



## **Turbiditet som mått på suspenderat material och totalfosfor**

Jens Fölster och Pernilla Rönnback

**SLU, Vatten och miljö: Rapport 2015:2**

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Fölster J. och Rönnback, P., 2015. Turbiditet som mått på suspenderat material och totalfosfor. Institutionen för vatten och miljö, SLU Rapport 2015:2.

Omslagsfoto: Jens Fölster

Tryck: Endast digitalt

Tryckår: 2015

Kontakt

[jens.folster@slu.se](mailto:jens.folster@slu.se)

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

## Förord

Denna rapport utgör rapportering av projektet ”Utveckling av metoder för uppskattning av halten suspenderat material i de nationella miljöövervakningsprogrammen” finansierat med bidrag från Havs och vattenmyndigheten Dnr. 4350-12. Rapporten ska ge underlag för eventuella kommande satsningar på användandet av kontinuerliga mätningar med sensorer inom miljöövervakningen.

Rapporten har interngranskats av Lars Lundin.



# Innehåll

Förord.....	3
Sammanfattning .....	7
Summary .....	9
1 Introduktion.....	11
2 Material och metoder .....	12
2.1 Analysmetoder .....	12
2.2 Dataunderlag .....	13
2.3 Modellering av ämneshalter ur turbiditet och konduktivitet.....	13
2.4 Statistiska metoder .....	14
3 Resultat och diskussion.....	14
3.1 Samband mellan turbiditet och suspenderat material.....	14
3.2 Samband mellan turbiditet och AbsDiff.....	18
3.3 Modellering av Tot-P ur turbiditet och konduktivitet .....	20
3.4 Beräkning av månadstransport av totalfosfor ur månadsvis vattenkemi och kontinuerliga mätningar av turbiditet och konduktivitet med sensorer.....	22
4 Sammanfattande diskussion.....	25
Referenser .....	26



## Sammanfattning

Suspenderat material är en viktig transportör av fosfor, metaller och organiska miljögifter, men idag sker nästan inga mätningar av det inom den nationella miljöövervakningen. Turbiditet är ett mått på ett vattens förmåga att sprida ljus och kan i många fall användas som ett mått på halten suspenderat material och även på halten totalfosfor (Tot-P). Turbiditet ingår sedan 2010 som obligatorisk parameter i den nationella miljöövervakningen av sötvatten. Före 2010 användes skillnaden mellan filtrerad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) som mått på partikelförekomsten i vattnet. Teknisk utveckling har på senare tid ökat möjligheten att kontinuerligt mäta turbiditeten i vattendrag och därmed kunna följa den ofta snabba dynamiken i halten suspenderat material och därmed även Tot-P.

Syftet med detta arbete har varit att undersöka sambandet mellan turbiditet och halten suspenderat material samt sambandet mellan turbiditet och AbsDiff för olika typer av vattendrag i Sverige. Detta för att bättre kunna använda resultaten från de turbiditetsmätningar som idag utförs inom de nationella miljöövervakningsprogrammen. Dessutom utvärderades möjligheten att använda kontinuerliga mätningar av turbiditeten som komplement till den ordinarie provtagningen för transportberäkning av Tot-P i jordbruksvattendrag där höga halter av partikulär fosfor förekommer vid högflöden.

Det var ett likartat log-linjärt samband mellan turbiditet och suspenderat material i vattendrag med vitt skilda egenskaper. Enda undantaget var bäckarna inom Balsjöprojektet där påverkan från skogsbruksmetoder vid slutavverkning studeras. Proverna från dessa bäckar avvek tydligt från sambandet för de övriga vattendragen i sitt förhållande mellan turbiditet och suspenderat material. När Balsjöproverna utslöts ur analysen erhöles ett starkare samband ( $r^2 = 0,77$  för logaritmerade samband). En regressionskvation togs fram som kan användas för att uppskatta halten suspenderat material ur turbiditet. Samtidigt visade en analys av sambandet mellan turbiditet och suspenderat material i enskilda bäckar att sambandet i vissa fall kan vara svagt. Om möjligt bör man därför analysera suspenderat material i ett urval av prover innan man använder turbiditeten för att uppskatta halten suspenderat material i ett vattendrag.

Det fanns också ett tydligt samband mellan logaritmerade värden av turbiditet och AbsDiff, men det var inte helt linjärt. Dessutom var spridningen stor för låga värden, vilket beror på den stora mätosäkerheten vid låga värden. När låga värden utslöts blev sambandet starkare ( $r^2 = 0,82$ ). Det framtagna regressions sambandet kan användas för att räkna om AbsDiff till turbiditet.

Sambandet mellan Tot-P och turbiditet varierade mellan olika vattendrag i studien med ett medelvärde av  $r^2$ -värden på 0,51 och med stor spridning i  $r^2$ -värde för olika vattendrag. Med både turbiditet och konduktivitet som förklarande variabler ökar

den genomsnittliga  $r^2$ -värdet till 0,64 och i 25 % av vattendragen var  $r^2$ -värdet > 0,83. Resultaten visar på att sensorer med mätning av turbiditet och konduktivitet har en stor potential som komplement till vanlig provtagning och analys av Tot-P, men inte i alla vattendrag.

I en fallstudie i en liten jordbruksbäck inom den nationella miljöövervakningen av jordbruksmark studerades möjligheten att använda mätningar av en turbiditetssensor för att beräkna transporten av Tot-P. I vattendraget utfördes vattenkemisk provtagning i fasta prover varannan vecka samt med flödesstyrd kontinuerlig provtagning med blandprover varannan vecka. Linjärinterpolering av fasta prover gav en kraftig underskattning av transporten av Tot-P jämfört med det flödesvägda provet i den aktuella bäcken. Även turbiditetsmätningarna gav en lägre transport jämfört med det flödesstyrda provet. Det kan tyda på att en rumslig variation i halten suspenderat material i bäcken med högre halter nära botten och att sugslangen för det flödesstyrda provet låg närmare botten i bäcken jämfört med sensorn och därmed gav högre värden. Turbiditetssensorer har en stor potential att öka kunskapen om dynamiken i halter och transporten av suspenderat material och Tot-P från jordbruksbäckar, men även den rumsliga variationen i vattendraget måste beaktas.



## Summary

Suspended matter is important for transport of phosphorus, metals and organic pollutants, but today it is rarely measured in Swedish national monitoring programs. Turbidity is a measurement of the scattering of light by particles in the water and can be used as a proxy for suspended matter and even the concentration of total phosphorus (Tot-P). Turbidity is included as a parameter in the Swedish national monitoring programs in fresh waters since 2010. Earlier, difference in absorbance of filtered and unfiltered sample (AbsDiff) was used as a measurement of the content of particles in water. Recent technical development has made it easier to perform continuous measurements of turbidity in streams to follow the typical fast dynamics of suspended matter as well as Tot-P.

The aim of this work was to establish relationships between turbidity and the concentration of suspended matter as well as with AbsDiff in different kinds of streams. This will then make the turbidity measurements in the monitoring programs more useful. Further, the use of turbidity sensors as a complement to grab sampling for calculating Tot-P transport in agricultural streams was evaluated. In these streams, short episodes of high concentrations are common.

There was a uniform log-linear relation between turbidity and suspended matter in streams with very different features. The only exception was the streams in the Balsjö project where the impact from forest harvesting of various intensity was studied. These streams had a deviating relation between the two parameters compared to the other streams. When the Balsjö-samples were removed from the dataset, a stronger relationship was found for the remaining streams ( $r^2 = 0,77$ , log-log). The linear regression can be used for estimating suspended matter from turbidity measurements. A separate analysis for individual streams showed that although there often were strong correlations, for some streams they could be very weak. If possible, the relationship between the two parameters in a single stream should be verified by contemporary analysis of both parameters for a selection of samples.

There was also a strong relationship between logarithmic values of turbidity and AbsDiff, but it was not totally linear. There was also a higher variance for lower values due to the high error in the measurements at low AbsDiff. When low values were excluded, the relationship was more linear with an  $r^2$ -value of 0,82. The established linear regression can be used for transforming AbsDiff into turbidity.

The relationship between Tot-P and turbidity varied between the different streams with a mean in  $r^2$  of 0,51 and with a high variance. With both turbidity and conductivity as explaining parameters the mean  $r^2$ -value was 0,64 and 25 % of the streams had an  $r^2$  - value  $> 0,83$ . The results show that sensors have the potential to complement ordinary sampling and analysis for Tot-P, but not for all streams.

In a small case study with a small agricultural stream within the national monitoring program of agricultural soils, the possibilities for using a turbidity sensor for calculating Tot-P transport was evaluated. Biweekly grab sampling as well as flow weighted sampling was performed. Transport of Tot-P calculated from linear interpolation of grab samples gave a strong underestimation of the Tot-P transport compared to the flow weighted sampling. Even the transport calculated from the continuous turbidity measurements gave somewhat lower Tot-P transports compared to the flow weighted sampling. Observations by the field staff however indicated that the suction tube for the flow weighted sampling might have been mounted too close to the bottom, possibly leading to a contamination of sediments in the samples.

Turbidity sensors have a large potential to increase the knowledge of the dynamic in concentrations and transport of suspended matter and Tot-P in agricultural streams, but the spatial variation in the stream has to be considered.

# 1 Introduktion

Suspenderat material påverkar levande organismer på många sätt. Hydromorfologisk påverkan på vattensystemen påverkar till exempel de levande organismerna bland annat genom att ändra dynamiken i suspenderat material. Suspenderat material är också en viktig transportör av fosfor, metaller och organiska miljögifter (Djordjic et al. 2012). Mellan 1967 och 1994 analyserades suspenderat material i 26 flodmynningar av SMHI, men mätningarna avslutades av besparingsskäl (Brandt 1996). Sedan dess har det bara undantagsvis analyserats inom den nationella miljöövervakningen. Idag mäts suspenderat material i tre skogsbäckar inom den integrerade miljöövervakningen (IM) samt i miljöövervakningen av jordbruksmark i små jordbruksvattendrag, så kallade Typområden. Suspenderat material analyseras också inom olika regionala miljöövervakningsprogram samt i forskningsprogram, t ex Balsjöprojektet där man studerar effekter av skogsbruk på ytvatten (Löfgren et al. 2009).

Halterna av partiklar varierar ofta betydligt snabbare än lösta ämnen med typiska korta pulser av höga halter vid högflöden. Det gör att en stor del av transporten av partikelbundna ämnen som t ex fosfor och metaller sker under korta flödestoppar som ofta missas av den månadsvisa provtagningen. En undersökning av korttidsvariationen av partikulärt material i två Norrländska älvar med dygnsvis provtagning under vårflödena 2008 och 2009 visade att transporten av partikulärt material underskattas i oreglerade älvar med månadsvis provtagning (Rönnback et al. 2009). En annan studie i små jordbruksbäckar visade att provtagningar varannan vecka underskattade transporten av partikulärt fosfor jämfört med en flödesstyrd provtagning i bäckar som avvattnade lerjordar (Kyllmar 2009).

Som alternativ till analys av suspenderat material kan turbiditeten mätas som är ett mått på provets förmåga att sprida ljus. Turbiditet är korrelerat med halten suspenderat material och kan ses som ett kvantitativt mått på partikelhalten och kan också användas för att uppskatta halten Tot-P i lerjordar (Villa 2014). Sedan 2010 analyseras turbiditet i samtliga vatten i den nationella miljöövervakningen och i många regionala övervakningsprogram. Innan dess finns data på skillnad mellan filtrerad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) som mått på förekomst av partiklar. Metoden ger inte ett kvantitativt mått på partikelförekomsten och det finns ingen standardmetod för mätningen, vilket var anledningen till att metoden byttes ut mot turbiditet. AbsDiff är dock det enda måttet på partiklar som finns i långa tidsserier inom den nationella miljöövervakningen och det är därför viktigt att undersöka om AbsDiff kan räknas om till Turbiditet för att kunna se de långsiktiga förändringarna i partikulärt material som sträcker sig över metodbytet.

Turbiditet kan mätas kontinuerligt direkt i vattendraget med en fast monterad sensor. Det ger möjlighet att beskriva tidsdynamiken av halten suspenderade material i vattendrag på ett sätt som inte är möjligt med vanlig provtagning och laboratorieanalys. Tekniken har funnits en längre tid, men på senare tid har teknikutvecklingen

gjort att sensorerna blivit noggrannare och bättre anpassade för mätningar i fält. Med en fortsatt utveckling av teknik och priser på sensorer finns förhoppningar om att kontinuerlig mätning av turbiditet (och andra parametrar) ska kunna komplettera de månadsvisa provtagningarna av vattenkemi i miljöövervakningen och därmed öka kunskapen om korttidsvariationen av partikulärt material och förbättra uppskattningen av ämnestransporten i vattendrag.

Syftet med studien var att ta fram sambandet mellan turbiditet och halten suspenderat material samt mellan turbiditet och AbsDiff för olika typer av vattendrag. Detta för att bättre kunna använda resultaten från de turbiditetsmätningar som idag görs inom de nationella programmen. Slutligen prövades metodik för att mäta turbiditet kontinuerligt för att utvärdera om det kan vara ett komplement till den ordinarie provtagningen för transportberäkning av Tot-P i vattendrag där höga halter suspenderat material förekommer.

På sikt ska resultaten kunna öka nyttan av de turbiditetsmätningar som redan görs i de nationella miljöövervakningsprogrammen i sötvatten och därigenom öka kunskapen av dynamiken i halter och transport av suspenderat material i vattendrag. Eftersom suspenderat material är en viktig transportör av fosfor, metaller och organiska miljögifter samt påverkar de levande organismernas livsmiljö är resultaten till nytta för uppföljningen av miljömålen Ingen övergödning, En giftfri miljö samt Levande sjöar och vattendrag.

## 2 Material och metoder

### 2.1 Analysmetoder

Samtliga kemiska analyser utfördes på de ackrediterade laboratorierna på institutionerna för Vatten och miljö samt Mark och miljö vid SLU. (Sedan 2014 sammanlagda. [vatten-miljo/kemlab](#)).

Turbiditeten i lab mättes med en Turbidimeter Hach 2100AN IS enligt standard SS-EN ISO 7027. I fält mättes turbiditeten med en sensor av märke Hach-Lange (SOLITAX SC och SC-1000) med anslutning till elnät. Enheten var FNU.

Suspenderat material analyserades i de flesta fall med 0,45 µm filter enligt standard SS-EN 872:2005. Undantag är proverna från typområdet U8 där porstorleken på filtret var 0,2 µm.

Filtrerad absorbans analyserades efter filtrering med 0,45 µm filter och mätning vid 420 nm med 5 cm kyvett enligt standard SS-EN ISO 7887-2012. Ofiltrerad absorbans mättes på samma sätt men på ofiltrerat prov.

Totalfosfor mättes med en Bran Luebbe Autoanalyser 3 med en aparatspecifik metod som är en modifiering av standardmetoden.

## 2.2 Dataunderlag

### 2.2.1 Samband mellan turbiditet och suspenderat material

Data samlades in från stationer med analyser av både suspenderat material och turbiditet i minst 5 prover från samma station mellan 2010 och 2012. Urvalet omfattade data från 136 stationer med mellan 5 och 67 prover från varje. Den nedre rapporteringsgränsen för suspenderat material är 1 mg/l så för att utesluta osäkra värden i datasetet är värden < 1 mg/l borttagna. Markanvändningsdata fanns tillgängligt för 57 av stationerna och visade på att urvalet omfattade allt från jordbrukspåverkade områden till rena skogsområden. Bland skogsområden finns dels små referensbäckar inom Trendvattendragprogrammet och IM (Fölster et al. 2014) samt specialstudier av slutavverkade områden (Balån, (Löfgren et al. 2009). Bland jordbruksområden finns typområdena inom jordbrukets recipientkontroll, som är små jordbruksvattendrag med god kännedom om markförhållandena (Stjernman Forsberg et al. 2011). Ett stort antal av stationerna ingick i den regional miljöövervakning och recipientkontrollprogram i Mälardalen där transport av suspenderat material från lerdominerade jordar är av stort intresse.

### 2.2.2 Samband mellan turbiditet och AbsDiff

Sambandet mellan Turbiditet och skillnaden mellan filtrerad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) studerades i data från 255 sjöar och vattendrag med parallella analyser under 2010 i mellan 5 och 16 prover per station. Stationerna ingick i olika miljöövervakningsprogram.

## 2.3 Modellering av ämneshalter ur turbiditet och konduktivitet

Totalfosfor och suspenderat material (slamhalt) modellerades ur turbiditeten och konduktiviteten i 124 vattendrag med minst 10 prover med alla parametrar 2010-2012. Urvalet begränsades av tillgången på analys av suspenderat material som endast provtas i vissa program. I urvalet ingår allt från små skogsbäckar inom nationell miljöövervakning till lerdominerade jordbruksvattendrag inom den samordnade recipientkontrollen.

### 2.3.1 Beräkning av månadstransport av totalfosfor ur månadsvis vattenkemi och kontinuerliga mätningar av turbiditet och konduktivitet med sensorer

En jämförelse av fosfortransport beräknat ur linjärinterpolerade fasta prover varannan vecka, respektive kontinuerlig mätning (30 minuters intervall) av turbiditet jämfördes med flödesproportionerlig provtagning för mätdata från en jordbruksbäck, station U8 i inom den regionala övervakningen av jordbruksmark. Bäckens

ligger i Västmanland, har ett avrinningsområde på 6 km<sup>2</sup> som består av 56 % jordbruksmark på lerjord (Stjernman Forsberg et al. 2011). Mätningarna för studien genomfördes 4 juli – 3 december 2012. Vattenföringen mättes kontinuerligt vid avbördningsstation med ett v-format överfall vid provplatsen.

Transporten beräknades för tvåveckorsperioder mellan de fasta provtagningarna. För de fasta proverna beräknades först koncentrationer för alla dagar genom att linjärinterpolera halterna mellan provtagningarna till dygnsvärden som sedan multiplicerades med dygnsvärden för vattenföring till dygnstransporter, vilka slutligen summerades. För de kontinuerliga mätningarna med sensor beräknades först halter av Tot-P ur turbiditeten med regressionssambandet mellan turbiditet och Tot-P vid provtillfällena. Därefter beräknades dygnstransporter genom att multiplicera dygnsmedelvärden för beräknad Tot-P och vattenföring som sedan summerades.

## 2.4 Statistiska metoder

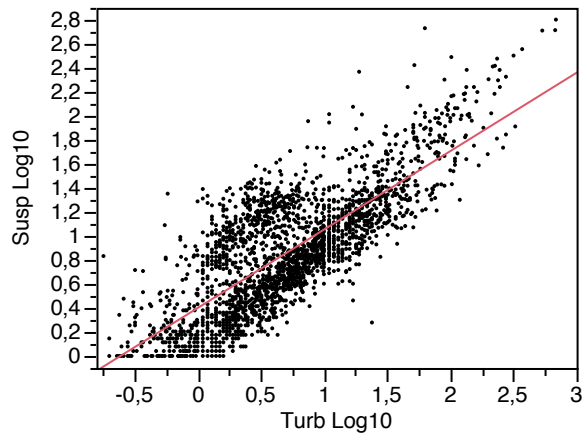
Samband mellan olika parametrar studerades med linjär regression. Vid behov log transformerades data för att uppnå normalfördelade residualer och linjära samband.

# 3 Resultat och diskussion

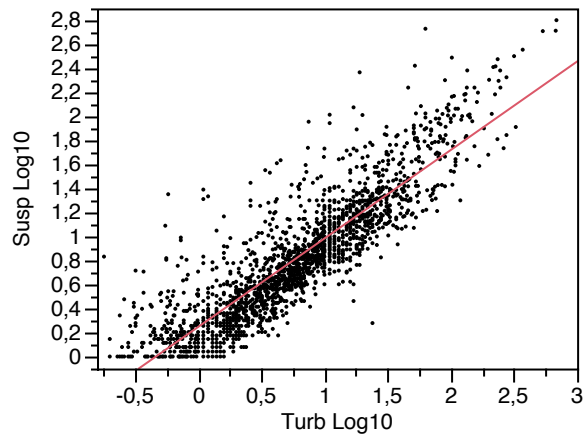
## 3.1 Samband mellan turbiditet och suspenderat material

För regressionssamband mellan suspenderat material och turbiditet användes logaritmerade data. Först studerades alla data och en signifikant regression uppvisades mellan suspenderat material och turbiditet (Figur 1,  $r^2=0,61$ ,  $p<0,0001$ ). I plotten mellan de två parametrarna kunde två olika grupper särskiljas, där den övre gruppen hade högre halt suspenderat material i förhållande till turbiditeten (Figur 1). Dessa prover kom från avverkade skogsområden (Balån) och visar att det partikulära materialet där hade lägre förmåga att sprida ljus jämfört med partiklarna i andra vatten. En ny analys gjordes utan data från Balån vilket gav en högre förklaringsgrad ( $r^2=0,77$ ,  $p<0,0001$ , Figur 2). Den erhållna regressionsekvationen kan användas som en generell formel för en grov uppskattning av halten suspenderat material i de flesta vattendrag utifrån turbiditeten med enheter mg/l för Susp och NTU för Turb (Figur 2):

$$10 \log Susp = 0,246 + 0,737 * 10 \log Turb \quad (\text{ekv. 1})$$

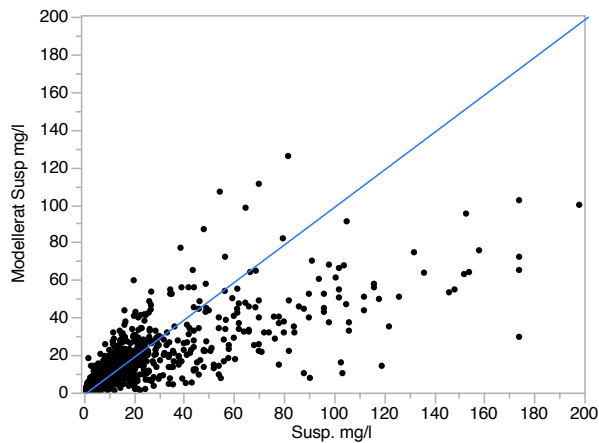


Figur 1. Regressionsanalys mellan suspenderat material och turbiditet för hela datasetet.



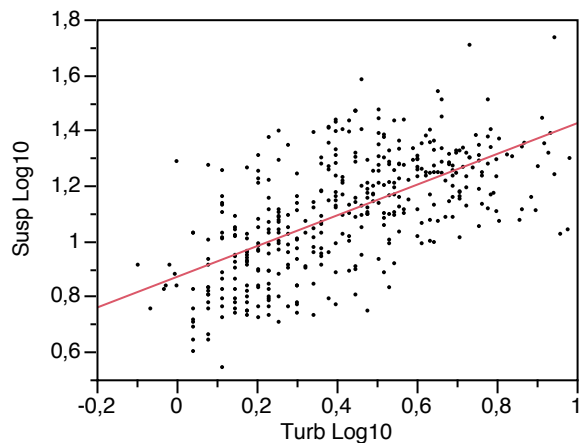
Figur 2. Regressionsanalys mellan suspenderat material och turbiditet i vattendrag utan data från nyavverkade skogsområden (Balån)

Plottar man de modellerade ologariterade värdena mot de uppmätta värdena ser man att modellen ger stora slumpmässiga fel, särskilt vid höga värden (Figur 3). Turbiditeten bör därför bara användas för att studera långsiktiga trender i suspenderat material, inte för kvantitativa uppskattningar.



Figur 3. Modellerad halt suspenderat material (y-axeln) mot det uppmätta värdet (x-axeln). Linjen anger 1:1 förhållandet

En regression gjordes också för bäckarna i Balån och även här blev resultatet signifikant, men med mycket lägre förklaringsgrad ( $r^2=0,39$ ,  $p<0,0001$ , Figur 4).

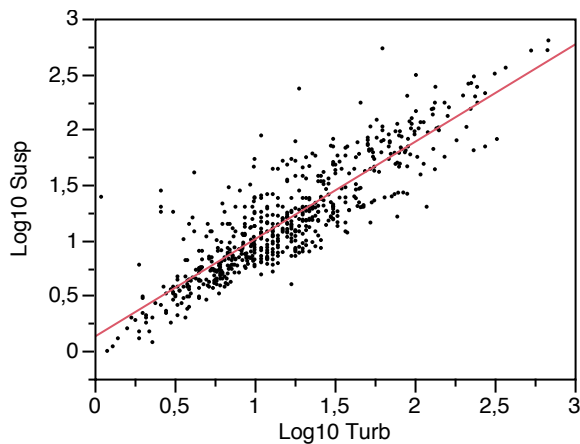


Figur 4. Regressionsanalys mellan suspenderat material och turbiditet i i nyavverkade skogsområden (Balån)

Residualerna från regressionen utan Balsjödata analyserades för att se om de grupperade sig utifrån markanvändningen (jordbruk, myr, vatten och skog). Endast vid gruppering utifrån procent jordbruksmark i avrinningsområdet kunde två grupper urskiljas där gränsen går vid  $>24$  % jordbruksmark. Därpå undersöktes sambandet mellan suspenderat material och turbiditet för gruppen med  $>24$  % jordbruksmark (Figur 5). Resultatet uppvisar en signifikant förklaringsgrad i samma storleksordning som alla data utom de från Balsjöområdet ( $r^2=0,76$ ,  $p<0,0001$ ). För stationerna med  $>50$  % jordbruksmark fanns en tendens till att turbiditeten överskattade halten suspenderat material.

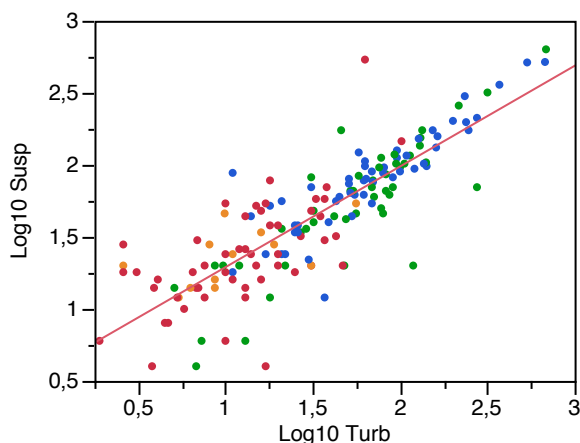


Ett försök att lägga till halten järn i en multipel linjär regression för att öka förklaringsgraden gav inte något positivt resultat.



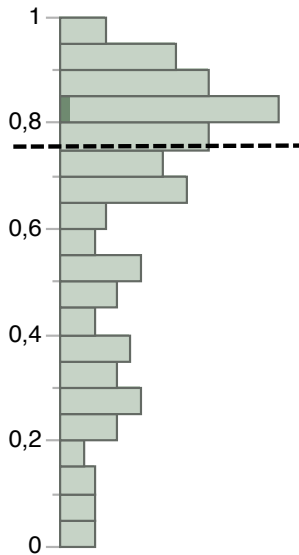
Figur 5. Regressionsanalys mellan suspenderat material och turbiditet för stationer med >24 % jordbruksmark.

En särskild analys gjordes av Typområdena inom jordbrukets recipientkontroll ( $r^2=0,712$ ,  $p<0,0001$ , Figur 6)(Stjernman Forsberg et al. 2011). Typområdena har valts ut för att representera olika typer av odlingsjord. Data omfattade 10 typområden indelade efter dominerande jordart: sand (orange), lättlera (röd), mellanlera (blå) och styv lera (grön). De jordbruksområden som domineras av mellanlera och styv lera uppvisar ett likartat samband och vid en regressionsanalys av enbart data från de områdena blev förklaringsgraden något bättre ( $r^2=0,739$ ,  $p<0,0001$ ) medan jordbruksområden som domineras av sand eller lättlera ej har ett lika tydligt samband och de uppvisar även en lägre halt av både suspenderat material och turbiditet. Resultaten är positiva eftersom de visar på goda möjligheter att studera trender i halten suspenderat material i avrinningen från lerjordar där problemen med fosforförluster kopplat till erosion är stora.



Figur 6. Regressionsanalys mellan suspenderat material och turbiditet för 10 typområden indelade efter dominerande jordart: sand (orange), lättlera (röd), mellanlera (blå) och styv lera (grön).

Slutligen gjordes en analys av sambanden mellan suspenderat material och turbiditet för varje enskilt vattendrag (Figur 7). Resultaten visar att för många vattendrag är sambandet mycket svagt.



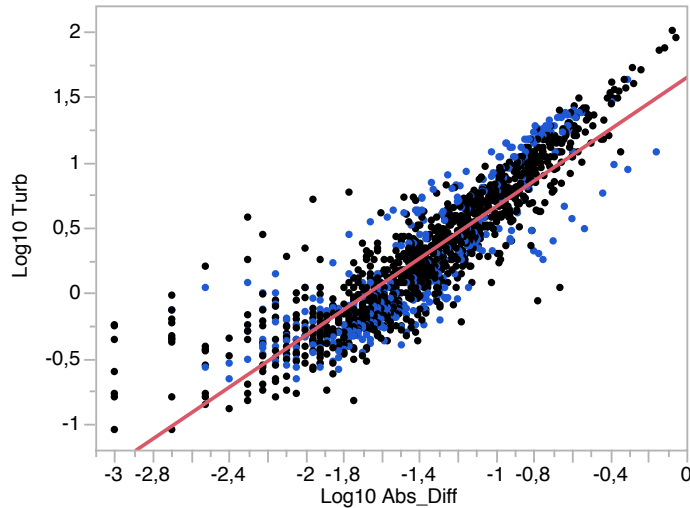
Figur 7. Fördelningen av förklaringsgrad ( $r^2$ ) av regressionssambandet mellan halten suspenderat material och turbiditet (logaritmerade värden) för 135 stationer med mellan fem och 67 prover. Referenslinjen anger  $r^2$ -värdet för regressionen för hela datasetet.

Resultaten visar på att det finns ett gemensamt samband mellan logaritmerade värden av suspenderat material och turbiditet i vattendrag inom den svenska miljöövervakningen med olika typer av markanvändning. Ett undantag utgör skogsbäckarna i nyavverkade områden i Balsjöprojektet där det suspenderade materialet hade en lägre förmåga att sprida ljus och därmed fick lägre turbiditet vid samma halt suspenderat material. För enskilda vattendrag kan dock sambandet vara svagt och man bör därför, om möjligt mäta suspenderat material i ett urval av prover för att etablera ett specifikt samband för varje enskilt vattendrag om man vill göra kvantitativa uppskattningar av halten suspenderat material ur turbiditeten.

### 3.2 Samband mellan turbiditet och AbsDiff

Före 2010 användes skillnaden i absorbans på filtrerat och ofiltrerat prov som ett semikvantitativt mått på partikelhalt. Därefter ersattes metoden med mätning av turbiditet som ger en kvantitativ uppskattning av partikelhalten. För att kunna jämföra partikelhalterna mellan tidsperioderna sammanställdes data med mätningar av båda parametrarna från både sjöar och vattendrag som genomfördes under 2010. En regressionsanalys gjordes på hela datasetet (Figur 5), där sjöarna (blå) och vattendragen (svarta) är grupperade. Signifikant regression uppvisades mellan turbiditet och AbsDiff ( $r^2=0,78$ ,  $p<0,0001$ ).

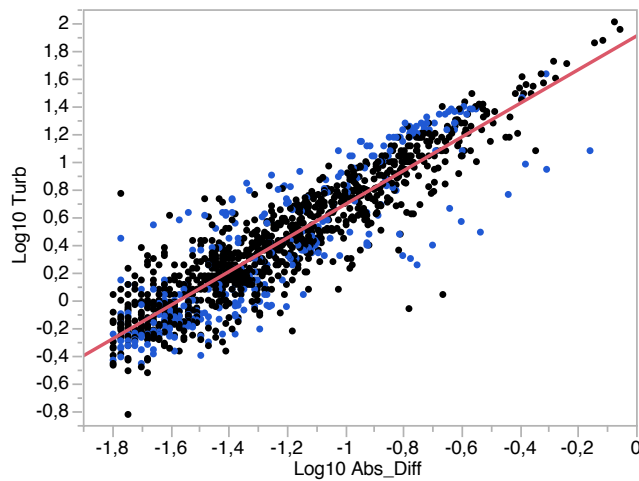
En okulär besiktning av figur 8 visade att sambandet inte är helt linjärt och att det kan finnas grupper av stationer som har ett annat samband mellan turbiditet och AbsDiff. Separata analyser för sjöar och vattendrag visade på något sämre samband för ( $r^2=0,73$ ,  $p<0,0001$ ) och något bättre för vattendrag ( $r^2=0,80$ ,  $p<0,0001$ ).



Figur 8. Samband mellan två mått på partiklar: Turbiditet och skillnad mellan filterad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) i mätningar från 255 sjöar (blå) och vattendrag (svart) med 5 – 16 prover per station.

Spridningen är störst vid låga värden då mätfelet är stort. Det gäller särskilt för AbsDiff då låga värden kan vara en liten skillnad mellan två stora tal. Analysen gjordes därför om efter att värden med  $\text{LogAbsDiff} < -1,8$  uteslutits (Figur 9). Sambandet blir då linjärt och  $r^2$ -värdet ökar till 0,82. Regressionsekvationen kan användas för att uppskatta turbiditet ur AbsDiff om man saknar parallella mätningar för en station ( ekv. 2).

$$10 \log Turb = 1,904 + 1,215 * 10 \log AbsDiff \quad (\text{ekv. 2})$$



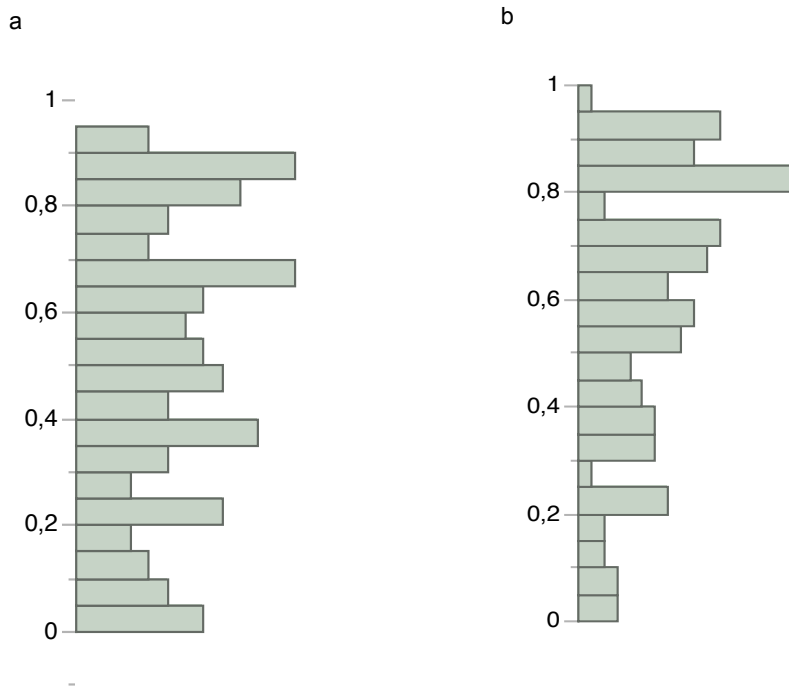
Figur 9. Samband mellan två mått på partiklar: Turbiditet och skillnad mellan filtrerad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) i mätningar från 255 sjöar (blå) och vattendrag (svart) med 5 – 16 prover per station, men efter att värden med  $\log_{10} \text{AbsDiff} < -1,8$  uteslutits.

### 3.3 Modellering av Tot-P ur turbiditet och konduktivitet

Turbiditet och konduktivitet kan mätas kontinuerligt med sensorer vilket gör det möjligt att följa snabba tidsförlopp i haltförändringar. Det ger också bättre precision vid beräkning av ämnestransporter med en kontinuerlig mätning jämfört med diskreta prover varannan vecka eller varje månad och där man linjärinterpolerar halterna mellan mätningarna, vilket är det normala i miljöövervakning av vattendrag. Om andra ämnen, som t ex närsalter, är korrelerade till turbiditet och konduktivitet kan säkrare bestämningar av ämnestransport göras om interpoleringen av halterna mellan de diskreta proverna istället görs med hjälp av beräkningar ur sensordata. Det gäller särskilt för totalfosfor (Tot-P) där en stor del av transporten ofta sker under episoder med höga halter partikelbunden fosfor.

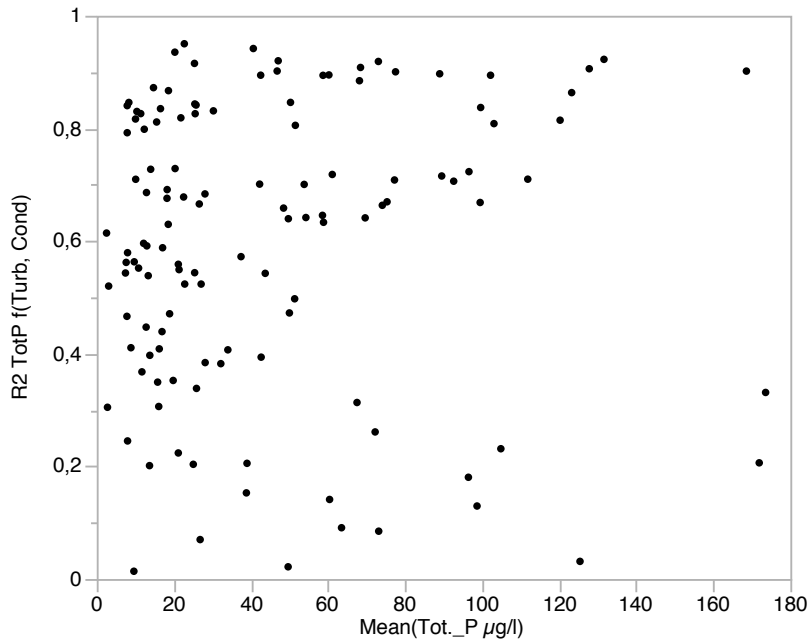
Sambandet mellan Tot-P och turbiditet samt konduktivitet gjordes i 124 stationer med 10 prover eller fler under 2010 – 2012.

Möjligheten att beräkna halten Tot-P varierar mycket mellan olika vattendrag (Figur 10) med ett medelvärde av  $r^2$ -värden på 0,51 och med stor spridning (logaritmerade värden). Med både turbiditet och konduktivitet som förklarande variabler ökar den genomsnittliga  $r^2$ -värdet till 0,64 och i 25 % av vattendragen var  $r^2$ -värdet  $> 0,83$ .



Figur 10. Förklaringsgrad ( $r^2$ ) av halten Tot-P beräknad ur turbiditeten (a) samt turbiditet och konduktivitet (b)) med linjär regression av logaritmerade värden för 124 vattendrag med  $\geq 10$  prover mellan 2010 och 2012.

Den stora spridningen mellan  $r^2$ -värdena visar på att de processer som styr halten Tot-P varierar mycket mellan vattendrag (Figur 11). För vattendrag med medelhalter under  $50 \mu\text{g/l}$  är  $r^2$ -värdena jämnt fördelade mellan 0,01 och 0,95. Vattendragen med högre halter delar upp sig i två grupper. En med  $r^2$ -värden under 0,2 och en med värden över 0,6. De med låga förklaringsgrader är troligen påverkade av punktutsläpp, medan de övriga troligen är jordbruksdominerade där Tot-P halten styrs av partikeltransport under höga flöden. Det antyder att det finns goda möjligheter att använda sensorer för turbiditet och konduktivitet som komplement till vanlig provtagning i många jordbrukspåverkade vattendrag.



Figur 11. Samband mellan  $r^2$ -värdet för regression av Tot-P som en funktion av turbiditet och konduktivitet samt medelhalten Tot-P i 124 vattendrag.

### 3.4 Beräkning av månadstransport av totalfosfor ur månadsvis vattenkemi och kontinuerliga mätningar av turbiditet och konduktivitet med sensorer

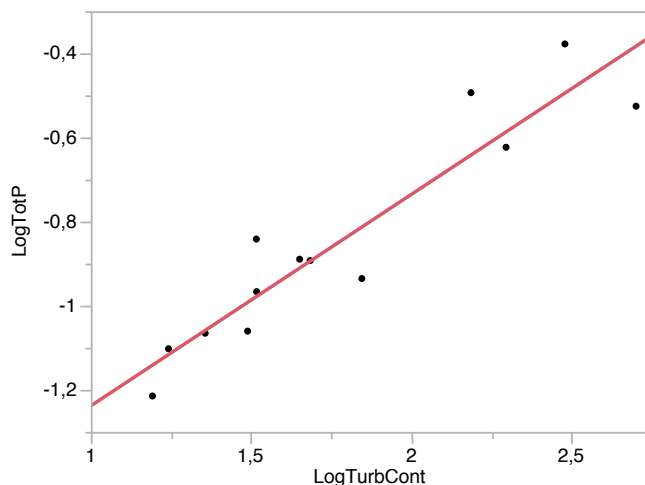
#### 3.4.1 Praktiska erfarenheter av mätningarna med turbiditetssensor i fält

Den sensor som användes för kontinuerlig mätning av turbiditet i fält var en Hach-Lange, SOLITAX SC och SC-1000. Instrumentet är främst avsett för industriellt bruk och har en hög strömförbrukning vilket kräver nätanslutning. Strömförsörjningen drabbades flera gånger av avbrott vilket gjorde att vi bara fick data från hösten 2012 trots att mätningarna pågick under en längre tid. Instrumentet är utformat som en lång metallstav, vilket troligen var orsaken att det slogs ut av ett åsknedslag och blev obrukbart så att mätningarna avslutades. Mjukvaran var rudimentär vilket bl.a. innebar att tömning och tolkning av data var omständlig. Under projektets gång gjordes en noggrannare marknadsundersökning vilket ledde till inköp av andra typer av sensorer som i första hand är avsedda för fältbruk. Dessa är strömsnålare och drivs av batterier. De har också en mjukvara som gör det enkelt att tömma och utvärdera data. De är också betydligt mindre och vissa typer kan sänkas ned under vattenytan vilket gör dem mindre utsatta för skadegörelse, åska och is.

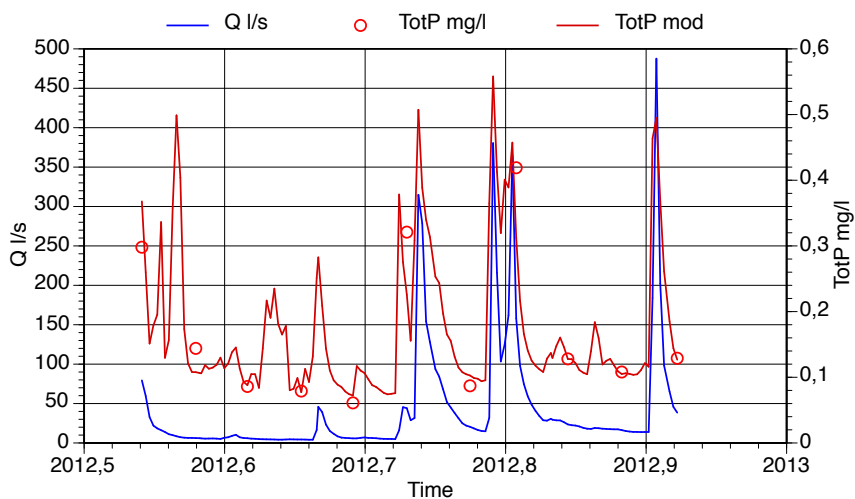
### 3.4.2 Beräkning av transporten av Tot-P i en jordbruksbäck med hjälp av turbiditetssensor

Sambandet mellan turbiditet och Tot-P i jordbruksbäcken U8 var mycket gott, med ett  $r^2$ -värde på 0,88 för logaritmerade värden (Figur 12). Vattenföringen var låg under första halvan av mätperioden, medan det var tre stora flödestoppar under den andra halvan (Figur 13). Den kontinuerliga mätningen av turbiditet, som i detta fall väl avspeglar halten Tot-P, visade på höga halter i samband med flödestopparna, men också på toppar vid andra tillfällen. Den fasta provtagningen varannan vecka sammanföll med de höga halterna under de två första flödestopparna, men missade den sista toppen. Under den första perioden med låga flöden förekom också episoder med höga Tot-P halter mellan provtagningstillfällena.

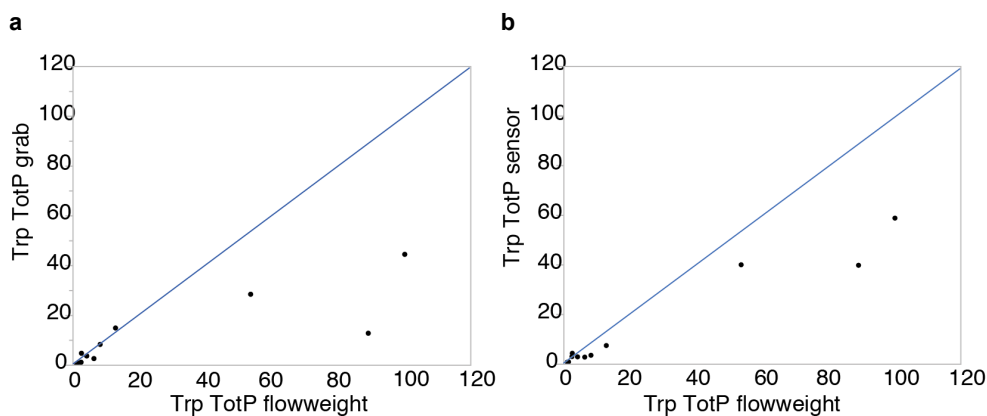
Beräkningen av transport för Tot-P genom linjärinterpolering av fasta prover ledde till en kraftig underskattning av transporten jämfört med den flödesvägda provtagningen vid de tre perioderna med höga transporter (Figur 14a). Även transporten beräknad ur de kontinuerliga mätningarna av turbiditet ledde till lägre värden, och då även för perioder med lägre transporter (Figur 14b). En möjlig förklaring till detta kan vara att insugningsslangen för provtagningen av de flödesstyrda proverna sitter nära botten för att undvika att den går torr vid mycket låga flöden. Det gör att det finns risk att den suger upp bottenlam vilket då ger en överskattning av transporten (Kyllmar 2009).



Figur 12. Samband mellan Tot-P och turbiditet (logaritmerade värden) i det jordbruksdominerade vattendraget U8 ( $r^2 = 0,88$ ).



Figur 13. Vattenföring och Tot-P i Fiholm hösten 2012. Tot-P dels uppmätt i prover tagna varannan vecka och dels beräknade ur kontinuerliga mätningar av turbiditeten (Tot-P mod). X-axeln visar tiden från 1 juli till 31 december som år i decimalform.



Figur 14. Samband mellan transporter av Tot-P beräknat ur från prover tagna varannan vecka (a) respektive kontinuerlig mätning med turbiditetssensor (b) jämfört med flödesviktad provtagning (x-axeln på båda figurerna). Varje punkt avser transporten under en tvåveckorsperiod. De blå linjerna visar på 1:1 samband.



## 4 Sammanfattande diskussion

Mätningarna visade att turbiditet kan användas som ersättning för både suspenderat material och för Tot-P. Ett generellt samband kan användas för de flesta typer av vattendrag (ekv. 1), men det är lämpligare att ta fram ett samband för varje enskilt vattendrag om det finns data med båda parametrarna för ett urval av prover. Det visar t.ex. mätningarna i de skogsbrukspåverkade bäckarna inom Balsjöprojektet där sambandet mellan turbiditet avvek markant från andra vattendrag. Även bland de övriga vattendragen förekom exempel med mycket svagt samband mellan turbiditet och suspenderat material, även om sambandet i de flesta fall är starkt. Man bör också komma ihåg att de sambanden som togs fram gäller för logaritmerade värden. För ologaritmerade värden blir felet större, särskilt för höga värden.

En klimatförändring förväntas öka vattenflödet och framför allt förekomsten av kraftiga höglöden. Detta kan i sin tur förväntas ge ökande förekomst av suspenderat material. Det är därför olyckligt att det finns så lite mätningar av suspenderat material i långa tidsserier. För studier av förändringar i partikelhalt i tiden är man hänvisad till skillnad mellan filtrerad och ofiltrerad absorbans (AbsDiff) som avslutades 2010 och ersattes med mätning av turbiditet. Vi har visat på ett generellt samband mellan logaritmerade värden av AbsDiff och turbiditet kan då användas för att räkna om AbsDiff till turbiditet ( ekv. 2), och på så sätt kombinera tidsserierna av de två parametrarna. Man bör dock granska varje enskild tidsserie för att se om ett ”hack” i kurvan vid tiden för metodbytet indikerar att omräkningen ger ett systematiskt fel som måste beaktas vid en statistisk analys av tidsserierna.

Erfarenheterna från fältmätningar med en sensor med kontinuerliga mätningar av turbiditet och konduktivitet visar att tekniken har stor potential att öka kunskapen om dynamiken i halter och transporten av suspenderat material och totalfosfor från jordbruksmark. Samtidigt visades på vikten av att ta hänsyn till den rumsliga variationen i vattendraget som kan vara stor för suspenderat material. Det gäller både när man tar vanliga prover, installerar slangar för provtagning av flödesviktade prover och monterar sensorer för kontinuerliga mätningar. För noggranna resultat bör man därför göra mätningar med en sensor i en vertikalprofil vid olika flöden för att hitta en representativ punkt.

## Referenser

- Brandt, M. 1996. Sedimenttransport i Svenska vattendrag, exempel från 1967-1994. SMHI Hydrologi Nr 96.
- Djordjic, F., S. Hellgren, M.N. Futter, and M. Brandt. 2012. Suspenderat material – transporter och betydelsen för andra vattenkvalitetsparametrar. SMED Rapport Nr 102 2012.
- Fölster, J., R.K. Johnson, M.N. Futter, and A. Wilander. 2014. The Swedish monitoring of surface waters: 50 Years of adaptive monitoring. *Ambio* 43: 3-18. doi:DOI 10.1007/s13280-014-0558-z.
- Kyllmar, K. 2009. Transporter av kväve och fosfor i vattendrag - Inverkan av metodik vid vattenprovtagning
- Jämförelse av vattenanalyser från manuell respektive flödesproportionell vattenprovtagning i åtta Intensivtypområden. Teknisk rapport 131. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för Mark och miljö, Enheten för Biogeofysik och Vattenvård.
- Löfgren, S., E. Ring, C. von Brömssen, R. Sørensen, and L. Högbom. 2009. Short-term effects of clear-cutting on the water chemistry of two boreal streams in northern Sweden: A paired catchment study. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 38: 347-356.
- Rönback, P., L. Sonesten, and M. Wallin. 2009. Ämnestransporter under vårflöden i Ume älv och Kalix älv. Effekter på transportberäkningarna av en utökad provtagningsfrekvens. Rapport 2009:20. Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Stjernman Forsberg, L., K. Kyllmar, and S. Andersson. 2011. Växtnäringsförluster i små jord- bruksdominerade avrinningsområden 2009/2010. Årsredovisning för miljöövervakningsprogrammet Typområden på jordbruksmark. – SLU, Institutionen för mark och miljö. Ekohydrologi 126.
- Villa, A. 2014. Risk assessment of erosion and losses of particulate phosphorus. A series of studies at laboratory, field and catchment scales. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae* 2014:64., Swedish University of Agricultural Sciences.

