



Topografins inverkan på grundvattennivå och markvattenhalt i ett svenskt skogsområde

Examensarbete 20 poäng

Olof Johansson

Institutionen för miljöanalys
Sveriges Lantbruksuniversitet
Box 7050 750 07 Uppsala

Handledare: Jan Seibert
Examinator: Björn Vinnerås

Topografins inverkan på grundvattennivå och markvattenhalt i ett svenskt skogsområde

ISSN 1403-977X

SAMMANFATTNING

Topografins inverkan på grundvattennivå och markvattenhalt i ett svenskt skogsområde

Olof Johansson

En studie genomfördes för att undersöka sambanden mellan topografiska index och uppmätta värden på djup till grundvattennivå, markvattenhalt och mark-pH i ett 20 ha stort avrinningsområde i naturreservatet Kindlahöjden. Avrinningsområdet var starkt kuperat och hade granitisk berggrund med tunn täckning av stenfattig morän. De digitala topografiska indexen beräknades ur höjddata från topografisk kartering med 5m ekvidistans. Mätning av djup till grundvattennivå och markvattenhalt genomfördes i tre omgångar i vardera månaden juni, juli och augusti 2003. Mark-pH mättes i de markprover som togs och jordartsklassificerades i juli.

Som topografiska index användes det digitala topografiska fuktighetsindexet Topographic Wetness Index (TWI) och dess två beståndsdelar uppströmsarea och tan β , samt Downslope Index (DI). Dessutom användes det direkt i fält manuellt uppmätta indexet Uppströmslutning.

Indexen uppströmsarea och tan β gav större förståelse för sambanden mellan TWI och uppmätta värden, men gav inga egna korrelationer av större vikt mot uppmätta värden. DI gav i stort sett identiska värden som tan β .

Humusskiktets pH-värde visade sig vara något högre i blötare områden, vilket beskrivs bra av såväl markvattenhalt och djup till grundvattennivå som av TWI.

Generellt visade sig TWI kunna lokalisera in- och utströmningsområden. TWI kunde däremot inte på ett tillfredsställande sätt beskriva den rumsliga variationen av markvattenhalt och djup till grundvattennivå i avrinningsområdet. Visserligen var korrelationerna signifikanta för mätningarna i augusti, men tvetydiga. Anledningarna till denna tvetydighet och de dåliga sambanden i juni och juli anses vara: svårigheter i att föra ihop provplatsernas koordinater med digitala höjddata, dålig lokal topografibeskrivning av TWI, samt påverkan av lokala variationer i markstruktur, marklutning och evapotranspiration.

Indexet Uppströmslutning visade sig få signifikanta samband mot både djup till grundvattennivå och markvattenhalt för alla tre mättillfällen. Index liknande Uppströmslutning föreslås därför som alternativ eller komplement till TWI.

ABSTRACT

Influence from topography on ground water table and soil moisture in a swedish forest catchment.

Olof Johansson

A study was performed in order to investigate the relationships between topographic indices and measured values on depth to groundwater table, soil moisture and soil pH in a 20 ha catchment in the nature reserv of Kindlahöjden. The catchment was quite hilly and had a granitic bedrock with a thin cover of till soil. The digital topographic indices were estimated with elevation data from a topographic map with 5m equidistance. The measurements of depth to groundwater table and soil moisture was performed in three occasions: in June, July and August 2003 respectively. Soil pH was measured in the soil samples which were taken and soil classified in July.

The topographic indices used in the study were Topographic Wetness Index and its two components upslope area and $\tan\beta$. Also Downslope Index (DI) and the index Uppströmslutning (Upstream slope), which was manually measured direct in the catchment, were used.

The indices upslope area and $\tan\beta$ didn't gave strong correlations to the measurements of soil moisture content or depth to groundwater table but contributed to the understanding of the correlations between TWI and the same measurements.

Soil pH in O-horizon appeared to be slightly higher in wetter areas, which was well described of soil moisture, depth to groundwater table and TWI.

In general TWI succeeded to localize wet and dry areas and describe the water distribution in the catchment. On the other hand TWI wasn't able to describe the spatial distribution of soil moisture and depth to groundwater table in a satisfactory way. The correlations with the measurements performed in August were significant but on the same time equivocal. The reasons for this ambiguity and the weak correlations in June and July is considered to be: problems to connect coordinates for sample plots with elevation data, TWI is not able to describe local topography and local influences from variations in soil structure, ground slope and evapotranspiration.

Significant correlations between Uppströmslutning and depth to groundwater table and between Uppströmslutning and soil moisture were obtained for all of the three measuring occasions. Therefor index like Uppströmslutning are suggested to be good alternatives or complements to TWI.

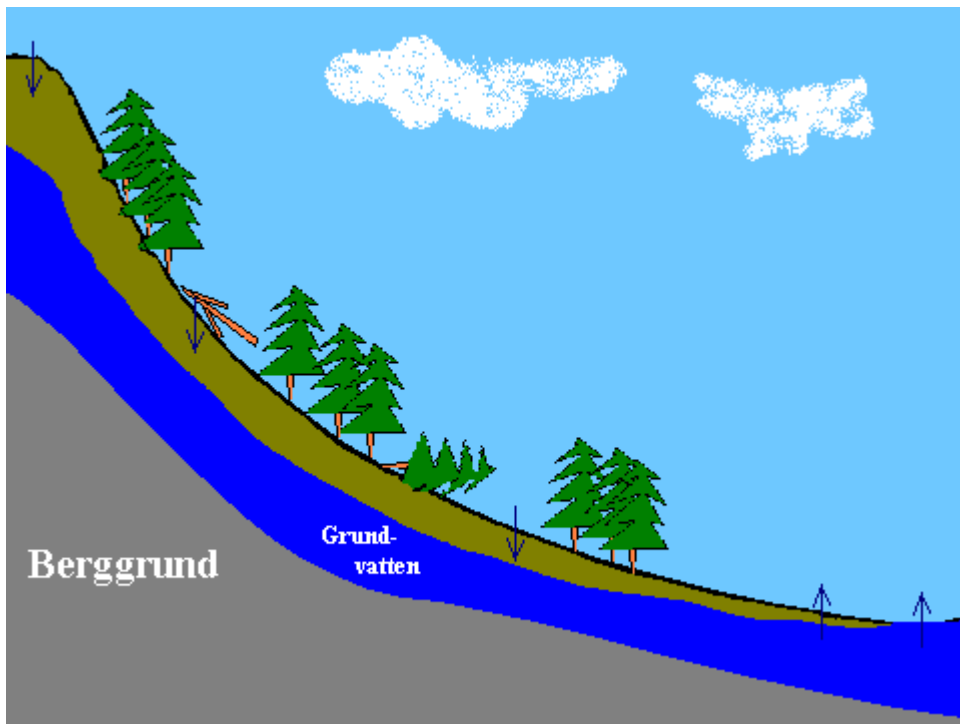
INNEHÅLL

1. BAKGRUND.....	1
2. TIDIGARE STUDIER.....	2
3. SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR.....	4
4. MATERIAL OCH METODER.....	5
4.1 Områdesbeskrivning: Kindlahöjden	5
4.2 Fältmätningar	8
4.2.1 Allmänt.....	8
4.2.2 Mätning av djup till grundvattennivå.....	8
4.2.3 Mätning av markvattenhalt	8
4.2.4 Markprovtagning och pH-mätning.....	10
4.3 Topografiska index	10
4.3.1 Digitala topografiska index: TWI, uppströmsarea, tan β och DI.....	10
4.3.2 Index uppmätt i fält: Uppströmslutning	11
4.4 Statistisk analys.....	12
4.5 Osäkerheter	12
5. RESULTAT	14
5.1 Allmänt	14
5.2 Korrelationer	17
5.2.1 Observerade data.....	17
5.2.2 Topografiska index.....	20
5.2.3 Topografiska index beskriver observerade data	21
6. DISKUSSION.....	25
6.1 Allmänt	25
6.2 Observerade data.....	25
6.3 Topografiska index	26
6.4 Topografiska index beskriver observerade data.....	27
7. SLUTSATSER	29
TACKORD	30
REFERENSER	30
Tryckta referenser	30
Internetreferenser	31
Personliga meddelanden	31

1. BAKGRUND

För allt miljöarbete som har med mark att göra är hydrologi en mycket viktig faktor för förståelsen av de biologiska, fysiska och kemiska processer som sker i marken. Fastläggning eller läckage av fosfor och kväve i åkermark och försurande regn som infiltrerar i skogsmark är exempel på processer som styrs av den rådande hydrologin. Därför är det viktigt att hitta analystekniker som kan beskriva avrinningsmönster och förutsäga representativa provplatser för t ex miljöövervakning.

Ur ett svenskt perspektiv, i ett land som får mycket nederbörd, som främst täcks av skog och har en relativt kuperad terräng, är det intressant att studera hur vattnet letar sin väg ner genom marken i skogslandskapet. Olika typer av moräner är de vanligaste jordarterna i Sverige och dessa har bildats av inlandsisens uppbrytning, slipning och deponering av den underliggande berggrunden (Minell, 1997). En morän är sammansatt av alltifrån stora block och stenar till små lerpartiklar och är därför osorterad. Kombinationen av att den osorterade moränen har låg mättad konduktivitet och att den oftast utgör ett grunt jordlager ovanpå en relativt ogenomsläpplig berggrund, gör att moränlandskapets grundvatten når nära markytan (Rodhe, 1997). På höjderna finns grundvattennivån på några meters djup från markytan för att sedan ligga allt grundare ju längre ner i terrängen man kommer (figur 1). I terrängens låglägen når grundvattnet upp till och ibland över markytan. Det är här våtmarksområden och bäckar uppkommer (Grip och Rodhe, 1988). Eftersom grundvattennivåns djupvariationer under markytan är så små jämfört med sluttningarnas höjdskillnader, kommer grundvattennivån i stort sett att följa markytans topografi (Rodhe, 1997).



Figur 1. Schematisk beskrivning av hydrologin i moränområde.

Den area där nederbörden samlas upp och nedströms bidrar till flödet i ett vattendrag kallas avrinningsområde. I avrinningsområdet finns inströmningsområden och utströmningsområden. Inströmningsområden är belägna i avrinningsområdets högre och torrare platser medan utströmningsområden återfinns i lägre och blötare lägen. I

inströmningsområdena är vattenrörelsen riktad ner mot grundvattnet. Regnvatten infiltrerar ner genom markytan och vidare ner till grundvattnet under inverkan av gravitationen. I utströmningsområdena är vattenrörelsen istället riktad upp från grundvattnet, på grund av tryckkraften från grundvatten från högre belägna områden. Här bidrar alltså grundvattnet till påfyllnad av våtmarksområden och flödet i bäckar. (Rodhe, 1997; Grip & Rodhe, 1988)

Även om årstidsväxlingar, variationer i marksammansättning, klimatet och vegetationen påverkar vattenvandringen i moränlandskapet verkar topografin vara den enskilt största påverkande faktorn. Med hjälp av topografin borde det gå att någorlunda förutsäga, inte bara grundvattennivån utan också vilken markvattenhalt markens ytskikt har. Orsaken till detta är att vattnet i markens ytskikt står i jämvikt med grundvattennivån. Anledningen till att inte allt vatten direkt dräneras ner till grundvattnet är att markpartiklarna adsorptvitt, och markporerna kapillärt, binder kvar vattnet med ett så kallat bindningstryck (Grip & Rodhe, 1988). Detta bindningstryck motverkar gravitationskraften vid infiltrering, men påverkas i sig av grundvattennivån. Därför kommer grundvattennivåns djupläge att styra markvattenhalten. Ju djupare grundvattennivån ligger desto högre bindningstryck kommer att behövas i markens ytskikt för att hålla kvar samma mängd vatten. I större porer upprätthålls inte tillräckligt högt bindningstryck, så vattnet i dessa porer dräneras av till grundvattnet. Allteftersom grundvattennivån sänks och högre och högre bindningstryck krävs kommer sedan allt mindre porer avtappas på vatten. Marken blir alltså torrare ju djupare grundvattennivån är belägen. Eftersom grundvattennivån i moränområden, enligt tidigare resonemang, i huvudsak styrs av topografin kan därför även markvattenhalten förväntas styras av topografin.

Då det är omöjligt att i detalj mäta grundvattennivåer och markvattenhalter över större arealer skulle alltså topografin kunna vara en utgångspunkt för att i grova drag uppskatta markhydrologin. En teknik att använda topografin för markhydrologiska ändamål är att med hjälp av topografiska kartdata räkna ut ett matematiskt index. Med TOPMODEL lanserades denna teknik av Beven och Kirkby (1979). I takt med ökande tillgänglighet till digitala höjddata har denna typ av modeller blivit ett allt kraftfullare redskap (Quinn m.fl., 1995). I TOPMODEL lades grunden till Topographic Wetness Index (TWI) som matematiskt beskrivs: $\ln(a/\tan\beta)$. Något förenklat kan man säga att det avrinningsområde som ska studeras delas in i ett rutsystem med celler. Med $\ln(a/\tan\beta)$ -algoritmen beräknas sedan för varje cell hur många celler som är belägna uppströms denna cell och vilken lutning den aktuella cellen har. Ju lägre cellens läge är i terrängen, desto högre indexvärde och desto blötare eftersom antalet uppströmsceller ackumuleras och lutningen dessutom brukar bli flackare lägre ner i terrängen. Förutom att beskriva markens fuktighet har TWI också visat sig kunna beskriva markens pH-värden (Juutilainen, 2003).

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka hur väl de topografiska indexen TWI, $\tan\beta$, uppströmsarea, Downslope Index (DI) och Uppströmslutning beskriver ett avrinningsområde i naturreservatet Kindlahöjden, jämfört med uppmätta värden på grundvattennivå, markvattenhalt och mark-pH.

2. TIDIGARE STUDIER

Topographic Wetness Index (TWI) har använts i försök runtom i världen och i Sverige. Här ska tre internationella studier översiktligt behandlas och sedan lite grundligare redogöras för två svenska.

Moore och Thompson (1996) testade i ett avrinningsområde i British Columbia, Kanada, hur väl det gick att förutsäga djupet till grundvattennivån med hjälp av TWI. Avrinningsområdet var skogsbeväxtad podsolmark på granitisk berggrund. Jämförelser gav ett statistiskt och

signifikant samband mellan TWI och fältmätningar av djupet till grundvattennivån, men sambandet var svagt. Enligt författarna var den främsta orsaken till den dåliga överensstämmelsen stora skillnader i markens mättade hydrauliska konduktivitet på olika ställen i avrinningsområdet. En annan orsak skulle, enligt författarna, kunna vara problem i att bra beskriva topografin i landskapet med digitala höjddata, eftersom upplösningen på höjddata var för grov.

I två australiska avrinningsområden gjorde Grayson m fl (1997) en hydrologisk undersökning med gravimetrisk vattenhaltsbestämning. De kom fram till att avrinningsmönstret och markvattenhalten växlade mellan två dominerande lägen: blöt fas och torr fas. Den blöta fasen uppkom under den tempererade australiska vintern. Markvattenhalten påverkades då av storskaliga processer i avrinningsområdena med stora laterala grundvattenflöden från högre belägna områden (jämför inströmningsområden) till lägre belägna områden med svackor (jämför utströmningsområden). Under den torra fasen, som uppkom under den tempererade australiska sommaren, påverkades markvattenhalten istället av lokala variationer i markstruktur, evapotranspiration och lokal marklutning. I och med existensen av dessa två skilda faser ansåg Grayson m fl att det därför också krävdes två index för att beskriva markvattenhalten. För den blöta fasen skulle TWI förmodligen fungera som index. För den torra fasen skulle indexet däremot ta hänsyn till markegenskaper, lokal marklutning och eventuellt potentiell evapotranspiration.

Townsend och Walsh (1996) undersökte i Uwharrie National forest, North Carolina, USA hur markparametrar påverkar TWI. Jordarterna i Uwharrie var djupa och med hög lerhalt. I studien jämfördes konventionell TWI-beräkning med en modifierad TWI-beräkning. I den konventionella beräkningen brukar antas att hela det studerade området har en enhetlig marksammansättning. I den modifierade beräkningen togs också hänsyn till de olika jordarternas mättade hydrauliska konduktivitet och markens djup till berggrund i TWI-algoritmen. Generella data på dessa parametrar hämtades från databas och tidigare studier. Allmänt visade det sig att de två typerna av index beskrev området i stort sett likadant. Huvudorsaken till detta anser Townsend och Walsh vara det faktum att jordarten i huvudsak ändrar sig med topografin. På vissa platser gav dock de olika indexberäkningarna skilda värden. I områden där marken hade låg genomsläpplighet gav konventionell TWI-beräkning alltför låga värden jämfört med modifierad TWI-beräkning. Motsvarande förhållande rådde i områden med hög genomsläpplighet och djupare jordarter där konventionell TWI-beräkning gav för höga värden.

I en svensk studie undersökte Rodhe och Seibert (1999) hur väl det gick att med TWI förutsäga sankmarker i terrängen. Indexet baserades på Gröna kartans höjddata med celler på 50x50m över två, topografiskt skilda avrinningsområden: Kassjöån, ett kuperat skogslandskap i Mellansverige med typiska höjdskillnader på 50-150 m, och Nåsten, ett flackare skogsområde i södra Sverige. I studien antogs att sankmarker representerade de absolut blötaste partierna av respektive avrinningsområde. Om de celler som i verkligheten kunde observeras som sankmarker också fick de högsta värdena av TWI, ansåg Rodhe och Seibert att modellen fungerade. TWI skulle då även kunna förutsäga markfuktigheten för torrare partier.

För Kassjöån fick man en någorlunda överensstämmelse där sankmarkscellerna generellt fick högre indexvärden än icke sankmarksceller, även om det fanns undantag där vissa sankmarksceller tvärtom fick lägre indexvärden än icke sankmarksceller. För Nåsten däremot fick sankmarkscellerna inte högre indexvärden än icke sankmarksceller. Förutsägelse av sankmarker gick alltså bara att göra i Kassjöån och där bara någorlunda bra.

Med detta sankmarkstest av TWI drar Rodhe och Seibert slutsatserna att det är 50x50m-upplösningen på höjddata som bidrar till den dåliga överensstämmelsen för Nåsten. För Nåsten ligger den typiska längdskalan för topografiändringar i landskapet snarare på ca 10 m. I Kassjöån där upplösningen av höjddata bättre överensstämmer med de större och kraftigare topografiändringarna i landskapet stöder detta test möjligheten att TWI kan användas för att förutsäga markvattenhalter och grundvattennivåer. Detta måste dock undersökas vidare i ytterligare studier anser Rodhe och Seibert.

Ytterligare en svensk undersökning har utförts av Juutilainen (2003). Syftet var att utreda sambandet mellan topografiska index och markens hydrologiska och kemiska egenskaper i ett kuperat, 25 km² stort skogsområde 7 mil öster om Östersund. Topografin varierade mellan 300-450 m ö h och jordarten var sandig morän. De topografiska indexen (däribland TWI) beräknades utifrån höjddata med celler på 20x20m. Över området hade 55 provceller representativt slumpats ut och i dessa gjordes mätningar av grundvattennivå och markvattenhalt i juli och oktober 2002. Mätningarna av grundvattennivå och markvattenhalt utfördes på samma sätt som i detta arbete och tillvägagångssättet finns beskrivet i 4.2.2 och 4.2.3. I samma provceller togs också markprov i juli 2002 för diverse kemiska analyser, bl a pH-mätning. I samband med markprovtagningen klassades också proverna in som podsoler eller sumpjord beroende på jordarten. TWI, och marklutningsindexet Downslope Index (DI) baserat på 20x20m-celler räknades ut. $\tan\beta$ som beskriver lutningen i TWI användes i sig också som ett eget index. TWI beräknades också som ett medelvärde för aktuell cell och dess omkringliggande celler (sammanlagt nio celler) och kallades då TWI_{mean} .

Det visade sig råda ett starkt samband mellan TWI och markvattenhalten för mätningarna från både juli och oktober. Dessutom rådde ett negativt samband mellan markvattenhalt och DI, det vill säga; ju brantare kring provplatsen desto lägre markvattenhalt. För enbart provplatser med podsolmark kunde ett motsvarande negativt samband mellan markvattenhalt och $\tan\beta$ konstateras. För enbart sumpjordsprovplatser fanns i oktober ett samband mellan TWI_{mean} och grundvattennivå som indikerade att högre TWI_{mean} -värden gav grundare djup till grundvattennivån. Mellan pH i humusskiktet och uppmätta markvattenhalter fanns ett starkt samband, som alltså indikerade att blötare platser gav högre pH-värden. Motsvarande samband gällde också mellan pH i humusskiktet och TWI_{mean} .

Juutilainen drar utifrån sin studie slutsatserna att beräkning av topografiska index var ett bra sätt att förutsäga markvattenhalt och vissa kemiska variabler, till exempel pH, i det aktuella skogsområdet. För att förutsäga markvattenhalter fungerade TWI_{mean} bäst för sumpjordar och TWI bäst för podsoler. Antagligen kan förutsägelseerna av markvattenhalt generellt bli bättre om $\tan\beta$ byts ut mot DI i TWI-beräkningen tror Juutilainen.

3. SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

Syftet med detta examensarbete var att undersöka sambanden mellan de topografiska indexen TWI, $\tan\beta$, uppströmsarea, DI och Uppströmslutning och uppmätta värden på djup till grundvattennivå, markvattenhalt och pH

Mätningarna av markvattenhalt och djup till grundvattennivå genomfördes under sommarmånaderna juni, juli och augusti 2003 i det 20 ha stora avrinningsområdet i naturreservatet Kindla. Markvattenhalten har mätts med TDR-teknik i markens ytskikt och grundvattennivån har mätts till och med ett djup på 95cm. I juli togs också markprov för att bestämma pH och klassificera jordarter.

4. MATERIAL OCH METODER

4.1 Områdesbeskrivning: Kindlahöjden

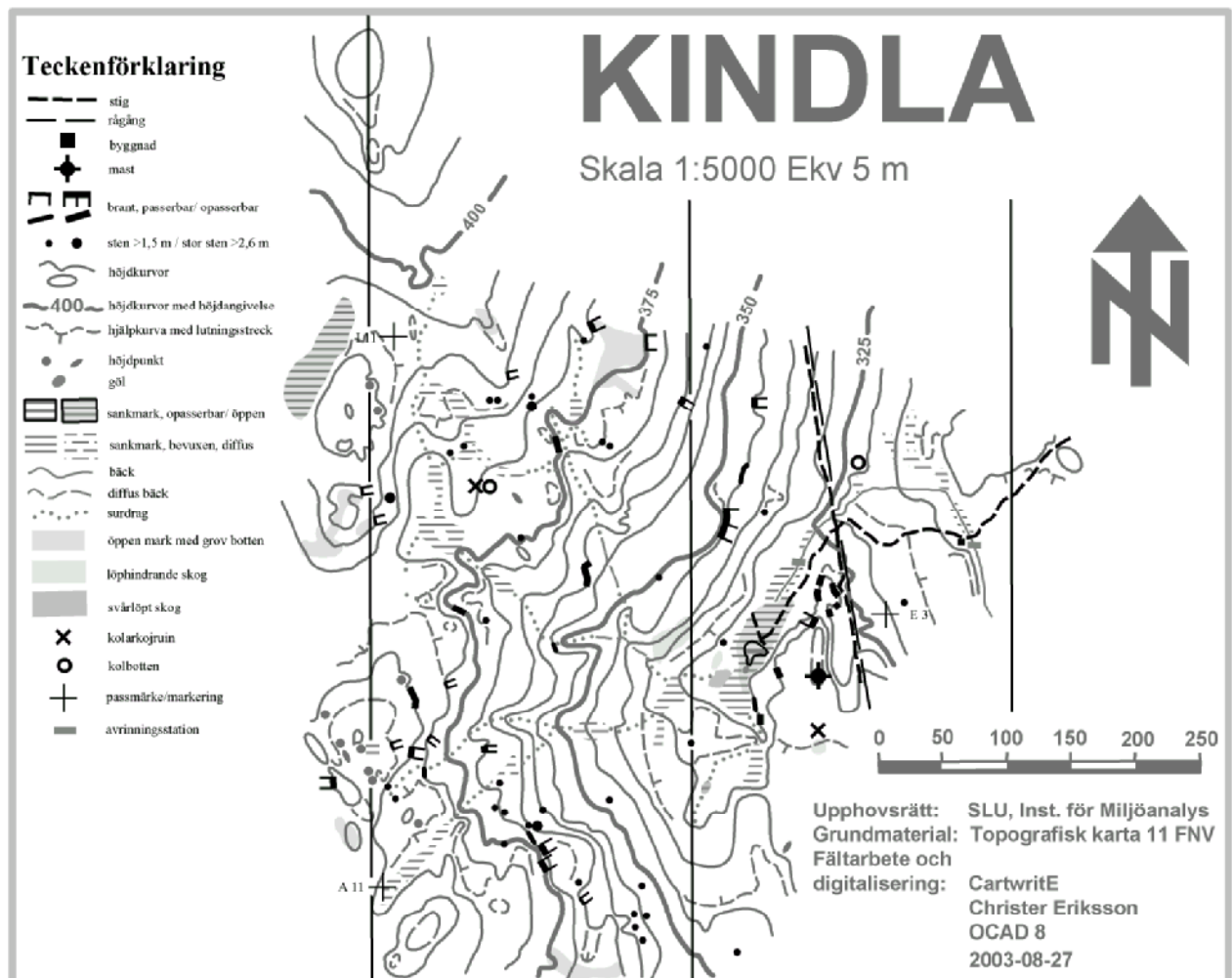
Kindlahöjden är namnet på det 933 ha stora skogsområde i Bergslagen, Örebro län, som blev naturreservat 1999 (figur 2). Hela området är högt beläget, själva berget Kindlahöjden 425möh, och ligger över högsta kustlinjen (Lst Örebro, [www](http://www.lst.se)). Naturreservatet är rikt på mossar och myrmarker. Eftersom gruvdrift och hyttverksamhet pågått i området har skogarnas träd nyttjats som konstruktionsvirke till gruvorna och träkol producerats till hyttorna. Ett stort antal kolbottnar går därför att se i naturreservatet. Dessutom reglerades områdets sjöar, och bäckar leddes om i syfte att ge kraft åt gruvornas pump- och hissanordningar.



Figur 2. Naturreservatet och avrinningsområdet Kindlahöjdens läge i Sverige.

I naturreservatet finns det ca 20 ha stora avrinningsområde som har studerats (figur 3). Detta område ingår i *Integrerad miljöövervakning i naturekosystem* (IM). IM har som mål att ”i små väldefinierade avrinningsområden samordna mätningar och utvärderingar så att samhällets behov av detaljerad kunskap och prognoser långsiktigt kan tillgodoses m. a. p. försurning, eutrofiering och metallpåverkan i typiska, svenska skogsekosystem” (Löfgren 2002). Vidare ska IM ”utveckla och tillämpa verktyg, t ex modeller, för kartläggning och prediktion av långtidseffekter” (IM, [www](http://www.im.se)). I Sverige ingår sedan 1994 fyra avrinningsområden, skyddade från aktiv markanvändning, i IM. Området i Kindlahöjden är alltså ett av dessa.

området. Årsmedeltemperaturen är + 4,2°C och den årliga nederbörden ca 900 mm. Markkemin präglas av vattnets snabba och ytliga transportvägar i marken och pH håller sig i utströmningsområden på 4,4 och strax däröver (Löfgren, 2002).



Figur 4. Topografisk kartering av avrinningsområdet i Kindla.

Geologiskt är området beläget inom det så kallade Grängenmassivets granitiska berggrund (Lundström, 1995). Grängengraniten är här grovkornig med strökorn av mikroclin. Moränområdet är stenfattigt. Enligt en studie av Eriksson (2002) utgör stenar endast 5-10% av markvolymen vid provtagning. Markdjupet är över stora delar av avrinningsområdet tunnare än en meter och block är vanligt förekommande i terrängen (Eriksson, 2002).

4.2 Fältmätningar

4.2.1 Allmänt

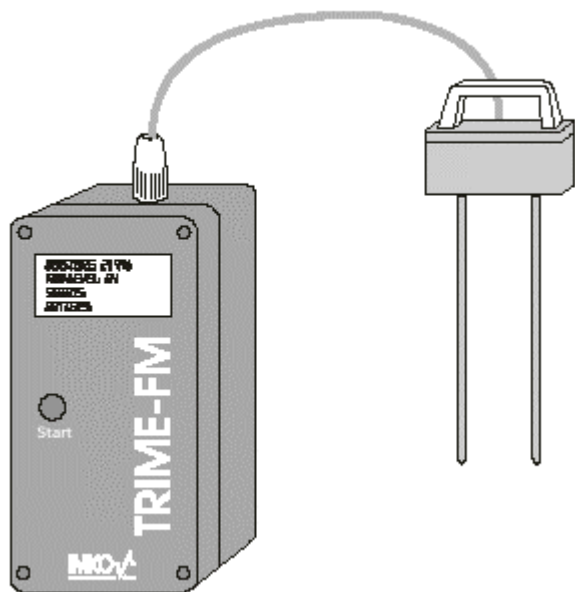
I det 20 ha stora avrinningsområdet fanns redan från början ett antal rör som mätte grundvattennivån i de låglänta delarna kring bäcken, det vill säga i det nordöstra hörnet av kartan i figur 4. Av dessa valdes 13 st ut för att användas vid mätningarna. För att i största möjliga mån täcka in hela området installerades ytterligare 47 rör spritt över de resterande delarna. Dock installerades dessa företrädesvis i blötare partier av terrängen eftersom tidigare studier med liknande försök (Juutilainen, 2003) har visat på problem i att registrera grundvattennivåer på torrare partier, där grundvattennivån finns djupare i marken än vad rören når ner. För att i någon mån kompensera detta förfarande mättes sedan markvattenhalt i markens ytskikt, inte bara kring de installerade och utvalda rören, utan också på ytterligare 9 platser i områdets högläntare partier, företrädesvis inströmningsområden. De senare kring avrinningsområdets utmarkerade koordinater, varför dessa provpunkter framgent kommer att kallas koordinatpunkter. Provpunkterna består följaktligen av 60 grundvattentrör och ytterligare 9 koordinatpunkter. I fält klassificerades 15 provpunkter som inströmningsområden och 54 provpunkter som utströmningsområden. Mätningarna av grundvattennivå och markvattenhalt utfördes 17 juni, 10 juli och 20 augusti 2003. Markprovtagning vid samtliga provplatser genomfördes i samband med mätomgången 10 juli. Dessa markprover jordartsklassificerades och mark-pH bestämdes.

4.2.2 Mätning av djup till grundvattennivå

Mätning av djup till grundvattennivå utfördes 17 juni, 10 juli och 20 augusti 2003. De installerade rören består helt enkelt av ett operforerat plaströr med öppning längst ner, innerdiameter på 10 mm och längd på 100 cm. De installerades med ca 5 cm rör stickandes upp över markytan. Egentligen är alltså dessa rör inga grundvattenståndsrör eftersom de inte är perforerade, utan piezometrar som mäter grundvattnets totalpotential på ca 95 centimeters djup. Skillnaden i totalpotential mot grundvattennivån har antagits vara försumbart liten. Därför har mätningarna av dessa rör antagits visa grundvattennivån. Rören har slagits ned i marken med hjälp av stabiliserande innerstång och slägga. Av de sedan tidigare installerade rören valdes 13 ut efter kriterierna att de skulle vara operforerade, av samma längd som de nyinstallerade samt spridda över området. Den första mätningen av djupet till grundvattennivån utfördes drygt två veckor efter installeringen, då grundvattnet i marken antogs ha ställt sig i jämvikt även inne i de nyinstallerade rören. Mätningen gjordes med en millimetergraderad sensorstav. Av de sammanlagt 60 rören kunde grundvatten registreras i 51 (85%), 50 (83%) samt 30 (50%) för mätningarna 17 juni, 10 juli respektive 20 augusti 2003. För de rör som ej registrerade grundvatten antecknades 100 cm som grundvattendjup.

4.2.3 Mätning av markvattenhalt

Mätning av markvattenhalt i markens ytskikt utfördes 17 juni, 10 juli och 20 augusti 2003 vid alla provpunkter. Vid varje provplats gjordes 3 mätningar av markvattenhalten. Vid stor spridning på mätvärdena vid provplatsen gjordes ytterligare en mätning. Mätningarna genomfördes med ett TDR-instrument av modell IMKO TRIME FM 2, tillverkat i Ettlingen, Tyskland, med 2-stavars känselond (figur 5). Efter borttagning av mossa eller annan markytvegetation trycktes känselondens två 16 cm långa stålstavar ned i två, med preparationsstavar, förtryckta hål i markens ytskikt.



Figur 5. IMKO TRIME FM 2, TDR-instrumentet med tillkopplad känselond som användes till markvattenhaltmätningen. (modifierad efter TRIME, 2001)

TDR-tekniken (Time Domain Reflectometry) utvecklades ursprungligen för kontrollering av elektriska system där den fortfarande används (IMKO, [www](http://www.imko.com)). En spänningspuls skickas från en kabeltestare och den elektromagnetiska vågen fortplantar sig i systemet för att så småningom reflekteras vid kabelslut. Genom att mäta tiden det tar för pulsen att reflekteras kan fel som till exempel kortslutningar detekteras. Vid användning av TDR-teknik för bestämning av volumetrisk vattenhalt i mark mäts den tid det tar från det att en elektromagnetisk spänningspuls lämnar mätinstrumentet, fortplantar sig ner genom känselondens två stålstavar och reflekteras mot marken och tillbaka till mätinstrumentet. Enligt Topp m fl (1980) är den elektromagnetiska spänningspulsens fortplantningshastighet mot marken direkt proportionell mot markens dielektriska konstant. Med den uppmätta reflektionstiden och med kända längder på känselondens stålstavar kan alltså markens dielektriska konstant beräknas.

Genom försök med mineraljordar tog Topp m fl (1980) fram en kalibreringsfunktion som beskrev vattenhalten som en funktion av den dielektriska konstanten. Denna kalibreringsfunktion byggde på mätningar av den dielektriska konstanten och gravimetrisk vattenhaltsbestämning för dessa mineraljordar samt antagandet att mättad mark kan approximeras med den dielektriska konstanten för rent vatten. Det är alltså denna kalibreringsfunktion som finns inprogrammerad i TDR-instrumentet och ger markens vattenhalt. Kalibreringsfunktionen är empiriskt framtagen med mineraljordar och TDR-instrumentet är följaktligen fabrikskalibrerat för att räkna ut vattenhalter i mineraljordar. Detta ger onekligen upphov till en felkälla eftersom mätningarna av markvattenhalt har gjorts i skogsmarkens ytskikt med dess höga humushalt. Dock inriktar sig intresset för markvattenhalt i den här studien främst på relativa och inte absoluta värden.

4.2.4 Markprovtagning och pH-mätning

Markprovtagningen genomfördes den 11-13 juli 2003, och utfördes vid samtliga provpunkter. Markproverna togs upp med metallcylinder av diameter 5 cm och längd 30 cm som kopplades ihop med ett handtag att trycka ned cylindern i marken med. I undantagsfall där alltför blöt eller rottrik mark inte tillät annat togs humuslagret upp med en grövre sågtandad cylinder i plast, medan de djupare horisonterna alltså provtogs med metallcylinder. Upptagna prover klassificerades med avseende på jordart och horisontgränser mättes ut. För varje prov sorterades sedan humusskikt och mineraljordsskikt var för sig. I förekommande fall av torv togs istället för mineraljord, torvjord på 10-20cm djup från markytan. För podsoler sorterades blekjorden bort och rostjordens övre 10cm användes som mineraljordsskikt. På detta sätt gav varje markprov 2 provskikt som direkt i fält förpackades i varsin plastpåse. För provpunkter vid grundvattenrör togs tre markprov, var och en ca en meter från röret. För koordinatpunkter togs fyra markprov i vardera riktningen N, S, V och Ö, samtliga utlokaliserade fem meter från respektive koordinatmarkering. Jordartsklassificeringen gjordes till de fyra typerna: järnpodsol, humuspodsol, sumpjord och torv.

Inför pH-mätningen torkades skiktproverna i ugn med 40°C tills ytterligare viktnedgång var obetydlig. Sedan sållades mineralskiktsprov i 2mm-såll och humusskiktsprov i 4mm-såll. För invägningsmängd av skiktproverna till suspensioner, utgicks från pH-bestämningsmetoden som används vid svensk ståndortskartering (Karlton, www). Alltså vägdes 2,00 g humusjord, resp 5,00 g mineraljord upp i 30ml-flaska som tillsattes destillerat vatten upp till flaskhalsen. Detta ger de ungefärliga utspädningsförhållandena 1:15 för humusjord och 1:5 för mineraljord. Provflaskorna omskakades sedan i maskin med 30 rpm 1h för att sedan sedimentera till klart vatten. Själva pH-mätningarna gjordes sedan med glaselektrod som kalibrerats med pH 4- och pH 7-lösningar. Provsuspensionerna omrördes konstant under pH-mätningen för att uppnå stabila värden. Glaselektroden kalibrerades om vid ca vart 25:e prov för att säkerställa resultatet.

4.3 Topografiska index

Topografiska index kan beräknas med hjälp av digitala höjddata där höjddata är uppdelat i celler för det avrinningsområde man vill studera. Fördelen med topografiska index är att få kvantitativa värden på topografiska former. Dessa värden kan sedan relateras till rumsligt varierande variabler, t ex markvattenhalt och djup till grundvattennivå. Förutom de digitala topografiska indexen har i detta arbete också manuellt mätts upp ett index direkt i fält: Uppströmslutning.

4.3.1 Digitala topografiska index: TWI, uppströmsarea, tan β och DI

Som grund för de digitala topografiska indexen ligger den nygjorda topografiska kartering av avrinningsområdet i Kindla som gjordes i skala 1:5000 med ekvidistansen 5m (figur 4). Denna karta digitaliserades och sedan beräknades höjddataceller om 5x5m respektive 20x20m. Utifrån dessa celler beräknades sedan TWI, uppströmsarea, tan β och DI enligt nedan:

Topographic wetness index (TWI) som utförligt beskrivs i Quinn m fl (1995) används för att förutsäga var torrare och blötare platser finns i terrängen. Indexet beräknas som $\ln(a/\tan\beta)$ där $a = A/L$ (m) är den ackumulerade uppströmsarean A (m²) per breddenhet L (m) av tvärsnittet, och tan β är den lokala lutningen där β är lutningsvinkeln i grader. Ju större ackumulerad

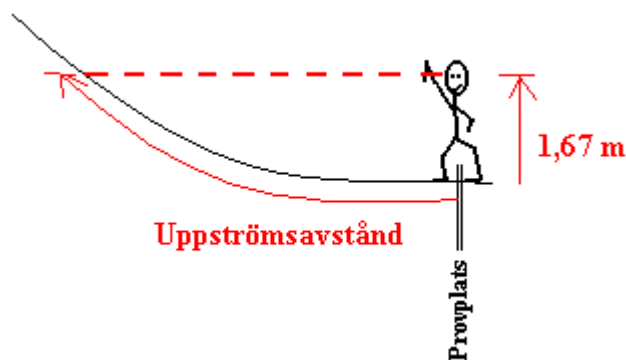
uppströmsarea och ju mindre lokal lutning desto högre TWI-värde och desto blötare (jämför utströmningsområden). Ju mindre ackumulerad uppströmsarea och ju större lokal lutning desto lägre TWI-värde och desto torrare (jämför inströmningsområden). Denna beräkning ger alltså ett TWI-värde för varje enskild cell. Beräkning har också gjorts där ett medelvärde för den aktuella cellen och dess omgivande celler (sammanlagt nio celler) tilldelats den aktuella cellen, vilket gett ett nytt index kallat TWI_{mean} . För att inte t ex en bäck som rinner igenom en cell ska bidra med ett alltför högt, och för cellen ej representativt, TWI-värde lades i algoritmen för beräkningen av TWI in ett tröskelvärde för ytvattenflöde. Detta tröskelvärde sattes till en uppströmsarea på $50\,000\text{m}^2$. En cell kan alltså aldrig få högre uppströmsarea än $50\,000\text{m}^2$; överstigande räknas bort som ytvattenflöde.

Uppströmsarea och $\tan\beta$ används alltså i beräkningen för TWI. Både uppströmsarea och $\tan\beta$ har också använts som egna index för jämförelse mot TWI, DI och Uppströmslutning. På samma sätt som för TWI_{mean} har också $uppströmsarea_{mean}$ och $\tan\beta_{mean}$ beräknats.

Downslope Index (DI) tar hänsyn till nedströmsförhållanden och beräknas som: d/L_d där d är en kvot mellan det vertikala avståndet (d) mellan två punkter och det horisontella avståndet (L_d) mellan dessa punkter. För att kunna jämföra DI mot det i fält uppmätta Uppströmslutning har DI beräknats på samma vertikala höjd som Uppströmslutning, $d = 1,67\text{m}$.

4.3.2 Index uppmätt i fält: Uppströmslutning

I fält mättes en typ av topografiskt index upp manuellt. Vid varje provplats bestämdes den brantaste uppförlutningen. Med hjälp av en optisk pendel siktades sedan in vilken punkt i terrängen uppströms som svarade mot observatörens (=författarens!) ögonhöjd. Genom stegning av uppströmsavståndet, d vs avståndet mellan provplats och denna punkt kunde en kvot mellan den vertikala höjden (=observatörens ögonhöjd= $1,67\text{m}$) och uppströmsavståndet beräknas (figur 6). Denna kvot har kallats för Uppströmslutning och liknar det digitala Downslope Index (DI). Skillnaderna är att DI är beräknat på digitala höjddata och alltså tar hänsyn till lutningsförhållanden i hela cellen där den aktuella provpunkten finns.



Figur 6. Förklarande skiss för Uppströmslutning.

4.4 Statistisk analys

För markvattenhaltsmätningen beräknades ett medianvärde för de 3-4 mätningarna vid varje provplats. På samma sätt beräknades ett medianvärde ut för de 3-4 skiktproven vid pH-mätningen vid varje provplats för humusskikt respektive mineraljordsskikt. Dessa medianvärden har sedan använts som värden för provplatsen.

För att kunna jämföra värden mot varandra och hitta eventuella samband användes Spearmans rangkorrelation. Fördelen med denna metod är att den är ickeparametrisk, det vill säga de variabler av data som jämförs kan vara stickprov från helt olika fördelningar med helt skilda värdeskalor (Sprent 1993). Då två dataserier ska jämföras mot varandra används följande formel för att räkna ut Spearmans rangkorrelationskoefficient (r):

$$r = 1 - \frac{6 \cdot T}{n \cdot (n^2 - 1)}$$

där $T = \sum_i (x_i - y_i)^2$ dvs summan av kvadraterna för differensen i rangnummer, x_i och y_i , för respektive datapar och n är antalet datapar (Sprent, 1993).

Korrelationskoefficienten, r , antar värden mellan -1 och 1 . Vid perfekt matchning kommer r anta värdet -1 eller 1 . Om r antar värden nära noll, finns ingen korrelation mellan de två dataserierna. En negativ korrelation innebär att ju högre värden den ena dataserien antar desto lägre värden antar den andra dataserien. Följaktligen indikerar en positiv korrelation att båda dataserierna antar högre värden i samma riktning.

Som uppskattningen av tillförlitligheten för varje korrelation beräknades också signifikansnivån ut (p-värdet) med hjälp av formeln för värdet på t :

$$t = r \cdot \sqrt{\frac{N - 2}{1 - r^2}}$$

där r = Spearman's rank correlation coefficient och N är antalet datapar. Värdet på t avvägs sedan mot t -fördelning, vilket slutligen ger ett p -värde för den aktuella korrelationen. p -värdet är alltså ett mått på om de två stickproven som korrelationen bygger på är representativa för populationen, eller om den aktuella korrelationen bara är ett resultat av ren slump då korrelationen som finns i stickproven ej finns i populationen. Ju högre p -värde, desto högre sannolikhet att korrelationen beror av slumpen. Ett p -värde på $p = 0,01$ talar om att det finns 1% risk att korrelationen tillkommit av ren slump. I resultatavsnittet beskrivs korrelationer med p -värde mindre än $0,01$ som signifikanta.

4.5 Osäkerheter

Metoderna och mätningarna jag använt mig av medför naturligtvis en del osäkerheter. Rent allmänt måste konstateras att mark, och i synnerhet moränmark, är ett högst heterogent material. Trots detta har ingen hänsyn tagits till eventuella skillnader i marksammansättning på olika platser i avrinningsområdet. Liksom i de flesta studier med TWI har antagits en enhetlig markstruktur över hela avrinningsområdet. Konsekvenserna av detta antagande behandlas ingående i diskussionsavsnittet.

Mätningen av djup till grundvattennivå kan ha påverkats av att stenar och rötter eventuellt har blockerat rören så att grundvattnet ej kunnat stiga till representativa nivåer. Vidare har mikrotopografin kring varje rör medfört att mätningen av hur högt över markytan röret står i många fall blivit en bedömningsfråga. För att i så stor utsträckning som möjligt undvika

osäkerheter i dessa bedömningar har de gjorts om i ett flertal omgångar så att liknande mikrotopografi har behandlats lika.

Vid mätningen av markvattenhalt med TDR-teknik kan flera felkällor ha inverkat. Som beskrivits tidigare är mätinstrumentet fabrikskalibrerat mot mineraljordar vilket kan bidra till för låga vattenhaltsvärden för humusskiktet. Denna kalibrering är också gjord i ett lägre vattenhaltsregister än mätningarna i det här arbetet. Därför måste markvattenhaltsmätningar över 80% betraktas som extra osäkra (Seibert, pers.).

I jordmånstyperna sumpjord och torv kan också för låga värden ha uppmätts eftersom dessa jordmånstyper har lägre densitet än vad mineraljord har. Lägre densitet innebär större porvolym som kan vara luftfylld och luft har mycket låg dielektrisk konstant, vilket ger lägre markvattenhalter (IMKO, www). På samma sätt kommer stora luftfyllda porer i marken och lufthål precis kring känselondens stålstavar bidra till alltför låga värden. Därför kan också installation med hjälp av preparationsstavar, återinstallation i gamla hål och för dåligt nedtryckt känselond bidra till för låga värden. Det tidigare har varit oundvikligt för att inte trycka sönder känselonden mot stenar, men de två senare har undvikits i största möjliga utsträckning.

5. RESULTAT

Upplägget i denna del av arbetet kommer att vara följande: Först presenteras en allmän resultatbeskrivning där medelvärden av mätningar och beräkningar kommenteras. Det statistiskt korrelerade resultatet har delats upp i tre delar: *Observerade data*, *Topografiska index* och *Topografiska index beskriver observerade data*. I *Observerade data* jämförs de i fält uppmätta parametrarna mot varandra. I *Topografiska index* jämförs de digitala indexen mot varandra och mot det i fält uppmätta Uppströmslutning. Det sista avsnittet tar upp kärnfrågan med hela arbetet: Kan de topografiska indexen beskriva markens uppmätta fuktförhållanden?

Mätningen av grundvattennivå skedde enbart vid 60 provplatser. Därtill kunde inte mätning av grundvattennivå och markvattenhalt samt upptagning av markprover genomföras vid exakt alla provplatser. Därför finns saknade data som bidrar till att antalet observationer varierar beroende på vilka parametrar som ingår i de olika korrelationerna som redovisas.

5.1 Allmänt

Till grund för den beskrivning som kommer nedan ligger Tabell 1: *Medelvärden för observerade data* och Tabell 2: *Medelvärden för topografiska index*. Dessa tabeller återfinns på nästkommande två sidor.

I de båda tabellerna har alltså medelvärden beräknats för alla 69 provplatser. Medelvärden har också beräknats för indelningen i in- och utströmningsområden, samt för indelningen i jordartstyper. För gruppen ”Alla provplatser” kan konstateras att grundvattennivån ligger på ungefär samma djup i juni och juli men att den sjunker avsevärt (ca 30cm) i augusti. På samma sätt förhåller det sig med markvattenhalten, som efter ungefär lika höga värden i juni och juli sjunker betydligt (ca 10 procentenheter) i augusti. Markproven från markens humusskikt gav generellt något lägre pH-värden än för markproven från mineraljorden. TWI ger lägre värden beräknat på höjddata med 5m-upplösning (5x5m-celler) än på höjddata med 20m-upplösning (20x20m-celler). Standardavvikelseerna visar att spridningen är stor för såväl observerade data som för de topografiska indexen.

Inströmningsområdena domineras av de två typerna av podsoler, vilket också avspeglas i medelvärdena: Inströmningsområdena har liksom podsolerna ett relativt stort djup till grundvattennivån, låg markvattenhalt och låga pH-värden. Utströmningsområdena domineras av torv- och framför allt sumpjordar, trots enstaka podsoler. De har jämfört med inströmningsområdena grundare djup till grundvattennivån, högre markvattenhalt och högre pH-värden. Också TWI-värdena ger utströmningsområdena högre värden än inströmningsområdena och beskriver på så sätt utströmningsområdena som blötare.

Tabell 1: Medelvärden för observerade data

Grupp	Antal ²	Djup till grundvattennivå (cm) ¹				Markvattenhalt (%)				Humusskikt s.a.	pH	Mineraljord s.a.					
		m.v.	juni s.a.	m.v.	juli s.a.	m.v.	aug s.a.	m.v.	juni s.a.				m.v.	juli s.a.	m.v.	aug s.a.	
Alla Provyplatser	69	40	29	38	31	70	33	58	31	53	29	45	26	4,40	0,40	4,61	0,24
Utströmn.omr	54	36	26	34	28	66	33	65	29	61	29	51	25	4,50	0,38	4,65	0,24
Instömn.omr.	15	72	37	73	35	100	0	27	16	27	10	21	10	4,05	0,21	4,50	0,18
Humuspodsoler	14	70	33	66	37	95	13	31	25	31	19	22	12	4,01	0,29	4,55	0,20
Järnpodsoler	8	87	21	92	19	100	0	24	4	23	6	20	6	3,99	0,24	4,54	0,10
Summjordar	37	31	18	30	18	71	29	63	23	58	24	45	15	4,58	0,32	4,5	0,24
Torv	10	17	15	13	8	21	12	100	0	93	13	91	11	4,61	0,25	4,62	0,36

1) Där djupet till grundvattennivån varit för djupt för att kunna mätas har djupet satts till 100 cm.

2) Observera att det endast vid 60 av provplatserna mätts grundvattendjup och att ytterligare missade data gör att antalet för varje grupp varierar med vilken parameter som mätts upp och alltså inte alltid överensstämmer med antalet givet för gruppen.

m.v.=medelvärde

s.a.=standardavvikelse

Tabell 2: Medelvärden för topografiska index

Grupp	Antal m.v.	TWI		Upslope area		tan b		DI		Uppströms- lutning									
		5 m	20 m	5 m	20 m	5 m	20 m	5 m	20 m	5 m	20 m								
Alla Provsplatser	69	7,77	2,67	8,42	2,08	6980	12700	15900	18300	0,20	0,14	0,17	0,10	0,19	0,14	0,17	0,10	0,22	0,13
Uströmn.omr	54	8,02	2,85	8,93	2,01	8660	13900	19800	18900	0,20	0,15	0,16	0,10	0,19	0,15	0,15	0,10	0,19	0,08
Inströmn.omr.	15	6,85	1,68	6,58	1,02	942	1110	1840	1180	0,21	0,08	0,22	0,08	0,19	0,08	0,22	0,08	0,32	0,20
Humuspodsoler	14	6,72	1,70	7,13	1,75	930	1130	7160	13200	0,24	0,15	0,22	0,09	0,22	0,15	0,22	0,09	0,30	0,20
Järnpodsoler	8	6,12	1,92	7,04	1,63	532	589	7960	17000	0,27	0,11	0,25	0,10	0,26	0,10	0,24	0,10	0,32	0,10
Summjordar	37	8,55	2,85	9,00	1,86	10400	14200	19300	18600	0,18	0,14	0,16	0,10	0,18	0,14	0,15	0,10	0,19	0,08
Torv	10	7,63	2,81	9,20	2,47	7890	16600	21900	20200	0,16	0,12	0,10	0,06	0,16	0,13	0,10	0,06	0,13	0,03

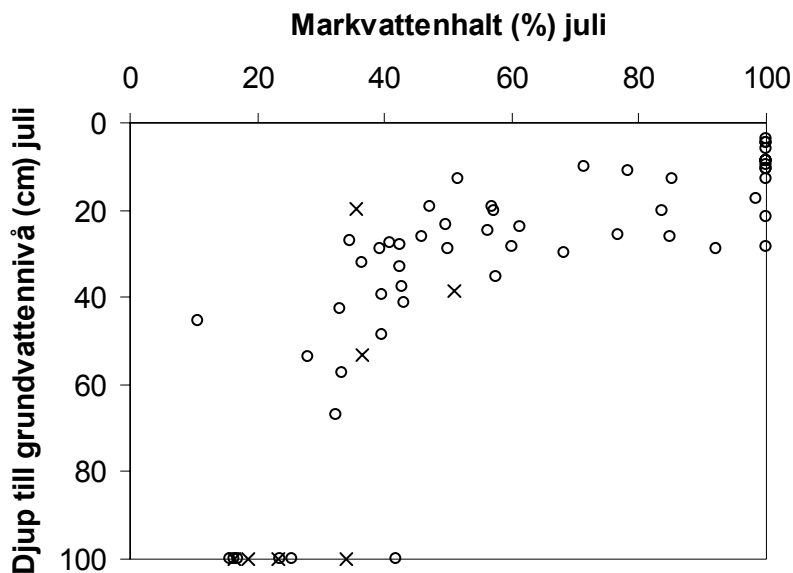
m.v.=medelvärde

s.a.=standardavvikelse

5.2 Korrelationer

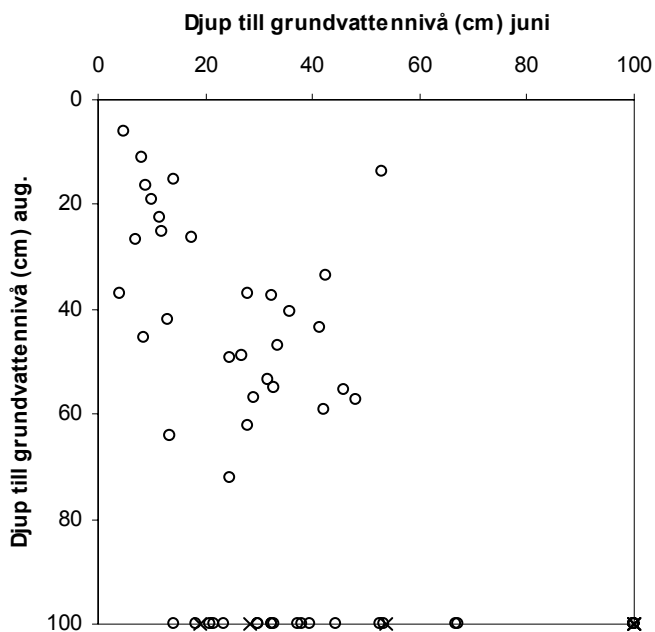
5.2.1 Observerade data

Det första som kunde konstateras bland de uppmätta parametrarna är att markvattenhalten sjönk med ökande djup till grundvattennivån. Starkast är detta samband i juli ($r=-0,85$; $p<0,0001$; $n=60$; figur 7). Sambandet är nästan lika starkt i juni ($r=-0,83$; $p<0,0001$; $n=60$) och starkt även i augusti ($r=-0,74$; $p<0,0001$; $n=59$).



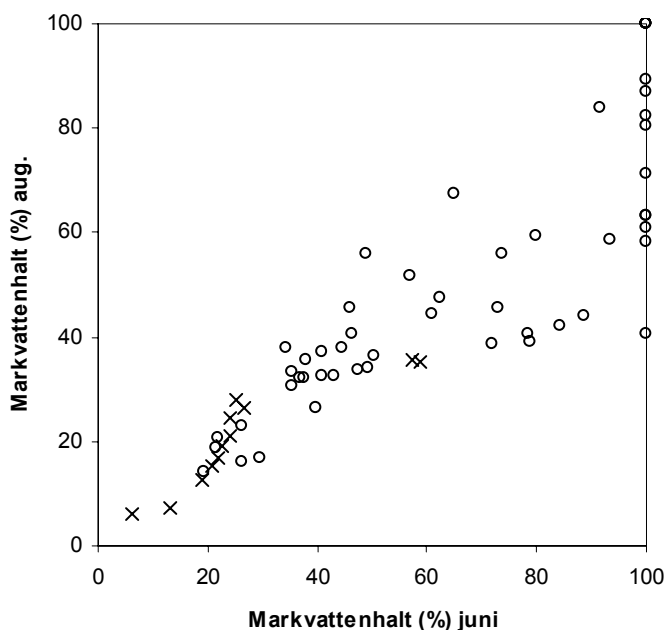
Figur 7. Samband mellan djup till grundvattennivå och markvattenhalt i juli ($r=-0,85$; $p<0,0001$; $n=60$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

Samband mellan mättillfällena av djup till grundvattennivå visade att nivåerna var på samma nivåer och hade samma rumsliga mönster i juni och juli ($r=0,94$; $p<0,0001$; $n=60$). Samma klara samband för det rumsliga mönstret fanns inte mellan juni och augusti ($r=0,57$; $p<0,0001$; $n=60$; figur 8) eller juli och augusti ($r=0,59$; $p<0,0001$; $n=60$).



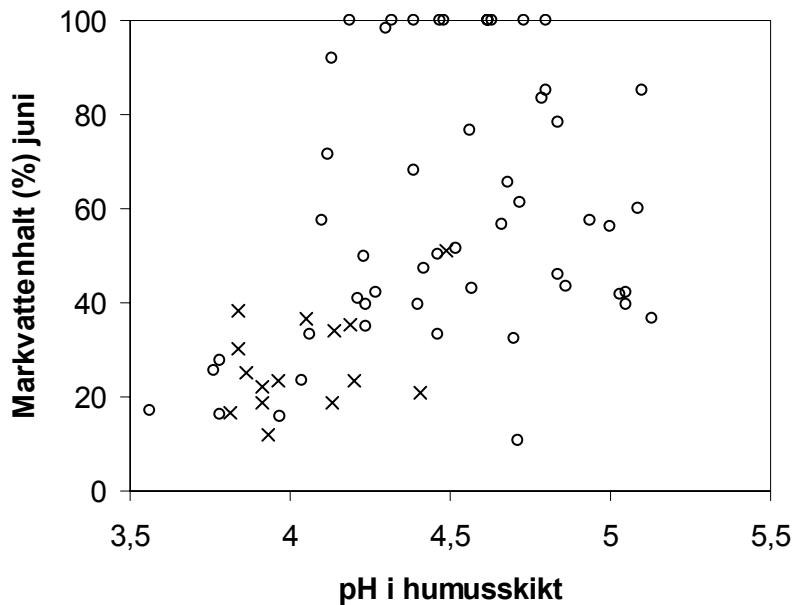
Figur 8. Samband mellan djup till grundvattennivå i juni och djup till grundvattennivå i augusti ($r=0,57$; $p<0,0001$; $n=60$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

För markvattenhaltarna var det rumsliga mönstret klarare. Här blev korrelationerna mellan mätillfällena: juni och juli ($r=0,94$; $p<0,0001$; $n=65$), juni och augusti ($r=0,93$; $p<0,0001$; $n=64$; figur 9) och juli och augusti ($r=0,92$; $p<0,0001$; $n=68$).

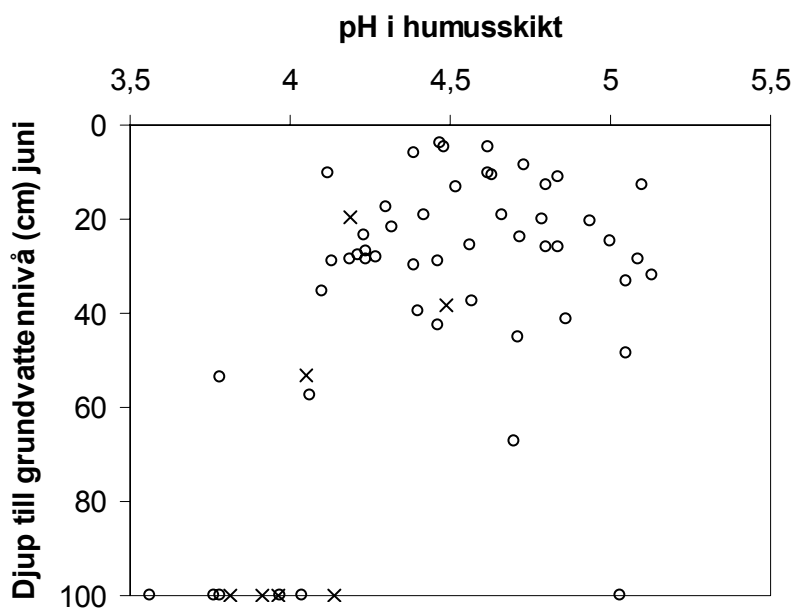


Figur 9. Samband mellan markvattenhalt i juni och markvattenhalt i augusti ($r=0,93$; $p<0,0001$; $n=64$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

Humusskiktets pH-värde ökade med ökande markvattenhalt, för markvattenhalt mätt i juni ($r=0,54$; $p<0,0001$; $n=63$; figur 10) och sjönk med ökande grundvattendjup, för grundvattendjup mätt i juni ($r=-0,48$; $p<0,0001$; $n=58$; figur 11). För enbart humuspodsoler blev korrelationen pH i humusskikt mot grundvattendjup mätt i juli mycket stark ($r=-0,91$; $p=0,0015$; $n=8$). För mineraljordens pH gick det inte att hitta något signifikant samband mot grundvattendjup eller markvattenhalt ens för någon enstaka jordartsgrupp.



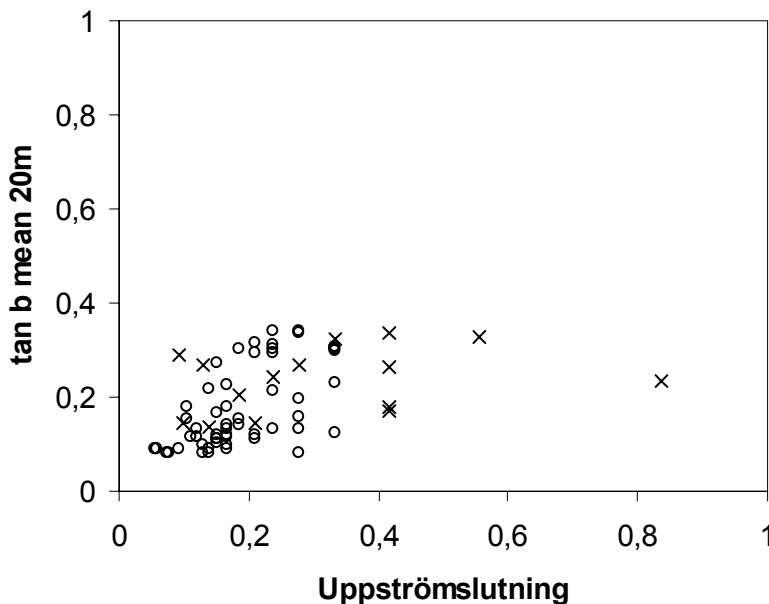
Figur 10. Samband mellan pH i humusskikt och markvattenhalt i juni ($r=0,54$; $p<0,0001$; $n=63$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.



Figur 11. Samband mellan pH i humusskikt och djup till grundvattennivå i juni ($r=-0,48$; $p<0,0001$; $n=58$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

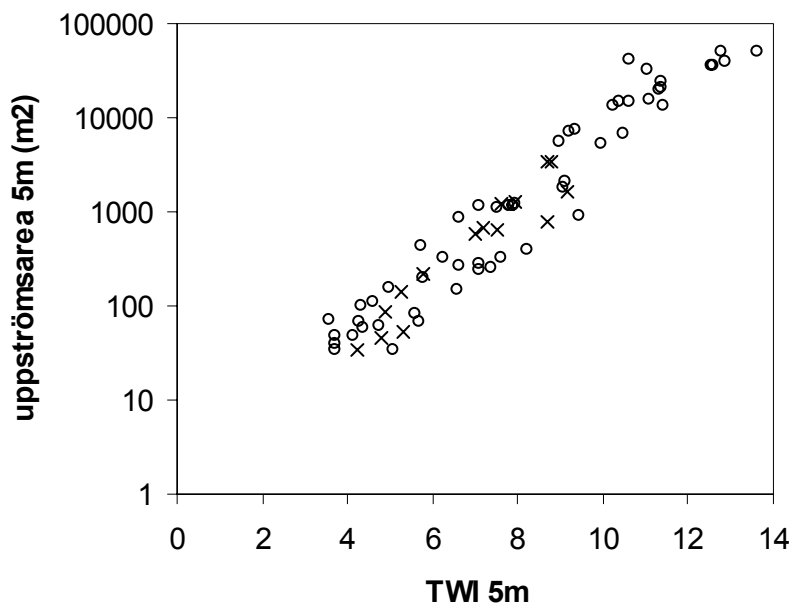
5.2.2 Topografiska index

Både $\tan\beta$ och DI korrelerade bäst mot det i fält uppmätta Uppströmslutning då de var beräknade med 20m-upplösning och allra bäst som $\tan\beta_{\text{mean}}$ och DI_{mean} . Med 20m-upplösning fick provplatserna närmast identiska värden med $\tan\beta_{\text{mean}}$ och DI_{mean} . Följaktligen blev korrelationerna lika mot Uppströmslutning ($r=0,60$; $p<0,0001$; $n=69$; figur 12) och i figur 12 redovisas $\tan\beta_{\text{mean}}$. För uppströmsarea, uppströmsarea_{mean}, TWI och TWI_{mean} fanns inga eller mycket svaga korrelationer mot Uppströmslutning. Som man kan se i figur 12 korrelerade både $\tan\beta_{\text{mean}}$ och DI_{mean} mycket sämre mot Uppströmslutning för de 15 provplatserna i inströmningsområdena ($r=0,26$ resp. $r=0,31$) än för alla provplatser.



Figur 12. Samband mellan Uppströmslutning och $\tan\beta_{\text{mean}}$ ($r=0,60$; $p<0,0001$; $n=69$). Motsvarande mönster gäller för sambandet mellan Uppströmslutning och DI_{mean} . Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

Sambandet mellan TWI och uppströmsarea (båda beräknade med 5m-upplösning) visade sig vara mycket starkt ($r=0,96$; $p<0,0001$; $n=69$; figur 13) men förväntat eftersom TWI byggs upp delvis av uppströmsarea. För TWI gentemot $\tan\beta$ respektive DI uppnåddes inte lika starka samband med 5m-upplösning ($r=-0,46$ resp $r=-0,56$) men sambanden blev betydligt starkare med 20m-upplösning ($r=-0,75$ resp. $r=-0,74$).

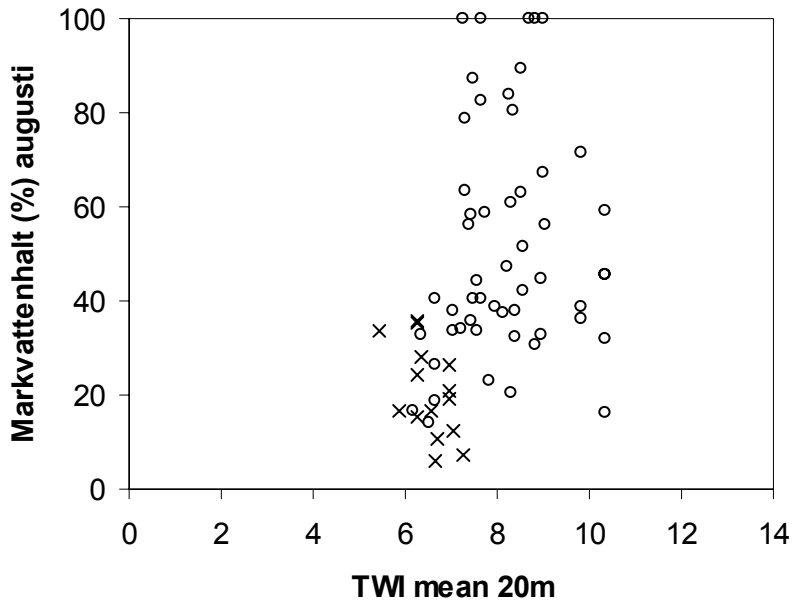


Figur 13. Samband mellan TWI och dess beståndsdel uppströmsarea med 5m-upplösning ($r=0,96$; $p<0,0001$; $n=69$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

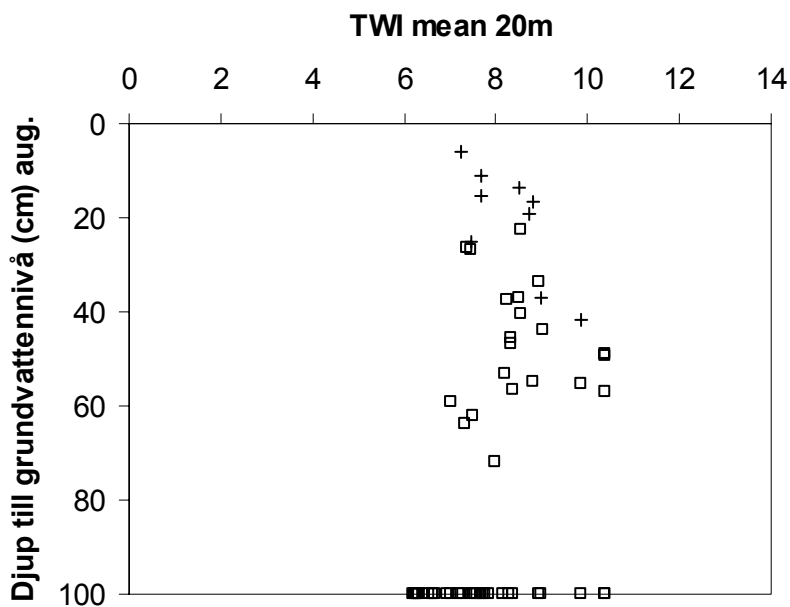
5.2.3 Topografiska index beskriver observerade data

Med 5m-upplösning fanns inga signifikanta samband mellan TWI eller TWI_{mean} och markvattenhalten vid något mätillfälle. Med 20m-upplösning fanns signifikanta samband, det starkaste mellan TWI_{mean} och markvattenhalten mätt i augusti ($r=0,50$; $p<0,0001$; $n=68$; figur 14). Dock råder för samma mätillfälle också ett motsatt samband med negativ korrelationskoefficient för enbart inströmningsområdena ($r=-0,55$; $p=0,0349$; $n=15$; figur 14), vilket syns tydligt i figuren.

Inte heller fanns det några signifikanta samband mellan TWI eller TWI_{mean} och grundvattendjupet med 5m-upplösning. Med 20m-upplösning fanns det signifikant samband endast för grundvattennivåmätningen i augusti, starkast för TWI_{mean} ($r=-0,38$; $p=0,0026$; $n=59$; figur 15). Också här fanns det dock ett motsatt samband med positiv korrelationskoefficient för enbart torvmark ($r=0,70$; $p=0,0347$; $n=9$; figur 15) vilket även här syns tydligt i figuren.

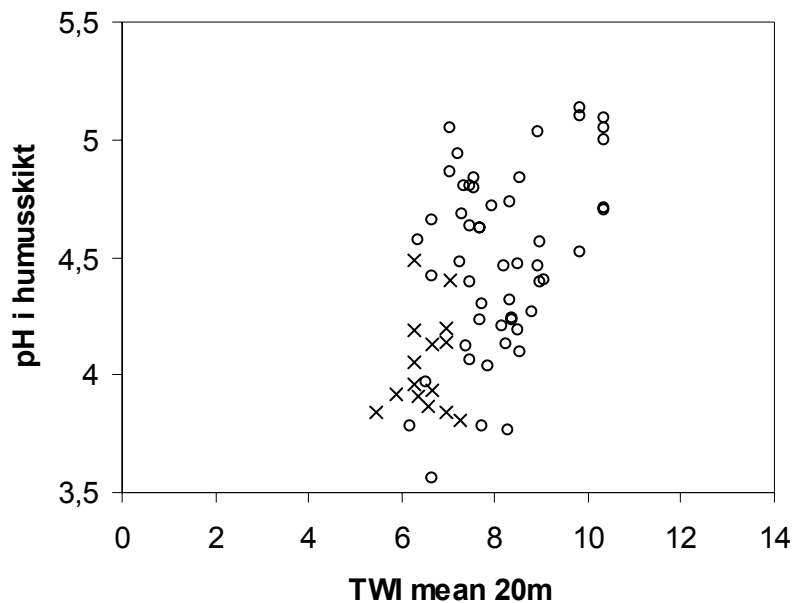


Figur 14. För alla provplatser ökade markvattenhalten i augusti med ökande $TWI_{mean\ 20m}$ ($r=0,50$; $p<0,0001$; $n=68$), men för enbart inströmningsområden minskade istället markvattenhalten i augusti med ökande $TWI_{mean\ 20m}$ ($r=-0,55$; $p=0,0349$; $n=15$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.



Figur 15. För alla provplatser minskade grundvattendjupet med ökande $TWI_{mean\ 20m}$ ($r=-0,38$; $p=0,0026$; $n=59$), men för enbart torvmark ökade istället grundvattendjupet med ökande $TWI_{mean\ 20m}$ ($r=0,70$; $p=0,0347$; $n=9$). Plus anger torvmark och fyrkanter anger övriga jordarter.

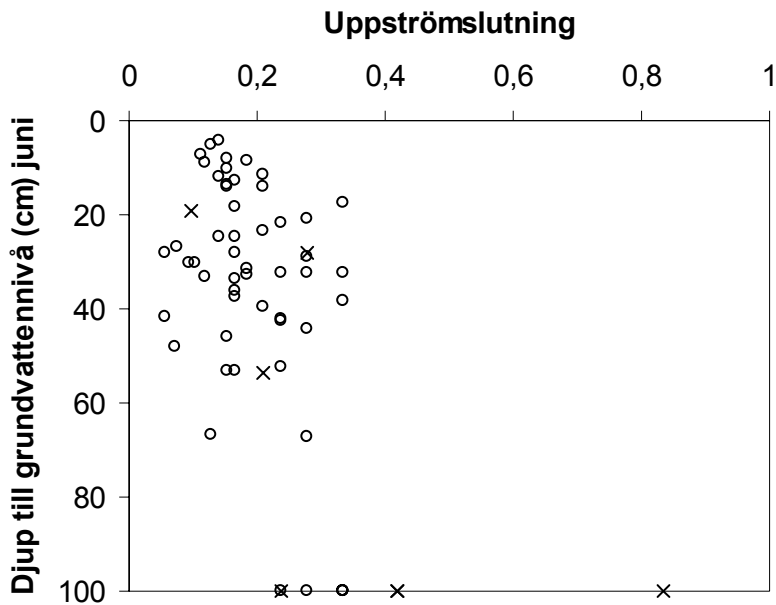
TWI_{mean} korrelerar också någorlunda mot pH. Mot pH i humusskiktet bäst med 20m-upplösning ($r=0,48$; $p<0,0001$; $n=67$; figur 16) och mot pH i mineraljord bäst med 5m-upplösning ($r=0,45$; $p=0,0001$; $n=67$).



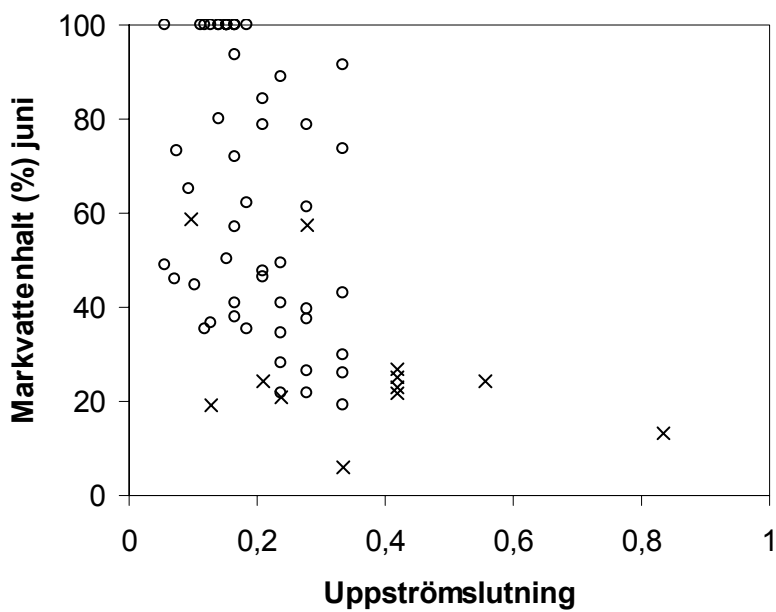
Figur 16. Samband mellan TWI_{mean} 20m och pH i humusskiktet ($r=0,48$; $p<0,0001$; $n=67$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

Det visade sig att $\tan\beta_{mean}$ 20m och DI_{mean} 20m båda korrelerade mot grundvattendjup med ($r=0,40$; $p=0,0015$; $n=59$) vilket är något bättre än sambandet TWI_{mean} 20m mot grundvattendjup. Av DI och $\tan\beta$ var det $\tan\beta$ som korrelerade bäst mot markvattenhalt, allra bäst i augusti ($r=-0,48$; $p<0,0001$; $n=59$). Bästa sambanden mot pH, förutom de redan nämnda med TWI_{mean} , uppnåddes av uppströmsarea; uppströmsarea mot pH i humusskikt ($r=0,46$; $p=0,0001$; $n=67$) uppströmsarea mot pH i mineraljord ($r=0,37$; $p=0,0019$; $n=67$).

Det i fält uppmätta Uppströmslutning får i motsats till de andra topografiska indexen höga värden i korrelationer mot samtliga mättillfällen av grundvattendjup och markvattenhalt. Som exempel kan nämnas sambanden i juni: Uppströmslutning mot grundvattendjup ($r=0,47$; $p=0,0002$; $n=65$; figur 17) och Uppströmslutning mot markvattenhalt ($r=-0,55$; $p<0,0001$; $n=65$; figur 18).



Figur 17. Samband mellan Upströmslutning och djup till grundvattennivå mätt i juni ($r=0,47$; $p=0,0002$; $n=65$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.



Figur 18. Samband mellan Upströmslutning och markvattenhalt mätt i juni ($r=-0,55$; $p<0,0001$; $n=65$). Kryss anger inströmningsområden och ringar anger utströmningsområden.

6. DISKUSSION

6.1 Allmänt

För alla provplatser uppmättes grundvattennivåerna till ungefär samma djup i juni och juli. Markvattenhalterna mättes också till ungefär samma värden i juni och juli. Att djupet till grundvattennivåerna ökade och markvattenhalterna sjönk i augusti berodde på markens upptorkande efter mycket regn i juni och början av juli, men betydligt varmare och torrare väder för o m mitten av juli och framåt.

Det faktum att inströmningsområdena som grupp betraktat har större djup till grundvattennivån och lägre markvattenhalt än utströmningsområdena är inte överraskande. Vid klassningen av in- och utströmningsområden har ju förutom topografien utgått från just dessa kriterier. Vad som är mer intressant är att inströmningsområdena starkt domineras av järn- och humuspodsoler. Podsolerna är ju jordmåner som bara kan utvecklas i marker med i huvudsak dränerande, nedåtgående vattenrörelse genom markens övre skikt (Grip & Rodhe, 1988). På samma sätt består utströmningsområdena företrädesvis av sump- och torvjordar. Dessa är jordarter som utvecklas på platser i skogslandskapet med mycket vatten och uppåtgående vattenrörelse. Även TWI skiljer sig åt mellan in- och utströmningsområden, då utströmningsområdena får högre värden. Klassificeringen av in- och utströmningsområden verkar alltså vara riktig och på ett generellt plan beskriver topografien (i form av TWI) var in- och utströmningsområdena finns i avrinningsområdet.

Antagandet att grundvattnet finns ytligt i moränlandskapet, som beskrivs i bakgrundsavsnittet, verkar också riktigt eftersom mätning av grundvattnet har kunnat göras i så många av grundvattenrören. Även om inte ett representativt antal inströmningsområden funnits med i studien, har tidigare studier (Eriksson, 2002) visat på generellt låg markmäktighet ovan berggrunden. Därför får grundvattennivåerna anses ytliga och grundvattenströmmarna i huvudsak följa topografien.

6.2 Observerade data

För alla tre mättillfällena fanns starka och signifikanta samband som visade att markvattenhalten sjönk med ökande djup till grundvattennivån. Antagandet att markvattenhalten i hög grad påverkas av djupet till grundvattennivån styrks alltså av dessa mätningar.

För det rumsliga mönstret i fuktighet visar markvattenhalterna att samma mönster tycks gälla oavsett hur blöt marken är. Eftersom sambanden är starka även mellan den blötare juni-mätningen och den torrare augustimätningen antyder markvattenhaltsmätningarna att avrinningen genom markerna verkar ta samma vägar, även om markvattenhalterna generellt är lägre i augusti. Svårare är det att analysera resultatet från mätningarna av djupet till grundvattennivån. Även om det finns indikationer på ett liknande avrinningsmönster för blötare och torrare mättillfällen även här, finns det också provplatser som i juni hade grunt djup till grundvattennivån, och som i augusti ej kunde mätas alls. Kanske hade sambanden blivit bättre om grundvattennivåmätningen hade kunnat göras till ett större djup.

För pH-värden i humusskiktet angav mätningarna i juni att pH blev högre ju blötare marken var. Sambanden mot markvattenhalt och djup till grundvattennivå är signifikanta, men inte så starka. Motsvarande skillnad i humusskiktets pH kan utläsas av bilaga 1 där de blötare utströmningsområdena fick högre pH-värden än de torrare inströmningsområdena. Eftersom buffertförmågan är mycket låg i avrinningsområdet (Löfgren, 2002) har inte något större

utbyte mellan baskatjoner och vätejoner kunnat ske. Det som kan förklara de något högre pH-värdena i de blötare utströmningsområdena är upptag och avgivande av koldioxid. Vid inströmningsområdena ökar halten av koldioxid på grund av rotandningen och koldioxid löser sig i markvattnet till kolsyra som gör markvattnet surt och därigenom marken sur. Då transportvägarna i avrinningsområdet är ytliga och snabba (Löfgren, 2002) och berggrunden är granitisk (Lundström, 1995) kan ingen egentlig vittring ske som konsumerar vätejonerna. Först när vattnet, via grundvattnet, når utströmningsområdena kommer den lösta koldioxiden ställa sig i jämvikt med atmosfärens koldioxidhalt, vilket resulterar i drastiskt minskad koldioxidhalt i markvattnet då koldioxid avgår till atmosfären. Därigenom blir det också mindre kolsyra, och följaktligen något högre pH-värde i markvattnet och i markens humusskikt i utströmningsområdena.

Att inga signifikanta samband finns mellan markfuktighet och pH i mineraljorden ska inte fästas för stor uppmärksamhet vid. Eftersom det vid till exempel torvjordar ej funnits någon mineraljord har, som beskrivits i 4.2.4 *Markprovtagning och pH-mätning*, då tagits torvjord på motsvarande djup. På detta sätt är mineraljorden inte något enhetligt material, vilket kan förklara att inga samband har hittats.

6.3 Topografiska index

Eftersom Uppströmslutning är uppmätt i fält står detta index självständigt mot de digitalt framtagna och är därför ett bra mått på hur väl de digitala indexen beskriver topografien. Trots att Uppströmslutning beskriver lutningen precis uppströms provplatsen, fås bäst överensstämmelse mot $\tan\beta_{\text{mean}}$ och DI_{mean} med 20m-upplösning, som är beräknad medellutning för ett relativt stort område (3600m^2). De signifikanta sambanden är i alla fall starka och det spelar ingen roll om man använder sig av $\tan\beta_{\text{mean}}$ eller DI_{mean} . De digitala lutningsindexen förefaller kunna beskriva topografien väl i avrinningsområdet med undantag för inströmningsområdena. I dessa, ofta högt belägna områden, där lutningen har störst betydelse för markens fuktighet (eftersom det är brant och den ackumulerade tillrinningsarean är liten), överensstämmer de digitala lutningsindexen dåligt med Uppströmslutning. Detta beror naturligtvis på att den lokala lutningen vid provplatsen ej kan beskrivas väl med en medellutning över ett så stort område. Längdskalan för topografiändringar i landskapet vid inströmningsområdena ligger betydligt lägre än inom 9 celler á $20\times 20\text{m}$. Förmodligen hade sambanden här sett annorlunda ut om fler provplatser i studien varit inströmningsområden.

Anledningen till att överensstämmelserna generellt blir bäst med 20m-upplösning och medelvärden kan ha att göra med svårigheten i att pricka in provplatserna med korrekta koordinater gentemot höjddata. Den nygjorda topografiska karteringen av avrinningsområdet (figur 3) som TWI-beräkningarna bygger på beskriver landskapet mycket bättre och på en noggrannare nivå än tidigare karteringar. Trots höjddata med 5m ekvidistans kan inte de digitala topografiska indexen beskriva topografien bättre. Problemet beror förmodligen främst på att koordinatmarkeringarna som finns i fält ej haft tillförlitliga kartkoordinater. Då koordinatmarkeringarna i fält använts som referenspunkter vid inmätningen av provplatserna, medför naturligtvis koordinatmarkeringarnas otillförlitlighet även till osäkerhet i provplatsernas koordinater gentemot höjddata. Dessutom gjordes inmätningen av provplatserna med hjälp av stegning och kompass, ett förfarande som, trots flertalet ommätningar mot referenspunkterna, i sig troligen också har bidragit till ytterligare osäkerhet. Allt detta medverkar alltså till provplatsernas osäkra koordinatbestämning gentemot höjddata och kan förklara varför $\tan\beta$ och DI och också uppströmsarea stämmer så dåligt mot topografien (i form av Uppströmslutning) med 5m-upplösning. Observerade data kan helt enkelt ha hamnat i fel celler. Det som ofta lyfts fram som problem för försök med TWI, där ju

tan β och uppströmsarea ingår, är alltför stora höjddataceller, vilket också har framförts i denna diskussion. Intressant här är dock att höjddatacellerna verkar kunna ge problem också när de är för små (5x5m). Att detta problem är högst påtagligt i detta arbete talar det faktum att samtliga samband då TWI beskriver observerade data, blivit bäst med TWI_{mean} 20m.

Sambanden TWI mot uppströmsarea respektive TWI mot de digitala lutningsindexen, visar att TWI i större utsträckning styrs av uppströmsarean än lutningen. Eftersom indexet uppströmsarea korrelerar mycket dåligt mot Uppströmslutning är det därför naturligt att också TWI gör det.

6.4 Topografiska index beskriver observerade data

Vid jämförelserna av TWI mot observerade data kan först konstateras att ett signifikant samband finns mellan TWI_{mean} 20m och markvattenhalten mätt i augusti. Visserligen är sambandet ungefär lika starkt som motsvarande samband för Juutilainen (2003) men bara för mätillfället i augusti. För markvattenhaltsmätningarna i juni och juli är sambanden betydligt sämre. Högre värde på TWI ger dock högre markvattenhalt, men det är långt ifrån ett tydligt samband. För enbart gruppen inströmningsområden gäller en starkare, om än ej signifikant, motsatt trend. Som diskuterats i avsnittet om topografiska index beror denna motsatta trend förmodligen på att tan β , som ju finns inbakat i TWI, ej kan beskriva topografin i inströmningsområdena med medellutning över så stort område.

En annan tänkbar orsak till att sambandet mellan TWI_{mean} 20m och markvattenhalten var så tvetydigt skulle kunna vara det som Grayson m fl (1997) kom fram till i avrinningsområden i Australien. Nämligen att markvattenhalten sommartid, när marken är torrare, snarare påverkas av lokala variationer i marklutning, markstruktur och evapotranspiration, än storskaliga grundvattenflöden. Dock är det ju just i augusti, när marken är torrast av de tre mätillfällena, som sambandet ändå är som starkast. Trots detta visar erfarenheter från fält på att markvattenhalten i stor utsträckning ändå påverkas av de lokala förhållandena. Vid själva fältmätningarna varierade marksammansättning och markvegetation mycket. Vid vissa provplatser kunde det finnas riktigt blöta partier där vitmossa växte på sumpjord bara några decimetrar från torra, markvegetationsfria partier av podsoljord. Vid sådana provplatser kunde markvattenhalterna variera mellan 40% till uppemot 100%. Vanligt var annars att markvattenhalterna varierade 10-20 procentenheter vid varje provplats trots att mätningarna utfördes inom en radie av en knapp meter.

Alltså verkar de lokala förhållandena kunna påverka markvattenhalten. Detta tar TWI-beräkningen inte någon hänsyn till. Därför skulle man kunna tänka sig att, precis som Townsend och Walsh (1996) gjorde i sin studie, ta jordartsspecifika konduktiviteter och markdjup med i TWI-beräkningen. I motsats till marken i den amerikanska studien har dock moränmarken i Kindla låg mäktighet och låg lerhalt. Det är två av anledningarna till att jordarterna i Kindla varierar kraftigt även i en mikroskala, t ex vid provplatserna. Denna jordartsvariation anser jag är omöjlig att täcka in med en mängd fältarbete som står i proportion till syftet med TWI som ju är att helt utan, eller utan större mängd, fältarbete ändå kunna förutsäga markens fuktighet.

Trots att det i augusti bara gått att mäta grundvattennivåer vid hälften av grundvattenrören är det då överensstämmelsen mot TWI är bäst. Sambandet mellan TWI_{mean} 20m och djupet till grundvattennivån i augusti är visserligen signifikant, men svagt. För mätillfällena i juni och juli finns inga signifikanta samband alls. Högre TWI-värden gav dock som förväntat grundare grundvattennivå. Vid de nio torvmarkerna, som alla finns i utströmningsområden, har grundvattennivåerna kunnat mätas, men här är sambandet det motsatta. Även sambandet

mellan TWI_{mean} 20m och djupet till grundvattennivån var alltså tvetydigt. Att just torvjordarna visade på motsatt trend skulle kunna ha sin förklaring i att vissa torvjordar skulle kunna ha mäktigare och mer genomsläppliga marklager än andra torvjordar och övriga provplatser. Med ökat markdjup mellan markyta och berggrund kommer grundvattennivån, relativt markytan, därför att befinna sig djupare i marken. Att sambanden mellan TWI_{mean} 20m och djupet till grundvattennivån i övrigt var så svaga, särskilt för mättillfällena i juni och juli, kan förklaras med tidigare diskuterade faktorer: problem med topografibeskrivning i alltför stora eller små celler, inverkan av variationer i jordart och marksammansättning, samt påverkan av lokala faktorer som marklutning och evapotranspiration.

Att TWI_{mean} 20m kan förutsäga pH i humusskiktet är kanske inte så konstigt. Enligt diskussionen tidigare i avsnittet om observerade data förklarar upptag och avgivande av CO_2 de högre pH-värdena i blötare områden, och TWI kan ju någorlunda förutsäga markvattenhalterna, åtminstone för utströmningsområdena. Mer förvånande är det faktum att TWI_{mean} 5m överhuvudtaget korrelerar mot pH i mineraljord eftersom det inte finns några signifikanta samband mellan pH i mineraljorden och markvattenhalt respektive djup till grundvattennivån.

Det faktum att det i fält uppmätta indexet Uppströmslutning fick så pass bra överensstämmelse mot samtliga mättillfällen av markvattenhalt och djup till grundvattennivå var överraskande. Uppströmslutning som mättes upp som ett redskap för att kontrollera hur väl de topografiska lutningsindexen beskrev topografien, blev i sig ett bra index. Som diskuterats tidigare tar Grayson m fl (1997) upp lokala variationer i bl a marklutning som en viktig faktor för markvattenhalten. Dessutom verkar TWI inte kunna beskriva just lutningen särskilt väl, särskilt inte i inströmningsområdena. Därför kan ett direkt i fält uppmätt index som Uppströmslutning vara ett intressant alternativ eller komplement till TWI. Som alternativ till TWI skulle alltså inga detaljerade höjddata eller beräkningar behövas, enbart fältmätningar. Eftersom Uppströmslutning ju är platsspecifik lutning ute i terrängen, är det svårt att veta hur tätt det skulle krävas att dessa mätningar gjordes för att på ett bra sätt representera ett helt avrinningsområde. Som komplement till TWI skulle man kunna tänka sig att byta ut tan β mot Uppströmslutning och på så sätt kombinera digitala höjddata och fältmätningar av marklutning i ett gemensamt index. Den senare diskussionen om indexet Uppströmslutnings vidare användningsområden är naturligtvis bara spekulationer, men goda uppslag för ytterligare studier.

7. SLUTSATSER

Det här arbetet visar att TWI på ett generellt plan någorlunda kan beskriva markfuktigheten i ett svenskt skogsområde. TWI kan alltså beskriva avrinningsmönstret och lokalisera in- och utströmningsområden. Tidigare kända förhållanden i svensk skogsmark, så som att grundvattennivåerna är grunda, att grundvattenströmmarna i huvudsak följer topografin och att markvattenhalten påverkas av grundvattennivån har kunnat verifieras. Humusskiktets pH-värde är något högre i blötare områden, vilket beskrivs bra av såväl markvattenhalt och djup till grundvattennivå som av $TWI_{\text{mean } 20\text{m}}$.

Det går däremot inte särskilt väl att beskriva den rumsliga variationen av markvattenhalt och djup till grundvattennivå med TWI. Anledningarna till detta är flera. På grund av svårigheter i att föra ihop observerade data med rätt koordinater för höjddata blir beskrivning med 5m-upplösning mycket dålig. Även om beskrivningen av markfuktigheten blir bättre med $TWI_{\text{mean } 20\text{m}}$ kan inte TWI med denna upplösning beskriva den lokala topografin tillräckligt bra. Detta i kombination med stor variation i jordart och marksammansättning ger tvetydiga samband.

Indexen uppströmsarea och $\tan\beta$ gav större förståelse för sambanden mellan TWI och uppmätta värden, men gav inga egna korrelationer av större vikt mot uppmätta värden. DI gav i stort sett identiska värden som $\tan\beta$.

Uppströmslutning, som är lokal marklutning uppmätt i fält, beskriver markvattenhalt och djup till grundvattennivå jämnare och bättre än TWI. Uppströmslutning får därför anses som ett alternativ eller komplement till TWI.

TACKORD

Tack till Rasmus Sörensen för det gemensamma arbetet med markprovtagningen och pH-mätningen i juli. Vi slogs tappert, om än i numerärt underläge, mot knotten! Tack också till min handledare Jan Seibert som orkat svara på alla mina frågor.

REFERENSER

Tryckta referenser

- Beven K J, Kirkby M J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, vol 24 nr 1. s 43-69.
- Eriksson J. 2002. Concentrations of cadmium, lead and mercury in different soils in two Swedish forest catchments. *Scandinavian journal of forest research*, vol 17. s 436-445.
- Grayson R B, Western A W, Chiew F H S, Blöschl G. 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: Local and nonlocal controls. *Water Resources Research*, vol 33 nr 12. s 2897-2908.
- Grip R, Rodhe A. 1988. *Vattnets väg från regn till bäck*. Hallgren & Fallgren. Uppsala. ISBN:9-17382-635-9.
- Juutilainen M. 2003. *Dependency of soil parameters on topography and its potential use in nature conservation*. Examensarbete. Institutionen för geovetenskaper, Uppsala Universitet.
- Lundström I. 1995. *Beskrivning till Berggrundskartorna Filipstad SO och NO*. Sveriges Geologiska Undersökning. Uppsala. s. 143-145.
- Löfgren S (red). 2002. *Integrerad övervakning av miljötillståndet i svensk skogsmark Årrsrapport 2000*. Rapport 2002:17. Institutionen för miljöanalys, SLU, Uppsala.
- Minell H. 1997. Jordarternas tillkomst och fördelning. I: Minell H, Pettersson B (red). *Marken i skogslandskapet*. Skogsstyrelsen. Jönköping. s 25-59. ISBN: 91-88462-31-5.
- Moore R D, Thompson J C. 1996. Are water table variations in a shallow forest soil consistent with the TOPMODEL concept? *Water Resources Research*, vol 32 nr 3. s 663-669.
- Quinn P F, Beven K J, Lamb R. 1995. The $\ln(\alpha/\tan\beta)$ index: How to calculate it and how to use it within the topmodel framework. *Hydrological processes*, vol. 9 nr 2. s. 161-182.
- Rodhe A, Seibert J. 1999. Wetland Occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators. *Agricultural and Forest Meteorology* 98-99. s. 325-340.
- Rodhe A. 1997. Vattnet i skogen. I: Minell H, Pettersson B (red). *Marken i skogslandskapet*. Skogsstyrelsen. Jönköping. s. 81-103. ISBN: 91-88462-31-5.
- Sprent P. 1993. *Applied nonparametric statistical methods*. Chapman & Hall. London. ISBN: 0-412-44980-3.
- Topp G C, Davis J L, Annan A P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16. s. 574-582.
- Townsend P A, Walsh S J. 1996. Estimation of soil parameters for assessing potential wetness: comparison of model responses through GIS. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 21 nr 4. s 307-326.

TRIME, 2001. TRIME FM User Manual. IMKO Micromodultechnik GmbH. (Dokumentet går också att hitta på <http://www.trime.de> under Downloads, Manuals)

Internetreferenser

IM. 2002-11-08. Integrerad miljöövervakning i Sverige. <http://www.ma.slu.se/IM>. Integrerad miljöövervakning. Besökt: 2003-09-17.

IMKO. Theoretical aspects on measuring moisture using TRIME. (Dokumentet hittas under Downloads, Publications, *TRIME TDR theory*) <http://www.imko.de>. Besökt: 2003-09-01.

Lst Örebro. 2003-07-10. Naturreservat 85 Kindla. Länsstyrelsen Örebro län. <http://www.t.lst.se>. Besökt: 2003-08-15.

Karlton, E. Markkemiska analyser inom Ståndortskarteringen metodbeskrivningar. <http://www-sml.slu.se/sk/analyinf.pdf>. Besökt: 2003-12-10.

Personliga meddelanden

Seibert Jan. forskare, institutionen för miljöanalys SLU. 018-673145. 2003-11-13.