området för att kunna undersöka avverkningens effekt.

Genom att undersöka hur grundvattennivån i jorden samspelar med vattenföringen i den avvattande bäcken, konstruerades en modell som beskriver detta samspel. Grundvattenmätningar samt vattenföringsmätningar i den avvattande bäcken utfördes i alla försöksområden. Modellen användes vidare för att undersöka skogsavverkningens effekt på grundvattnets strömningsvägar i jorden.

## **2. TEORI**

### **2.1. VATTNETS TRANSPORTVÄGAR I MARKEN**

#### **2.1.1. Strömningens drivkrafter**

Vattenflödet i jorden drivs av gravitations- och tryckkrafter som balanseras av friktionskraften som uppkommer då vattnet strömmar genom jordens porer. Flödet kan också beskrivas genom att undersöka vattnets potential. Markvattnets totala potential utgörs av tryckpotential och lägespotential. Strömning går från högre till lägre total potential. (Grip & Rodhe, 2003)

I de högre delarna av landskapet är flödet nedåtriktat och det sker en påfyllnad av grundvatten, så kallad grundvattenbildning. När regn infiltrerar i marken kan det ge upphov till en höjning av grundvattenytan som leder till ökad strömning i de lägre delarna av landskapet, utströmningsområdet. Utströmningsområdet bidrar med en stor del av vattenföringen i bäcken. Grundvattenytan är nära markytan och infiltrationen ger snabbt upphov till ökad grundvattenströmning. Den starka påverkan avtar gradvis med ett ökat avstånd från utströmningsområdet. (Grip & Rodhe, 2003)

#### **2.1.2. Jordens betydelse för vattentransport**

Det finns en rumslig variation i jordens utseende. Dess struktur, porstorleksfördelning och jordpartiklarnas kemiska sammansättning påverkar vattnets flödesvägar och dess uppehållstid i marken (Bishop m fl., 1998).

Flödet av vatten i marken påverkas av jordens egenskaper samt jordens vattenhalt. Den hydrauliska konduktiviteten visar jordens förmåga att kunna transportera vatten. En por i jorden måste innehålla vatten för att kunna transportera vatten. Vid mättade förhållanden är den hydrauliska konduktiviteten i jorden som störst. I en moränjord ökar vanligen jordens hydrauliska konduktivitet mot markytan (Lundin, 1982). När en jord torkar dräneras de största porerna först och jordens hydrauliska konduktivitet minskar. (Grip & Rodhe, 2003)

I morändominerade marker följer som regel grundvattenytan markytans topografi. Hela jordprofilens ledningsförmåga kallas transmissivitet. Grundvattenföringen kan således beräknas utifrån grundvattenytans lutning och grundvattennivå. (Grip & Rodhe, 2003)

#### **2.1.3. Vattnets hastighet**

Vattnets rörelse kan uttryckas på tre olika sätt, Darcys hastighet, partikelhastighet och tryckfortplantningshastighet. Darcys hastighet uttrycker vattenföring per tvärsnittsarea. Vattenpartikelns hastighet är högre på grund av att tvärsnittsarean endast beräknas som den del av ytan där vattnet kan transporteras, även kallad effektiv area. För att kunna beräkna den effektiva arean multiplicerar man den totala tvärsnittsarean med vattenhalten i jorden. Tryckfortplantningshastigheten kan enklast beskrivas som ett tryck som fortplantas genom den mättade delen av jorden, och ska inte förväxlas med vattenpartiklarnas hastighet, som är avsevärt långsammare. (Grip & Rodhe, 2003)

## **2.2. SKOGSAVVERKNING**

### **2.2.1. Avverkning av skogsområden**

För att ge minst påverkan på miljön sker avverkning av skog oftast på vintern då marken är frusen. Tjälens minskar risken för spårbildningar och kompaktering av jorden. Kompaktering kan leda till sämre infiltrationskapacitet och eventuell ytavrinning. Vid skogsavverkningen kan en skyddande kantzon av träd lämnas kvar närmast vattendraget. (Ring m fl., 2008b)

### **2.2.2. Skogsavverkningens inverkan på vattnets förekomst**

Efter avverkning av skog minskar transpirationen samt interceptionen genom att vegetationen reducerats (Grip & Rodhe, 2003). Den totala evapotranspirationen från ett avverkat skogsområde kan vara upp till 25-50 % lägre än för en skog (Entenmann, 2008). Avverkningen medför en ökad infiltration, högre vattenhalt i marken samt ökad grundvattenbildning. Den ökande mängden vatten gör också att medelavrinningen i den avvattnande bäcken ökar och det mättade utströmningsområdet ökar (Grip & Rodhe, 2003).

Skogsavverkning ökar vattenföringen för flera år framåt (Ring m fl., 2008b; Entenmann, 2008). Beroende på hur stor del av avrinningsområdet som avverkas, höjs vattenföringen olika mycket. Störst påverkan på vattenföringen ses vid högvattenföring hos mindre vattendrag (Ring m fl., 2008b). Få studier har undersökt hur avverkning påverkar grundvattnet samt dess respons och val av flödesvägar vid ett regn- eller snösmältningstillfälle. En studie av Lundin (1979) observerade en förhöjd grundvattenyta till följd av avverkning.

## **2.3. STUDIER PÅ VATTNETS TRANSPORT I MARKEN**

För svenska skogslandskap består merparten av vattnet i bäckar av grundvatten och flera studier undersöker sambandet mellan grundvattennivå och bäckvattenföring (Bishop, 1991; Bishop m fl., 1998; Rodhe, 1989; Seibert m fl., 2003). En vattenpartikels infiltrationshastighet kan uppgå till några cm per timme vid ett regn- eller smältillfälle. Följden blir att endast vattenpartiklar nära bäcken, där jorden blir mättad, bidrar till vattenföring i bäcken i början. Den mekanism som driver vattnet till bäcken är det tryck som byggs upp vid infiltrationsområdet och som sen fortplantar sig. Hastigheten på fortplantningen styr hur lång tid responsen på vattenföringen i bäcken blir från regn- eller snösmältningstillfället. Området som bidrar till en topp i vattenföringen är stort men dess effektivitet minskar med avståndet från bäcken. Grundvattenströmningen kan öka med fem till femtio gånger inom några timmar eller dagar beroende på regnets eller snösmältningens och jordens förhållanden. (Rodhe, 1989)

I en viss del av jorden genereras en ökad vattenföring utan en ändring i potentialgradienten för den laterala strömningen. Eftersom den mättade hydrauliska konduktiviteten ökar mot markytan för en moränjord (Lundin, 1982), transporteras merparten av grundvattnet i de ytliga skikten av den mättade jorden. En stor del av den årliga avrinningen, vid högvattenföring, transporteras i det mättade jordskiktet under grundvattenytan under ett fåtal dagar. (Bishop m fl., 1998)

I en studie av Bishop m. fl. (1998) studerades vattnets uppehållstid och dess flödesvägar i en moränmark. Resultatet från denna studie visade att jorden nära vattendraget gav ett direkt tillskott på vattenföringen i vattendraget medan jorden längre bort från

vattendraget gav ett tillskott några dagar efter regn- eller snösmältningstillfället. När grundvattenytan nådde en viss nivå gav den en snabb respons på vattenföringen i bäcken. Ovanför denna tröskelhöjd var konduktiviteten hög och en liten höjning av grundvattenytan gav ett stort tillskott till vattenföringen. Studien visade att merparten av det laterala flödet, vid högvattenföring, koncentrerades till ett 2-3dm tjockt jordskikt under grundvattenytan. I de marknära jordskikten koncentrerades det laterala flödet till en period under två veckor, medan djupare ner i jorden koncentrerades det laterala flödet till en längre period över året.

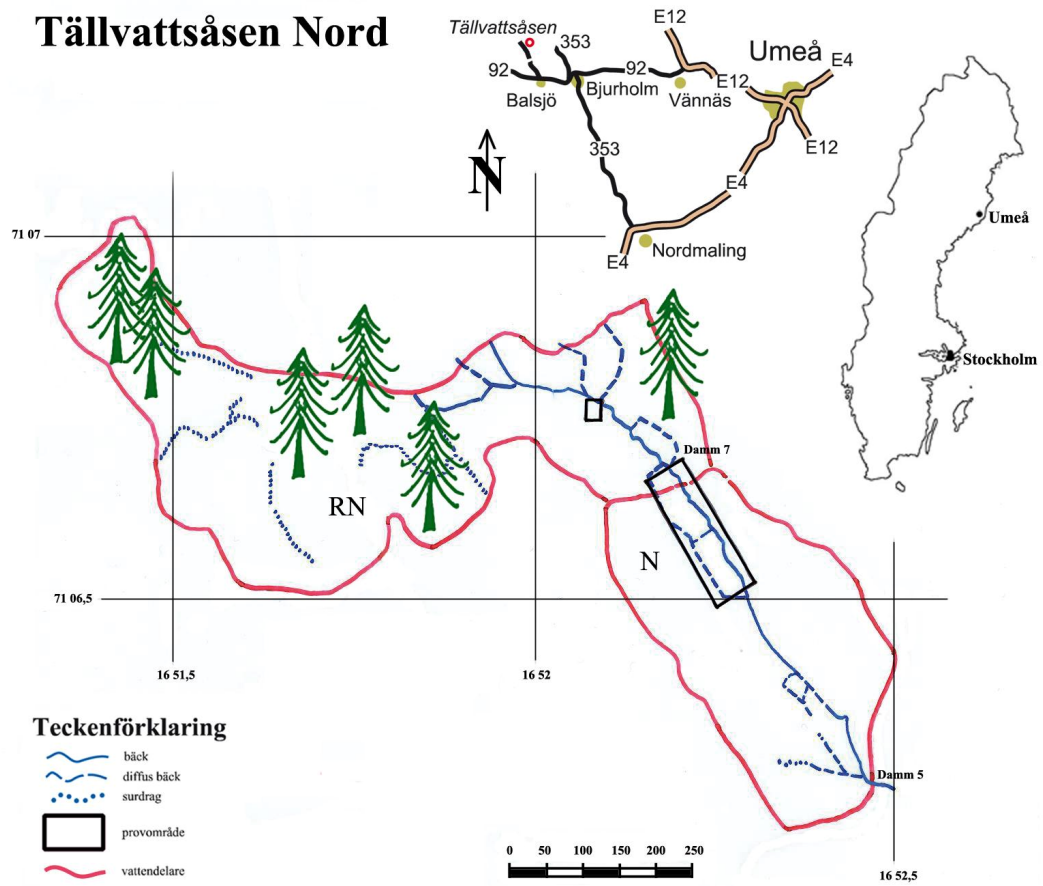
Kopplingen mellan vattenföring i bäck och grundvatten är en viktig del i förståelsen av vattentransport i marken. Seibert m. fl. (2003) kom efter en studie fram till slutsatsen att det fanns en korrelation mellan vattenföringen i bäcken och grundvattennivån närmast bäcken, men korrelationen sjönk markant på avstånd över 40 m från bäcken. Hypotesen som testades var att grundvattennivån höjs och sänks uniformt i moränslutningen längs med bäcken i samklang med en höjning och sänkning av vattenföringen i bäcken. Resultatet från denna studie visade att tidigt i ett regn- eller snösmältningstillfälle, medan grundvattennivån närmast bäcken och den uppmätta vattenföringen steg, sjönk grundvattennivån längre bort från bäcken som en del av recessionen från regntillfället från några dagar före. Efter det att toppen i vattenföringen hade passerat kunde grundvattennivån längre bort från bäcken stiga medan den sjönk närmare bäcken. Grundvattennivån närmare bäcken förblev närmare markytan och fluktuerade inom ett mindre intervall i jorden jämfört med grundvattennivån längre från bäcken.

### **3. MATERIAL OCH METODER**

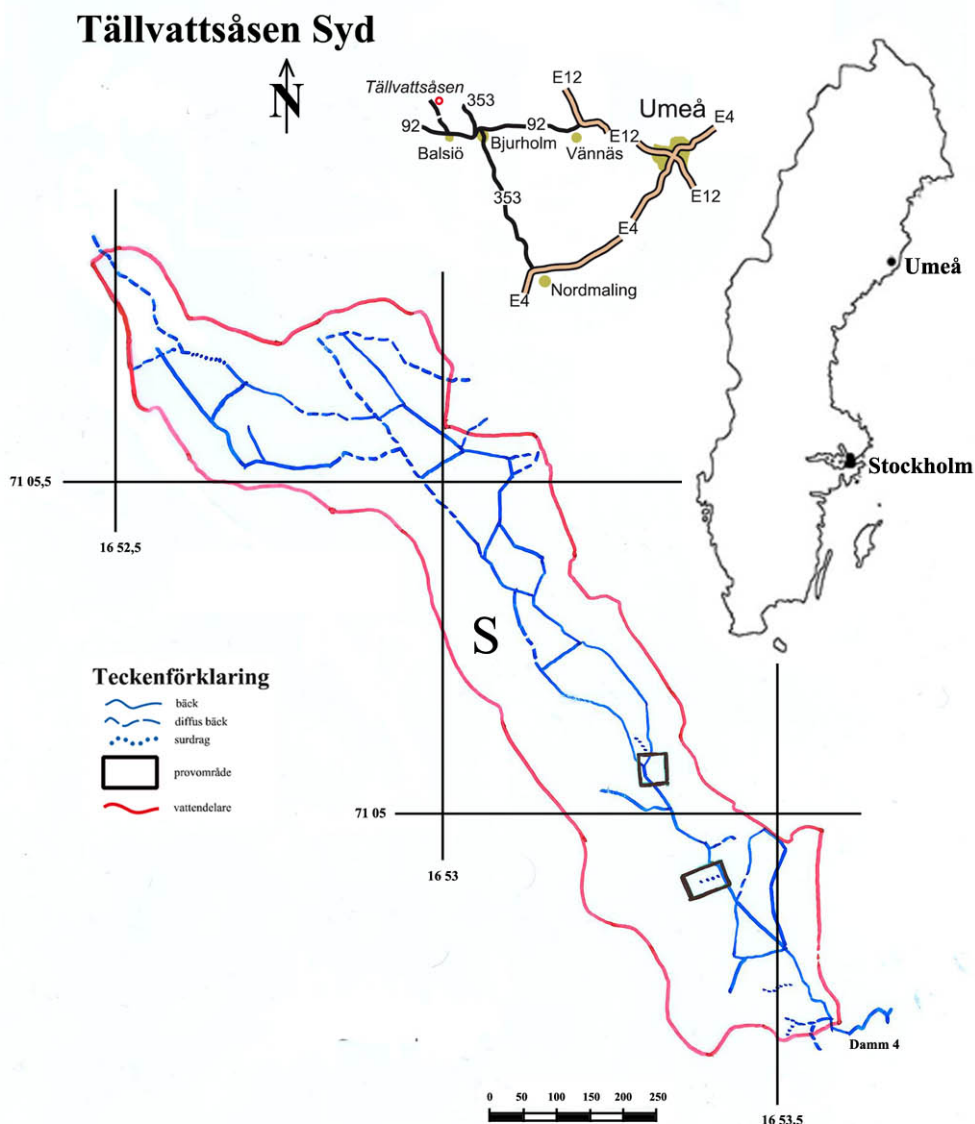
Målet med detta examensarbete var att undersöka hur vattnets strömningsvägar i jorden förändrades vid skogsavverkning. En modell togs fram som beskrev sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken och modellen antogs gälla även efter skogsavverkning. För att kunna beräkna vattenföring efter skogsavverkning, skildrades dess effekt genom att använda beräknade procentuell ökning av vattenföring i bäcken efter avverkning, framtagen i en annan studie (Sörensen, 2009), som adderades till vattenföringen i bäcken före avverkning. Med hjälp av modellen beräknades en grundvattennivå efter avverkning. Grundvattennivån användes för att beräkna hur lång tid jorden var mättad på olika nivåer, och därmed kunde sammanlagd framrunnen volym vatten på de olika nivåerna tas fram genom modellen. Jämförelsen av den sammanlagda framrunna volymen vatten i jorden före och efter avverkning, gav effekten av skogsavverkningen.

#### **3.1. OMRÅDESBESKRIVNING**

Skogsområdet som studerats ligger i Balsjö som är beläget 60 km väster om Umeå. Den årliga nederbörden är 554 mm (Alexandersson m fl., 1991).



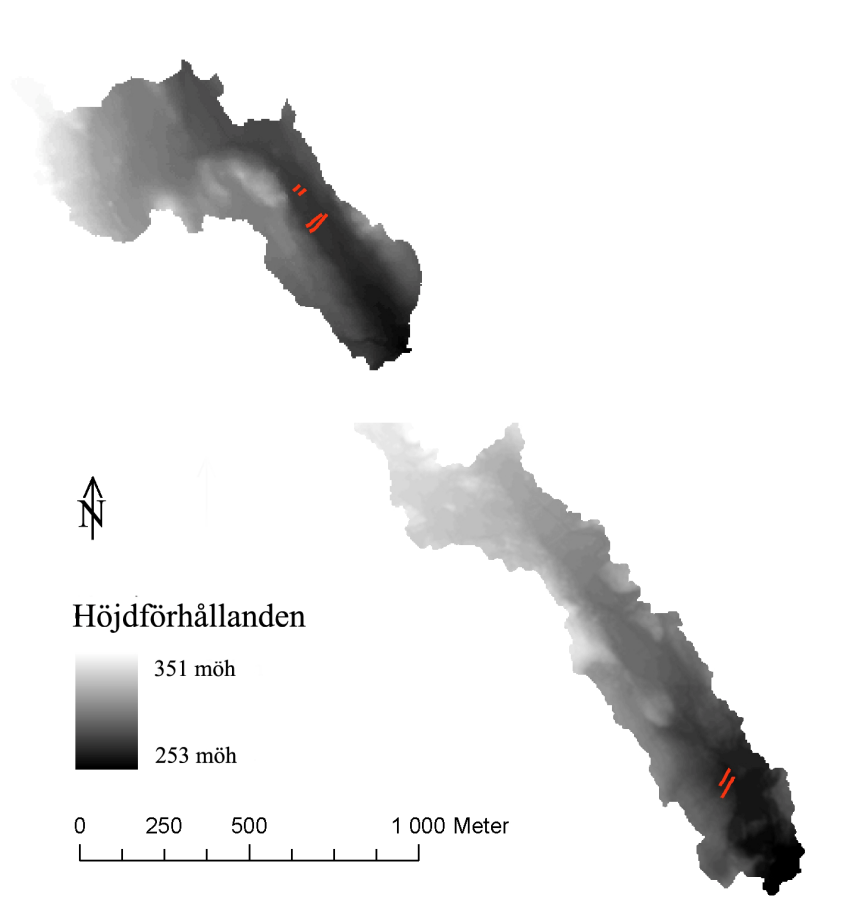
**Figur 1.** Det norra avrinningsområdet. Referensområdet är (RN) och behandlade är (N).



Figur 2. Det södra avrinningsområdet (S).

Försöksområdet bestod av tre olika delar. Ett större område i norra delen var indelat i ett referensområde (RN) på 20 ha och ett avverkat område (N) på 11 ha (se fig. 1). Område RN gränsade mot N och ett källflöde till Balån börjar i RN och rann genom N. RN var orört under hela perioden. Avverkning har skett i N, men en trädbevuxen kantzon har lämnats kvar längs vattendraget. För att kunna beräkna vattenföringen från områdena har dammar konstruerats i vattendragen vid utloppet av varje område. Gränsen mellan RN och N markerades av en damm som mätte vattenföringen för utflödet från RN. Ytterligare en damm fanns placerad i bäcken nedströms i områdesgränsen för hela det norra området (RN+N). Söderut fanns ett område (S) på 37 ha där avverkning skett (se fig. 2). Ytterligare ett källflöde till Balån rinner igenom området. Här har avverkning skett ända ner mot vattendraget. (Högbom m fl., 2008)

Avrinningsområdena dominerades av moränmark som var beväxt med barrskog samt blåbär- och lingonris. Längs med bäcken i båda områdena utgjordes en viss del av marken av myrmark där vitmossa dominerade. Jordmånen i områdena var generellt podsol förutom ett torvlager i de djupa delarna längs med bäcken i det norra området. (Högbom m fl., 2008)



**Figur 3.** Översikt över höjdförhållandet i de båda försöksområdena RN och N uppe till vänster och S nere till höger. De röda punkterna utgör transekter med grundvattenrör där mätningar av grundvattennivån skett. (ArcGIS)

Höjden över havet varierade mellan 250-300 m för S och 300-350 m för NR och N (se fig. 3). Tvärsnitt av markens höjdförhållande, från bäcken och cirka 100-150 m bort längs transekten, finns att se för alla transekter i appendix E. Det norra området har en U-formad topografi. Det södra området har liknande topografi men den är inte lika markant som i norra området. (Högbom m fl., 2008)

Jämförbarheten mellan de olika försöksområdena minskade på grund av att topografin i observationsplatsernas omgivning skiljde sig. Även jordmånen varierade för de olika observationsplatserna.

### 3.2. BEARBETNING AV FÖRSÖKSOMRÅDET

År 2004 påbörjades provtagning i försöksområdet Balsjö och under mars 2006 skedde en konventionell skogsavverkning i det norra området (N) och i det södra området (S) (se fig. 4).



Figur 4. Avverkning av skogen. (Foto: Lars Högbom)

Stubbar samt små täppor med träd på stenblock och myrmarker lämnades kvar vid avverkning. Tjälén i marken skyddade området från de stora skogsmaskinernas kompaktering. I det södra området krävdes det att maskinerna korsade bäcken för att kunna avverka på andra sidan bäcken. Stockar placerades temporärt över bäcken under avverkningsperioden. (Ring m fl., 2008a)

### 3.3. MÄTNINGAR

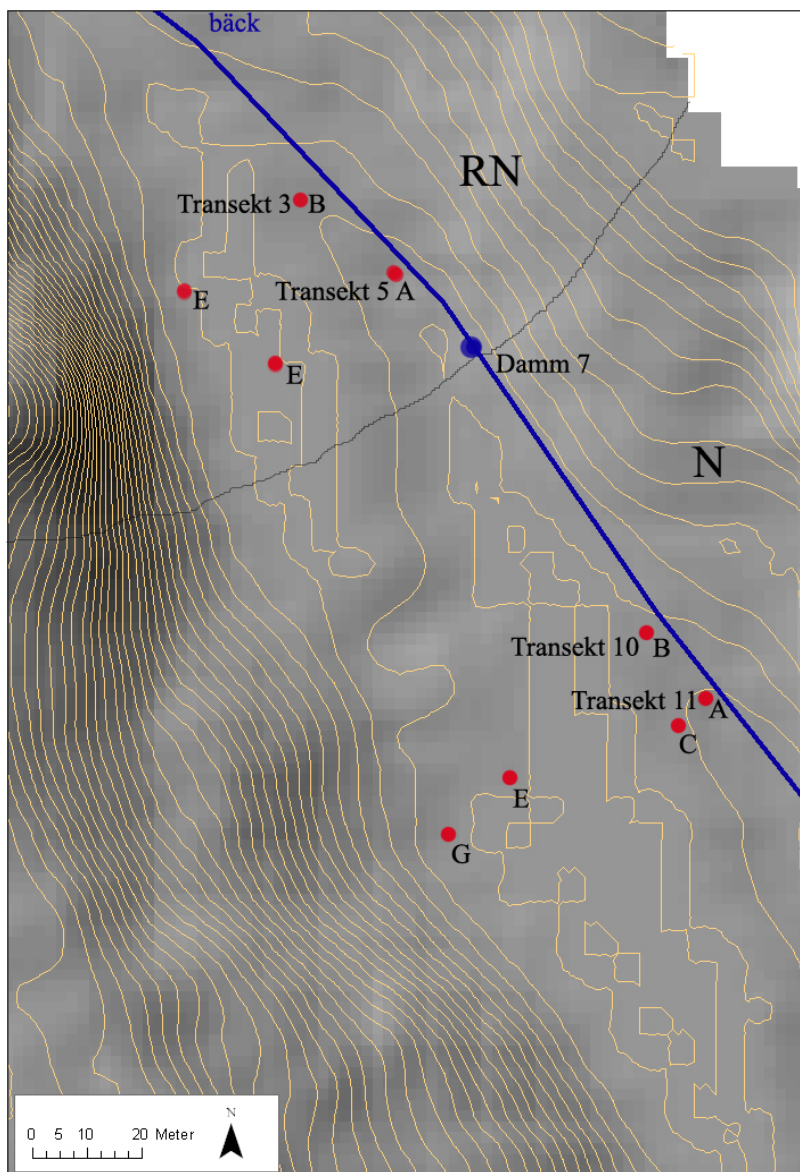
#### 3.3.1. Grundvattenmätningar

Grundvattenytans nivå i jorden undersöktes genom att utföra grundvattenmätningar, dels kontinuerligt, dels manuellt, i grundvattenrör. Grundvattenrören var plaströr perforerade med små hål längs röret för att möjliggöra en transport av grundvatten in i röret. Plaströrets diameter var 3 cm och rörets längd under markytan varierade mellan 75-150 cm . Rören placerades i rader, transekter, och denna studie använde mätningar från sex transekter. Dessa transekter var nummer 3 och 5 i NR, 10 och 11 i N samt 16 och 17 i S (se fig. 5 och 6). Grundvattenrör närmast bäcken benämns som A, vidare rör benämns i bokstavsordning med ökat avstånd från bäcken. Rörets avstånd till bäcken varierade och medelavståndet till bäcken för grundvattenrören ges i tabell 1.

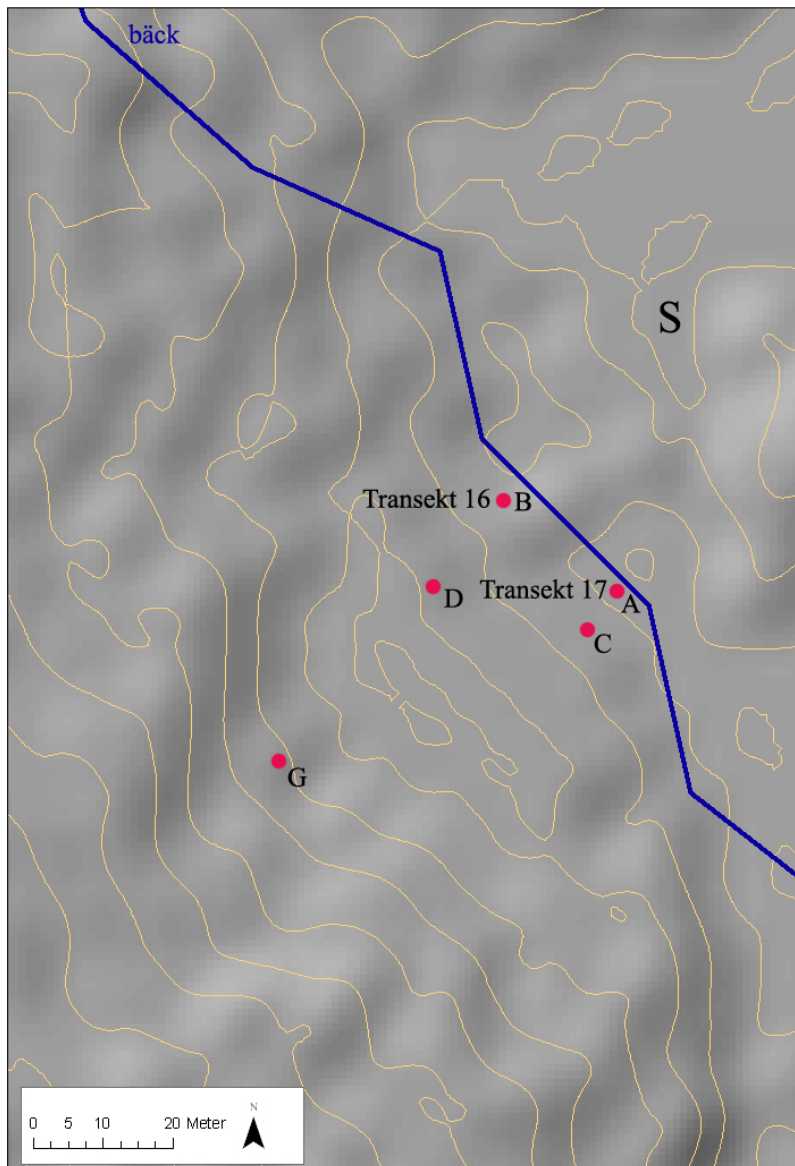
**Tabell 1.** Grundvattenrörets medelavstånd till bäcken.

Placering	Avstånd [m]
A	> 0,2
B	2,6
C	6,2
D	16,8
E	27,2
F	32
G	47





**Figur 5.** Transekt 3 och 5 i RN och transekt 10 och 11 i N. De röda punkterna utgör grundvattenrör som denna undersökning grundar sig på. Bruna linjer utgör höjdkurvor med en höjdskillnad (ekvidistans 1 m). (ArcGIS)



**Figur 6.** Transekt 16 och 17 i S. De röda punkterna utgör grundvattenrör som denna undersökning grundar sig på. Bruna linjer utgör höjdkurvor (ekvidistans 1 m). (ArcGIS)

### **Manuella mätningar**

Grundvattennivån mättes vid ett flertal tillfällen med start i början av maj och mätningarna avslutades i slutet av oktober 2005, före avverkning skett. Den mätutrustning som användes var ett graderat plaströr med en gummislang monterad längst upp. Genom att blåsa i gummislangen hördes ett bubblande ljud från röret när grundvattenytan nåddes. Avståndet till grundvattenytan lästes av på graderingen på plaströret (se fig. 7a).

### **Kontinuerliga mätningar**

Grundvattennivån mättes kontinuerligt av en TruTracklogger, placerad i grundvattenrören. Mätningarna påbörjades i slutet av april och avslutades i slutet av november. Loggern bestod av ett stålrör med en diameter på två cm som mäter

avståndet till grundvattennivån ovanför loggerns botten. Loggern mätte varje timme och mätvärdena sparades i loggern, för att senare laddas ner till en dator. (TruTrack, 2008)



**Figur 7.** Manuell mätning av grundvattennivån (a), triangulärt överfall (b).  
(Foto: André Spans (a), Carolin Haglund (b))

### 3.3.2. Vattenföringsmätningar

Vattenföringsmätningar skedde kontinuerligt i mätdammar med triangulära mätöverfall (se fig. 7b) i bäckarnas utflöde från de tre områdena. I dammarna fanns TruTrack-loggrar placerade som mätte hur höjden på vattenytan i dammen fluktuerade. Ett samband mellan vattenföring och höjden på vattenytan över det triangulära överfallet bestämdes enligt ekvation (1),

$$Q = K \cdot H^{2.5} \quad (1)$$

där  $Q$  [l/s] var vattenföringen i bäcken,  $H$  [cm] var höjden över överfallet,  $K$  var en konstant som bestämdes genom kalibrering med hjälp av vattenföringsmätningar med hink i överfallet. Exponenten 2.5 var ett teoretiskt värde som även det kalibrerades för varje enskild damm (Sörensen, 2008, muntligen).

## 3.4. BERÄKNINGAR

Beräkningarna beskriver de olika stegen i arbetsgången för denna undersökning. Modellen grundade sig på mätningar från år 2005, före skogsavverkningen.

### 3.4.1. Kalibrering av grundvattennivå

Tidsserierna från de kontinuerliga mätningarna jämfördes med de manuellt uppmätta djupen för att kunna beskriva en tidsserie över grundvattennivån. Den manuella grundvattennivån kunde beskrivas som en linjär funktion av den kontinuerliga grundvattennivån enligt ekvation (2). Där  $h_{\text{man}}$  [cm] var manuellt uppmätt avstånd från

markytan till grundvattenytan,  $h_{\log}$  [cm] var loggers uppmätta värde, a och b var konstanter som fås från sambandet.

$$h_{man} = a \cdot h_{\log} + b \quad (2)$$

En ny grundvattennivå,  $h_{grv}$ , beräknades med hjälp av konstanterna (a, b) och loggers uppmätta värde av grundvattenytan. Markytan ses som referensnivå.

### 3.4.2. Grundvattennivåns samverkan med vattenföringen i bäcken

För att undersöka sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken jämfördes de två tidsserierna med varandra. Från loggers tidsserie togs fyra jämnt fördelade enskilda mätvärden ut för varje dag. Sambandet, grundvattennivå som funktion av vattenföring i bäcken, antogs kunna beskrivas med en logaritmisk funktion enligt ekvation (3).

$$h_{grv} = c \cdot \ln(Q) + d \quad (3)$$

Där  $h_{grv}$  [cm] var grundvattennivå, Q [l/s] var vattenföring i bäcken, c och d var konstanter som fås från sambandet.

### 3.4.3. Ny tidsserie för grundvattennivå

Modellen för sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken beskrevs genom ekvation (3). Med hjälp av modellen kunde en ny modellerad tidsserie för grundvattennivån,  $h_{mod}$ , genereras. Den nya tidsserien sträckte sig under samma tid som vattenföringen uppmätts.

### 3.4.4. Framrunnen volym grundvatten i jorden

Vattnets strömningsvägar i jorden undersöktes genom att beräkna sammanlagd framrunnen volym vatten per tvärsnittsarea. För att beräkna sammanlagd framrunnen volym vatten på olika nivåer i jorden, undersöktes hur lång tid jorden var mättad vid varje nivå. Vidare summerades antal timmar som jorden var mättad vid en bestämd nivå. Upplösningen på djupindelningen var centimetertjocka skikt.

Med hjälp av modellen kunde sambandet beskrivas med Q isolerat istället för  $h_{grv}$ , vattenföring i bäcken som funktion av grundvattennivån (se ekv. 4).

$$Q = f \cdot e^{g \cdot h_{grv}} \quad (4)$$

Där Q [l/s] var vattenföring i bäcken,  $h_{grv}$  [cm] var grundvattennivå, f och g var konstanter som beskriver sambandet. För varje skikt i marken kunde förändringen av vattenföringen i bäcken beräknas genom derivering av ekvation 4 (se ekv. 5).

$$\frac{dQ}{dh} = f \cdot g \cdot e^{g \cdot h_{grv}} \quad (5)$$

Hela tillrinningsområdet bidrar med vattenströmning till bäcken. Den avrunna volymen vatten per ytenhet antogs vara konstant för hela området. Andelen som rinner förbi genom tvärsnittet, 1 m bred, vid grundvattenröret beräknades genom att multiplicera

vattenföringen i bäcken med kvoten mellan tillrinningsarean för grundvattenröret och den totala tillrinningsarean för hela området. Tillrinningsarean för grundvattenröret uppskattades med 1 m bred rektangel från grundvattenröret till gränsen för hela tillrinningsområdet. Den framrunna volymen vatten kunde således beräknas genom ekvation (6).

$$q_v = \frac{\frac{dQ}{dh} \cdot t_{\text{mättadmark}}}{A_{\text{tvärsnitt}}} \cdot \frac{A_{\text{grvrör}}}{A_{\text{område}}} \quad (6)$$

Där  $q_v$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ] var framrunnen volym vatten vid grundvattenröret,  $dQ/dh$  [ $1/\text{s}$ ] var förändring av vattenföring i bäcken,  $t$  [ $\text{s}$ ] var tiden då jordskiktet var mättat,  $A_{\text{tvärsnitt}}$  [ $\text{m}^2$ ] var tvärsnittsarean på jordskiktet,  $A_{\text{grvrör}}$  [ $\text{m}^2$ ] var tillrinningsarean för grundvattenröret och  $A_{\text{område}}$  [ $\text{m}^2$ ] var områdets totala tillrinningsarea.

### 3.4.5. Skogsavverkningens effekt på strömningsvägar

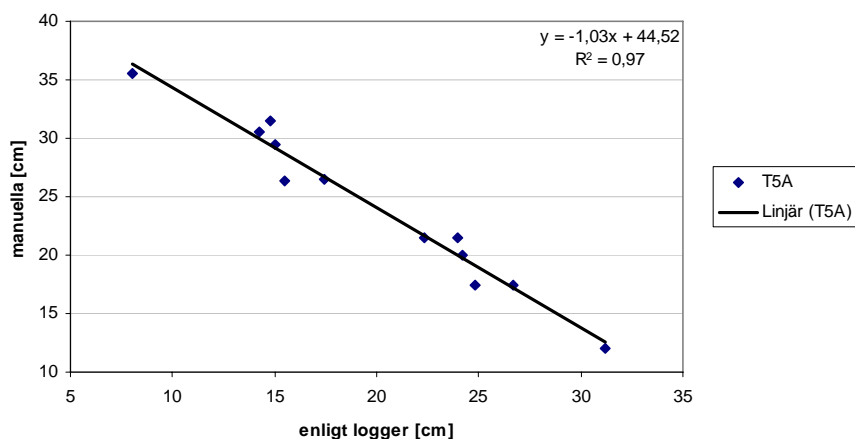
Analys av vattenföringsmätningar i bäcken från de avverkade områdena flera år efter skogsavverkning visade att vattenföringen ökat i bäcken. Ökningen av vattenföringen efter avverkning var inte jämnt fördelad över tiden utan den varierade med vattenföringsintensiteten. Störst ökning skedde under lågvattenföring i bäcken. Uppskattningsvis ökade vattenföringen med 40 % för vattenföring mindre än en millimeter per dag, 30 % för vattenföring större än en millimeter per dag upp till vattenföringen vid topparna under våren och sommaren och 20 % vid topparna i vattenföringen under våren och sommaren. Med hjälp av de procentuella ökningarna genererades nya modellerade tidsserier för vattenföringen efter avverkning. De modellerade vattenföringarna skildrar situationen som om områdena hade varit avverkade år 2005.

En ny modellerad grundvattennivå för perioden efter avverkning beräknades enligt ekvation (3) där den nya modellerade vattenföringen efter avverkning användes som x-variabel ( $\ln Q$ ). Den ökade vattenföringen medförde att marken var mättad under längre tid närmare markytan. Den framrunna volymen vatten per tvärsnittsarea efter avverkning bestämdes enligt ekvation (5) genom att undersöka hur många dagar marken var mättad på en viss nivå i jorden efter avverkning.

## 4. RESULTAT

### 4.1. KALIBRERING AV GRUNDVATTENNIVÅ

Grundvattennivån varierade i området beroende på grundvattenrörets lokalisering samt topografin i lokaliseringens omgivning. Tidsserierna från de kontinuerliga mätningarna av grundvattennivån jämfördes med den manuellt uppmätta grundvattennivån. Ett linjärt samband hittades som möjliggjorde en kalibrering av grundvattennivåmätningen från loggern (se exempel fig. 8).



Figur 8. Kalibrering av loggermätning vid grundvattenrör T5A.

Antalet manuella mätningar av grundvattennivån varierade (9-12 st), men ett linjärt samband fanns hos alla grundvattenrör (se appendix A). Den linjära anpassningen var olika bra för olika grundvattenrör (se tab. 2).

Tabell 2. Korrelation mellan manuella grundvattenmätningar och grundvattenmätningar enligt logger. Transekt benämns med T, den följande siffran anger transektens nummer och den följande bokstaven anger rörets placering i förhållande till bäcken.

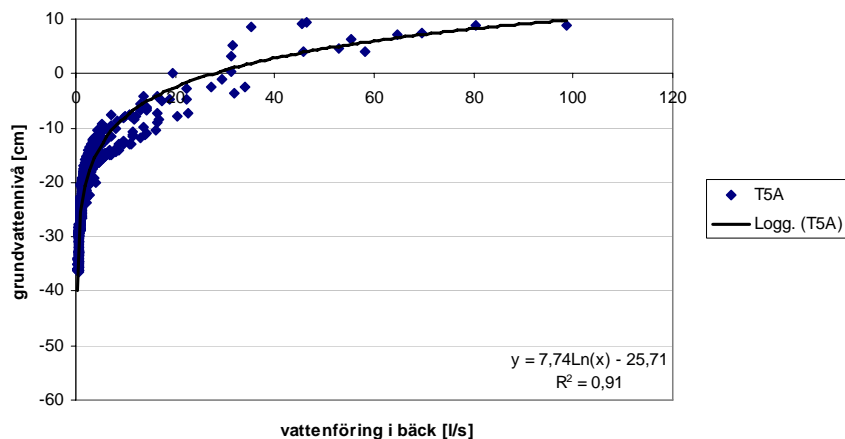
Grundvattenrör	R2-värde
T3B	0,85
T3E	0,65
T5A	0,97
T5E	0,96
T10B	0,24
T10E	0,95
T10G	0,90
T11A	0,72
T11C	0,73
T16B	0,96
T16D	0,78
T16G	0,85
T17A	0,73
T17C	0,90

### 4.2. GRUNDVATTENNIVÅNS SAMVERKAN MED VATTENFÖRINGEN I BÄCKEN

Grundvattennivån i jorden korrelerades med vattenföringen i bäcken för att få en förståelse för hur grundvattennivån samverkar med vattenföringen. En brant stigning av

kurvan innebär att grundvattennivån stiger snabbt vid en liten ökning av vattenföringen (se exempel fig. 9). Detta sker i djupare jordlager i marken där den hydrauliska konduktiviteten är låg. I marknära jordskikt där kurvan planar ut medför en liten höjning av grundvattennivån en stor ökning av vattenföringen i bäcken. Jordens hydrauliska konduktivitet är hög och en stor mängd vatten transporteras vid mättnad i detta jordlager.

Flera grundvattenrör påvisade en bra korrelation med vattenföring i bäcken, med en viss spridning vid en hög vattenföring i bäcken. För att anpassa den logaritmiska funktionen även till högvattenföring har de lågtrepresenterade högvattenföringsmätningar viktats högre än låg- och medelvattenföringsmätningarna. Viktningens storlek baserades på kurvans anpassning vid högvattenföring.



Figur 9. Samband mellan grundvattennivå och vattenföring för grundvattenrör T5A.

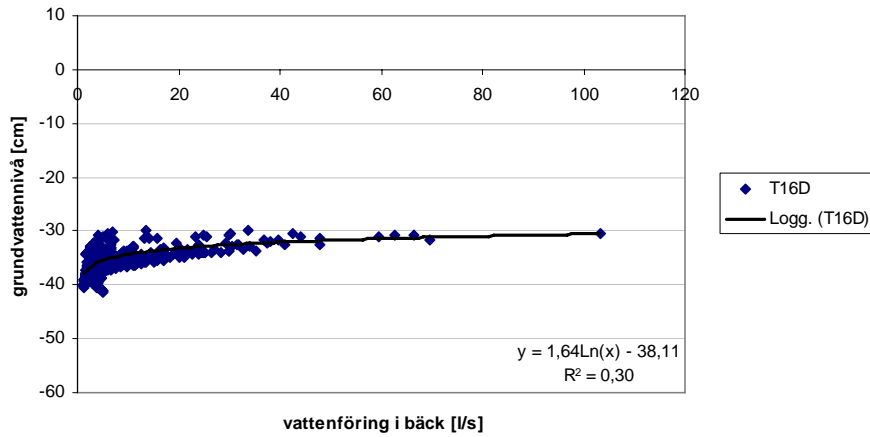
Korrelationen varierande för de olika grundvattenrören (se tab. 3). Alla resultat finns i appendix B.

**Tabell 3.** Korrelation för grundvattennivå och vattenföring i bäcken.

Grundvattenrör	R2-värde
T3B	0,92
T3E	0,54
T5A	0,91
T5E	0,91
T10B	0,89
T10E	0,89
T10G	0,85
T11A	0,84
T11C	0,70
T16B	0,88
T16D	0,30
T16G	0,70
T17A	0,61
T17C	0,77

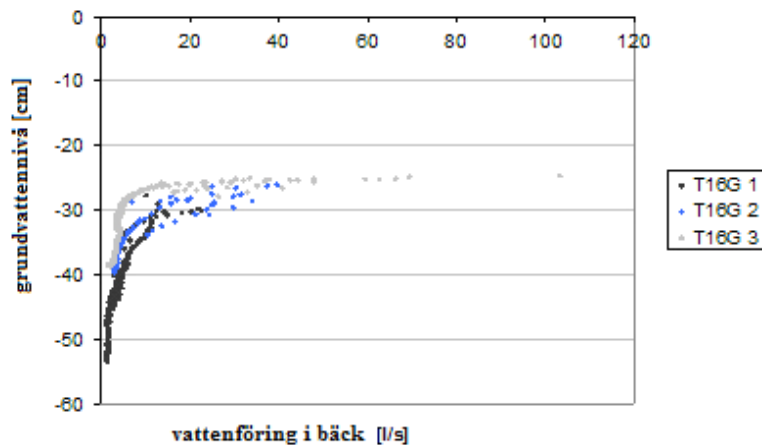
Grundvattennivån fluktuerade vid flertalet grundvattenrör inom ett intervall på 10-20 cm i jordprofilen. Nära bäcken i de norra områdena var variationen som störst. Det största intervallet observerades vid grundvattenrör T5A i RN där intervallet var

50 cm (se fig. 9). Grundvattenrören T5A och T11A närmast bäcken i RN och N gav en modellerad ytavrinning under ihållande nederbörd under sommarmånaderna. I RN visar även grundvattenrör som var placerade längst bort från bäcken på en yttlig grundvattennivå. Den modellerade grundvattennivån gav även i grundvattenrör T5E en ytavrinning under ihållande nederbörd.



Figur 10. Samband mellan grundvattennivå och vattenföring för grundvattenrör T16D.

Vid låg vattenföring var spridningen stor för flera grundvattenrör vilket visar att grundvattennivån vid lågvattenföring har ändrats under året (se exempel fig. 10). I dessa grundvattenrör var korrelationen för kurvanpassningen sämre men vid högre vattenföring var spridningen mindre och anpassningen bättre.



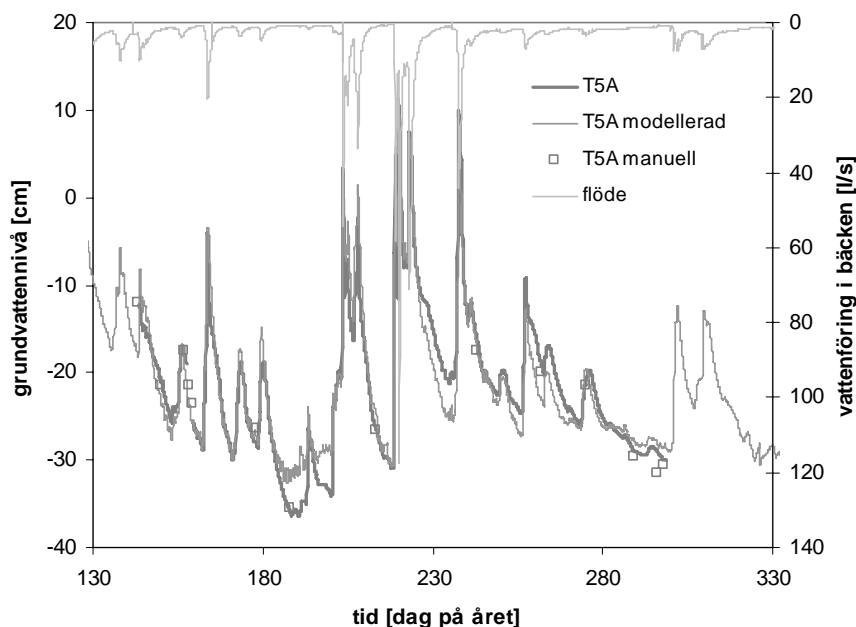
Figur 11. Samband mellan grundvattennivå och vattenföring för grundvattenrör T16G.

Grundvattenrör T16G var placerad i mineraljorden i S cirka 50 m från bäcken. Sambandet varierade i tiden och punkterna kunde sammankopplas till tre olika tidsperioder (se fig. 11). Period 1 stäcker sig från slutet av maj till slutet av juli, period 2 slutet av juli till en vecka in på augusti och period 3 en vecka in på augusti till slutet av oktober. Figur 13 visar att avståndet till grundvattenytan varierade vid låg vattenföring. Grundvattennivån vid låg vattenföring har höjts med tiden på året. Att kurvan planar ut så snabbt speciellt i den tredje perioden visar att grundvattennivån förblir hög även en period efter en topp i vattenföringen.



### 4.3. NY TIDSSERIE FÖR GRUNDVATTENNIVÅ

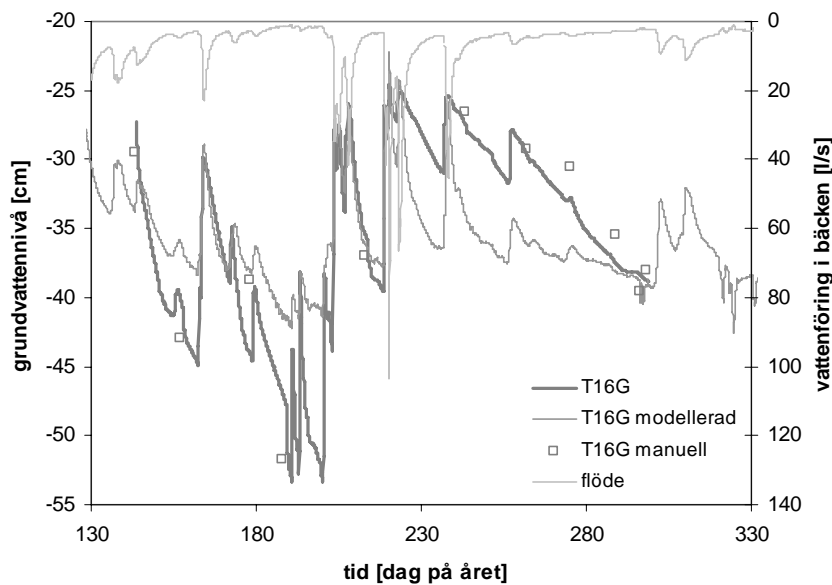
Genom det logaritmiska sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken (ekv. (3)) genererades en ny tidsserie över en modellerad grundvattennivå från mitten av april till mitten av december (se appendix C).



Figur 12. Grundvattennivåns variation under året för grundvattenrör T5A.

Den modellerade grundvattennivån stämde relativt bra överens med den uppmätta grundvattennivån i de norra områdena RN och N (se exempel fig. 12), med undantag för T11A och T11C i N. Skillnaden i grundvattennivå mellan tidsserierna var några centimeter och skillnaden uppkom främst vid låg vattenföring eller precis efter en topp i vattenföringen. För T11A stämde tidsserierna bra överens i mitten av perioden medan den modellerade grundvattennivån låg över det uppmätta i början av perioden och under slutet av perioden. Tidsserierna för T11C skiljde sig åt med några centimeter under hela perioden.

Tidsserierna från det södra området visade en återkommande tendens hos skillnaden mellan det modellerade och den uppmätta grundvattennivån. Skillnaden uppgick till några centimeter. Grundvattennivån stämde bra överens med topparna i vattenföringen från mitten av juli till slutet på augusti, dag 200 till 240, men perioden innan visade den modellerade tidsserien en för hög grundvattennivå. Efter topparna i vattenföringen under sommaren visade däremot den modellerade tidsserien en för låg grundvattennivå (se appendix C). Iakttagelser från resultatet i 4.2 (se fig. 10 och 11) med varierande grundvattennivå vid låg vattenföring under året styrker detta resultat.



Figur 13. Grundvattennivåns variation under året för grundvattenrör T16G.

Resultatet från T16G och T3E visar att den uppmätta grundvattennivån sjunker långsamt efter en topp i vattenföringen. Den modellerade grundvattennivån sjunker i takt med vattenföringen och därför blir skillnaden stor mellan tidsserierna (se fig. 13).

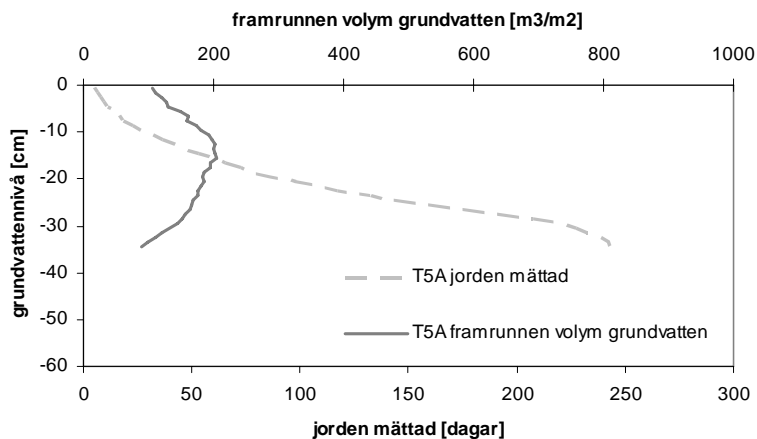
#### 4.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN I JORDEN

Den beräknade framrunna volymen vatten i jorden skiljde sig stort mellan de olika lokaliseringarna (se appendix D). Det gällde dels storleken på den maximala framrunna volymen vatten och på vilken nivå den inträffade, dels under hur många dagar jorden var mättad på denna nivå (se tab. 4).

**Tabell 4.** Sammanställning av resultaten för vattnets strömningsvägar i jorden. $h_{\text{med}}$  = median av grundvattennivån [cm] $h_{\text{maxQ}}$  = grundvattennivå vid den maximala framrunna volymen [cm] $q_v$  = storleken för den maximala framrunna volymen [ $\text{m}^3/\text{m}^2$ ] $h_{10\%}$  = grundvattennivån vid 10 % av de antal dagar som marken var mättad [cm] $h_{90\%}$  = grundvattennivån vid 90 % av de antal dagar som marken var mättad [cm] $h_{10-90\%}$  = intervall för grundvattennivån 10-90 % av de dagar som var mättade [cm]

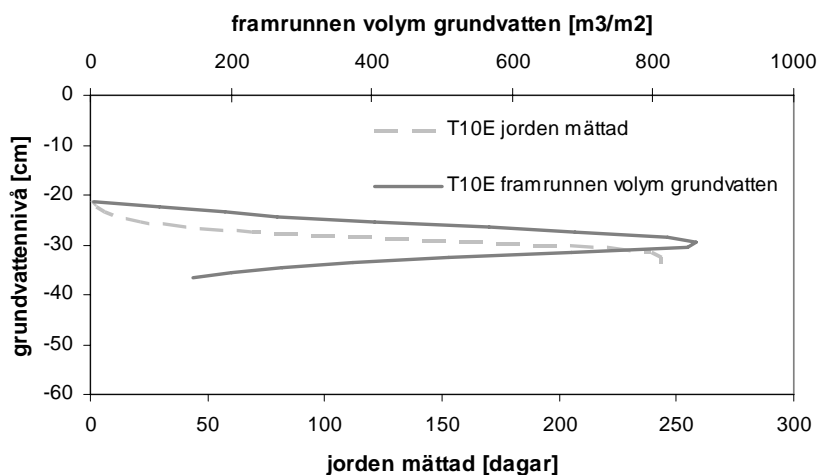
Rör	$h_{\text{med}}$	$h_{\text{maxQ}}$	$q_v$	$h_{10\%}$	$h_{90\%}$	$h_{10-90\%}$
T3B	-33	-30	680	-36	-29	7
T3E	-11	-12	670	-12	-8	4
T5A	-23	-16	204	-30	-10	20
T5E	-17	-11	309	-21	-9	12
T10B	-19	-18	748	-23	-14	9
T10E	-30	-29	658	-34	-26	8
T10G	-36	-36	310	-43	-29	14
T11A	-25	-24	307	-34	-13	21
T11C	-25	-24	888	-28	-21	7
T16B	-38	-37	353	-44	-31	14
T16D	-36	-37	442	-38	-34	5
T16G	-38	-37	413	-43	-31	12
T17A	-28	-27	372	-32	-22	10
T17C	-50	-50	525	-54	-45	9

Den maximala framrunna volymens storlek, av grundvatten i jorden, varierade mellan 200-900  $\text{m}^3/\text{m}^2$  och den maximala totala mängden vatten var på en nivå där jorden var mättad mellan 50-200 dagar. Den största framrunna volymen som skedde under kortast tid var vid grundvattenrör T3B. Under cirka 50 dagar transporterades drygt 650  $\text{m}^3/\text{m}^2$ . Detta kan liknas vid en 650 m lång vattenpelare som under dessa dagar ska passera ett centimetertjockt jordskikt på 30 cm djup i marken.



**Figur 14.** Streckad linje visar jordens mätnad, heldragen linje visar den framrunna volymen grundvatten i jordprofilen för grundvattenrör T5A.

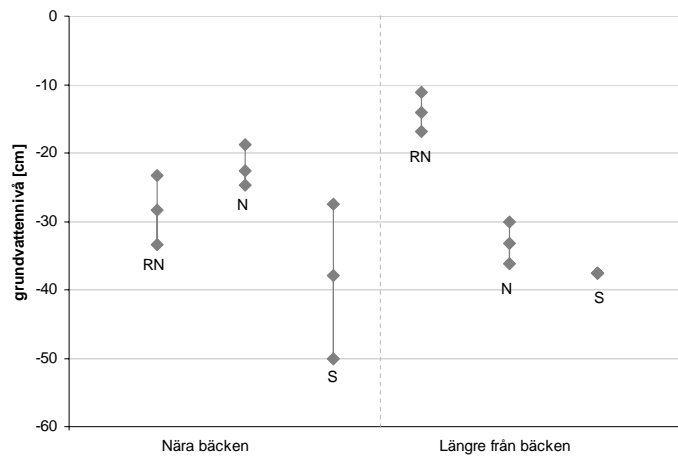
Vid de grundvattenrör, T5A och T5E, som gav en modellerad ytavrinning i RN var den framrunna volymen grundvatten mindre i varje skikt vid en jämförelse med resultaten från de resterande grundvattenrören. Grundvattnet transporterades i ett brett jordskikt i jordprofilen. Den maximala totala mängden framrunnet grundvatten inträffade på 10-15 cm djup från markytan och detta skikt var mättat cirka 50 dagar (se fig. 14). Största framrunna volymen grundvatten skedde vid T5E, närmast markytan i ett centimetertjockt jordskikt, där drygt  $100 \text{ m}^3/\text{m}^2$  transporterades under några dagar. Det grundvattenrör i N, T11A, som även gav en modellerad ytavrinning visade ett liknande resultat av den framrunna volymen grundvatten. Den maximala mängden framrunnet grundvatten inträffade på 25 cm djup från markytan och jorden var mättad cirka 150 dagar (se appendix. D).



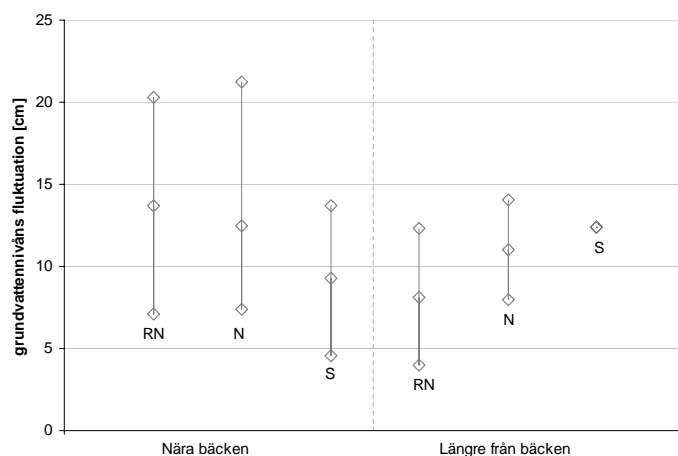
**Figur 15.** Streckad linje visar jordens mätnad, heldragen linje visar den framrunna volymen grundvatten i jordprofilen för grundvattenrör T10E.

Generellt visade resultaten för den framrunna volymen grundvatten, för grundvattenrör som var placerade längre från bäcken, att jordskiktets tjocklek där vattentransport skedde var cirka 1-2 dm (se exempel fig. 15). Detta jordskikt var mättat under en längre tidsperiod.

I figur 16 och 17 visas en del av resultatet från tabell 4 efter en indelning efter avstånd till bäcken. Grundvattenrör A-D hör till dem som var nära bäcken (0,2-17 m från bäcken) och grundvattenrör E-G hör till dem som var längre från bäcken (21-47 m från bäcken).



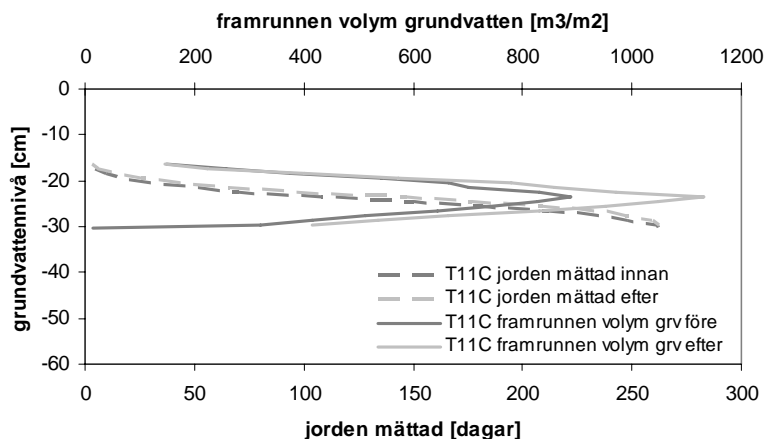
**Figur 16.** Punkterna visar median av grundvattennivån och grundvattennivån vid 10% och 90% av de antal dagar som jorden var mättad, från tabell 4.



**Figur 17.** Punkterna visar maximalt, medel och minimalt intervall för grundvattennivån fluktuation vid 10-90 % av de dagar som jorden var mättad, från tabell 4.

#### 4.5. SKOGSAVVERKNINGENS EFFEKT PÅ STRÖMNINGSVÄGAR

Effekten av skogsavverkning har undersökts i område N och S. Avverkningen av skogen medförde en högre grundvattennivå i jorden och jorden på en viss nivå var oftare mättad under fler dagar i jämförelse med före avverkning, se sammanställning av resultaten i tabell 5. Höjningen medförde att jordskikt närmare markytan med en hög hydraulisk konduktivitet mättades snabbare och oftare.



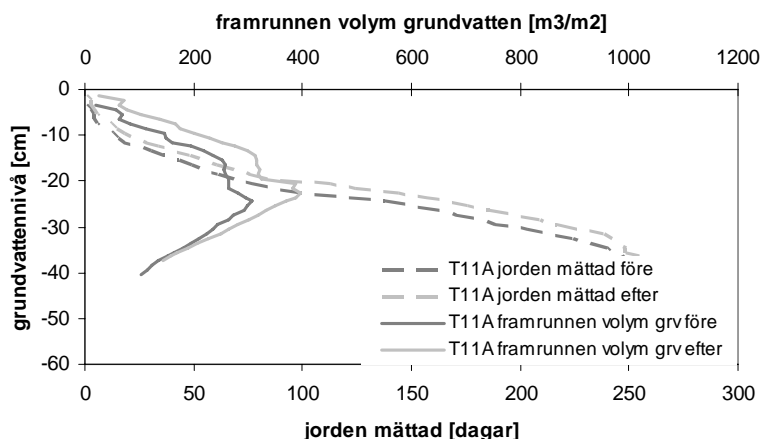
**Figur 18.** Jämförelse av jordens mätnad samt den framrunna volymen grundvatten före och efter avverkning för grundvattenrör T11C.

De två kurvorna över antalet dagar som marken var mättad före och efter avverkning har förhållandevis liknande utseende men med en viss förskjutning i jordprofilen (se appendix F). Det vertikala avståndet mellan kurvorna för jordens mätnad visar att jorden var mättad närmare markytan efter avverkning. Den horisontella skillnaden mellan samma kurvor avslöjar att jordens mätnad vid en viss grundvattennivå ökade efter avverkning.

I appendix G visas frekvensfördelningen över hur stor andel av tiden som grundvattnet var vid en viss nivå, före och efter avverkning.

Efter avverkning ökade den framrunna volymen grundvatten mest i de lager där merparten av den tidigare vattentransporten skett. Minst ökning inträffade djupare ner i marken. Skillnaden mellan den framrunna volymen grundvatten före och efter avverkning varierade mellan 100-250 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> för alla lokaliseringar. Största ökningen av den framrunna volymen grundvatten var vid T11C och T10B medan minsta ökningen var vid T11A och T16D (se fig. 18 och 19).

Parallellt med den ökade vattenföringen i bäcken har lokaliseringen av den maximala totala mängden framrunnet vatten vid några lokaliseringar förflyttat sig upp någon centimeter i jordprofilen. På grundvattennivån där den maximala totala mängden framrunnet vatten inträffade var jorden mättad mellan 75-225 dagar vid de olika lokaliseringarna.



**Figur 19.** Jämförelse av jordens mätnad samt den framrunna volymen grundvatten före och efter avverkning för grundvattenrör T11A.

Avverkningen har haft störst inverkan på jordens mätnad för T11A. Jorden var mättad flera centimeter högre efter avverkning. Grundvattennivåns stora fluktuation medförde att den framrunna volymen grundvatten har ökat i stort sett i hela jordprofilen, med undantag för de djupaste jordskikten där endast en liten ökning skett (se fig. 19).

**Tabell 5.** Sammanställning av skogsavverkningens effekt på vattnets transport. Fetmarkerad siffra anger ökningen efter avverkning.

$h_{med}$  = median av grundvattennivån [cm]

$h_{maxQ}$  = grundvattennivå vid den maximala framrunna volymen [cm]

$q_v$  = storleken för den maximala framrunna volymen [ $m^3/m^2$ ]

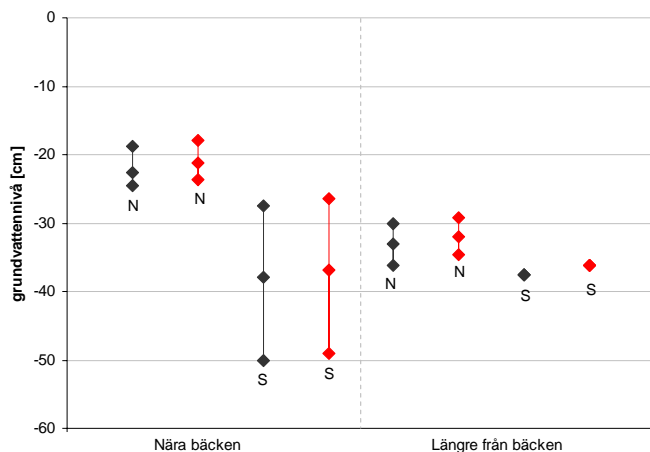
$h_{10\%}$  = grundvattennivån vid 10 % av de antal dagar som marken var mättad [cm]

$h_{90\%}$  = grundvattennivån vid 90 % av de antal dagar som marken var mättad [cm]

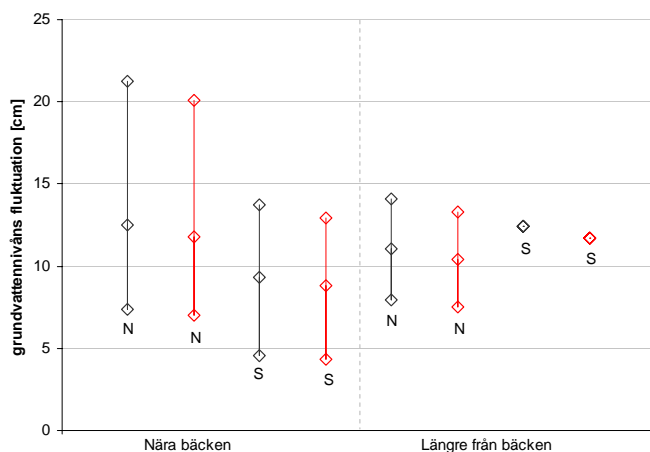
$h_{10-90\%}$  = intervall för grundvattennivån 10-90 % av de dagar som var mättade [cm]

Rör	$h_{med}$		$h_{maxQ}$		$q_v$		$h_{10\%}$		$h_{90\%}$		$h_{10-90\%}$	
	före	före	före	före	före	före	före	före	före	före	före	
T10B	-19	<b>1,1</b>	-18	<b>1,0</b>	748	<b>243</b>	-23	<b>1,1</b>	-14	<b>0,6</b>	15	<b>-0,5</b>
T10E	-30	<b>1,0</b>	-29	<b>1,0</b>	658	<b>233</b>	-34	<b>1,0</b>	-26	<b>0,5</b>	26	<b>-0,4</b>
T10G	-36	<b>1,7</b>	-36	<b>2,0</b>	310	<b>104</b>	-43	<b>1,7</b>	-29	<b>0,9</b>	29	<b>-0,8</b>
T11A	-25	<b>2,6</b>	-24	<b>2,0</b>	307	<b>90</b>	-34	<b>2,6</b>	-13	<b>1,4</b>	15	<b>-1,2</b>
T11C	-25	<b>0,9</b>	-24	<b>1,0</b>	888	<b>244</b>	-28	<b>0,9</b>	-21	<b>0,5</b>	21	<b>-0,4</b>
T16B	-38	<b>1,6</b>	-37	<b>1,0</b>	353	<b>118</b>	-44	<b>1,6</b>	-31	<b>0,9</b>	31	<b>-0,8</b>
T16D	-36	<b>0,6</b>	-37	<b>1,0</b>	442	<b>97</b>	-38	<b>0,6</b>	-34	<b>0,3</b>	34	<b>-0,3</b>
T16G	-38	<b>1,5</b>	-37	<b>1,0</b>	413	<b>169</b>	-43	<b>1,5</b>	-31	<b>0,8</b>	32	<b>-0,7</b>
T17A	-28	<b>1,2</b>	-27	<b>1,0</b>	372	<b>138</b>	-32	<b>1,2</b>	-22	<b>0,6</b>	23	<b>-0,5</b>
T17C	-50	<b>1,1</b>	-50	<b>2,0</b>	525	<b>233</b>	-54	<b>1,1</b>	-45	<b>0,6</b>	46	<b>-0,5</b>

I figur 20 och 21 jämförs en del av resultatet från tabell 4 med tabell 5 för de avverkade områdena, efter en indelning efter avstånd till bäcken. Grundvattenrör A-D hör till dem som var nära bäcken (0,2-17 m från bäcken) och grundvattenrör E-G hör till dem som var längre från bäcken (21-47 m från bäcken).



**Figur 20.** Gråa punkter visar resultatet före avverkning, röda punkter visar resultatet efter avverkning. Punkterna visar median av grundvattennivån och grundvattennivån vid 10% och 90% av de antal dagar som jorden var mättad, från tabell 4 och 5.



**Figur 21.** Gråa punkter visar resultatet före avverkning, röda punkter visar resultatet efter avverkning. Punkterna visar maximalt, medel och minimalt intervall för grundvattennivåns fluktuation vid 10-90 % av de dagar som var jorden var mättad, från tabell 4 och 5.

#### 4.5.1. Skogsavverkningens effekt på grundvattennivån

Höjningen av grundvattennivån i jorden efter avverkning har olika stor effekt för de olika lokaliseringarna. Tabell 6 visar hur mycket medelvärdet av grundvattennivån ändrats före och efter avverkning vid olika vattenföringsklasser. Vattenföringen delades in i tre klasser: låg (under 1 mm/d), medel (1-5 mm/d) och hög vattenföring (över 5 mm/d).

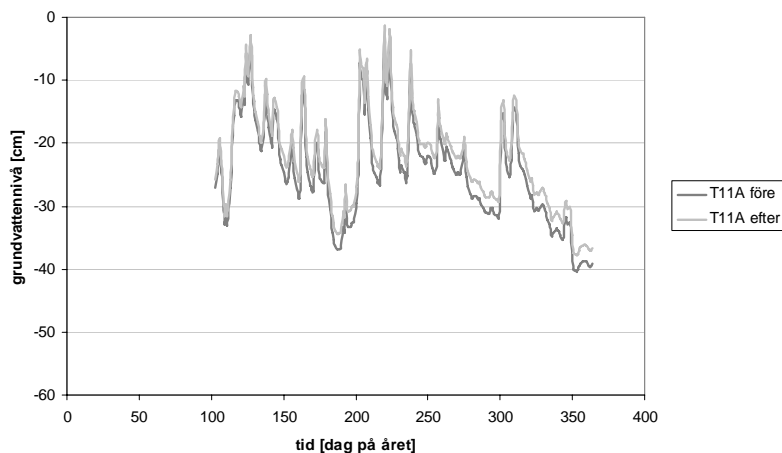
**Tabell 6.** Skillnad i medelvärde av grundvattennivå före och efter avverkning vid olika vattenföringsklasser.

Vattenföring [mm/d]	Medel av grundvattennivå [cm]									
	T10B	T10E	T10G	T11A	T11C	T16B	T16D	T16G	T17A	T17C
< 1	1,4	1,3	2,3	3,4	1,2	0,5	0,2	0,4	0,3	0,3
1-5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	-0,1	0,0	-0,1	-0,1	-0,1
> 5	0,4	0,4	0,6	1,0	0,3	0,6	0,2	0,6	0,5	0,4

Resultatet visar att störst höjning av grundvattennivån var vid låg vattenföring vid T11A. Även resterande grundvattenrör som var placerade i N resulterade i en större höjning av grundvattennivån vid låg vattenföring i jämförelse med grundvattenrören i S.



Medelvärdet av grundvattennivån har även höjts efter avverkning vid hög vattenföring vid grundvattenrören i N och S. Vid medelvattenföring ses ingen tydlig skillnad för något grundvattenrör.



Figur 22. Modellerad grundvattennivå före och efter avverkning vid T11A.

I Appendix H visas de modellerade grundvattennivåerna före och efter avverkning. Störst effekt ses vid grundvattenrör T11A där den största skillnaden mellan tidsserierna var cirka 2,5 cm (se fig. 22).

## 5. DISKUSSION

### 5.1. KALIBRERING AV GRUNDVATTENNIVÅ

De manuella grundvattenmätningarna gav informationen om vid vilken nivå i jorden grundvattnet befann sig. Den linjära anpassningen var olika bra och därför kan det vara intressant att studera eventuella felkällor, eftersom de påverkar vidare resultat. Den manuella grundvattennivån mättes vid tillfällena jämnt fördelade mellan maj och oktober. Kontinuiteten av grundvattenmätningarna var en bra förutsättning för jämförelsen mellan manuella och kontinuerliga mätningar. Mätningarna gjordes av samma person vilket borde minska felet mellan mätningarna. Grundvattenrörets höjd ovanför marken subtraherades från avståndet ner till grundvattenytan. På grund av markens ojämnheter i rörets omgivning blev grundvattenrörets höjd ovanför marknivån svår att bestämma exakt, men detta eventuella fel uppträdde som ett systematiskt fel, och påverkade inte tolkningen av de relativa förändringarna.

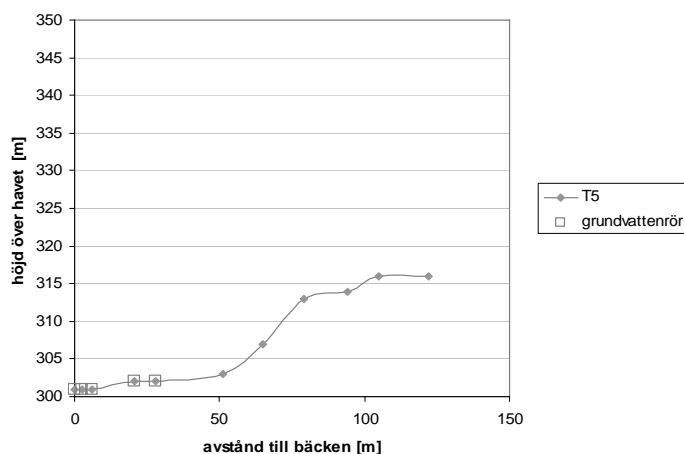
### 5.2. GRUNDVATTENNIVÅNS SAMVERKAN MED VATTENFÖRINGEN I BÄCKEN

Resultaten från denna studie visade liknande resultat som vid tidigare studier (Bishop m fl., 1998), att vid en viss nivå i jorden, närmare markytan, genererades en ökad vattenföring i bäcken utan en höjning av grundvattennivån. Korrelationen mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken visade att grundvattennivån vid lågvattenföring varierade vid flera grundvattenrör. Stor fluktuation återfanns vid grundvattenrör nära bäcken i RN och N och även vid grundvattenrör T5E och T16G.

Tidigare studier av Seibert m. fl. (2003) visade att grundvattennivån nära bäcken (< 35 m) fluktuerade under mätperioden inom ett litet intervall i jorden närmare markytan jämfört med grundvattenrör längre från bäcken (> 65 m). Alla grundvattenrör utom T10G och T16G räknades som rör nära bäcken enligt studien av

Seibert m. fl. (2003). Förutom de grundvattenrör som visade på en stor fluktuation av grundvattennivån även nära bäcken (se stycket ovan), varierade grundvattennivån inom ett litet intervall i jorden för grundvattenrören nära bäcken. Inga grundvattenrör i denna studie räknades som grundvattenrör längre från bäcken, men resultaten från T10G och T16G kunde visa på en indikation att grundvattennivåns fluktuation ökar med ökat avstånd från bäcken.

Topografin i området generellt sett, och i omgivningen kring grundvattenröret, spelade stor roll för vattentransporten till röret. Från höjdkartan över området kunde ett tvärsnitt tas fram för varje transekt (se appendix E). Tvärsnitten visade den branta lutningen ovanför grundvattenrörens placering på platån närmast bäcken i NR och N. Den branta lutningen borde innebära att en stor del vatten transporteras förhållandevis snabbt i mineraljorden, för att sen dämpas när sluttningen blir planare och mineraljorden gradvis övergår i torvmark i vissa delar.



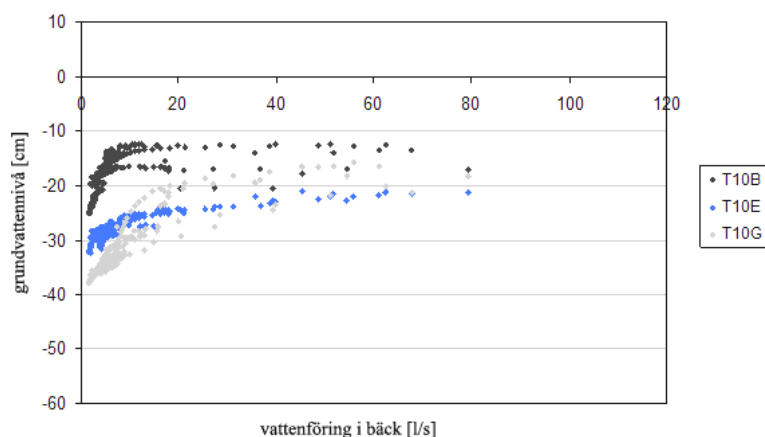
Figur 23. Tvärsnitt av transekt 5 som visar hur höjden (m ö h) varierar med avståndet från bäcken.

Den branta sluttningen mot grundvattenrör T5E kunde vara en förklaring till att grundvattnet här låg nära markytan och vissa delar av året enligt modellen gav upphov till ytavrinning (se fig. 23).

Utifrån utseendet på tidserierna från grundvattenrören kunde det i flera fall urskiljas att grundvattennivån har höjts i förhållande till avrinningen i bäcken under året (se appendix C). Under snösmältningen på våren och efter sommarmånadernas regn sågs denna höjning av grundvattennivån. I appendix C kunde det urskiljas att det, för flera grundvattenrör en bit från bäcken, var en viss fördröjning innan grundvattennivån sjönk efter en topp i vattenföringen. Denna iakttagelse får stöd av tidigare studier, dock varierade avståndet från bäcken vid jämförelsen mellan resultaten (Bishop m fl., 1998; Seibert m fl., 2003).

Vid jämförelsen mellan grundvattennivå och vattenföringen i bäcken påverkades anpassningen av en logaritmisk kurva av att grundvattennivån höjts i förhållande till avrinningen i bäcken under året. För att anpassningen ska bli bra bör grundvattennivån följa vattenföringens variation. En lösning på detta problem kan vara att dela upp tidsperioden för mätningarna i flera delar. Vid grundvattenrör T16G kunde tidsperioden delas in i tre delar för att göra en bättre uppskattning av hur grundvattennivån samverkade med vattenföringen i bäcken (se fig. 11 i avsnitt 4.2.). En viss

grundvattennivå i juni-juli föranledde en större vattenföring i bäcken än vid samma grundvattennivå i september-oktober.



**Figur 24.** Jämförelse mellan grundvattennivå och vattenföring för transekt 10 under tidsperiod 3, från 8:e augusti till 24:e oktober.

I figur 24 visas en jämförelse mellan de tre grundvattenrören i transekt tio under perioden från 8:e augusti till 24:e oktober. Under denna period hade vattenföringen två stora toppar vilket gav upphov till en spridning hos T10B och T10G, men inte i lika hög grad i T10E.

### 5.3. NY TIDSSERIE FÖR GRUNDVATTENNIVÅ

Med diskussionen från föregående kapitel i åtanke så var resultatet för den nya modellerade tidsserien väntat. Den anpassade modellen visade att den inte var heltäckande över hela perioden. För ett bättre resultat skulle en tidsindelning ha gjorts med olika modeller för varje period.

### 5.4. FRAMRUNNEN VOLYM GRUNDVATTEN I JORDEN

Vattnets transport i jorden skedde i jordskikt i intervallet 1-5 dm under grundvattenytan. Merparten av transporten skedde dock i cirka 1-2 dm tjockt jordskikt under grundvattenytan, vilket stämde bra överens med resultaten från tidigare studier (Bishop m fl., 1998), där jordskiktet var 2-3 dm tjockt. Resultaten i appendix D visade även att en stor del av volymen vatten som transporteras till bäcken vid högvattenföring skedde i marknära mättade jordskikt under en kort period.

Variationen i vattnets strömningsvägar i jorden berodde på var grundvattenröret var lokaliserat. Modellens anpassning var olika bra för de olika grundvattenrören och därför kunde beräkningen av den framrunna volymen grundvatten bli osäkert. Storleken på den framrunna volymen grundvatten var beräknat med flera förenklingar av verkligheten. Men de kunde ändå vara jämförbara mellan de olika grundvattenrören då samma uppskattning användes i beräkningarna.

### 5.5. SKOGSAVVERKNINGENS EFFEKT PÅ STRÖMNINGSVÄGAR

Modellen antog att jordens hydrauliska konduktivitet inte påverkades av skogsavverkningen, vilket innebär att det antas att skogsavverkningsmaskinerna inte bidragit till kompaktering eller spårbildning av marken.

Avverkning av skog i försöksområdet medförde liksom vid tidigare studie (Lundin, 1979) en högre grundvattennivå och en ökad vattenföring i bäcken. Ökningen av vattenföringen i bäcken efter avverkning varierade med vattenföringsintensiteten. Tidpunkten för när den största ökningen inträffade skiljde sig från en tidigare studie i andra områden. En tidigare studie av Ring m. fl. (2008b) visade att den största ökningen i små vattendrag var under högvattenföring, medan denna studie visade att den största ökningen inträffade under lågvattenföring. Höjningen av grundvattennivån spelade större roll i djupare jordlager vid lågvattenföring i bäcken.

Vid grundvattenrör där grundvattennivån fluktuerade upp till 2 dm innebär avverkningen att den framrunna volymen grundvatten ökade mest i de jordskikt där den större delen av vattentransporten skedde före avverkning. För de rör som hade en mer fluktuerande grundvattennivå transporterades ökningen av framrunnen volym grundvatten i fler av jordskikten, men ökningen var minst i djupare jordskikt.

Vid indelning efter avståndet till bäcken blev den individuella variationen på grundvattennivån vid lokaliseringarna för stor och avverkningens effekt var inte synbar.

## 6. SLUTSATS

Vattnets strömningsvägar i jorden berodde starkt av jordens egenskaper och topografin i observationsplatsens omgivning. Korrelationen mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken varierade för olika observationsplatser, och perioder på året. Resultaten från mätningarna visade att grundvattennivån hade höjts i förhållande till avrinningen i bäcken under året, vilket påverkade modellens anpassning.

Avverkning av skogen medförde en ökad grundvattenbildning och en förhöjd grundvattennivå, vilket medförde en ökad vattenföring i bäcken. Störst effekt sågs vid låg vattenföring i bäcken. Den största delen av den ökade vattentransporten i jorden förekom i de jordlager som transporterade mest grundvatten före avverkning. Där grundvattennivån fluktuerade i stor omfattning, transporteras ökningen av den framrunna volymen grundvatten i fler jordskikt, främst närmare markytan. Grundvattennivån efter avverkning höjdes som mest med 2,5 cm nära bäcken i N.

Resultatet av grundvattennivåns fluktuation efter indelningen av avstånd till bäcken visade en liten skillnad i jämförelse med före och efter avverkning. Då medelvärden för grundvattennivån i områdena N och S, före och efter avverkning, undersöktes vid olika vattenföringsklasser observerades en höjning av medelvärdet för grundvattennivån vid hög- och lågvattenföring.

Vidare kan grundligare undersökningar ske för de olika observationsplatserna. Speciellt med avseende på den mättade hydrauliska konduktiviteten och transmissiviteten i olika jordskikt. Mätningar från åren efter avverkning kan bidra till att modellen för vattnets strömningsvägar före avverkning kan anpassas bättre till de verkliga förhållandena. Även variationen i tiden kan studeras närmare för att få en bättre tolkning av samverkan mellan grundvattennivå och vattenföring i bäcken.

## 7. REFERENSER

- Alexandersson, H., Karlström C., Larsson-McCann S., 1991. Temperature and precipitation in Sweden 1961-90: Reference normals. Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping.
- Bishop, K.H., (1991). Episodic increases in stream acidity, catchment flow pathways and hydrograph separation, Univ. of Cambridge Doctoral Dissertation. 246 pp.
- Bishop, K. H., Hauhs, M., Nyberg, L., Seibert, J., Moldan, F., Rodhe, A., Lange, H. and Lischeid, G., (1998). The Hydrology of the Covered Catchment In: Experimental Reversal of Acid Rain Effects: The Gårdsjön Covered Catchment Experiment. H. Hultberg and R. Skeffington, (eds.) Wiley & Sons, p. 109-136.
- Entenmann, S., (2008). Effect of clear-cut on nitrate leaching in the Swedish forest, Litterature Review, Department of Aquatic Science and Assessment, Swedish University of Agricultural Science, Uppsala.
- Eriksson, J., Nilsson, I., Simonsson, M., (2005). Wiklanders marklära, Studentlitteratur, Lund.
- Grip, H. & Rodhe, A., (2003). Vattnets väg från regn till bäck, Hallgren & Fallgren Studieförlag AB, Uppsala.
- Högbom, L., Ring, E., Löfgren, S., Sörensen, R., (2008). Site description, experimental set-up and run-off chemistry before felling, manuscript.
- Lundin, L., (1979). Kalhuggningens inverkan på markvattenhalten och grundvatten djupet, Rapporter i skogekologi och skoglig marklära, Institutionen för skoglig marklära, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Lundin, L., (1982). Soil moisture and ground water in till soil and the significance of soil type for runoff. Doctoral dissertation, Uppsala University, UNGI Report Nr. 56. 216 pp.
- Mannerkoski, H., Finér, L., Piirainen, S., Starr, M., (2005). Effect of clear-cutting and site preparation on the level and quality of groundwater in some headwater catchments in eastern Finland, Forest Ecology and Management 220, 107-117.
- Porvari, P., Verta, M., Munthe, J., Haapanen, M., (2003). Forestry Practices Increase Mercury and Methyl Mercury Output from Boreal Forest Catchments, Environmental Science & Technology Vol. 37, No. 11, 2389-2393.
- Ring, E., Löfgren, S., Högbom, L., (2008a). Handout – experiment 277 Balsjö.
- Ring, E., Löfgren, S., Sandin, L., Högbom, L., Goedkoop, W., (2008b). Skogsbruk och vatten. En kunskapsöversikt, Skogforsk, Redogörelse nr3.

Rodhe, A., (1989). On the generation of stream runoff in till soils, *Nordic Hydrology*, 20, 1-8.

Seibert, J., Bishop, K., Rodhe, A., McDonnell, J.J., (2003). Groundwater dynamics along a hillslope: A test of the steady state hypothesis, *Water Resources Research* Vol. 39, No. 1, 1014.

Sörensen, R., (2008-12-10), muntlig källa.

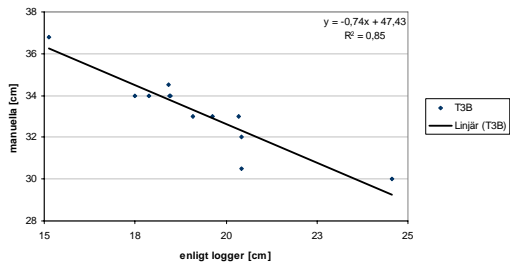
Sörensen, R., (2009). Forest harvest increases runoff most during low flows on two boreal streams, manuscript.

TruTrack, [www.trutrack.com/WT-HR.html](http://www.trutrack.com/WT-HR.html) (2008-09-29)

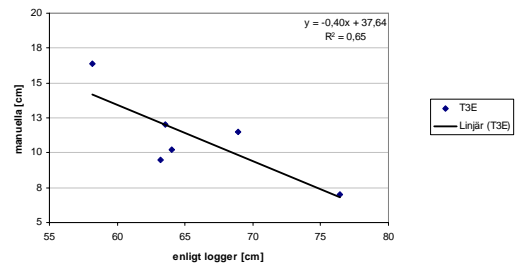
## Appendix A. Kalibrering av grundvattennivå

Grundvattenrör	Ekvation för sambandet	R2-värde
T3B	$h_{\text{man}} = -0,74h_{\text{logger}} + 47,43$	R2 = 0,85
T3E	$h_{\text{man}} = -0,40 h_{\text{logger}} + 37,64$	R2 = 0,65
T5A	$h_{\text{man}} = -1,03 h_{\text{logger}} + 44,52$	R2 = 0,97
T5E	$h_{\text{man}} = -0,86 h_{\text{logger}} + 69,41$	R2 = 0,96
T10B	$h_{\text{man}} = -0,56 h_{\text{logger}} + 41,66$	R2 = 0,24
T10E	$h_{\text{man}} = -0,81 h_{\text{logger}} + 67,43$	R2 = 0,95
T10G	$h_{\text{man}} = -1,00 h_{\text{logger}} + 68,83$	R2 = 0,90
T11A	$h_{\text{man}} = -0,87 h_{\text{logger}} + 44,44$	R2 = 0,72
T11C	$h_{\text{man}} = -0,85 h_{\text{logger}} + 62,41$	R2 = 0,73
T16B	$h_{\text{man}} = -0,90 h_{\text{logger}} + 77,16$	R2 = 0,96
T16D	$h_{\text{man}} = -0,69 h_{\text{logger}} + 68,62$	R2 = 0,78
T16G	$h_{\text{man}} = -0,89 h_{\text{logger}} + 78,52$	R2 = 0,85
T17A	$h_{\text{man}} = -0,69 h_{\text{logger}} + 55,90$	R2 = 0,73
T17C	$h_{\text{man}} = -0,65 h_{\text{logger}} + 101,18$	R2 = 0,90

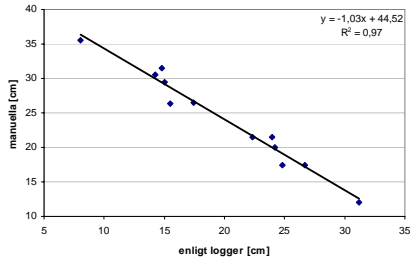




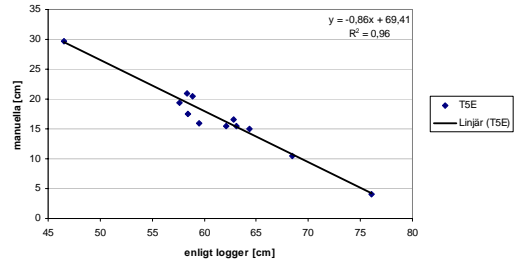
T3B



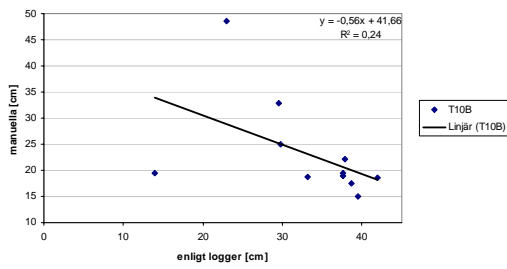
T3E



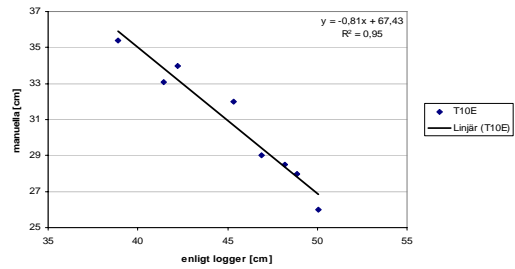
T5A



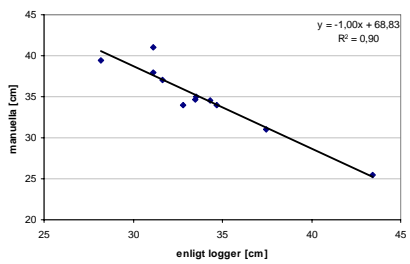
T5E



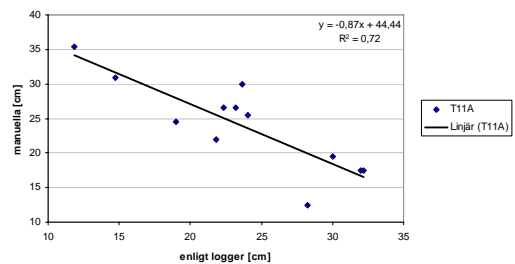
T10B



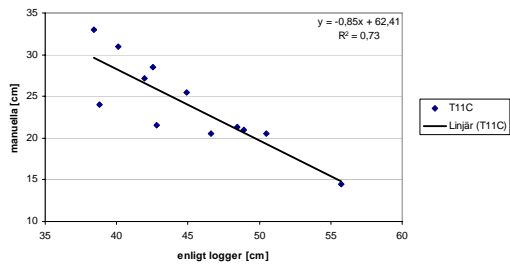
T10E



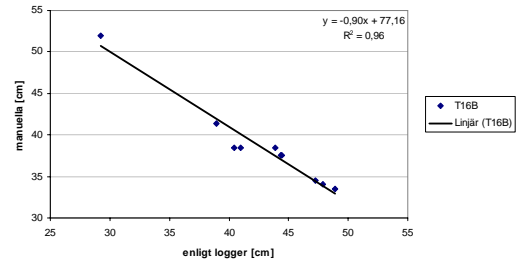
T10G



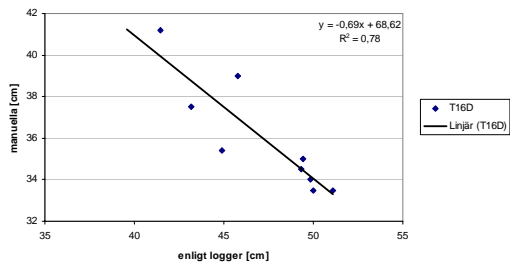
T11A



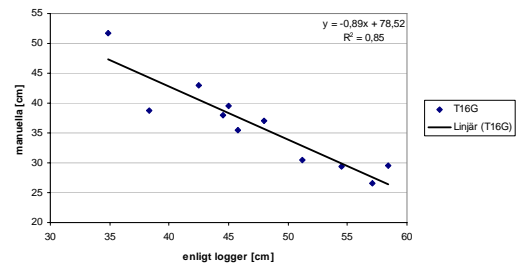
T11C



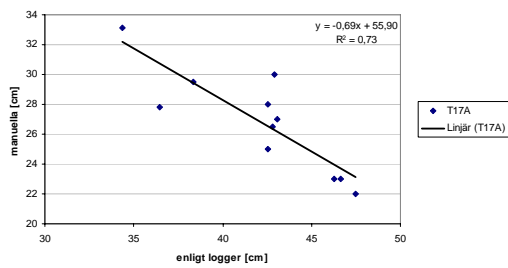
T16B



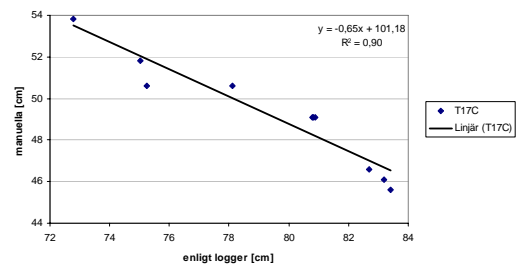
T16D



T16G



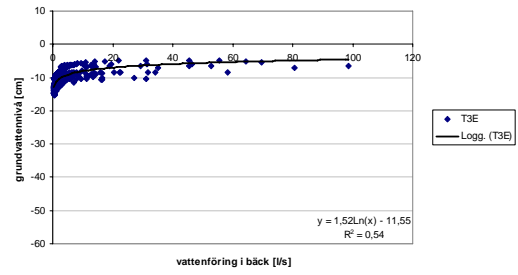
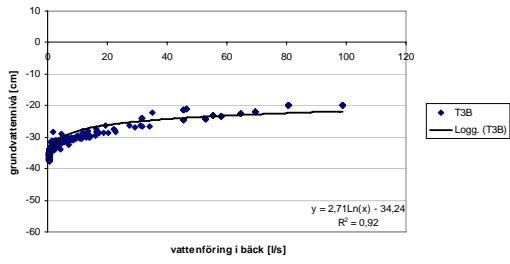
T17A



T17C

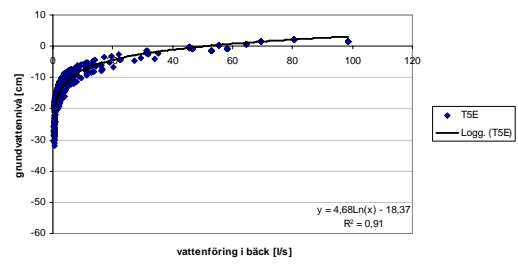
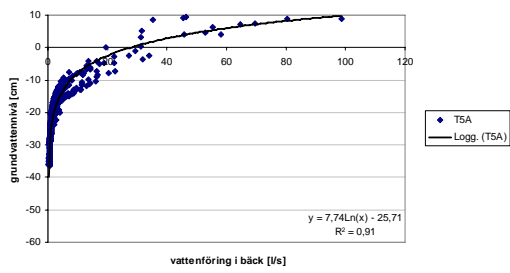
## Appendix B. Grundvattennivåns samverkan med vattenföringen i bäcken

Grundvattenrör	Ekvation för sambandet	R2-värde
T3B	$h = 2,71\text{Ln}(Q) - 34,24$	R2 = 0,92
T3E	$h = 1,52\text{Ln}(Q) - 11,55$	R2 = 0,54
T5A	$h = 7,74\text{Ln}(Q) - 25,71$	R2 = 0,91
T5E	$h = 4,68\text{Ln}(Q) - 18,37$	R2 = 0,91
T10B	$h = 3,17\text{Ln}(Q) - 22,04$	R2 = 0,89
T10E	$h = 2,85\text{Ln}(Q) - 33,00$	R2 = 0,89
T10G	$h = 5,03\text{Ln}(Q) - 41,29$	R2 = 0,85
T11A	$h = 7,59\text{Ln}(Q) - 32,34$	R2 = 0,84
T11C	$h = 2,64\text{Ln}(Q) - 27,19$	R2 = 0,70
T16B	$h = 4,90\text{Ln}(Q) - 43,71$	R2 = 0,88
T16D	$h = 1,64\text{Ln}(Q) - 38,11$	R2 = 0,30
T16G	$h = 4,43\text{Ln}(Q) - 42,78$	R2 = 0,70
T17A	$h = 3,54\text{Ln}(Q) - 31,65$	R2 = 0,61
T17C	$h = 3,23\text{Ln}(Q) - 53,88$	R2 = 0,77



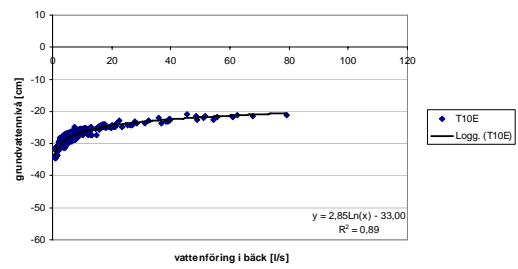
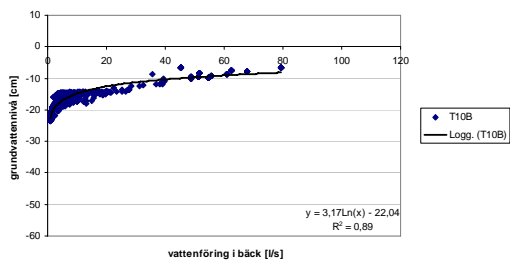
T3B

T3E



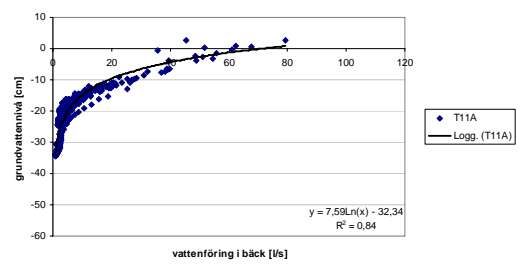
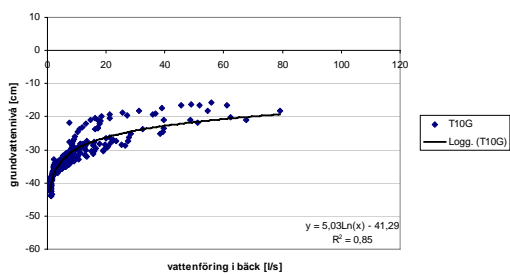
T5A

T5E



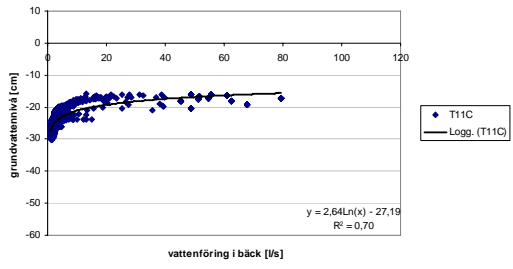
T10B

T10E

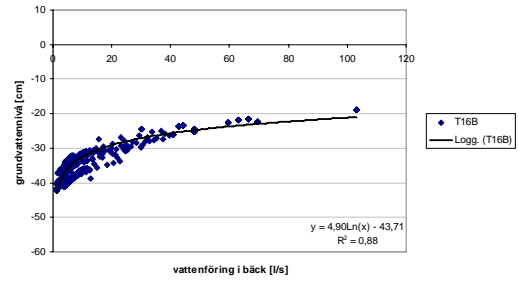


T10G

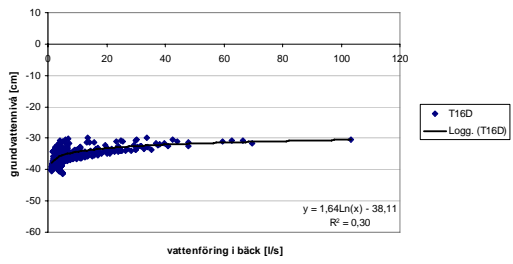
T11A



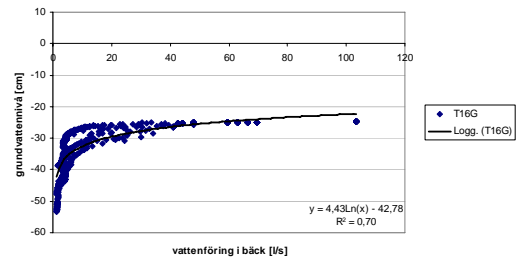
T11C



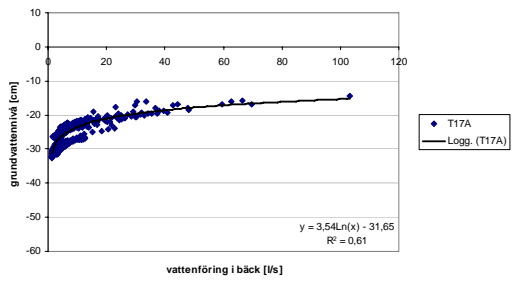
T16B



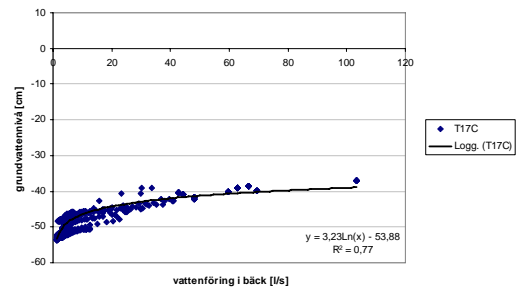
T16D



T16G



T17A

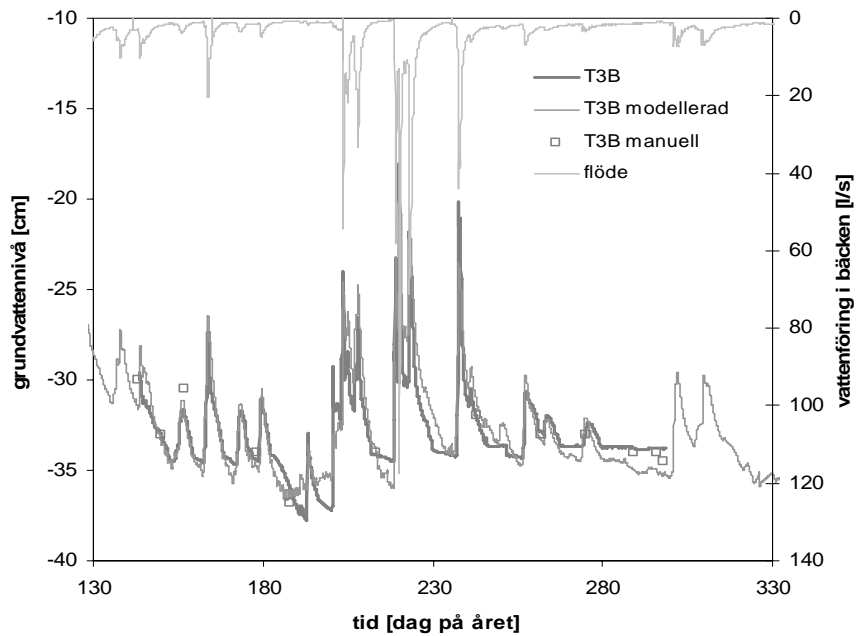


T17C

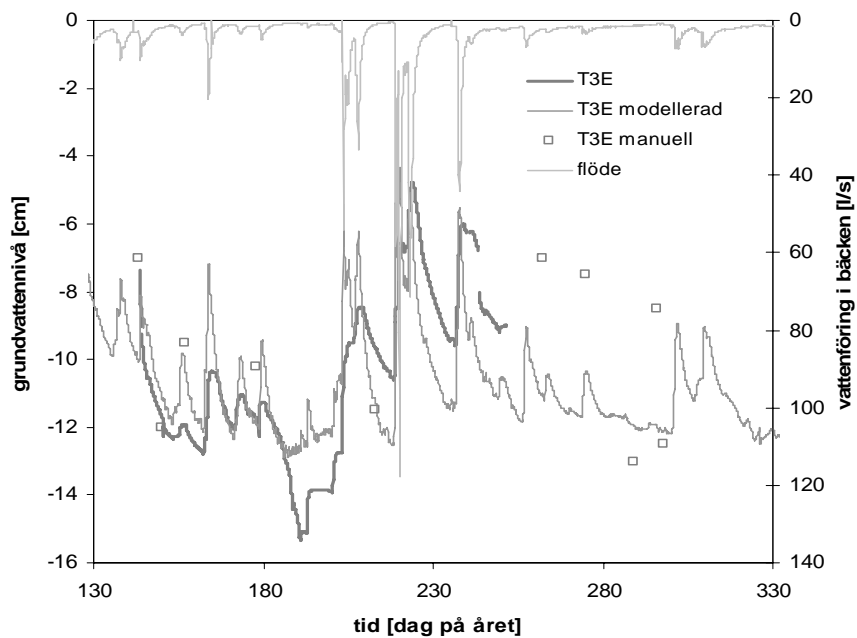
## Appendix C. Ny tidsserie för grundvattennivån

Modellerad = grundvattennivå enligt det logaritmiska sambandet mellan grundvattennivå och vattenföring i bäck

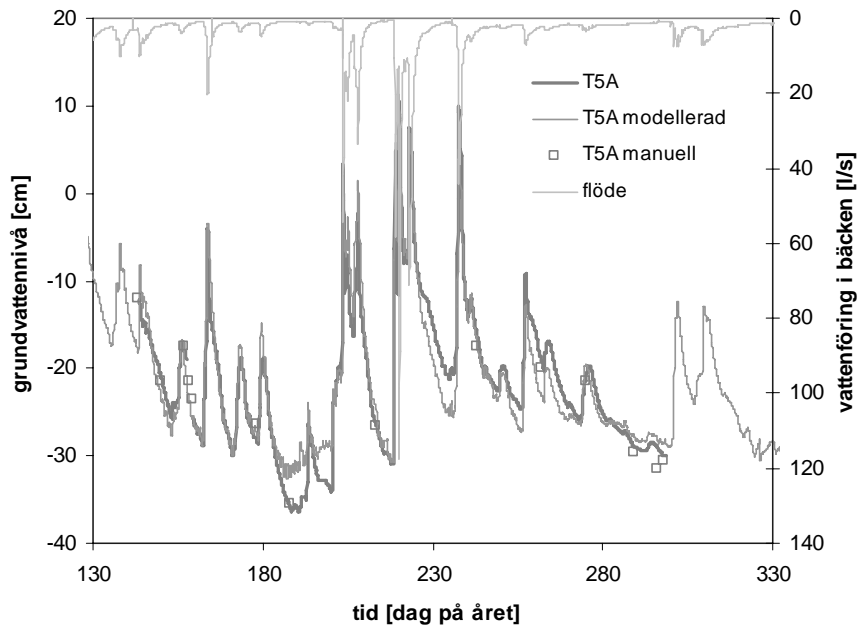
Flöde = vattenföring i bäck



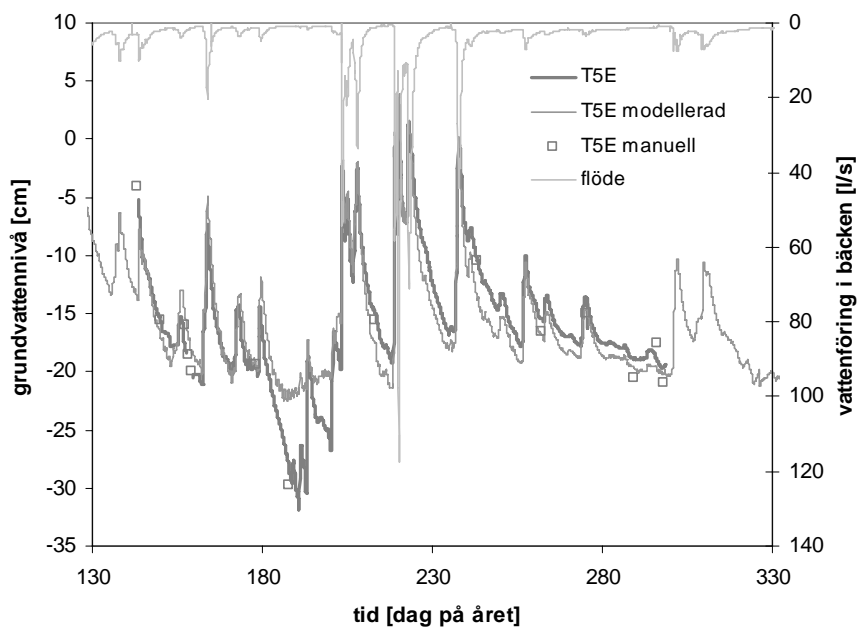
T3B



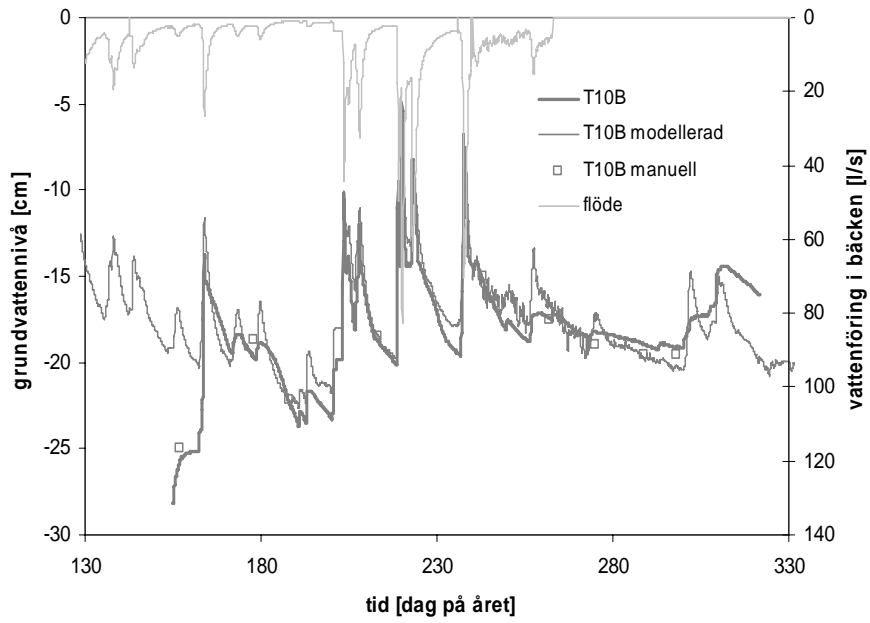
T3E



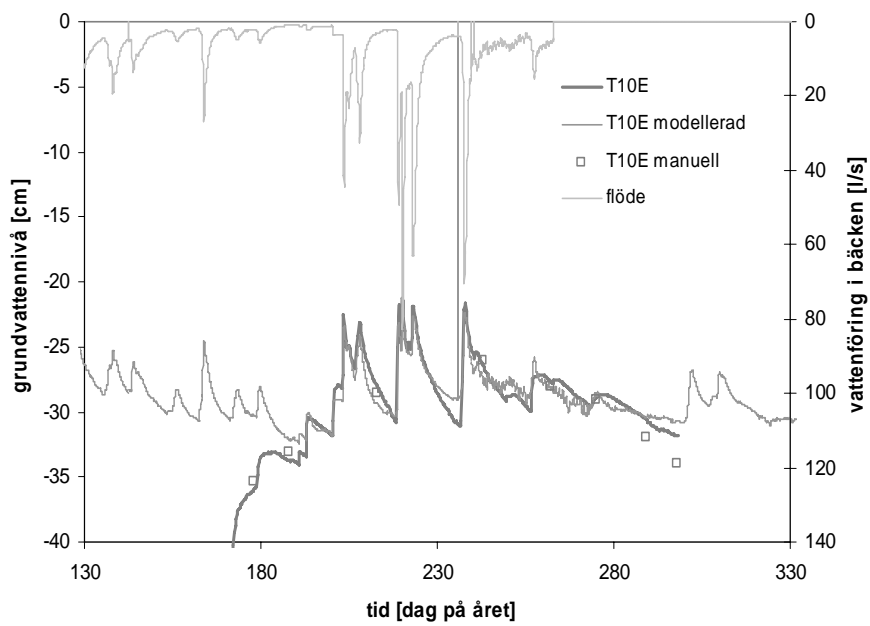
T5A



T5E

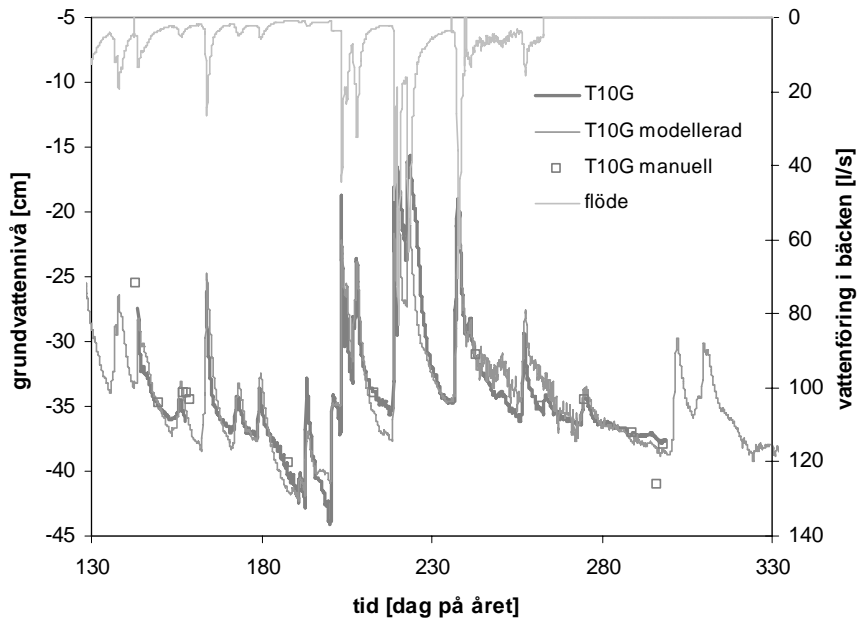


T10B

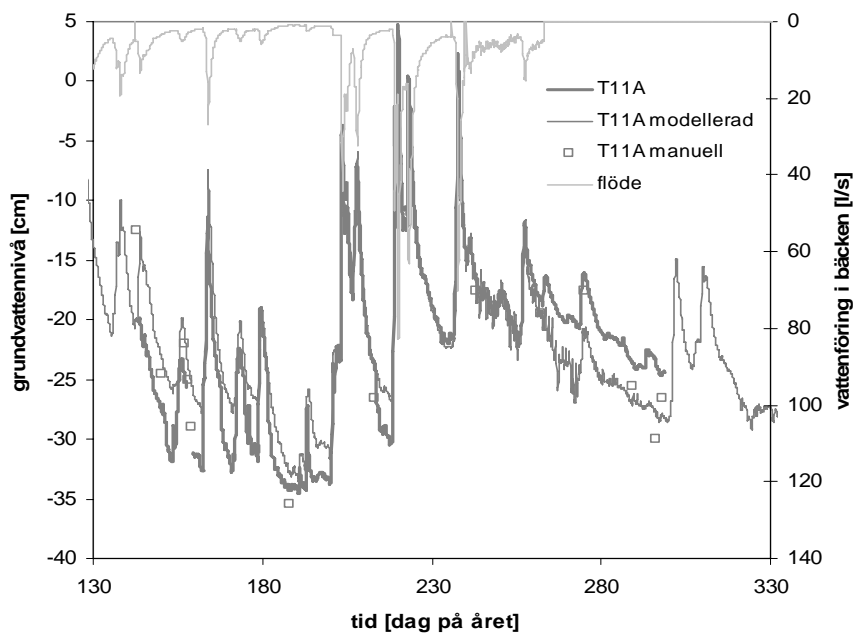


T10E

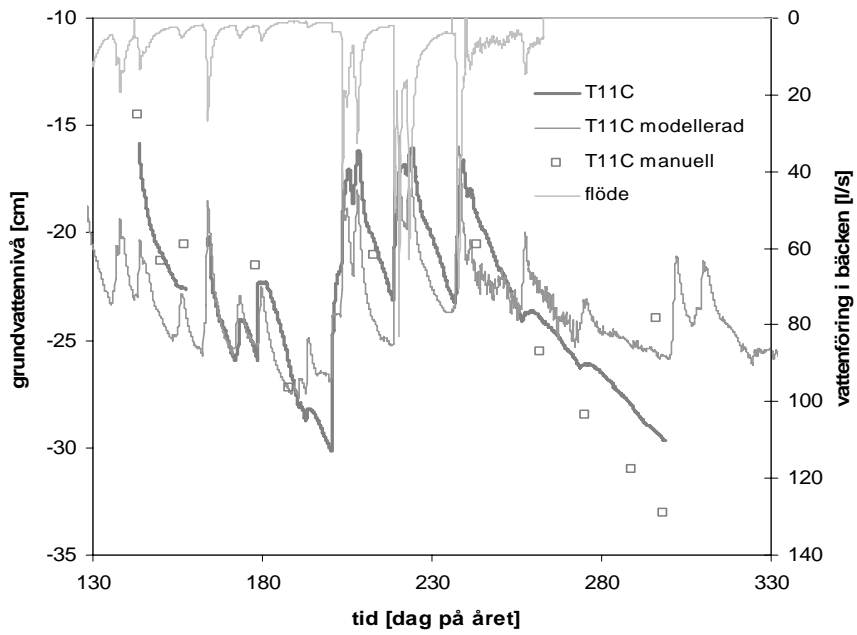




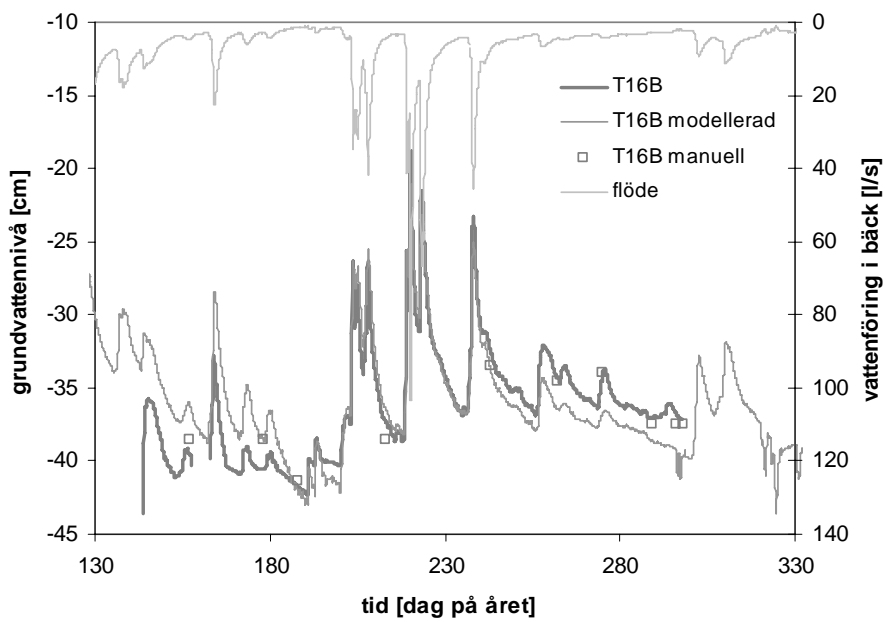
T10G



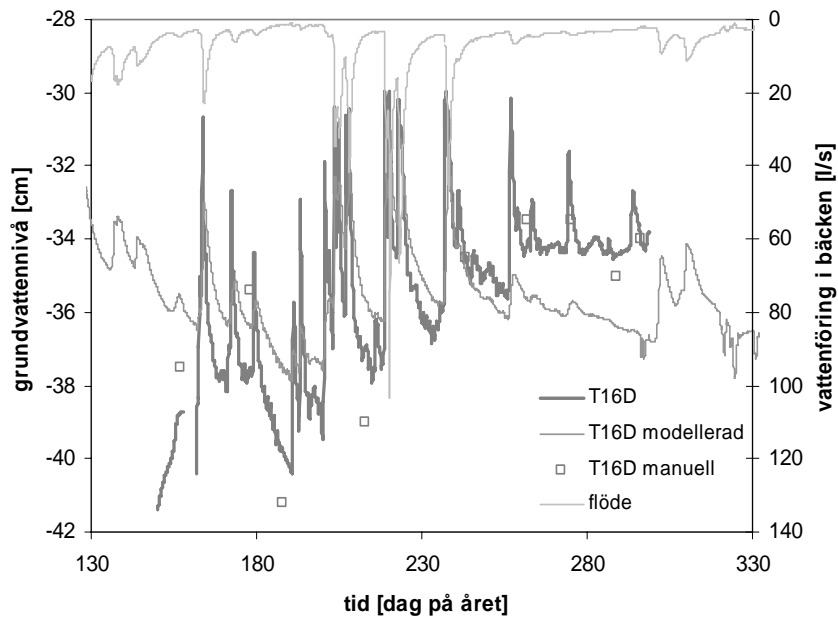
T11A



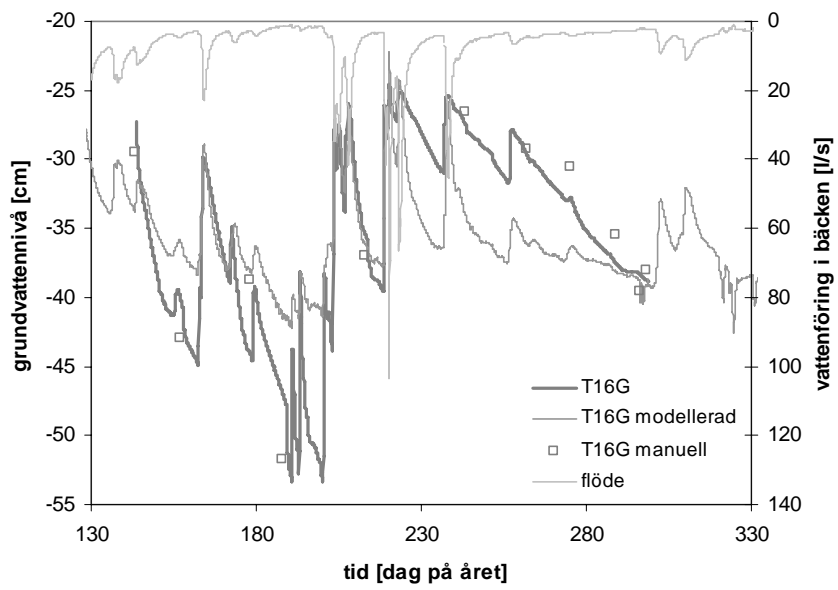
T11C



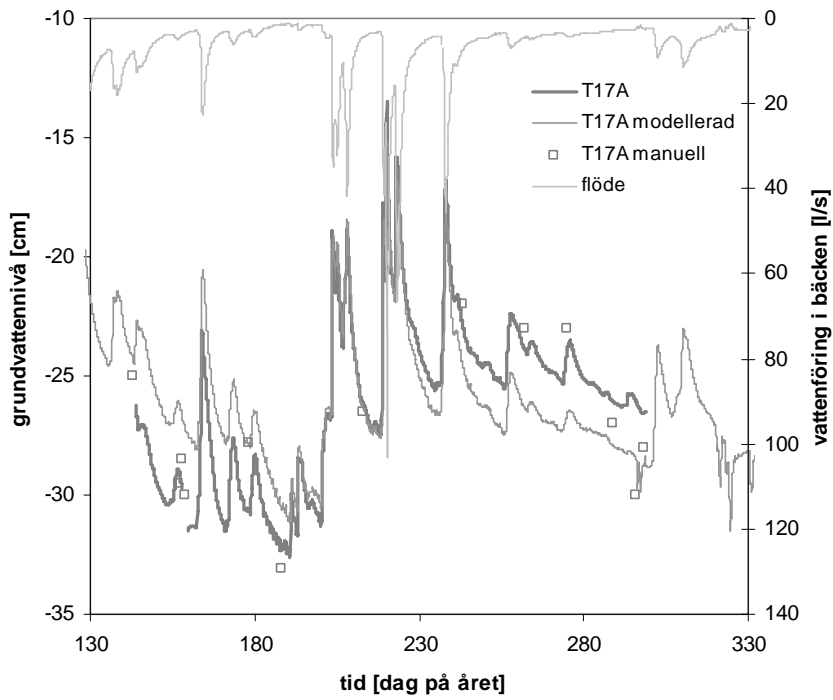
T16B



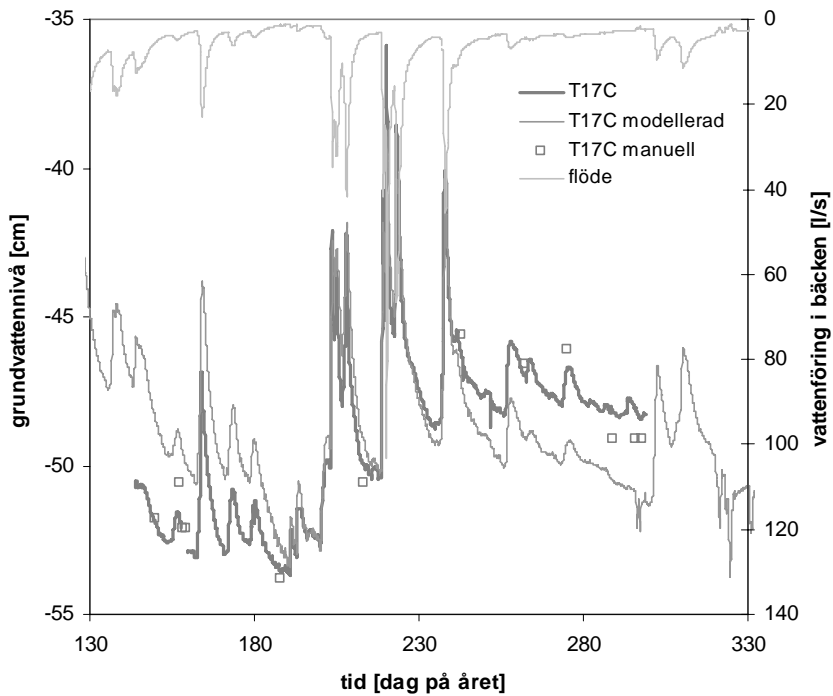
T16D



T16G

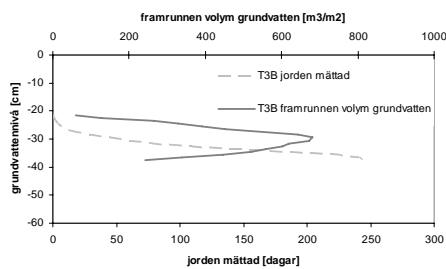


T17A

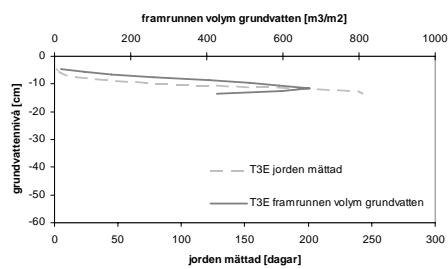


T17C

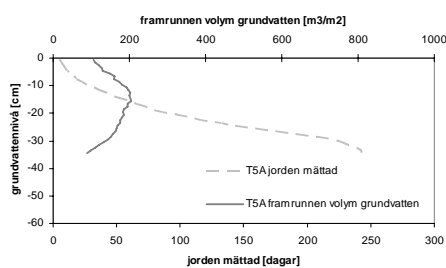
## Appendix D. Framrunnen volym grundvatten i jorden



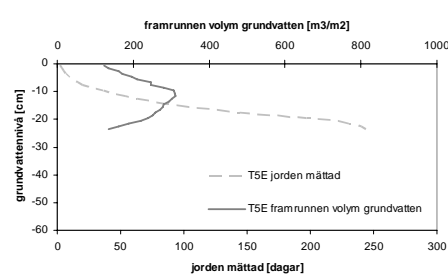
T3B



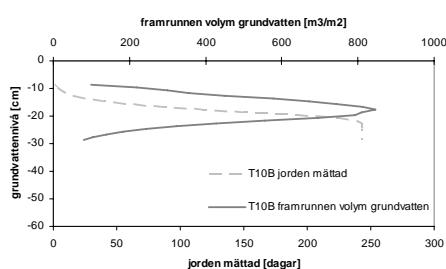
T3E



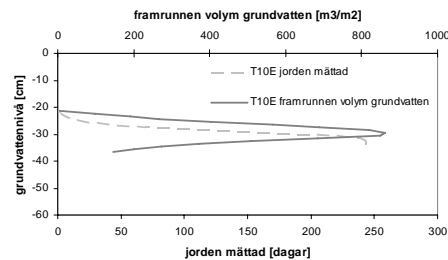
T5A



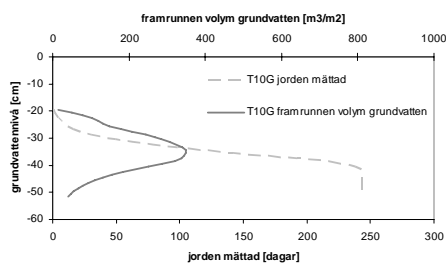
T5E



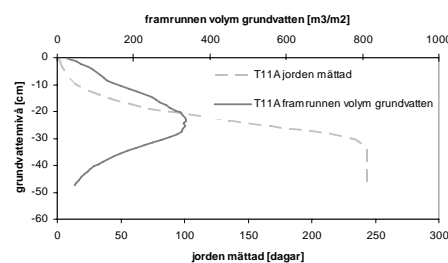
T10B



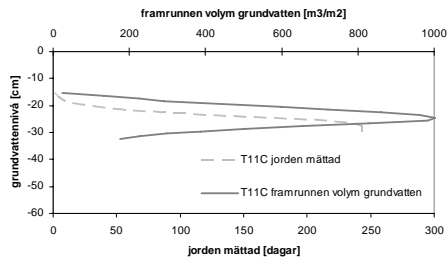
T10E



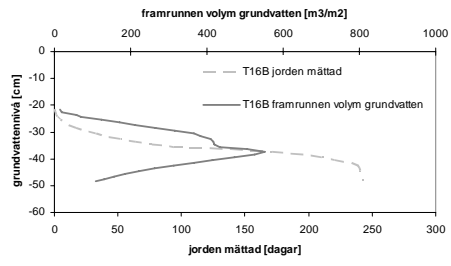
T10G



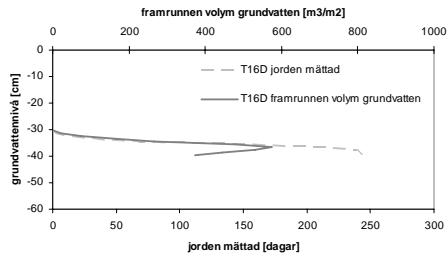
T11A



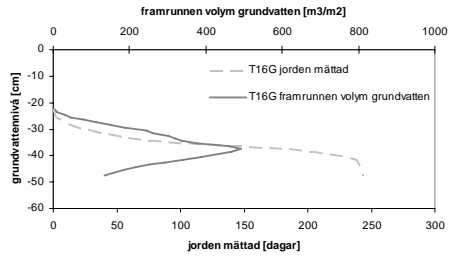
T11C



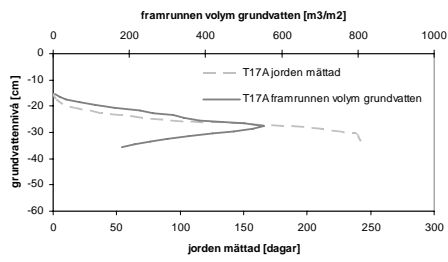
T16B



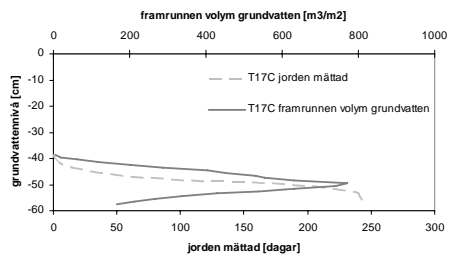
T16D



T16G

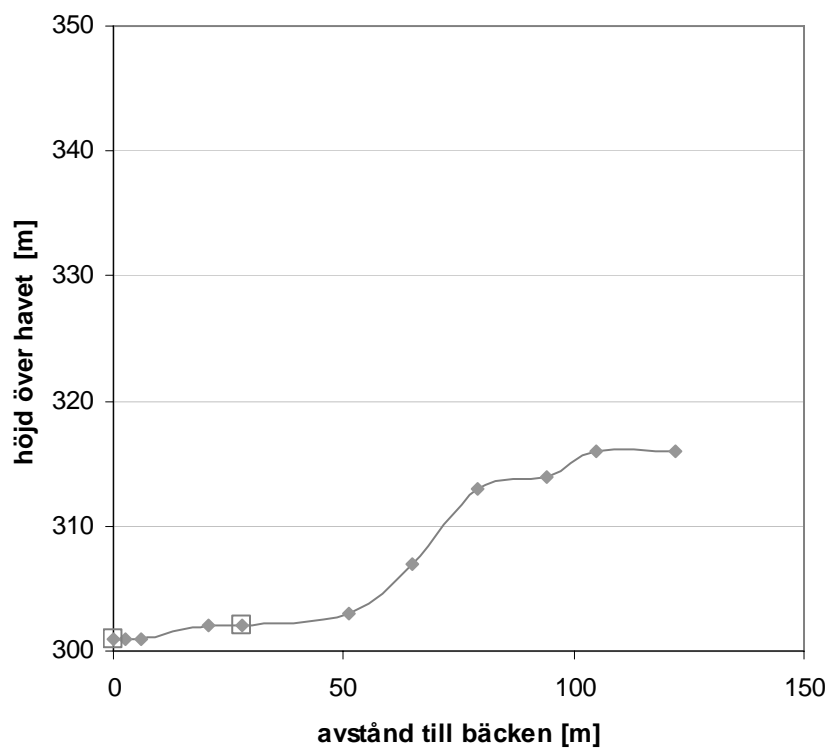
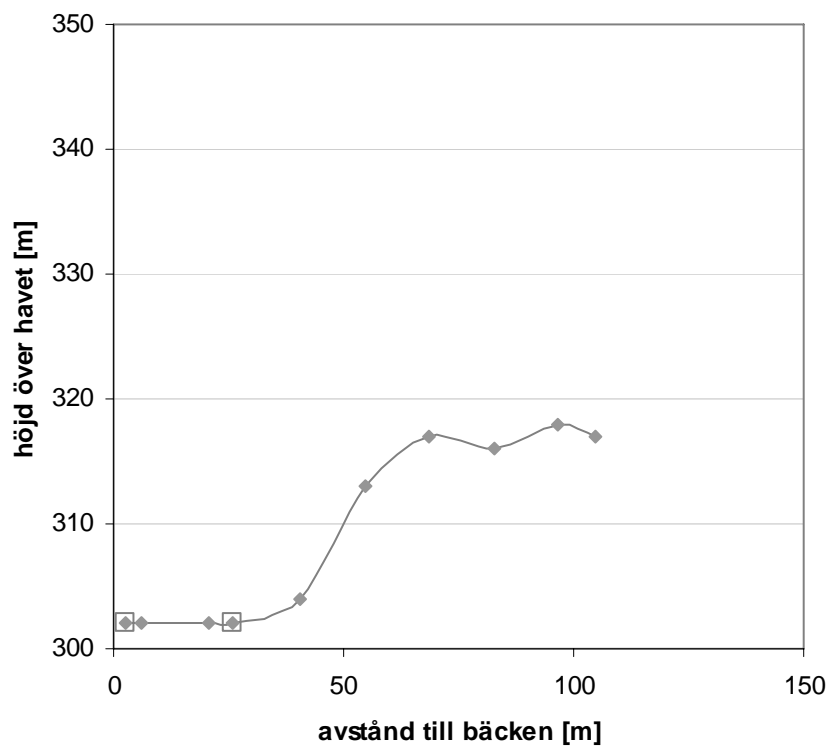


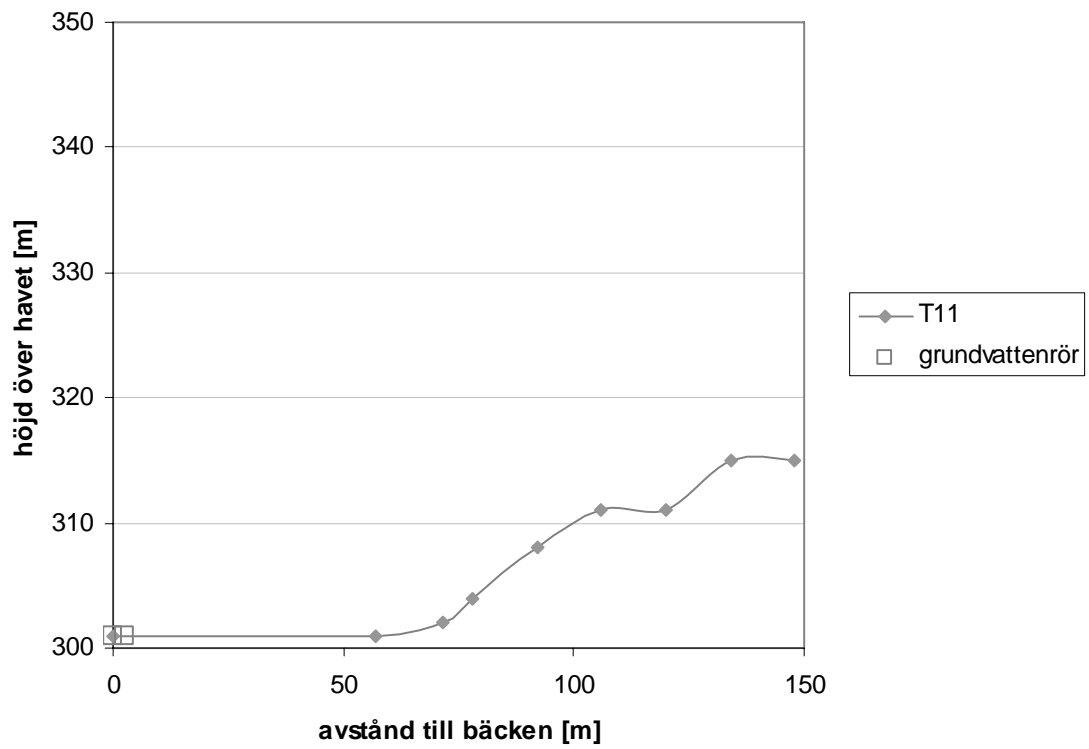
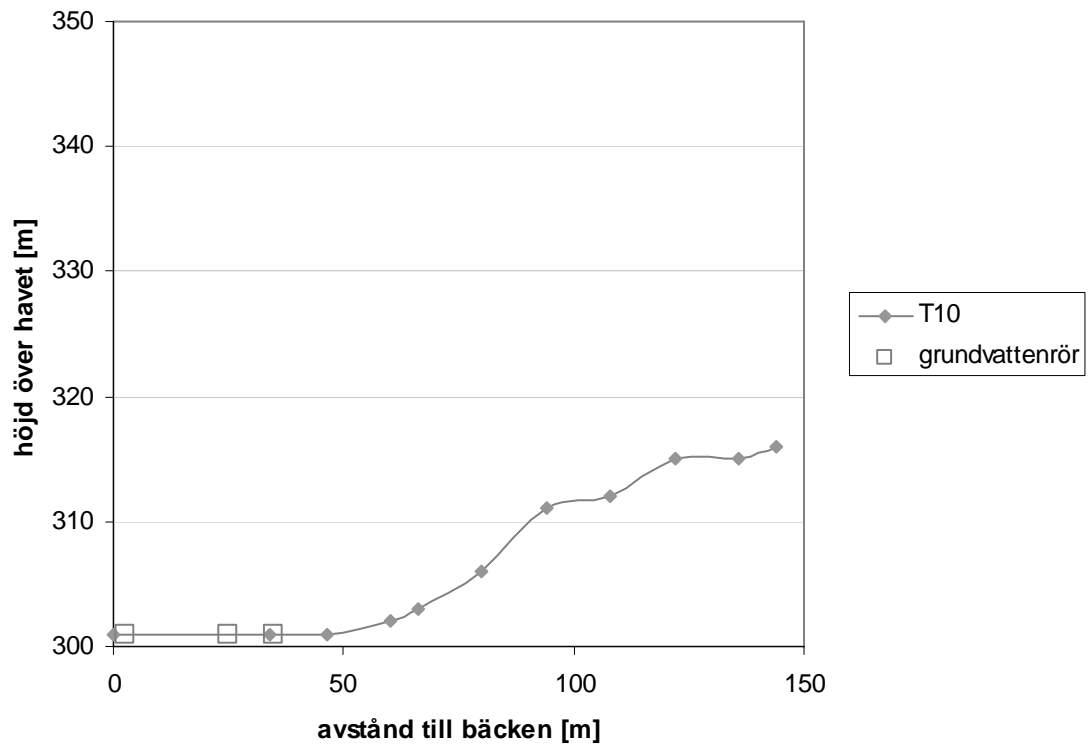
T17A



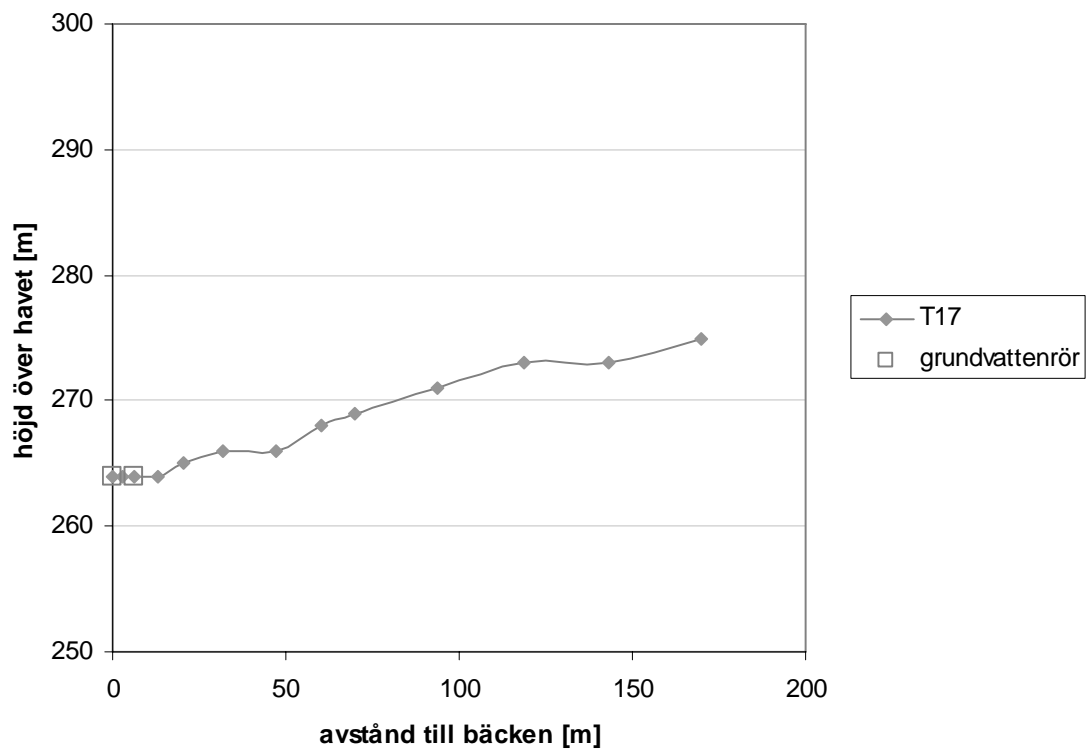
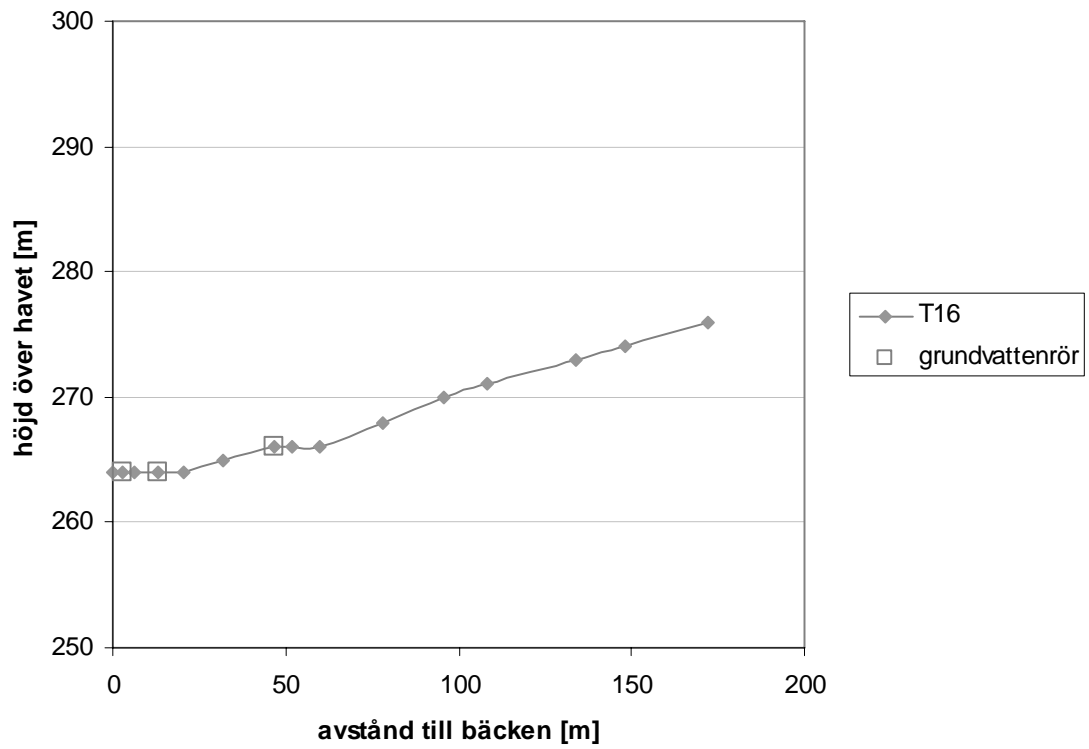
T17C

## Appendix E. Topografiskt tvärsnitt för varje transekt

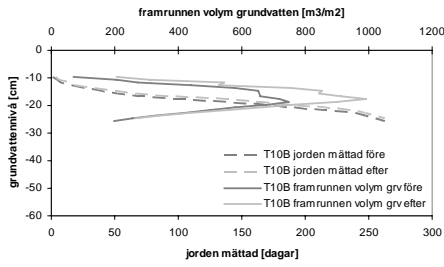




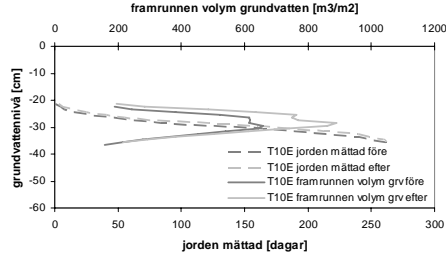




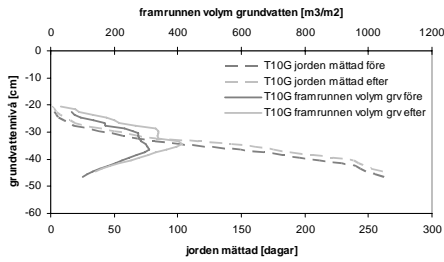
# Appendix F. Skogsavverkningens effekt på strömningsvägar



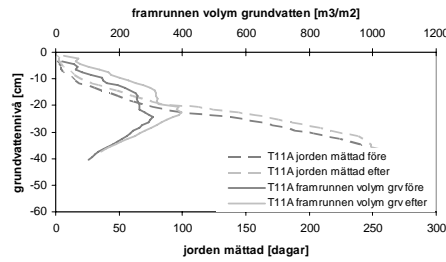
T10B



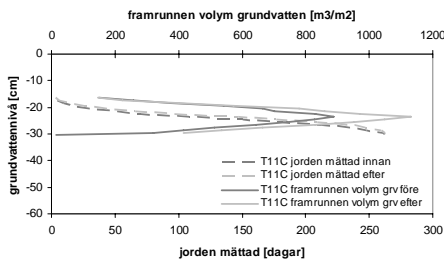
T10E



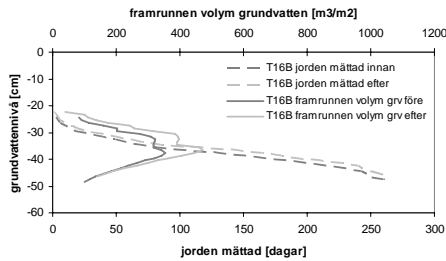
T10G



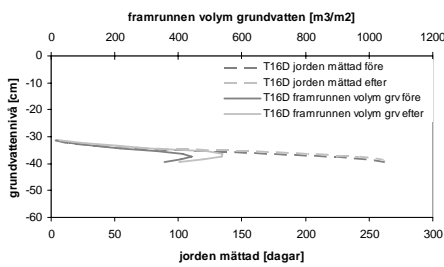
T11A



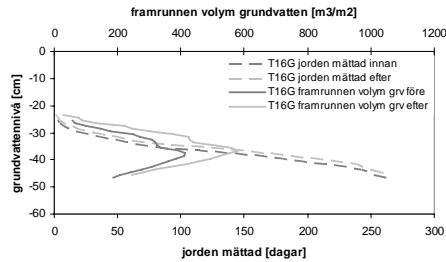
T11C



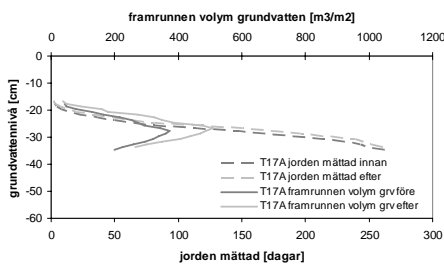
T16B



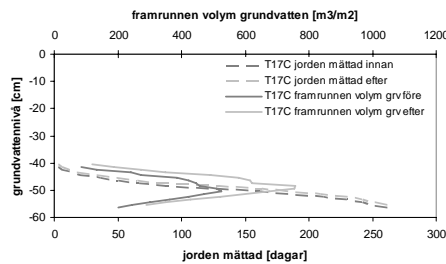
T16D



T16G

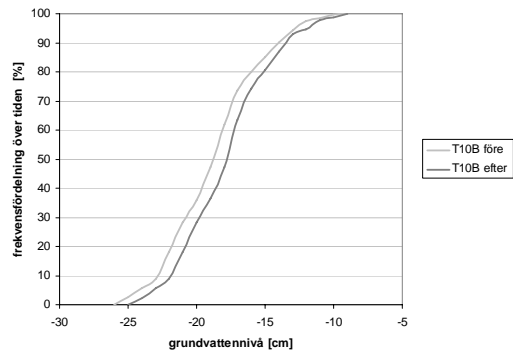


T17A

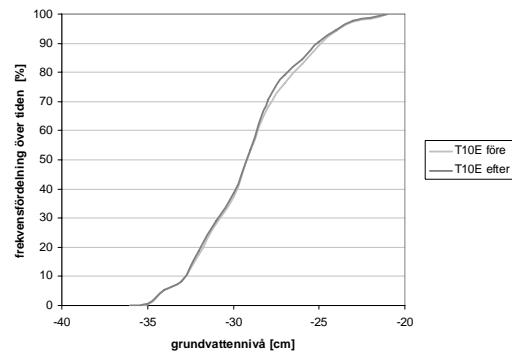


T17C

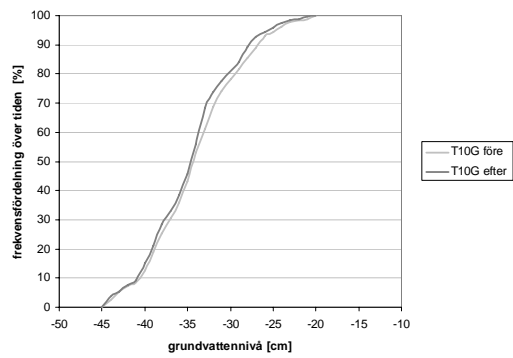
## Appendix G. Frekvensfördelning över grundvattennivån före och efter avverkning



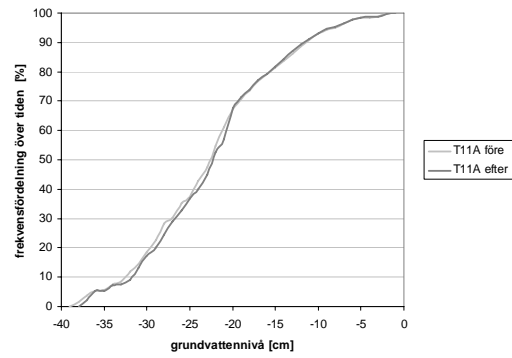
T10B



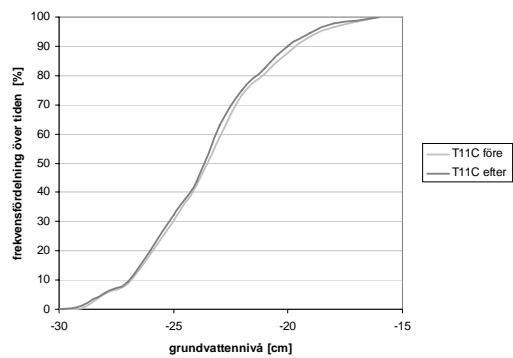
T10E



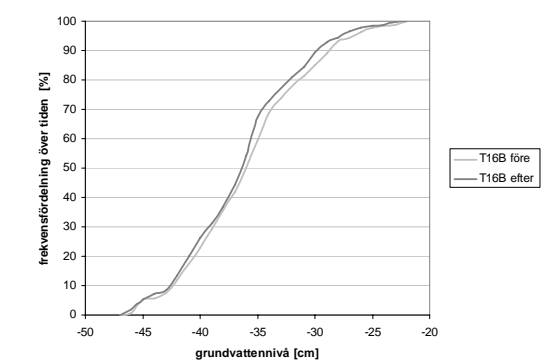
T10G



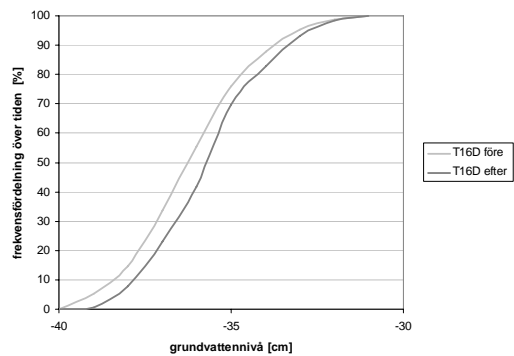
T11A



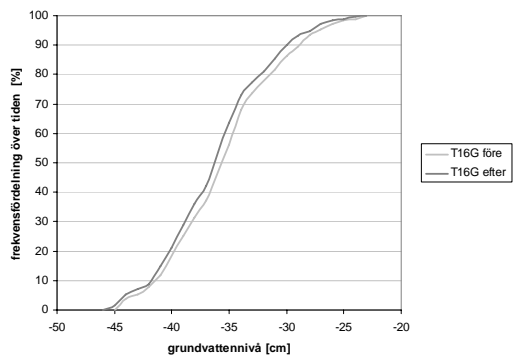
T11C



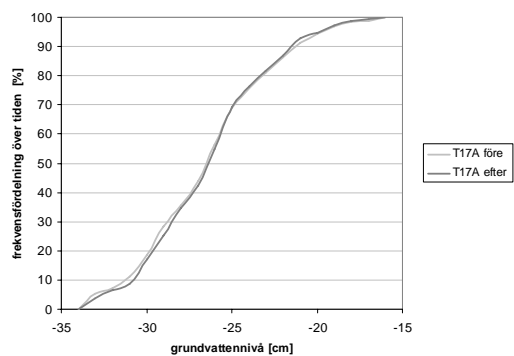
T16B



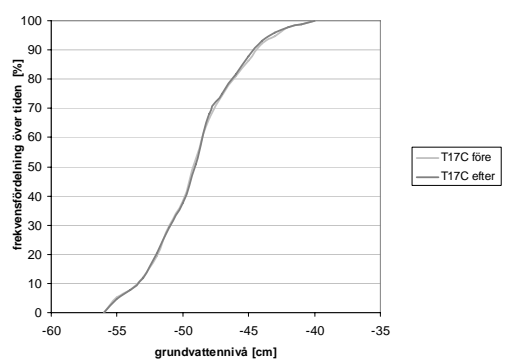
T16D



T16G

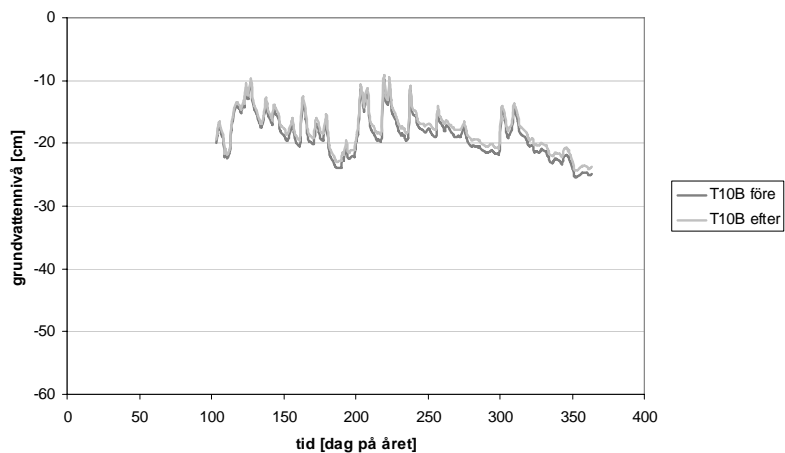


T17A

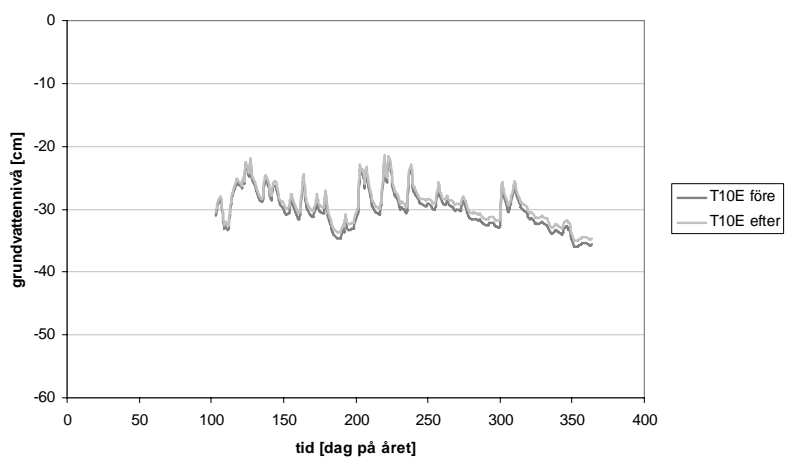


T17C

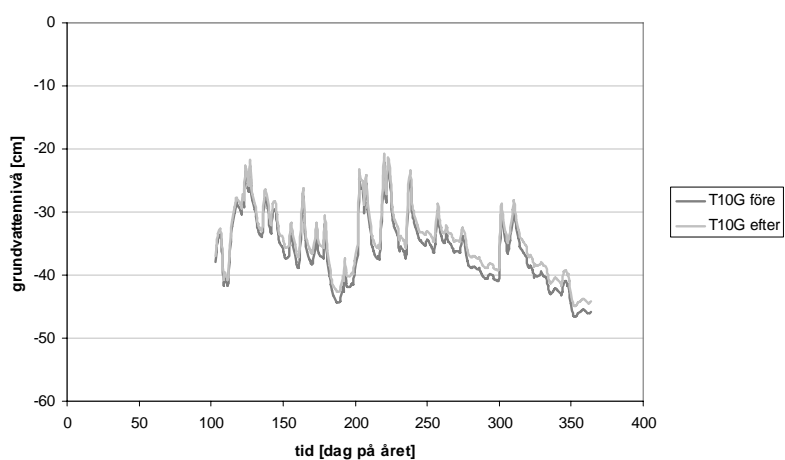
## Appendix H. Modellerad grundvattennivå före och efter avverkning



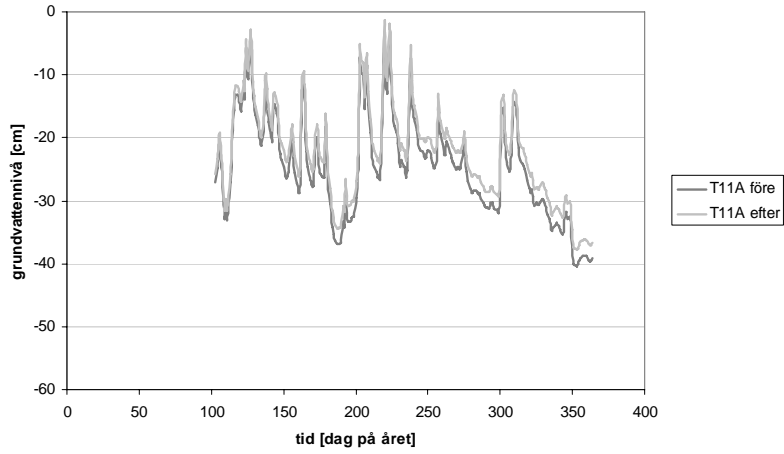
T10B



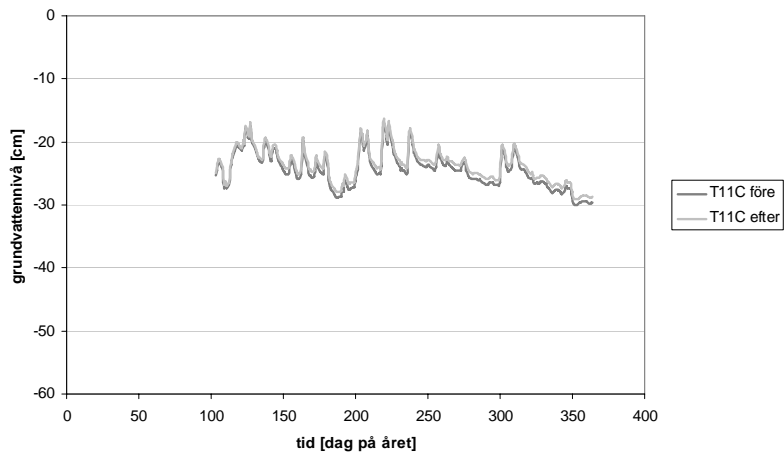
T10E



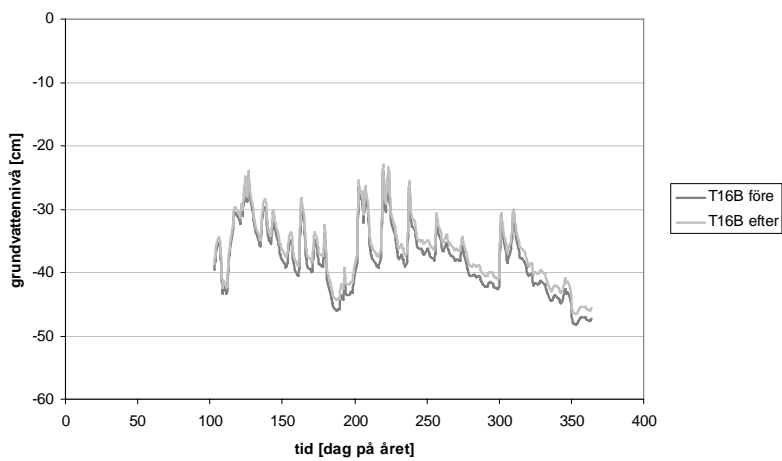
T10G



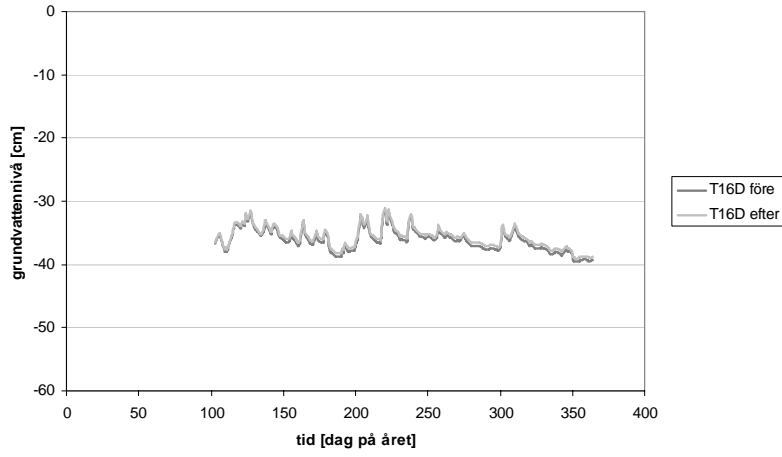
T11A



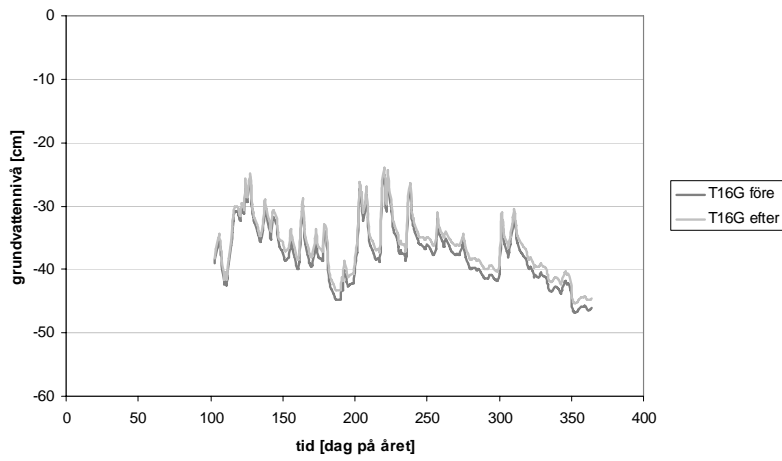
T11C



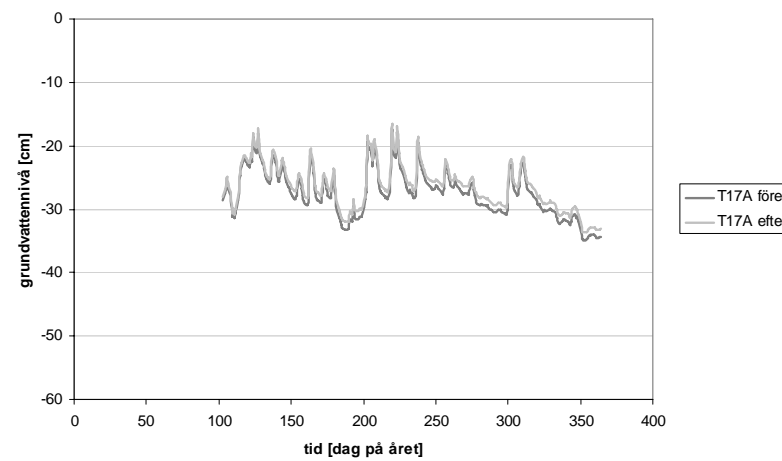
T16B



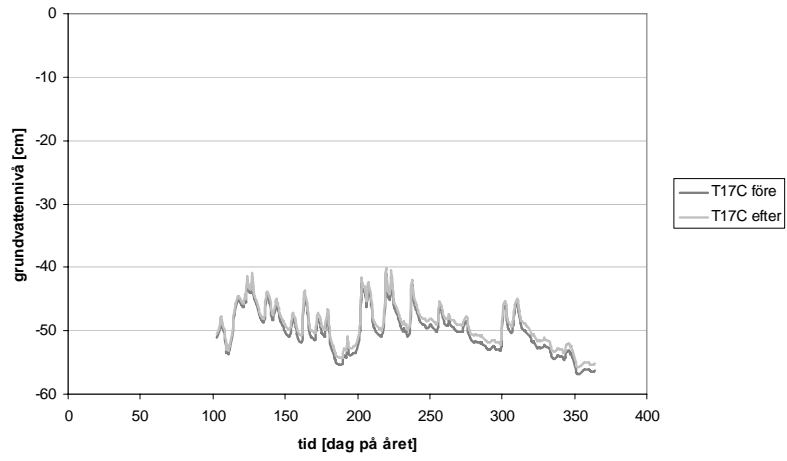
T16D



T16G



T17A



T17C