



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 12 007

Examensarbete 30 hp
Mars 2012

Identifiering av fosfatfosfors käll- och flödesfördelning i ett litet jordbruksområde

Identification of phosphate phosphorus source
and flow paths in a small agricultural catchment

Rasmus Rönnberg

REFERAT

Identifiering av fosfatförsors käll- och flödesfördelning i ett litet jordbruksområde

Rasmus Rönnberg

Eutrofiering av sjöar, vattendrag och hav är ett uppmärksammat miljöproblem och innebär en berikning av näringsämnen fosfor (P) och kväve (N). Fosfor anses utgöra den mest betydelsefulla komponenten för tillväxt av vattenlevande växter och i för stora mängder leder förhöjda halter till en intensifierad tillväxt. Fosfat (PO_4^{3-}) är den fraktionen av fosfor som lättast kan tillgodose av växter och på så vis har störst inverkan vid övergödning. Igenväxning av sjöar och kustzoner leder till syrebrist och döda havsbottnar vilket medför ogynnsamma förhållanden för vattenlevande djur. En betydande del av den ökade näringstillförseln till vattendrag kan härledas från fosfatläckage från jordbruksområden, där enskilda avlopp och åkermark utgör två källor. Hur stor del av de diffusa läckagen av fosfat som härrör från respektive källa råder det bristande kända om.

Med en ökad förståelse om hur käll- och flödesfördelning av fosfat förhåller sig i ett jordbruksdominerat avrinningsområde skulle kostnadseffektivare åtgärder mot läckage av näringsämnet kunna vidtas. Käll- och flödesfördelning av fosfat studerades i detta examensarbete och en högupplöst uppsättning av SMHI:s hydrologiska modell HYPE sattes upp över området. Provtagningar av fosfat från olika delar i området användes tillsammans med modellerad vattenföring och fosfattransporter beräknades. Uppströms- och nedströmsdynamik hos fosfat jämfördes under hög vattenföring, när fosfattransporter var stora. Provtagningar av syreisotopsammansättningen i fosfatjonen från avlopp och jordbruksmark analyserades och användes för uppskattning av källfördelningen vid olika vattenföring. De samlade studiernas information användes för att identifiera från vilken källa och vid vilken vattenföring i området fosfat läcker mest. Utöver det här utvärderades även betydelsen av val av rums- och tidssteg för HYPE.

Transportberäkningar i rummet visade att de avloppsdominerade avrinningsområdena var de områden som läckte mest fosfat per ytenhet under låg vattenföring. Ej avloppspåverkade jordbruksområden läckte mer fosfat per ytenhet vid hög vattenföring än vid låg. Denna läckagefördelning mellan delavrinningsområdena var tydlig under höst och vinter och mindre tydligt under vår och sommar. Syreisotopsammansättningen i fosfatjoner från källorna avlopp och jordbruksmark kunde med 99 % konfidens skiljas åt. Informationen utnyttjades för källseparering mellan fosfatkällorna där avlopp visade sig vara den huvudsakliga källan vid vattenföring upp till 23 l/s. Vid högre vattenföring blev jordbruksmark den huvudsakliga källan och källans andel ökade positivt linjärt med ökande vattenföring. Båda studierna pekar på att avlopp stod för de största fosfatläckagen under låg vattenföring. Under en snösmältningssperiod var fosfatläckaget störst i början och läckaget minskade allteftersom fosfater spolades ut ur marken då vattenföringen förblev hög under flera dagar i rad. Betydelsen av ett fint tidssteg var viktigare än en hög rumslig beskrivning i HYPE, men båda påverkade utdata marginellt bättre.

Nyckelord: Övergödning, fosfor, jordbruksområden, hydrologi, HYPE, isotop

*Institutionen för Geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.
Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sverige.*

ISSN 1401-5765

ABSTRACT

Identification of phosphate phosphorus source and flow paths in a small agricultural catchment area

Rasmus Rönnberg

Eutrophication of lakes and streams are nowadays a well known environmental problem and implies an enrichment of the nutrients phosphorus (P) and nitrogen (N). Phosphorus is considered to be the most important component for the growth of aquatic plants and leads in too large quantities to an intensification of growth. Phosphate (PO_4^{3-}) is the fraction of phosphorus that can easiest be taken up by plants and thus have the greatest impact on eutrophication. Increased plant growth in lakes and unfavorable conditions for aquatic animals are two examples of negative consequences. A significant portion of the increased nutrient supply to nearby water can be derived to phosphate leaching from agricultural areas, where private sewers and agriculture is two main sources. How much of the diffuse leakage of phosphate derived from each source is uncertain.

With an improved understanding of how the source and flow distribution of phosphate relationship works in an agricultural dominated catchment could a more cost efficient planning for choice of methods against leakage of the nutrient be achieved. The source and flow distribution of phosphate was therefore studied and a high resolution set of SMHI's hydrological model HYPE where set up over the area. Sampling of phosphate from different parts of the area where used together with modeled water flow and phosphate transport where calculated. Upstream and downstream dynamics of phosphate were compared during high water flow. Also sampling of the oxygen isotopic composition in phosphate ions from sewage and agricultural land were analyzed and used to estimate the source distribution at different situations of water flow. The collected information from these studies where used to identify from which source to phosphate and during which flow the leakage of phosphate where the most in the area. In addition to this an evaluation of the importance of the time and space resolution for the HYPE-model where made.

Phosphate transports in space shows that the sewage-dominated basins where the areas that leak most phosphate per area unit and during low water flows. Agricultural areas account for more significant leakage during a high water flow. This is evident in autumn and winter and less evident during spring and summer. Oxygen isotopic composition of phosphate ions from wastewater and agricultural land could with a 99 % confidence be separated. This information was used for source separation of phosphate sources where sewage was the main source of water flow up to 23 l/s. At higher water flow increases agricultural land as a primary source and increases positively linearly with increasing water discharge. Both studies indicate that sewage accounts for the greatest leakage during low water. During a snow-melting period the phosphate leaching is highest at the beginning and gradually flushed out from the soil when the water flow remains high for several days in a row. The importance of a high resolution time and space step affected modeled data marginally positive in HYPE where time step had a more important role.

Keywords: Eutrophication, phosphorous, agricultural area, hydrology, HYPE, isotope.

Department of Earth Sciences, Air, Water and Landscape Sciences, Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden.

ISSN 1401-5765

FÖRORD

Examensarbetet formulerades tillsammans med min projektgrupp bestående av kollegor från Linköpings universitet, SMHI i Norrköping och Länsstyrelsen i Linköping.

Projektet ligger som ett grenprojekt till det större nationella projektet "Greppa näringen" vars mål är att minska näringsförluster från åkermark.

Arbetet har såväl finansierats som utfärdats på avdelningen för Forskning och utveckling hydrologi (FoUh), SMHI.

Jag vill tacka Lotta Andersson (Handledare, SMHI), Karin Sundblad-Tonderski, Joakim Riml, Karin Johannesson, Anuschka Heeb, Göran Lindström, Allan Rodhe (Ämnesgranskare, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet), Frédéric Cortat, Johan Strömqvist och Lotta Pers för att ni har hjälpt mig under arbetets gång.

Rasmus Rönnerberg

Copyright © Rasmus Rönnerberg och Institutionen för Geovetenskaper, Luft-, vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 12 007, ISSN 1401-5765

Tryckt hos Institutionen för geovetenskaper, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2012.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Identifiering av fosfatfosfors käll- och flödesfördelning i ett litet jordbruksområde

Rasmus Rönnberg

Läckage av näringsämnen fosfor (P) och kväve (N) från åkermark har sedan länge varit känt som en stor källa till eutrofiering av sjö- och havsområden. Dessa två näringsämnen utgör tillsammans med solljus avgörande komponenter under växters påbyggnad av organiskt material och tillväxt. Då fosfor ofta anses vara det begränsande näringsämnet vid tillväxt av vattenlevande växter, såväl i sjöar som i olika havsområden, är det av stor angelägenhet att reducera utsläpp av fosfor. Enligt Naturvårdsverket står det diffusa läckaget av fosfor från åkermark för en tredjedel av all fosfor som når Östersjön. Mer än två tredjedelar av all fosfor som når närmiljön kan härledas till åkermark. Även enskilda avlopp står för ett betydande bidrag till övergödning av Östersjön, men påverkar i huvudsak sjöar och närliggande vattendrag.

Då enskilda avlopp och jordbruksmark ofta geografiskt sammanfaller blir det samlade läckaget av fosfor stort från jordbruksområden och således av extra vikt att åtgärda. Vanliga metoder idag för behandling och reduktion av fosforläckage från områden med ovan nämnda karaktär är exempelvis; våtmarksanläggningar vid utloppen från avrinningsområden; kalkning av jordbruksmark; fånggrödor eller efterliggande behandling av enskilda avlopp. Flera av dessa metoder är ineffektiva och tids- och kostnadskrävande, då stora områden behandlas med det missvisande antagandet att fosforläckaget är lika stort från hela jordbruksområdet.

Examensarbetets syfte var att utvärdera en metod för käll- och flödesfördelning av fosfat från jordbruksmark och avlopp i ett litet jordbruksdominerat avrinningsområde. Information om vilka delavrinningsområden och källor inom ett område som står för de största fosforläckagen skulle kunna utgöra underlag vid planering av kostnadseffektiva åtgärder mot fosforläckage. Den form av fosfor som lättast kan tas upp av växter är fosfatjonen (PO_4^{3-}) vilket är den lättlösliga formen av fosfor som studien avser. Den naturliga variationen av syreisotopsammansättningen i fosfatjonen utnyttjades för att särskilja fosfater från avlopp och fosfater från jordbruksmark. En högupplöst uppsättning (i tid och rum) av SMHI:s hydrologiska modell HYPE sattes upp för uppskattning av vattenföring från de olika källorna. Med den samlade informationen om fosfatkoncentration, vattenföring och syreisotopsammansättningen i fosfatjonerna, beräknades både fosfattransporter från de olika delavrinningsområdena och källfördelning vid olika vattenföring. Uppströms- och nedströmsdynamik i området studerades genom en intensivprovtagning av fosfatkoncentrationer under en snösmältningsperiod i mars 2010. Utöver det här undersöktes vilken betydelse tidsstegets storlek och rumsliga upplösning hade vid simulering av vattenföring och fosfatkoncentrationer med HYPE.

Resultatet av studien visade att fosfatläckage hade en variation i tid och rum. Under höst och vinter vid låg vattenföring i området var det tydligt att avloppsbelastade delavrinningsområdena stod för de största läckagen av fosfat per ytenhet. Det utgjordes sannolikt av avloppsläckage från dessa områden. Under hög vattenföring och under samma årstider stod de ej avloppsbelastade delavrinningsområdena för ett större läckage av fosfat per ytenhet än under låg vattenföring. Det här beror sannolikt på att fosfater från jordbruksmark spolades ut vid hög vattenföring. Under årstiderna vår och sommar återfanns samma tendenser i läckagefördelningen i området, men inte lika tydliga. Oavsett vattenföring var det de avloppspåverkade delavrinningsområdena som stod för

det största läckaget fosfat per ytenhet. Det betyder nödvändigtvis inte att det var avloppen som läckte mest fosfat, då alla områden var jordbruksområden. En möjlig förklaring till säsongsvariationen i läckagefördelningen från de olika delavrinningsområdena kan vara att växtsäsongen börjar på våren och fosfater tas upp. Grödoupptaget är som störst under sommaren och minskar under höst och vinter. Fosfatläckage från jordar blir följaktligen större vid hög vattenföring under höst och vinter då det är mer fosfat i jorden.

Den högupplösta uppsättningen av HYPE kalibrerades med ett bra resultat för vattenföring och mindre bra resultat för vattenkvalitet. Modellen ansågs fånga dynamiken i fosfatkoncentrationer så väl att den användes som verktyg till modellering av fosfatkoncentrationer. Tillsammans med syreisotopsammansättningen i fosfatjonen, som efter analys visade sig med 99 % konfidens skilja sig åt mellan källorna avlopp och jordbruksmark, tillämpades en massbalans för fosfat. Nio beräkningar gjordes och under låg vattenföring utgjorde avlopp den huvudsakliga källan till läckage av fosfat. Vid en vattenföring på 23 l/s var källfördelningen mellan avlopp och jordbruksmark lika stor och en högre vattenföring medförde en positivt linjär ökning av jordbruksmark som huvudsaklig källa. Metoden innehåller dock en del osäkerheter som inte kvantifierades. Både provtagningsstudien i rummet och den mer teoretiska studien av källfördelning av fosfat visar att källan avlopp läcker mest fosfat under låg vattenföring och jordbruksmark under hög. En tydlig samvariation mellan uppströmsområde och nedströmsområde i fosfatkoncentrationer och vattenföring erhöles.

Fosfatkoncentrationer är högst i början av en snösmältningsperiod och spolats succesivt ut ur marken i takt med att vattenföringen fortsätter vara hög. Transporterna var generellt sett stora under snösmältningsperioden och resultatet skulle kunna användas till åtgärd mot fosfatläckage under hög vattenföring. Värdet av ett kort tidssteg och en hög upplösning i rummet var marginellt positivt vid modellering av fosfatkoncentrationer och vattenföring. Av dessa två var tidssteget viktigast, men med hänsyn till arbetet bakom en högupplöst uppsättning av HYPE så var det i den här studien omotiverat. Det är sannolikt den lokala geografiska beskrivningen som ger mest inverkan på utdata vid modellering av området.

Sammantaget pekar de olika studierna på att i detta område utgör avlopp den huvudsakliga källan till fosfatläckage vid låg vattenföring och jordbruksmark vid hög. Mer data behövs för att validera isotop-källfördelningsmetoden och då skulle sannolikt den kunna utnyttjas för identifiering av käll- och flödesfördelning av fosfat. Det skulle i sin tur kunna utgöra underlag och stöd vid planering av kostnadseffektiva åtgärder mot läckage av fosfat.

Innehållsförteckning

REFERAT.....	<i>I</i>
ABSTRACT.....	<i>II</i>
FÖRORD.....	<i>III</i>
POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING.....	<i>IV</i>
1 INLEDNING.....	1
2 BAKGRUND.....	2
2.1 HYPE.....	2
2.2 Syreisotopsammansättning i fosfatjonen ($\delta^{18}\text{O}_p$).....	4
3 METOD.....	6
3.1 Områdesbeskrivning.....	6
3.2 Tillvägagångssätt och strategi.....	9
3.2.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat.....	9
3.2.2 Variation av fosfat i tid och rum.....	9
3.2.3 Källfördelning av fosfat.....	9
3.3 Provtagning och analys av fosfat.....	9
3.4 Provtagning och analys av $\delta^{18}\text{O}$ i fosfatjonen.....	10
3.5 H-HYPE.....	11
3.5.1 H-HYPE i rummet.....	11
3.5.2 H-HYPE i tiden.....	12
3.5.3 Kalibrering av H-HYPE.....	12
3.6 Jämförelse mellan olika modelluppsättningar av HYPE.....	12
3.6.1 Betydelsen av den rumsliga uppdelningen i HYPE.....	12
3.6.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE.....	12
3.7 $\delta^{18}\text{O}_p$ för bestämning av källfördelning av fosfat.....	13
4 RESULTAT.....	15
4.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat.....	15
4.2 Variation av fosfat i tid och rum.....	17
4.3 Syreisotopsammansättning i fosfat ($\delta^{18}\text{O}$).....	22
4.4 Kalibrering av H-HYPE.....	23
4.5 Jämförelse mellan olika modelluppsättningar av HYPE.....	26
4.5.1 Betydelsen av den rumsliga uppdelningen i HYPE.....	26
4.5.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE.....	26
4.6 Källfördelning av fosfat.....	27
5 DISKUSSION.....	28

5.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat.....	28
5.2 Variation av fosfat i tid och rum.....	28
5.3 Syreisotopsammansättning i fosfat ($\delta^{18}\text{O}$).....	30
5.4 Kalibrering av H-HYPE.....	30
5.5 Jämförelse mellan olika modelluppsättningar.....	31
5.5.1 Betydelsen av den rumsliga uppdelningen i HYPE.....	31
5.5.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE.....	31
5.6 Källfördelning av fosfat.....	31
6 SLUTSATSER.....	33
7 PRAKTISKA IMPLIKATIONER.....	34
8 REFERENSER.....	35
APPENDIX.....	37

1 INLEDNING

Näringsläckage från jordbruksmark har sedan länge varit känt som en av de mest betydelsefulla källorna till eutrofiering av sjöar och vattendrag. Transport av näringsämnet fosfor (P) från jordbruksmark till närliggande vattendrag uppskattas stå för 70-90 procent av den totala transporten fosfat från naturen (Ulén, 2006). Då tillförd fosfor, i form av gödsel, inte alltid kan tillgodogöras av växter urlakas närsalterna istället vid regn eller under snösmältning och transporteras via dräneringsrör och bäckar till sjöar och kustområden. Även enskilda avlopp med otillräcklig reningsgrad har visat sig spela en stor roll för läckage av fosfor från åkermark till sjöar och vattendrag (Ulén m.fl., 2006). Då fosfor generellt sätt är det begränsande näringsämnet för tillväxt av vattenlevande växter i sjöar och vattendrag (Vattenmyndigheten, 2010) och samtidigt en begränsad resurs (Greppa näringen, 2010), ligger det i många aktörers intresse att näringsämnet inte sprids ut och hamnar i sjöar och hav där syrebrist och algbloomning är två i raden av negativa konsekvenser (Havet.nu, 2012). Det är den växttillgängliga, oorganiska och lösta fraktionen av fosfor, fosfatfosfor (PO_4^{3-}), som växter tar upp (Göta älvs vattenvårdsförbund, 2011) och den ger därför stor påverkan vid eutrofiering (Göta älvs vattenvårdsförbund, 2011). Minskning av läckage från jordbruksdominerade områden, där läckage från enskilda avlopp och jordbruksmark ständigt sker har blivit extra intressant på senare år, då punktkällor som reningsverk håller en hög reduktionsgrad av näringsämnen. Eftersom fosfatläckage från enskilda avlopp och jordbruksvatten är svåra att uppskatta och båda härstammar från jordbruksområden finns det intresse i att kvantifiera hur stor andel som kommer från respektive källa. Information om källfördelning av fosfat kan användas som underlag vid planering av kostnadseffektiva åtgärdsprogram för reduktion av näringsämnet fosfat till sjöar och hav.

Det övergripande målet med examensarbetet var att få ökade kunskaper om hur fosfater läcker vid olika vattenföring inom ett jordbruksdominerat avrinningsområde.

Specifika mål var att:

- Jämföra uppströms- och nedströmsdynamik hos fosfat under en snösmältningsperiod med hög vattenföring
- Jämföra relativa fosfattransporter från olika delar av avrinningsområdet under olika årstider och under hög respektive låg vattenföring
- Källseparera fosfat från enskilda avlopp och jordbruksmark

Utöver det här gjordes en jämförelse mellan en högupplöst och en mindre högupplöst uppsättning av SMHI:s hydrologiska modell HYPE och betydelsen av ett kortare tidssteg och en finare rumslig uppdelning utvärderades.

2 BAKGRUND

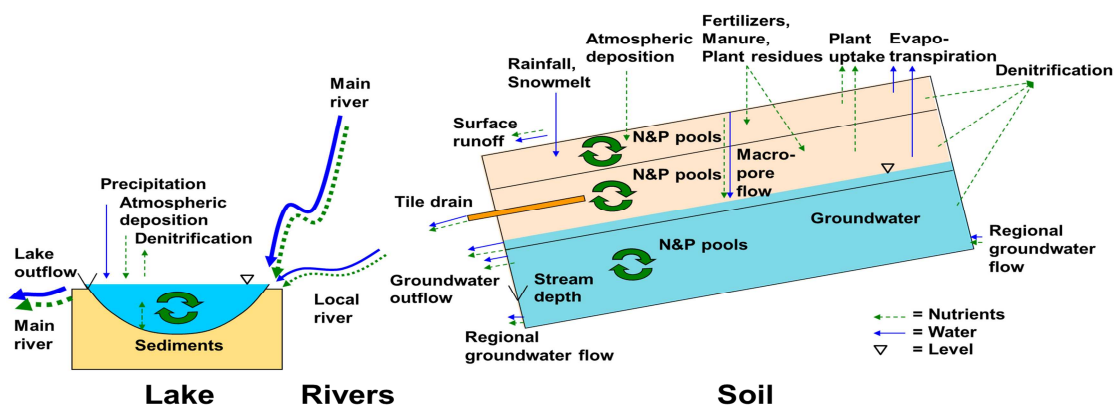
2.1 HYPE

Då det är ekonomiskt orimligt att kontinuerligt mäta vattenföring eller näringskoncentrationer i vattendrag krävs en abstraktion av verkligheten, en modell. HYPE användes för beräkning av vattenföring och vattenkvalitet i det jordbruksdominerade avrinningsområdet som studerades.

HYPE, eller **HY**drological **P**redictions of the **E**nvironment, är en av SMHI:s etablerade hydrologiska modeller och används vid uppskattning av vattenföring och vattenkvalitet. HYPE används för modellering av storskaliga avrinningsområden och modellen är idag uppsatt för både Sverige (S-HYPE) och Europa (E-HYPE). Oavsett storlek som modellen är skalad för, ligger samma matematiska ekvationer till grund för beräkningar av de olika processerna som ständigt sker i naturen.

Modellstrukturen utgörs av ett avrinningsområde, som i sin tur kan delas upp i delavrinningsområden, som beskrivs av jordtyp, markanvändning och typ av grödor (Strömqvist m.fl., 2010). En unik kombination av dessa tre kallas en klass (SLC) och är den minsta beräkningsbara ytan i rummet (Lindström m.fl., 2010). Kombinationen av en gröda på en jordtyp båda under en kategori av markanvändning utgör en klass. Klassen, eller de tre indelningarna som utgör klassen, beskrivs i parameterfiler för grödor, jordtyper och markanvändning. Summan av alla unika klasser utgör hela arean av området som modelleras. Klasserna, som beskriver den geografiska informationen, läses in av modellen och tillsammans med drivdata, bestående av nederbörd och temperatur, beräknas vattenföring och näringskoncentrationer.

För varje delavrinningsområde beräknas ett utflöde av näringsfraktioner och vatten och adderas till nästa delavrinningsområde nedströms. Samma process sker successivt genom hela systemet till utloppet. Beräkningarna utförs vanligtvis med ett dygn som tidssteg, d.v.s. en beräkning per dygn. Rumsliga variationer av egenskaper och indata inom avrinningsområden såsom vegetation, nederbörd och temperatur tas hänsyn till varför modellen anses vara hydrologiskt semi-distribuerad.



Figur 1: Schematisk bild över HYPE och dess modellstruktur, där streckade och heldragna linjer åskådliggör näringsämnen och vattnets respektive flöden (Strömqvist m.fl., 2010, med tillstånd).

HYPE beskriver markprofilen med maximalt tre skikt, där utbyten av näringsämnen kväve (N) och fosfor (P) mellan skikten beräknas (Fig.1). Inbördes näringspooler i de olika skikten adderas eller subtraheras från varandra, beskrivet av deras huvudsakliga källor och sänkor (Strömquist m.fl., 2010). Antal och djup på markskikten sätts av användaren och bestäms beroende på vilken vertikal upplösning som erfordras. Jordbruksmark beskrivs oftast med tre skikt (Lindström m.fl., 2010) och med olika hastighetskoefficienter för de olika lagren, medan skog, med dess mer homogena markprofil, beskrivs med två skikt. Regn och smältvatten infiltrerar ner i markskikten och avdunstar samtidigt från de två översta markskikten. Beroende på intensitet och mängd adderar nederbörd till grundvattenmagasinet och vid mättade förhållanden i markprofilen förs vatten bort till vattendrag via ytavrinning. Vatteninnehållet i de olika skikten styrs av variabler som håller reda på grundvattenytan och vatteninnehållet i de olika skikten. Vatten kan även dräneras via dräneringsrör eller diken och förs då till närmaste vattendrag. Alla processerna parametreras och används i de underliggande funktionerna vid beräkning av vattenföring och vattenkvalitet. En del parametrar är generella, såsom avdunstning som regleras av rådande temperatur. Andra parametrar sätts för en specifik klass, där jordtyp, markanvändning och gröda är inkorporerade. Exempel på parametrar som är jordtypberoende är vissningsgräns, fältkapacitet och makroporflöde.

Ett avrinningsområde kan teoretiskt bestå av hur många delavrinningsområden som helst. På samma sätt kan ett delavrinningsområde bestå av hur många klasser som helst. Antalet delavrinningsområden och klasser regleras endast av hur i rummet upplöst man vill och framförallt *kan* beskriva området. Graden av ökad spatial upplösning är linjär mot antalet parametrar och för att kunna utnyttja den upplösta beskrivningen krävs således att parametrarna är representativa. En simulering genererar i slutändan en vattenföring ut från avrinningsområdet och koncentrationer av sökta fraktioner av fosfor och kväve. När en uppsättning av modellen över ett område är färdig och simulering av modellen genererar eftersökt data, överensstämmer sällan teoretiskt modellerade data med uppmätta. Som referens och som förutsättning för kalibrering av modellen krävs en tidsserie med uppmätt data. Modellerade utdata jämförs med uppmätta och parametrar justeras för att åstadkomma en bättre korrelation mellan uppmätt och simulerad tidsserie av data. Kalibreringen bör göras över en så lång tid som möjligt, vanligt är en 30-årsperiod. Då det inte alltid finns kontinuerliga mätstationer eller data över 30-årsperioder begränsas kalibreringen och följaktligen beskrivningen av det studerade området. Kalibrering är en tidskrävande process och en mycket god överensstämmelse är svåruppnådd. Generellt sett är det enklare att kalibrera vattenföringen än vattenkvaliteten. Det beror delvis på att processerna för vatten i marken är enklare att beskriva men också på att vattenkvaliteten är en funktion av både vattenflödet och näringsprocesserna i marken. Ett mått på hur bra modellen predicerar data är Nash–Sutcliffe modell-effektivitetskoefficient. Nash–Sutcliffe R^2 är ett mått på prediktionskraften hos modellen, d.v.s. hur pålitlig modellen är.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (p_o^t - p_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (p_o^t - p_o^t)^2} \quad (1)$$

$\overline{p_o^t}$: medelvärdet av den modellerade parameterdata över hela tidsperioden.

p_o^t : observerad parameterdata vid tidpunkten t.

p_m^t : modellerad parameterdata vid tidpunkten t.

Parametern p kan exempelvis vara Q (vattenföring) eller P (fosfatkoncentration).

Vid en given tidpunkt jämförs observerad fosfatkoncentration med modellerad och kvadreras. Differenserna summeras över givet tidsintervall och blir summan lika med noll betyder det att observerad fosfatkoncentration är lika stor som modellerad vid alla tillfällen, vilket ger $R^2 = 1$ och modellen predicerar koncentrationerna idealt. Fallet $R^2 \leq 0$ innebär att den observerade fosfatkoncentrationens medelvärde motsvarar en lika bra eller bättre prediktor än modellen. Vanligt R^2 -värde för små sjölösa områden kan vara 0,3-0,7 medan R^2 -värdet för vattenkvalitet är lägre.

Andra mått på hur väl modellen predicerar data är medelvärdet av det kvadrerade felet (MSE), det relativa felet (RE) och volymfelet (VE).

$$MSE = Medel [\sum_{t=1}^T (p_o^t - p_m^t)^2] \quad (2)$$

p_o^t : observerade parameterdata vid tidpunkten t.

p_m^t : modellerade parameterdata vid tidpunkten t.

Felet summeras och kvadreras över alla tidpunkter. Sedan medelvärdesbildas felet och ger ett mått på hur stort fel modellen genererar.

$$RE (\%) = \frac{\Delta y - \Delta x}{\Delta x} \quad (3)$$

Det relativa felet beräknas genom att uppmätta data (Δx) subtraheras från modellerade data (Δy) och divideras med Δx . Det uttrycker huruvida modellen över- eller underprognostiserar data i andelar.

VE, eller volymfelet är summan av den totala modellerade volymen under den studerade tiden delat med summan av den uppmätta. Måttet är användbart vid kalibrering. Om $VE = 1$, så har rätt volym åstadkommit, dock betyder det inte att modellen predicerar rätt flöde vid rätt tidpunkt, utan ger bara information om att summan av den modellerade variabeln över hela tidsperioden överensstämmer med uppmätt. Sammantaget används alla mått för att studera hur väl modellen modellerar verkligheten.

HYPE har många användningsområden i praktiken. Vattenkraftindustrin är ett exempel, där mängden vatten som tillrinner ett magasin efterfrågas, vilket i sin tur ger underlag för deras prissättning på elektricitet. Ett annat exempel på användningsområde är inom oceanografin, där det är av betydelse att veta hur mycket sötvatten som tillrinner hav för att studera havstemperaturer. I ramdirektivet för vatten är ett av miljömålen till år 2012 att uppnå ”god ekologisk status”. Här bidrar SMHI bland annat med verktyget vattenweb, som tillgängliggör information om söt- och kustvatten och vars syfte är att underlätta och samla data för kommande miljöötgärder i Sverige (Vattenweb, 2010).

2.2 Syreisotopsammansättningen i fosfatjonen ($\delta^{18}\text{O}_p$)

Beroende på i vilken biologisk miljö fosfat befinner sig har det visat sig att den naturliga isotopsammansättningen i syreatomen i fosfatjonen varierar (Mclaugling m. fl., 2004, 2006; Katy m.fl., 2009; Tonderski m.fl., 2012). Atomer av ett ämne med olika antal neutroner kallas isotoper av ämnet. Sammansättning av den tyngre stabila

syreisotopen ^{18}O och den lättare, vanligast förekommande stabila syreisotopen ^{16}O , varierar då bakterier under olika miljöbetingelser ställer in syreisotopsammansättningen i fosfatjonen. Bakterierna medlar syreisotoper mellan vatten och oorganiskt fosfat och utbytet regleras av jämvikten mellan tunga och lätta syreisotoper. Det här varierar i sin tur beroende på hur stor mängd organiskt material som närvarar i miljön fosfaterna befinner sig i (Blake m.fl., 1997).

Fastställning av syreisotopsammansättningen i fosfat ($\delta^{18}\text{O}_p$), från olika källor inom ett avrinningsområde, kan ge information om den naturliga signaturen från olika fosfatkällor. Dessa indikatorer, eller signaturer, kan användas för att öronmärka och identifiera varifrån i ett avrinningsområde fosfat läcker mest. Metoden har visat sig framgångsrik för källseparering i såväl sjöar (Katy m.fl., 2009) som i urbana områden (McLaughlin m.fl., 2006).

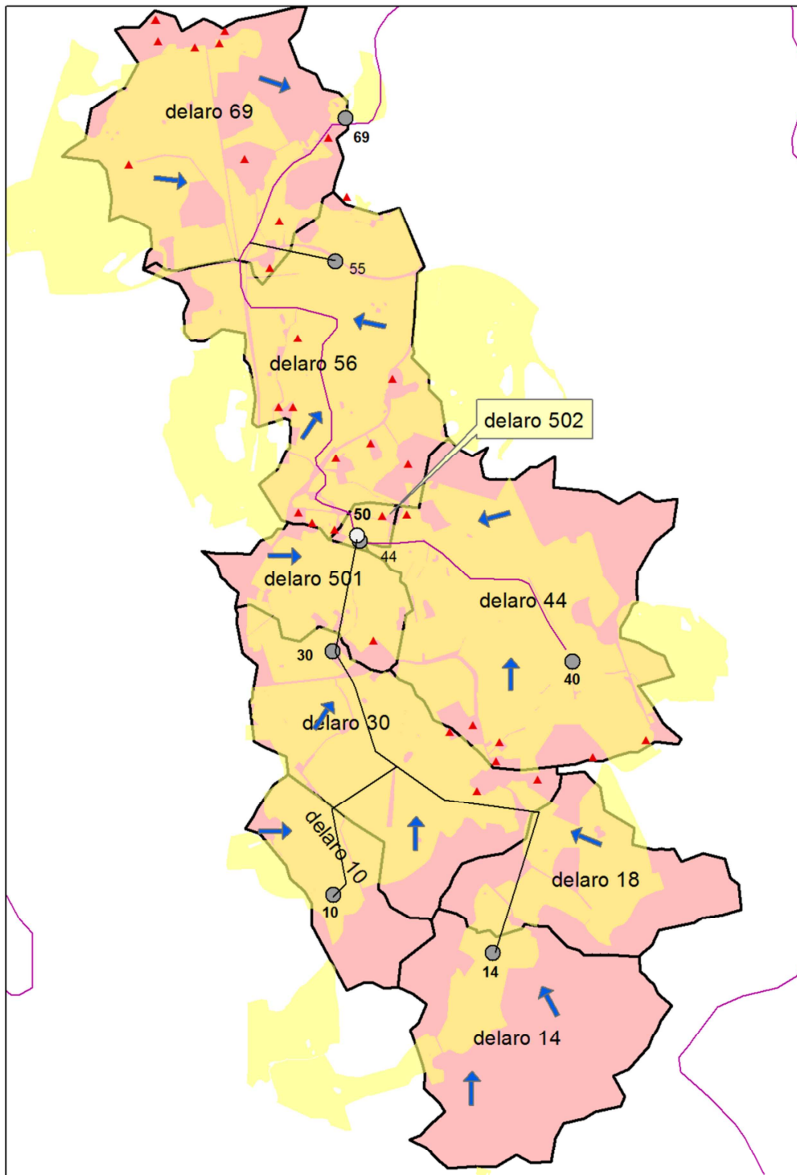
3 METOD

Fosfatkoncentrationer i vattenprover från samtliga provpunkter i det studerade området (Fig. 2) provtogs och vattenföring från jordbruk, avlopp och övrig mark modellerades med en högupplöst HYPE-modell (H-HYPE). Modellen sattes upp för området, tillsammans med Joakim Riml (doktorand vid KTH) utifrån lokalkännedom. Ett kort (en timme) tidssteg och en högupplöst (nio delavrinningsområden) rumslig uppdelning användes med ambitionen att noggrannare kunna modellera fosfat. H-HYPE kalibrerades mot uppmätta fosfatkoncentrationer och vattenföring i utloppet av området. En jämförelse av H-HYPE och S-HYPE gjordes och betydelsen av ett kortare tidssteg och en högre rumslig uppdelning studerades. För båda modellerna användes samma databas, d.v.s. enbart tids- och rumssteg varierade.

Efter kalibrering av H-HYPE användes modellen för beräkning av fosfatkoncentrationer och vattenföring från de olika delavrinningsområdena. Fosfattransporter från de olika delavrinningsområdena beräknades under olika årstider och vid hög och låg vattenföring. Fosfatprover togs även för analys och bestämning av syreisotopsammansättningen från källorna avlopp och jordbruk i området. Informationen användes tillsammans med modellerade fosfatkoncentrationer och vattenföring och en massbalans för fosfat tillämpades för bestämning av källfördelning. Den samlade informationen användes sedan för att identifiera varifrån i ett jordbruksdominerat avrinningsområde de största läckagen av fosfat kommer.

3.1 Områdesbeskrivning

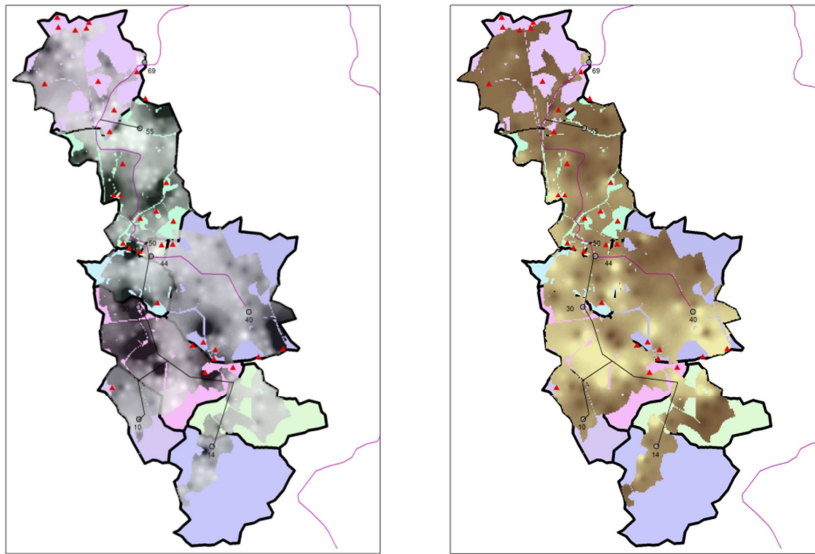
Området där studien genomfördes (7,8 km²) är beläget i södra Sverige och utgörs till största del av jordbruksmark, där den vanligaste jordtypen är lera. Området uppdelades i nio mindre delavrinningsområden, med en mer skogsdominerad mark uppströms och utan avloppspåverkan. Delavrinningsområden uppströms är dränerade och via dräneringsrör leds vattnet vidare under marken där de kopplas ihop och mynnar ut i en bäck. Där bäcken börjar finns en gles bebyggelse och enskilda avlopp har sina utlopp direkt, via diken eller infiltration till bäckfåran. Bäckens tilltar i storlek längre nedströms i systemet och mynnar slutligen ut i en damm. Här har SMHI en vattenföringsstation som kontinuerligt registrerar vattenföring. Avloppen i området har tidigare inventerats (Rönneberg, 2009) och information om typ av avlopp, efterliggande rening, antal personer i hushållet, permanentboende eller fritidsboende sammanställdes. Totalt finns det 34 enskilda avlopp i området.



Figur 2: Experimentområdet med de olika delavrinningsområdena markerat med delaro och siffra och provpunkter utsatta med siffror. Svarta streck markerar dräneringsrör, lila streck bäckfåra och röda trianglar symboliserar enskilda avlopp. Blåa pilar visar vattenföringens riktning. Gula fält är jordbruksmark, resten är skog, tomter och betesmark.

Tabell 1: Sammanfattning av Figur 2. Delavrinningsområde med tillhörande markanvändning.

Delavrinningsområde	Area (km ²)	Jordbruk (%)	Avlopp (antal/km ²)
10	0,43	58	0
14	1,11	17	0
18	0,7	49	0
30	1,07	77	2,8
44	1,65	71	3,6
501	0,4	80	2,5
502	0,05	83	57,1
56	1,27	83	8,7
69	1,22	59	8,2



Figur 3: Den vänstra bilden visar P-AL halter i marken, där tilltagade svartskala indikerar högre halter. Högra bilden visar styvhet hos lera, där tilltagade brunskala indikerar en styvare lera i området (modifierad data från en markkartering, Jordbruksverket, LRF, Greppa näringen, 2010).

P-AL är ett mått på hur mycket lättlöslig fosfor det finns i jorden. P står för fosfor och AL för ammoniumlaktat, ättiksyra och svavelsyra som blandas och används som extraktionsmedel av fosfor ur jorden (Eriksson m.fl., 2005). En hög P-AL-nivå innebär en hög halt lättillgänglig fosfor i jorden. En styvare lera har en högre halt lera än mellanlera och kan således bida fler partiklar till sig.

Uppströms i området ligger delavrinningsområdena 10, 14 och 18 (Fig. 2, Tab.1) som består av jordbruksmark, betesmark och skogsområden, ej påverkat av enskilda avlopp. Brunnar som dränerar dessa delavrinningsområden dränerar således vatten och fosfatkoncentrationer från en kombination av jordbruk, betesmark och skog. Skogsområdena anses bidra med en låg fosfatkoncentration. Detsamma gäller för betesmark. Generellt sett var det låga halter av P-AL i området (Fig. 3). Lerhalterna är höga och styva leror återfinns i delavrinningsområde 10 och 18.

I mittenpartiet av området ligger delavrinningsområdena 30, 501, 502 och 44 (Fig. 2, Tab.1) som utgörs av jordbruksområden, en del med höga P-AL halter (Fig. 3) och enskilda avlopp (Fig. 2). Här tas dräneringsvatten från uppströmspartiet emot och tillsammans med egna bidrag av vatten och fosfatkoncentrationer adderas flöden succesivt ner genom hela mittensektionen. Mittenpartiets dräneringsvatten utgörs följaktligen av en mix av vattenflöden och fosfater från jordbruk, avlopp och övrig mark.

I nedströmspartiet av området tas dräneringsvatten emot från mittenpartiet och egna bidrag i form av vattenflöden och fosfatkoncentrationer från jordbruksmark, enskilda avlopp och övrig mark blandas. Tillsammans mynnar summan av alla bidrag av vatten- och fosfatflöden från området ut i en damm (provpunkt 69, Fig. 2). Vid dammen finns ett triangulärt mätöverfall och en pegel som kontinuerligt registrerar vattenståndet så att vattenföringen ut från området erhålles.

3.2 Tillvägagångssätt och strategi

3.2.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat

Uppströms- och nedströmsdynamik studeras genom en i tiden högupplöst provtagning av fosfatkoncentrationer utförd under 14 dygn med en semi-automatisk provtagare under en smältperiod i mars 2010. Provpunkt 10 och 69 (Fig. 2) provtogs samtidigt och dynamik hos fosfatkoncentrationer studerades. Vattenföringen i provpunkt 10 modellerades med H-HYPE och jämfördes med vattenståndet som mättes med hjälp av en trycksensor i botten av dräneringsbrunn 10. Trycket räknades om till vattenstånd och användes som stöd vid uppskattning av hur bra H-HYPE modellerade vattenföring i brunnen.

3.2.2 Variation av fosfat i tid och rum

Stickprovtagningar av fosfatkoncentration under 4 års tid sammanställdes och delades in i årstiderna höst, vinter, vår och sommar med en ytterligare uppdelning i hög ($Q \geq 200$ l/s) och låg ($Q < 200$ l/s) vattenföring. H-HYPE användes för att beräkna vattenföringen vid dessa tillfällen. Vid situationer då modellen inte kunde modellera vattenföringen användes en viktningstabell, där det uppmätta utflödet från området fördelades proportionellt mot delavrinningsområdesareor, för uppskattning av vattenflöde från de olika delavrinningsområdena. Eftersom området var förhållandevis homogent anses viktningstabellen vara representativ vid uppskattning av vattenföringen. Vattenföringen multiplicerades med uppmätt fosfatkoncentration och fosfattransporterna bestämdes. Transporterna normaliserades med delavrinningsområdets yta för att göra jämförelserna av fosfattransport i rummet oberoende av yta. De tillfällen då fosfatkoncentrationsdata saknades aggregerades delavrinningsområden, vilket resulterade i en grövre upplösning i rummet då två eller fler delavrinningsområden lades ihop. Exempelvis aggregerades delavrinningsområde 18 och 30 konsekvent, då delavrinningsområde 18 saknade provtagningspunkt, men båda bidragen transporteras oundvikligen till utloppet i område 30. Delavrinningsområdenas fosfattransporter uppströms subtraherades från transporten från områden nedströms, eftersom fosfattransporterna successivt adderas från uppströms- till nedströmsområden. Hänsyn till fördröjning i området togs, då de flesta provtagningarna påbörjades uppströms i området och avslutades nedströms. Syftet var att studera skillnader mellan avloppspåverkade och ej avloppspåverkade områden för att få information om källfördelning mellan jordbruksmark och avlopp.

3.2.3 Källfördelning av fosfat

En separat provtagning av fosfatkoncentrationer gjordes för bestämning av syreisotopsammansättningen i fosfatjoner från jordbruksmark och avlopp. Fosfattransport från avlopp schabloniserades utifrån en avloppsinventering (Rönnerberg, 2009) och inkorporerades i modellen. Transport av fosfat från respektive fosfatkälla och fosfat från övrig mark modellerades med H-HYPE. Eftersom fosfater tas upp av växter och fastnar i marken var detta inte tillräcklig information för att uppskatta hur mycket av den totala fosfattransporten ut från området som utgjordes av respektive källa. Syreisotopsammansättningen i fosfatjonen utnyttjades för att särskilja fosfater från jordbruksmark och avlopp. Tillsammans med fosfattransporter användes isotopinformation och en massbalans för fosfor (Ekv. 4) tillämpades för uppskattning av källfördelning.

3.3 Provtagning och analys av fosfat

Vattenprover togs vid samtliga provpunkter i området (Fig. 2), vid hög och låg vattenföring, under alla årstider, från sommaren år 2009 till och med hösten 2011. En hög vattenföring definierades och sattes till $Q \geq 200$ l/s (Lindström, muntlig källa) vid utloppet av området (provpunkt 69, Fig. 2). Vattenföring lägre än 200 l/s, $Q < 200$ l/s, kategoriserades som en låg vattenföring. Provtagningstillfällena vid hög och låg vattenföring prognostiserades med hjälp av prognosverktyget Webhypro (SMHI), som är ett hydrologiskt prognosverktyg uppsatt och kalibrerat för området. Webhypro användes för prognoser av vattenföring i området och provtagning under hög och låg vattenföring planerades utifrån det här.

Två provpunkter, 10 och 69 (Fig. 2) provtogs högintensivt i tiden, med två timmars samplingsfrekvens. Det utfördes med en semi-automatisk provtagare under 14 dygn i rad i mars år 2010. Ambitionen var att studera hur fosfatkoncentrationer varierar under ett kort tidssteg när flera flödestoppar i rad inträffade.

Vid varje manuellt provtagningstillfälle, totalt ungefär 50 provtagningar och inte alltid i alla provpunkter, togs tre vattenprover för analys av fosfat, total-fosfor och ^{18}O i H_2O . Fosfatprovet filtrerades i fält genom ett 0,45 μm membranfilter, för att bli av med partikulärt bunden fosfor. Proverna transporterades till Linköpings universitet i kylväskor och analyserades av Karin Johannesson (Doktorand, LiU) eller av författaren. Med hjälp av ett automatiskt analysinstrument (FIA) och enligt svensk standard för analys av fosfatkoncentrationer fastställdes koncentrationerna. Då det sällan fanns tid att direkt efter provtagning analysera proverna, förvarades de nerfrysta i -40 °C i en frys på Linköpings universitet.

3.4 Provtagning och analys av $\delta^{18}\text{O}$ i fosfatjonen

Provpunkt 10, 14 och 69 (Fig. 2) och ett flertal enskilda avlopp i området provtogs för analys av syreisotopsammansättning i fosfatjonen ($\delta^{18}\text{O}_p$). Vid varje provtagning inhämtades ett vattenprov på 2, 15 och 20 liter för avlopp, utlopp (provpunkt 69) och dräneringsbrunnar (provpunkt 10 och 14) respektive. Fosfatkoncentrationerna i de olika provpunkterna varierade mycket, varför det inhämtades olika stora volymer vatten, då den kemiska analysen behövde en bestämd mängd fosfat. Under de flesta provtagningstillfällena inhämtades även korresponderande vattenprover för analys av fosfatkoncentrationen. I utloppet togs ett ensembleprov med en semi-automatisk provtagare, för att fånga fosfater från alla källorna. Ensembleprovet i utloppet utgörs således av en mix av fosfater från de olika källorna i området och var en förutsättning för bestämning av de relativa källbidragen.

Fosfatkällan avloppsvatten provtogs sex gånger i olika enskilda avlopp (röda trianglar, Fig. 2) från tredje kammaren i en trekammarbrunn, som var det vanligaste avloppssystemet i området. Vid fyra tillfällen användes en semi-automatisk provtagare som tog en halv liter prov varannan timme. Proverna samlades och blandades i ett 20 l kärl, innan 2 liter togs ut för analys. Detta gjordes för få ett representativt avloppsprov. Även två stickprov av avloppsvatten togs. Vatten från dräneringsbrunnarna (provpunkt 10 och 14) uppströms i området provtogs fem gånger, vid olika tillfällen under året. Dräneringsbrunnarna dränerar jordbruksmark och fosfatkällan som provtogs var således jordbruksmark. Med hjälp av en teleskopprovtagare samlades ca 20 liter dräneringsvatten in. Den otympliga volymen var nödvändig då fosfatkoncentrationerna var låga. Utloppet (provpunkt 69) provtogs nio gånger, där majoriteten av gångerna var med en semi-automatisk provtagare under ett dygn.

Oavsett vilken fosfatkälla som provtogs förbehandlades alla vattenprover innehållande fosfat inledningsvis med aktivt kol, för separering av löst organiskt och oorganiskt bunden fosfor. Den lösta oorganiska fraktionen av fosfor, fosfat, tillreddes och analyserades enligt McLaughlin (2004). De första fyra stegen i den kemiska analysprocessen utfördes av författaren på Linköpings universitet. Proverna skickades vidare i små rör, nu innehållande något gram ceriumfosfat, till Tübingen i Tyskland. Här utfördes resterande analyssteg av dr. Heinrich Taubald (Isotopengeochemie, Tübingen Universitet) och isotopsammansättningen i fosfatjonen fastställdes.

3.5 H-HYPE

Då fosfat har visat sig ha en komplex dynamik (Ekologgruppen, 2009; Ulén och Djodjic, 2004) är det svårt att modellera. En högupplöst modell (i tid och rum) sattes upp (H-HYPE) med avsikten att kunna ge en noggrannare beskrivning av hur koncentrationer och –transporter av fosfat varierar i tid och rum.

3.5.1 H-HYPE i rummet

Med en i rummet högupplöst modell eftersträvas en noggrannare geografisk beskrivning, som lämpligen utförs med Geografiska Informationssystem (GIS). Den här informationen transformeras sen till ett HYPE-anpassat format. Markanvändning, jordtyper, grödor, gödselgivor, startpooler av fosfor och vattendelare är exempel på information som kan beskrivas mer rumsligt upplöst.

I den nuvarande uppsättningen av HYPE över Sverige (S-HYPE), som finns tillgänglig på vattenweb, beskrivs jordbruksområdet som studerades med *ett* område. Den i rummet högupplösta uppsättningen som togs fram för den här studien beskriver istället området med nio delavrinningsområden. Vattendelare, som behövs för att dela in området i fler delavrinningsområden är framtaget av Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU). Ett avrinningsområde eller delavrinningsområde utgörs av ett antal SLC klasser. SLC står för ”Soil and Landuse Class”. SLC- klasserna byggs upp utifrån ytenheter med unika kombinationer av jordart, markanvändning och gröda. S-HYPE eller Sverigemodellen har en grövre indelning då hela Sverige beskrivs, medan den högupplösta, lokala uppsättningen av modellen, beskriver jordart, markanvändning och grödor mer noggrant och utifrån lokalkännedom. Markanvändningen i sig delas in i olika regioner i S-HYPE, där varje region i Sverige svarar för en unik typ av markanvändning och kalibreras utifrån regionens egenskaper.

Vid parametrering av den högupplösta lokala modellen användes ett linjärt förhållande mellan jordtyperna lätt-lera, mellan-lera och styvlera. Fältkapacitet, vissningsgräns och effektiv porositet, med utgångspunkt från Wiklanders marklära (2005), användes för att kunna särskilja de tre lerorna åt (Tab. A1). Exempelvis om fältkapaciteten höjdes för lättlera, så höjdes den lika mycket för de andra två lerorna. Indelning av olika typer av markanvändning baserat på en markkartering (Fig. 3) användes för att styra P-AL poolerna i marken (tab. 2). Markkarteringspunkterna interpolerades och en yta av området med varierade P-AL halter fastställdes.

Tabell 2: Beräkning av startpooler med P-AL för olika markanvändning.

Markanvändning	Markkartering [mg P/100g jord]	Markkartering för modellen	Omräknat till startpooler i modellen
Jordbruk 3	P-AL > 8	9 mg P/ 100g jord	247500 mg P/ m ³ jord
Jordbruk 2	P-AL = 4-8	6 mg P/ 100g jord	165000 mg P/ m ³ jord
Jordbruk 1	P-AL < 4	3 mg P/ 100g jord	82500 mg P/ m ³ jord

De beräknade P-AL mängderna användes som startvärden för kalibrering av modellen. Halterna justerades under kalibreringen av modellen, men markanvändningarnas inbördes sambandet mellan P-AL halter i jorden hölls konstant.

3.5.2 H-HYPE i tiden

En i tiden högupplöst modell har ett kortare tidssteg och fler beräkningar utförs per dygn och beskriver på så vis verklighetens processer mer realistiskt än en mindre högupplöst modell. Ett exempel är variabeln nederbörd, som med ett dygntidssteg faller som *en* nederbörd, men med ett kortare tidssteg istället faller flera gånger under dygnet. Summan av nederbörden per dygn är lika stor, men den i tiden högupplösta modellen tillåter växter och natur att få regn vid olika timmar inom dygnet. Tidssteget för S-HYPE är dygn, men i H-HYPE används en timme som tidssteg.

3.5.3 Kalibrering av H-HYPE

H-HYPE kalibrerades först för vattenföring och sen för fosfatkoncentration. I och med att fosfatjonerna transporteras i vattnet, började modellen kalibreras med avseende på vattenföring. Vattenföringen ut från området (provpunkt 69, Fig. 2) kalibrerades mot uppmätt vattenföring vid utloppet, där SMHI har en vattenföringsstation. HYPE använder sig av flera olika parametrar för att styra vattenmagasin, men de som gav störst inverkan på justering av vattenföringen för H-HYPE var fältkapacitet, effektiv porositet, recessionskoefficienter och makroporflöden. En kombination av dessa, tillsammans med många fler parametrar justerades succesivt under kalibreringen och både visuellt och med hjälp av R²-värde erhöles en slutgiltig inställning av modellen. Vattenkvalitén, i det här fallet fosfatkoncentration, beskrivs i HYPE av färre justerbara parametrar än vattenföringen. Fosforpooler, hastighetskoefficienter mellan olika magasin, upptagningsförmågor från grödor är exempel på parametrar som styr utkommande fosfatkoncentrationer från området. H-HYPE kalibrerades mot uppmätt fosfatkoncentration provtaget av LiU och SLU. Ett gemensamt dataset innehållande två provtagningar av fosfatkoncentration i månaden, från 2007 till 2011, sattes ihop och modellen kalibrerades mot uppmätta data. I och med att en fosfatkoncentration är en massa fosfat per liter vatten, så är flera vattenkvalitetsparametrar implicit beroende av vattenföringen.

3.6 Jämförelse mellan olika modelluppsättningar av HYPE

En jämförelse mellan olika modelluppsättningar av HYPE-modellen utfördes och värdet av ett kortare tidssteg och en högre geografisk beskrivning av rummet utvärderades. Båda modellerna utgick från samma databas och samma kalibrering av modellen. Det som skiljde de två modelluppsättningarna åt var endast tidssteget och den rumsliga upplösningen. Modellexperiment av de olika uppsättningarna jämfördes under olika

tidsintervall och betydelsen av hur tidssteg och rumslig upplösning påverkar genererade data fastställdes för HYPE.

3.6.1 Betydelsen av den rumsliga beskrivningen i HYPE

För att jämföra och studera skillnader mellan en i rummet högupplöst och mindre högupplöst modell utfördes följande modellexperiment. H-HYPE simulerade vattenföring över en ettårsperiod och en fyraårsperiod och fosfatkoncentrationer över en fyraårsperiod. Resultatet jämfördes med en simulering över samma tidsperiod, utfört av samma högupplösta modell i tiden och med samma kalibrering, men med en aggregerad beskrivning av rummet. Rummet beskrivs som tidigare nämnt av klasser och summan av alla klasser utgör hela arean. Istället för att beskriva klasser för alla nio delavrinningsområden klusterbildades klasserna till *ett* avrinningsområde, med samma procentuella andel SLC-klasser. Drivdata till H-HYPE aggregerades och genom medelvärdesbildning av nederbörden över alla områdena per timme lades den medelvärdesbildade nederbörden som *en* nederbörd på hela området. Temperaturen medelvärdesbildades också och lades som medeltemperatur i det aggregerade området. R^2 -värdena (Ekv. 1) jämfördes och betydelsen av den rumsliga uppdelningen i HYPE-modellen utvärderades.

3.6.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE

För att jämföra och studera skillnader mellan en i tiden högupplöst (timtidssteg) och icke högupplöst (dygnstidssteg) modell utfördes följande modellexperiment. Den geografiska beskrivningen i rummet hölls konstant, d.v.s. nio delavrinningsområden. Kalibreringen av H-HYPE var densamma. Drivdata (temperatur och nederbörd) medelvärdesbildades över ett dygn för samtliga delavrinningsområden och medelvärdet lades sen ut på varje timme under dygnet. Nu drivs H-HYPE med medelvärden över dygnet, som dygnmodellen, men fortfarande utförs 24 beräkningar per dygn. H-HYPE simulerades över en 1- och 4årsperiod och resultaten i fosfatkoncentrationer och vattenföring jämfördes med resultat modellerade med den högupplösta modellen i både tid och rum.

3.7 $\delta^{18}O_p$ för bestämning av källfördelning av fosfat

För källseparering av fosfat från jordbruk och avlopp i området användes syreisotopsammansättningen i fosfatjonen som teknik för öronmärkning. Uppmätta fosfatkoncentrationer från de olika källorna i området användes och multiplicerades med respektive isotopsammansättning, här kallad isotopsignatur, varpå fosfaterna kopplades ihop med sin ursprungliga källa. De öronmärkta fosfaternas transport beräknades till sist genom att rådande vattenföring från källan, modellerat med H-HYPE, multipliceras med isotopsignaturen från de olika källorna. Enligt en massbalans för fosfattransport (Ekv. 4) bestämdes de relativa bidraget av fosfat från jordbruksvatten respektive avloppsvatten i utflödet från området.

$$Q_{ut}^t \cdot \delta_{ut}^{18}O_p^t \cdot C(t)_{ut} = \sum_{x=1}^{x=3} Q_x^t \cdot \delta_x^{18}O_p^t \cdot C(t)_x \quad (4)$$

Q_{ut}^t = vattenföring ut från hela området

$\delta_{ut}^{18}O_p^t$ = ensemble av isotopsammansättningar från hela området

$C(t) = PO_4$

Q_x^t = vattenföring från källan x.

$\delta_{x,p}^{18}O^t$ = syreisotopsammansättningen i fosfat från källan x

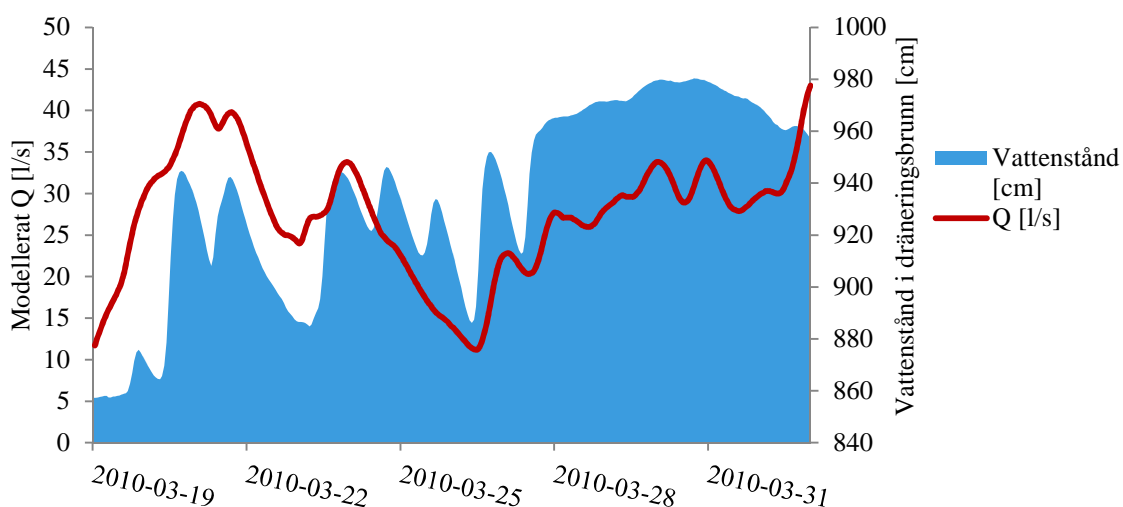
1=avlopp, 2=jordbruksmark, 3=övrig mark

t=tid

Enligt massbalans för fosfat är summan av all fosfattransport till utloppet lika med fosfattransporten ut från utloppet (Ekv. 4). Fosfatkoncentration och signatur i utloppet utgörs av en mix av fosfater med tillhörande signaturer från källorna avlopp, jordbruksmark och övrig mark. Vid alla tillfällen då provtagningar av isotopsignaturen gjordes i utloppet, utfördes tre simuleringar med H-HYPE. Först simulerades hela området med alla källbidrag och fosfattransporter fastställdes i utloppet (provpunkt 69). Sen stängdes avlopp av i modellen och hela området simulerades återigen. Till sist stängdes jordbruksmark av, kvar fanns då övrig mark, som simulerades. De tre olika resultaten på fosfattransporter användes för fastställning av fosfattransport från respektive källa. Medelvärdet av samlad data för isotopsignaturer i fosfat från jordbruk och avlopp användes i massbalansen och multiplicerade med tillhörande modellerad fosfatkoncentration och vattenföring. Den unika signaturen i utloppet användes tillsammans med den totala modellerade fosfattransporten till utloppet. H-HYPE modellerade de tre olika källorna över det dygn då ensembleprovet i utloppet togs. Källfördelningen av fosfat från avlopp och jordbruksmark bestämdes och övrig mark, som saknade signatur, blev en restterm. Om resttermen förblev konstant, inom ett rimligt intervall, mellan de olika tillfällena då källfördelningen bestämdes, ansågs metoden trovärdig.

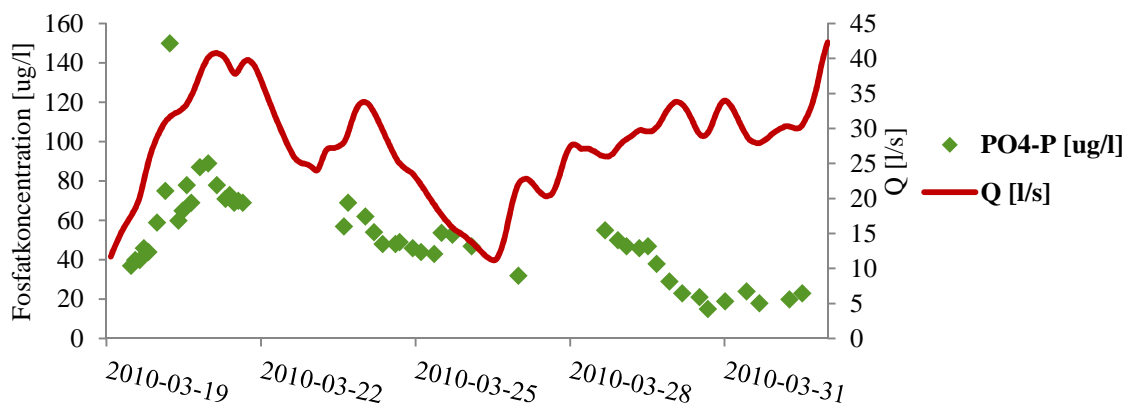
4 RESULTAT

4.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat



Figur 4: Röd linje markerar modellerad vattenföring i dräneringsbrunn 10 och den blå yta vattenståndet i dräneringsbrunn 10, under en snösmältningsperiod i mars år 2010.

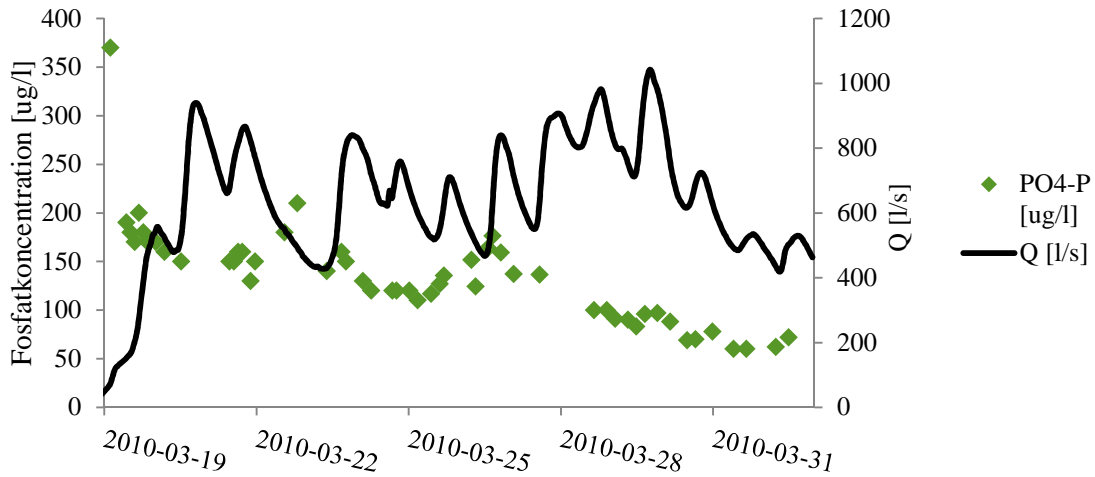
Det omräknade trycket i provpunkt 10 (dräneringsbrunn) till vattenstånd överrensstämde väl med modellerad vattenföring under den studerade snösmältningsperioden i mars. Vattenståndet förtäljde inte något om vattenföringens storlek, utan gav endast ett mått på hur vattenföringen varierade genom att högt vattenstånd indikerade hög vattenföring. Vattenståndet följde den beräknade vattenföringen i början av snösmältningsperioden men samvariationen blev sämre i slutet av snösmältningsperioden.



Figur 5: Röd linje markerar modellerad vattenföring och gröna punkter uppmätt fosfatkoncentration i dräneringsbrunn 10.

Fosfatkoncentrationerna i provpunkt 10 (dräneringsbrunn) var högst i början av snösmältningsperioden och avtog successivt över tiden. Även vattenföringen var högst i början och varierade under snösmältningsperioden. Tredan för fosfatkoncentrationer var att de blev lägre över tiden och vattenföringens trend var att den blev svagt högre över tiden. Fosfat spolades förmodligen ut ur marken i början av den höga vattenföringen. Fosfatkoncentrationerna följde vattenföringens dynamik, men minskade i takt med att flera höga vattenföringar kom i rad. Den lägsta vattenföringen under hela snösmältningsperioden registrerades den 26/3-2010 och sedan ökade vattenföringen

igen. Från den 26/3-2010 och framåt var utspolningseffekten tydligast och fosfatkoncentrationerna minskade trots att vattenförigen ökade.



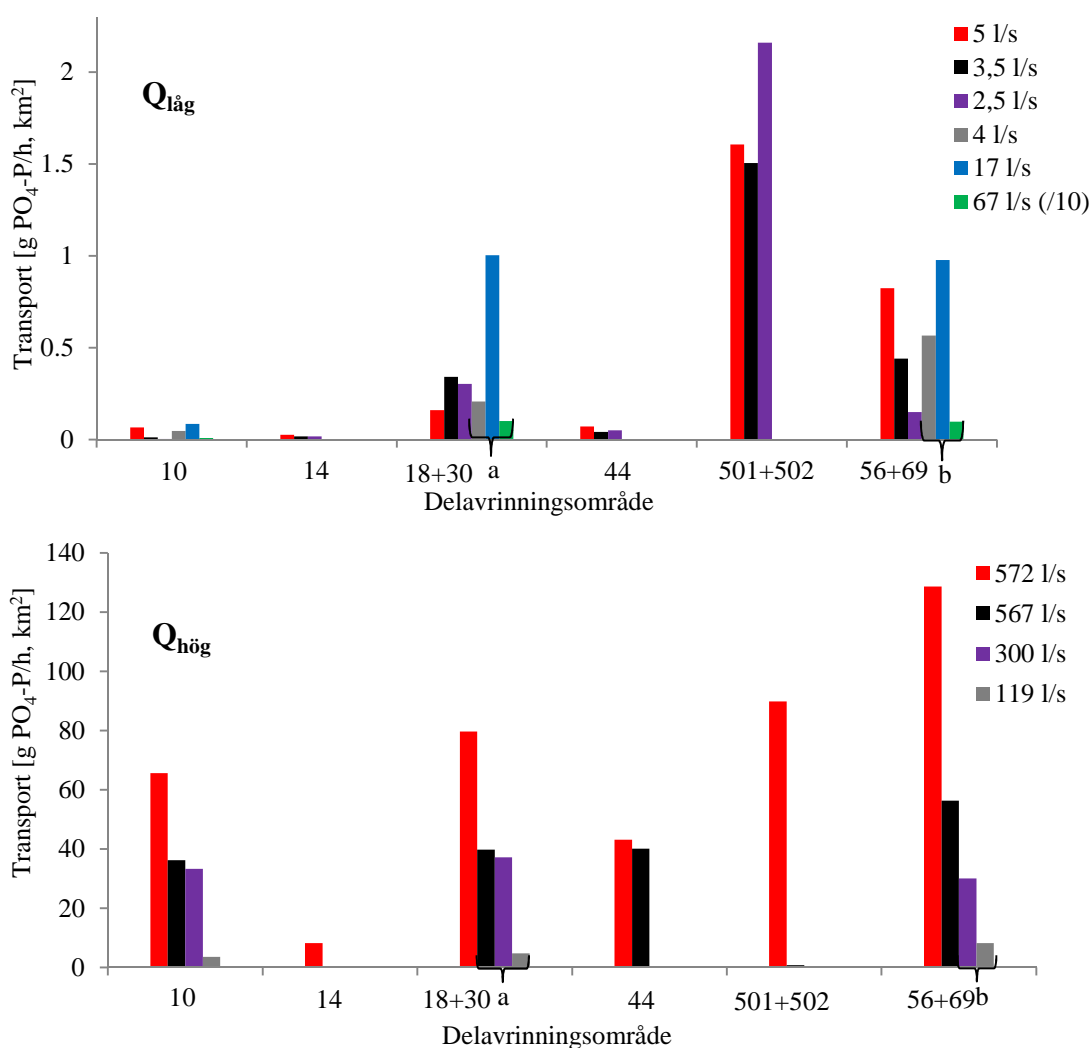
Figur 6: Svart linje markerar uppmätt vattenföring och gröna punkter uppmätt fosfatkoncentration i provpunkt 69 (utloppet).

Fosfatkoncentrationerna i provpunkt 69 (utloppet) var högst i början av snösmältningsperioden och avtog successivt över tiden. Vattenföringen var inte modellerad i utloppet utan uppmätt vattenföring användes. Trenden för vattenföring över tidsperioden var svagt uppåtgående med ökad vattenföring, medan fosfatkoncentrationernas trend var nedåtgående. De högsta fosfatkoncentrationerna återfanns vid de första höga vattenföringssituationerna och koncentrationerna avtog sedan, oavsett hur många eller höga vattenföringssituationer som följde. Liknande ”utspolningseffekt” verkade råda i utloppet (Fig. 6) som i dräneringsbrunn 10 (Fig. 5).

4.2 Variation av fosfat i tid och rum

Transport av fosfat från de olika delavrinningsområdena under olika årstider och vattenföring. Specifik transport (massa per tids- och ytenhet) och total transport (massa per tidsenhet) är två sätt att uttrycka transporter och användes för att studera läckage av fosfat i rummet och i tiden.

Höst – september, oktober och november

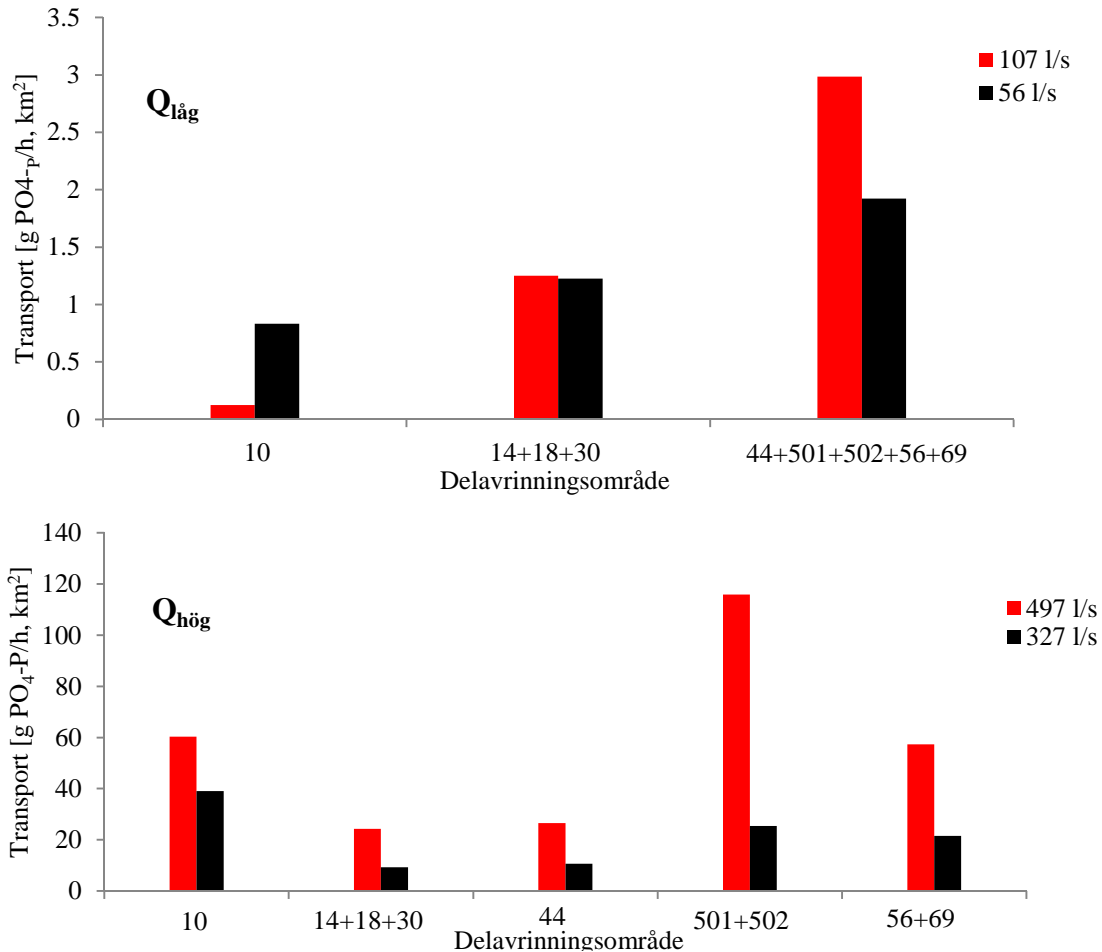


Figur 7: Låg ($Q_{\text{låg}}$) och hög vattenföring ($Q_{\text{hög}}$) under höst; specifik fosfattransport (fosfattransport i gram per timme och ytenhet) från de olika delavrinningsområdena och vid olika vattenföring i utloppet (69). Siffror nedanför staplarna markerar delavrinningsområde(n) som aggregerats. Bokstäverna a och b innebär specialtillfällen då delavrinningsområdena 14+18+30 respektive 44+501+502+56+69 aggregerats.

Delavrinningsområden uppströms (10 och 14) hade under låg vattenföring en låg specifik fosfattransport. Även delavrinningsområde 44, som var lätt avloppspåverkat och ett stort jordbruksområde, stod för en låg specifik fosfattransport. Det var i huvudsak de starkt avloppspåverkade områdena, speciellt 501 och 502 som tillsammans hade högst densitet avlopp (Tab. 1), som hade den högsta specifika fosfattransporten. Under hög vattenföring ställdes källfördelningen om. De avloppspåverkade områdena var nu mindre dominanta, även om de stod för den högsta specifika fosfattransporten. Istället utgjorde nu de jordbruksdominerade delavrinningsområdena 10, 18, 30 och 44

(Tab.1) en större specifik fosfattransport i jämförelse med den under låg vattenföring. Avloppspåverkade områden nedströms utgjorde dock fortfarande den största källan till fosfatläckage, men relativt under en låg vattenföring så utgjorde de jordbruksdominerade delavrinningsområdena en mer betydande källa till fosfat under hög vattenföring.

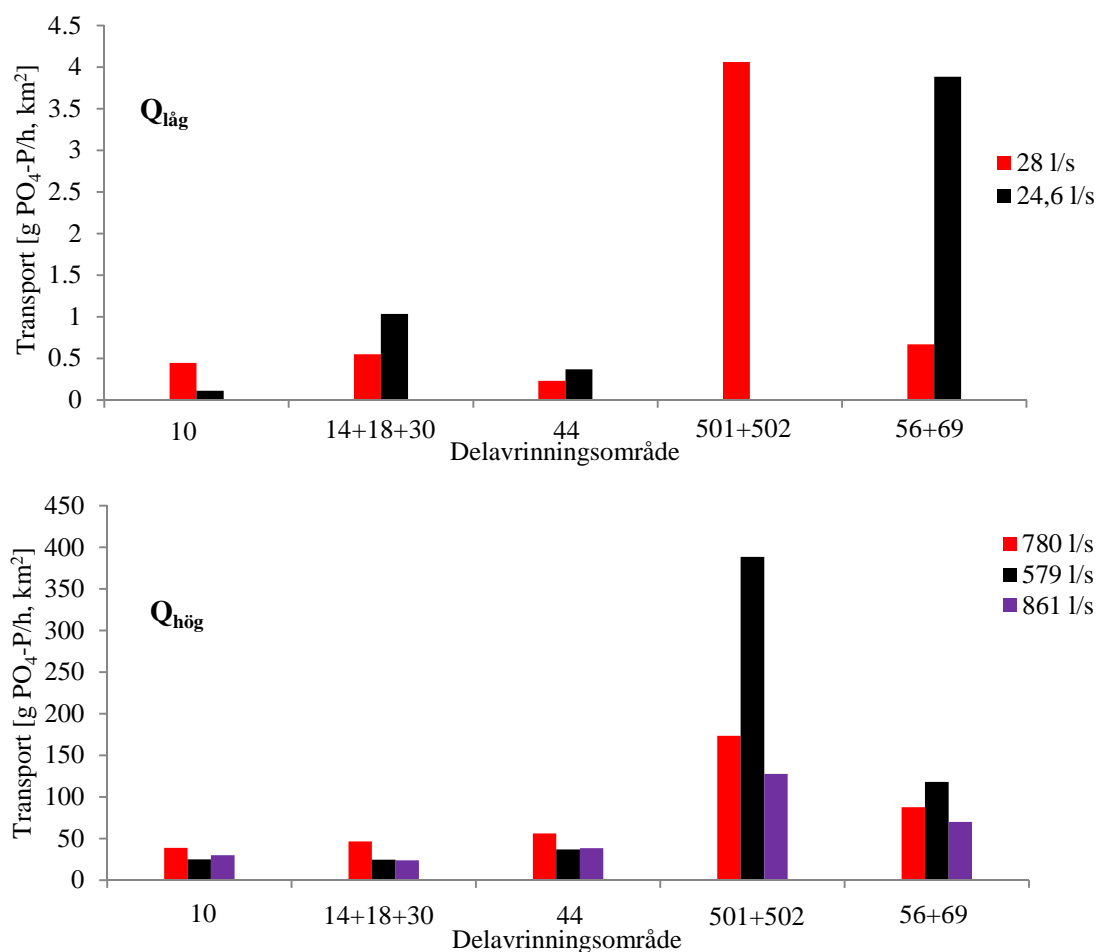
Vinter – december, januari och februari



Figur 8: Låg ($Q_{låg}$) och hög vattenföring ($Q_{hög}$) under vinter; specifik fosfattransport (fosfattransport i gram per timme och ytenhet) från de olika delavrinningsområdena och vid olika vattenföring i utloppet (69). Siffror nedanför staplarna markerar delavrinningsområde(n) som aggregerats.

Delavrinningsområde 10 stod för den lägsta specifika fosfattransporten under låg vattenföring. De avloppspåverkade delavrinningsområdena som återfanns nedströms i området (Tab.1) stod för en högre specifik fosfattransport. Under hög vattenföring var de jordbruksdominerade delavrinningsområdenas specifika fosfattransport högre än under låg vattenföring. Exempelvis hade delavrinningsområde 10 en högre specifik fosfattransport än de aggregerade och lätt avloppspåverkade delavrinningsområdet 14, 18 och 30. Även var den specifika fosfattransporten från delavrinningsområde 10 högre än från delavrinningsområdena 56 och 69, som hade flest avlopp (Tab. 1). Källfördelningen under vintern var snarlik den under hösten.

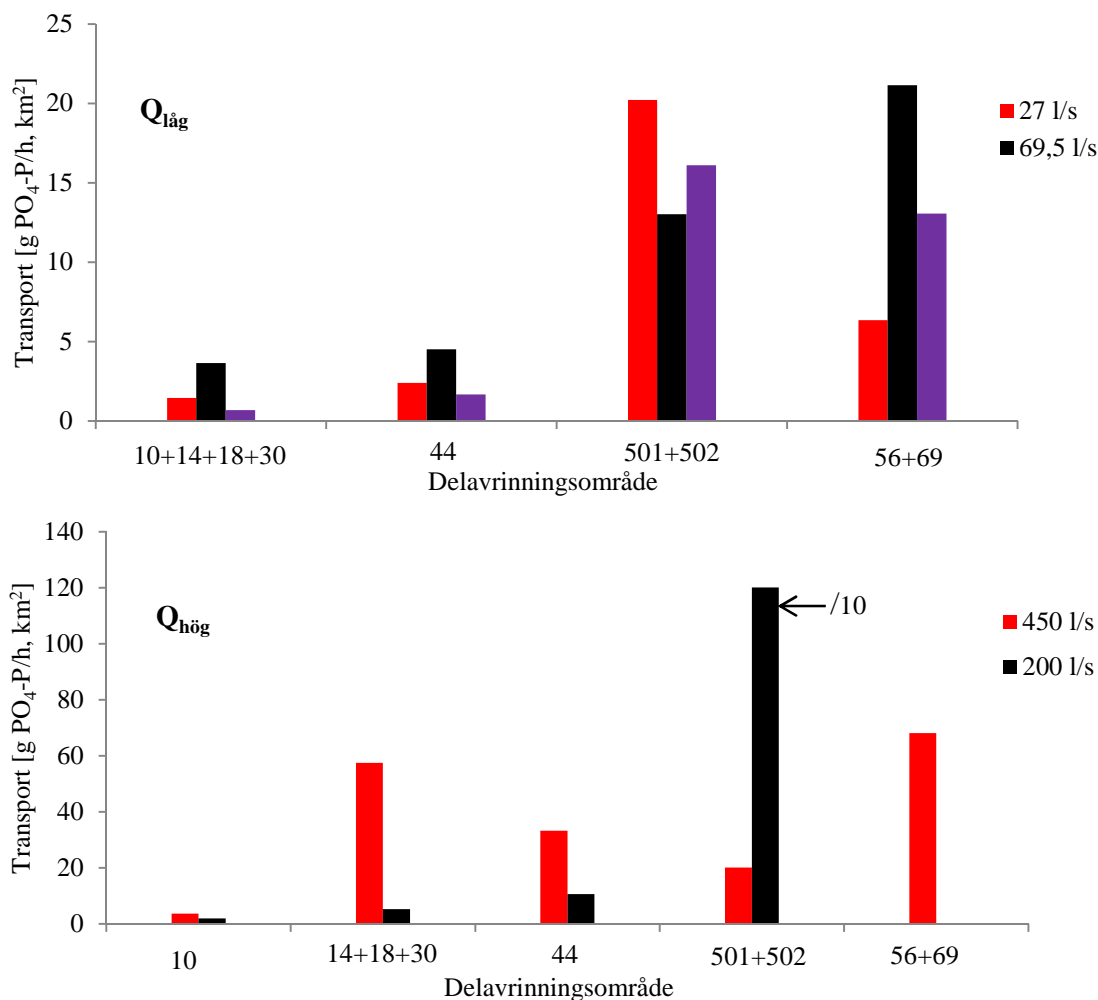
Vår – mars, april och maj



Figur 9: Låg ($Q_{\text{låg}}$) och hög vattenföring ($Q_{\text{hög}}$) under vår; specifik fosfattransport (fosfattransport i gram per timme och ytenhet) från de olika delavrinningsområdena och vid olika vattenföring i utloppet (69). Siffror nedanför staplarna markerar delavrinningsområde(n) som aggregerats.

Under våren var förhållandet mellan specifik fosfattransport från de olika delavrinningsområdena oberoende av vattenföring. Under hög vattenföring var dock totaltransporten fosfat ungefär 100 gånger så stor från samtliga provtagningspunkter i rummet som under låg vattenföring. De mest avloppsbelastade delavrinningsområdena 501 och 502 och 56 och 69 (Tab.1) stod oavsett vattenföringssituation för den största specifika fosfattransporten.

Sommar – juni, juli och augusti



Figur 10: Låg ($Q_{\text{låg}}$) och hög vattenföring ($Q_{\text{hög}}$) under sommar; specifik fosfattransport (fosfattransport i gram per timme och ytenhet) från de olika delavrinningsområdena och vid olika vattenföring i utloppet (69). Siffror nedanför staplarna markerar delavrinningsområde(n) som aggregerats. Stapeln som markerades med "/10" och innebar att den specifika fosfattransporten var så hög att den delades med 10 för att passa in i figuren

Under sommar och låg vattenföring stod delavrinningsområde 501 och 502 för den största specifika fosfattransporten. Vid hög vattenföring stod fortfarande de avloppspåverkade delavrinningsområdena för den största specifika fosfattransporten. Jordbruksområdet 10 stod för en nästan försumbart låg specifik fosfattransport medan de aggregerade områdena 14, 18 och 30 stod för en större. Källfördelningen under sommaren påminner om den under våren.

Tabell 3: Sammanfattande tabell över fosfattransporter vid låg och hög vattenföring, indelat i årstider. Specifik medeltransport fosfat från de olika delavrinningsområden uttryckt i andelar av den totala specifika medeltransporten från hela området.

Delavrinningsområde	10	14	30	44	501+502	69
Säsong						
Höst						
låg [%]	18	2	114	5	168	103
hög [%]	87	21	101	105	114	140
Vinter						
låg [%]	25		65			129
hög [%]	170		57	64	242	135
Vår						
låg [%]	24		66	25	169	190
hög [%]	48		49	68	357	142
Sommar						
låg [%]			29	43	249	205
hög [%]	8		86	60	1674	93

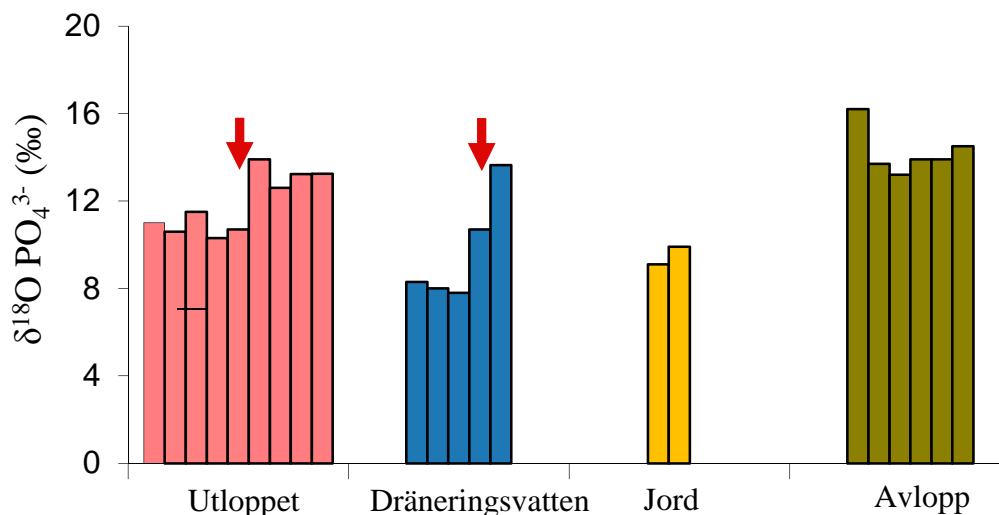
Etthundra procent innebär att transporten fosfat per ytenhet från ett delavrinningsområde var lika stort som den specifika medeltransporten fosfat från hela området. Den sammanfattande tabellen visar att oavsett årstid och vid låg vattenföring var det de mest avloppspåverkade delavrinningsområdena (501 och 502, 56 och 69) som hade högst specifik fosfattransport i förhållande till den specifika medeltransporten fosfat från hela området. De i huvudsak jordbruksdominerade delavrinningsområdena (10, 14 och 44) stod för en längre specifik fosfattransport i förhållande till den specifika medeltransporten ut från området. Vid hög vattenföring stod fortfarande de avloppsdominerade delavrinningsområdena för den högsta specifika fosfattransporten. Dock så fick de jordbruksdominerade delavrinningsområdena en högre specifik fosfattransport under hög vattenföring i förhållande till låg jämfört med de avloppspåverkade områdena.

Under höst och vinter var det tydligt att avloppsdominerade delavrinningsområden stod för den högsta specifika transporten. Delavrinningsområde 18 och 30, som var en kombination av avloppspåverkat och jordbruksdominerat delavrinningsområde stod vid både låg och hög vattenföring för en någorlunda konstant specifikt fosfattransport. Specifik fosfattransport från 56 och 69 förändrades procentuellt lite till det högre, då vattenföringen växlas från låg till hög. Att ej avloppspåverkade delavrinningsområden procentuellt sett ökade mer än avloppsbelastade delavrinningsområden då vattenföringen ändrades från låg till hög antyder på en eventuell källomfördelning av fosfat från avlopp till jordbruksmark.

Under vår och sommar var det även tydligt att de avloppspåverkade delavrinningsområdena stod för den största specifika fosfattransporten. När låg vattenföring växledes till hög, observerades inte samma procentuella förändring i jordbruksdominerade avrinningsområden som under höst och vinter. Endast en marginell ökning skedde. Specifik fosfattransport från utloppsområdet 56 och 69 förändrades procentuellt lite till det lägre, då vattenföringen växledes från låg till hög.

4.3 Syreisotopsammansättning i fosfat ($\delta^{18}\text{O}_p$)

Genom provtagningar av fosfat i avloppsvatten och dräneringsvatten fastställdes syreisotopsammansättningen (signaturen) i fosfatjonen från de två källorna.



Figur 11: Variationen av signaturer i fosfat från olika källor. Röd pil markerar en snösmältningsperiod i mars 2010. Figur modifierad från Tonderski m.fl., 2012.

Utloppet utgjordes av en mix av källsignaturer från avloppsvatten, dräneringsvatten och övriga okända källor. Avloppsvatten hade de högsta signaturerna och fosfater extraherat från jord de lägsta. Dräneringsvattnet, som provtogs i provpunkt 10 och 14, var vatten som dränerats från jordbruksmark från delavrinningsområde 10 och 14 (Fig. 2) och ligger således nära signaturen för jord. Röd pil markerar en snösmältningsperiod, där dräneringsvattnet hade samma signatur som vattnet i utloppet.

Tabell 4: t-test för undersökning av skillnad i signaturerna i fosfat från dräneringsvatten och avloppsvatten.

	Dräneringsvatten	Avloppsvatten
Medelvärde	9,69	14,51
Varians	6,25	1,07
Antal observationer	5	8
Antagen medelvärdesskillnad	0	
fg	5	
t-kvot	-4,10	
P(T<=t) ensidig	0,0047	
t-kritisk ensidig	2,02	
P(T<=t) tvåsidig	0,0093	
t-kritisk tvåsidig	2,57	

H_0 : Dräneringsvatten =
Avloppsvatten

D.v.s. H_0 förkastas och med 99 % konfidens är
signaturerna för avlopps- och dräneringsvatten
skilda åt.

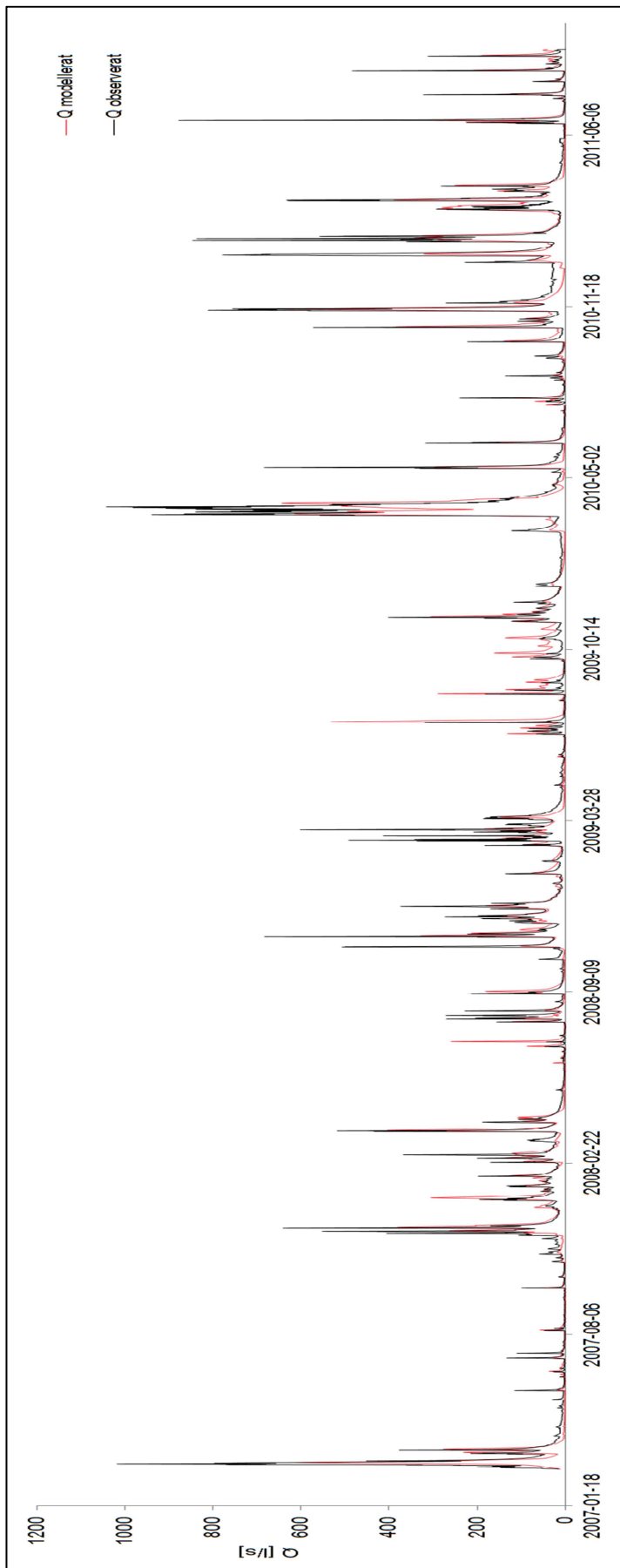
P(T<=t) tvåsidig < 0,01

Ett t-test utfördes för att statistiskt undersöka om det fanns signifikanta skillnader mellan syreisotopsammansättningen i fosfatjonen från dräneringsvatten och avloppsvatten. Vid åtta tillfällen provtogs signaturer i avloppsvatten och vid fem i dränerat jordbruksvatten. Baserat på provtagningarna kunde en skillnad i signaturer med 99 % konfidens konstateras och fosfater från de två källorna skiljas åt.

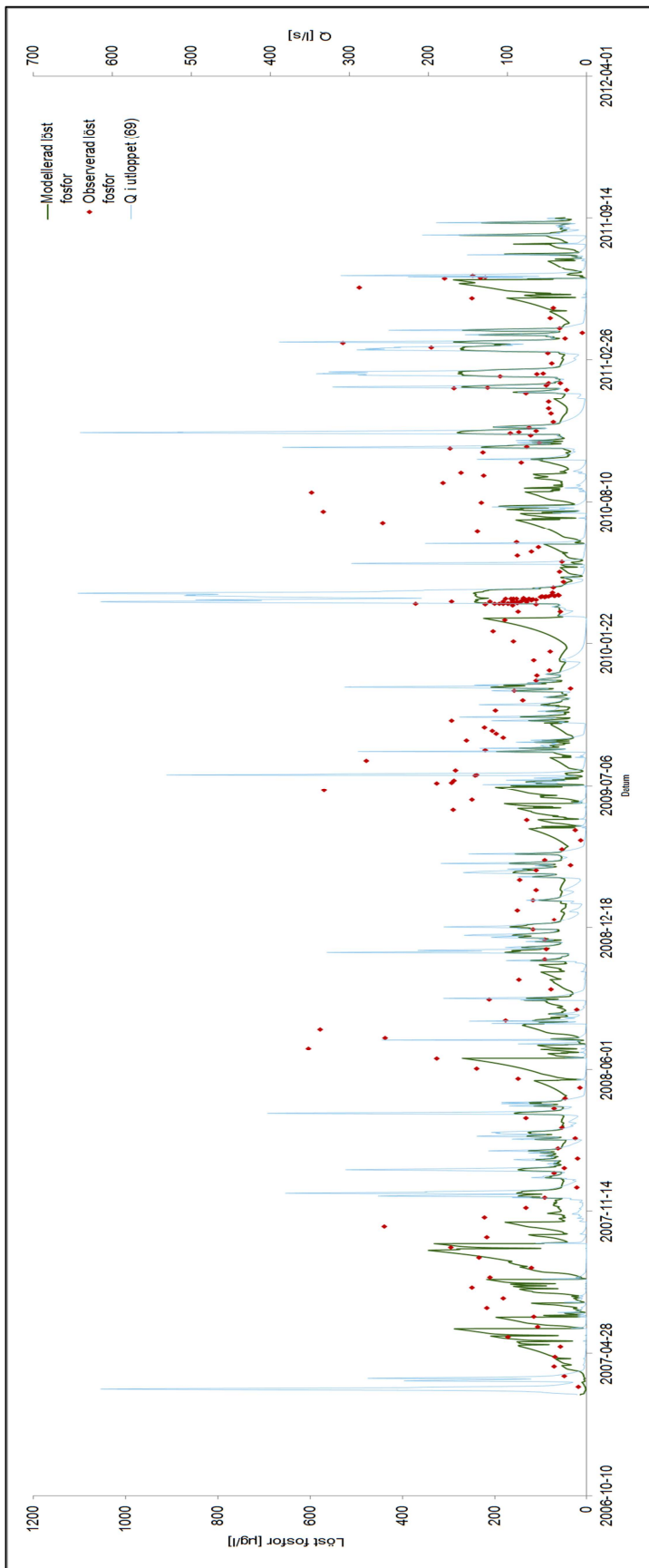
4.4 Kalibrering av H-HYPE

Modellerad vattenföring i utloppet av området kalibrerades mot uppmätt vattenföring varje timme under tidsperioden 2007-2011 (Fig. 12) och en överensstämmelse på 0,602 erhöles ($R^2 = 0,602$). H-HYPE underskattade vattenföringen med 10,9% ($RE = -10,91\%$) och det kvadrerade felet ($MSE = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$) var lågt. H-HYPE modellerade således vattenföringen bra under den studerade tidsperioden och det som förhindrade en eventuellt högre korrelation och ett lägre fel var snösmältningsperioder och sommartoppar, som var komplexa att beskriva. Då SMHI har en kontinuerlig mätstation i utloppet av området fanns det mätserier av vattenföring att kalibrera mot på timbasis varpå det gick lättare att uppnå ett bra resultat.

H-HYPE kalibrerades även mot uppmätta fosfatkoncentrationer under tidsperioden 2007-2011 (Fig. 13). Korrelationen mellan uppmätta och modellerade fosfatkoncentrationer var svag ($R^2 = -0,59$) och H-HYPE underskattade koncentrationerna med drygt 20 % ($RE = -20,567\%$). Visuellt erhöles en överensstämmande dynamik mellan uppmätta och modellerade fosfatkoncentrationer, men H-HYPE missade konsekvent de höga koncentrationerna under sommartid (Fig. 13) vilket medförde ett stort fel ($MSE = 21121 \text{ ug PO}_4\text{-P/l}$). Då mätserien av fosfatdata var otillräcklig med endast två observationer per månad blev kalibreringen bristfällig.



Figur 12: Modellerad (röd linje) och uppmätt (svart linje) vattenföring i utloppet av området.



Figur 13: Modellerad (grön linje) och uppmätt (röd prickar) löst fosfor i utloppet av området. Ljusblå linje markerar vattenföringen i utloppet av området.

4.5 Jämförelse mellan olika modelluppsättningar av HYPE

En undersökning gjordes av hur valet av tidssteg och rumslig upplösning påverkar simuleringsresultaten. Geografisk indata och kalibrering av modellen hölls konstant och två modellexperiment utfördes.

4.5.1 Betydelsen av den rumsliga uppdelningen i HYPE

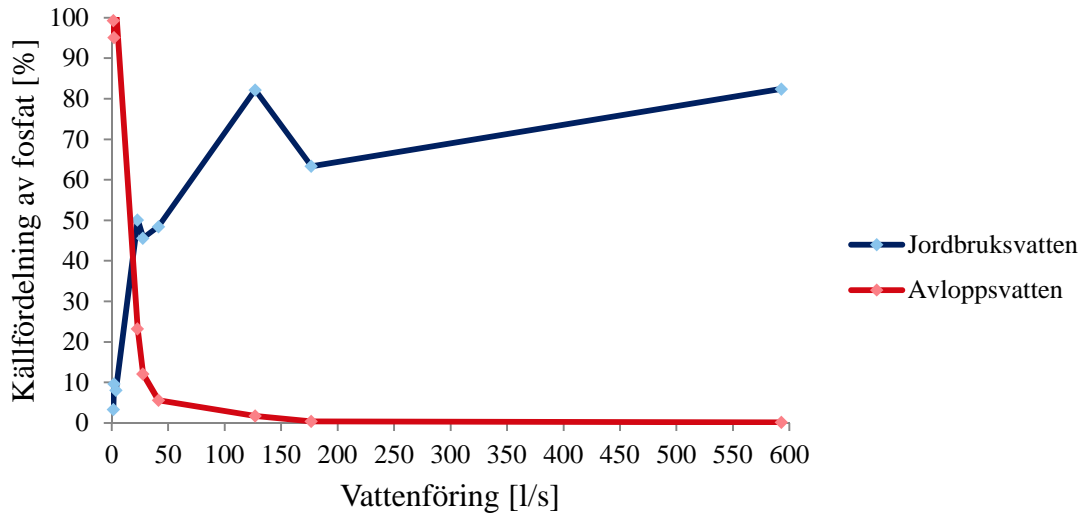
Båda tidsperioderna 2007-2011 och 2010 studerades i experimentet för att utvärdera hur vattenföring påverkades av en hög rumslig uppdelning. En modellkörning med en timme som tidssteg och ett aggregerat avrinningsområde från 2007 till 2011 utfördes. De statistiska måtten på hur väl modellen predicerade vattenföring fastslogs: $R^2 = 0,567$, $RE = -10,93 \%$, $MSE = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. En körning över samma tidsperiod gjordes igen, men nu med en timme som tidssteg och nio avrinningsområden. De statistiska måtten blev: $R^2 = 0,602$, $RE = -10,91 \%$, $MSE = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. Den rumsliga uppdelningen i HYPE, utvärderat med det här experimentet, verkar inte ha någon större betydelse för modellering av vattenföring. R^2 -värdet förbättrades med 0,035 då en upplösning från ett till nio delavrinningsområden gjordes under tidsperioden 2007-2011. Studerat under bara ett år, 2010, erhöles en modellkörning med en timme som tidssteg och ett aggregerat avrinningsområde med följande statistiska mått: $R^2 = 0,71$, $RE = -20,52\%$, $MSE = 0,0059 \text{ m}^3/\text{s}$. Jämfört med en modellkörning med en timme som tidssteg och nio delavrinningsområden, under samma tidsperiod så var skillnaderna konsekvent lika små som under hela tidsperioden. De statistiska måtten blev: $R^2 = 0,7410169$, $RE = -20,53 \%$, $MSE = 0,0053 \text{ m}^3/\text{s}$. En upplösning från ett delavrinningsområde till nio gav ett förbättrat R^2 -värde på 0,028 under tidsperioden 2010. För prediktion av fosfatkoncentrationer utfördes samma experiment under tidsperioden 2007-2011. En modellkörning med en timme som tidssteg och ett aggregerat avrinningsområde gav de statistiska måtten $R^2 = -0,59$, $RE = -21,38$, $MSE = 21176 \text{ ug PO4-P/l}$. En likadan modellkörning men med nio delavrinningsområden gav de statistiska måtten $R^2 = -0,59$, $RE = -20,57$ och $MSE = 21121 \text{ ug PO4-P/l}$. R^2 -värdet förbättrades ytterst lite med nio delavrinningsområden och det relativa felet minskade något. MSE är stort oavsett rumslig upplösning och det beror sannolikt på otillräcklig fosfatkoncentrationsdata att kalibrera mot. Både för modellering av vattenföring och fosfatkoncentrationer innebär den rumsliga uppdelningen en marginellt förbättrad modellering av de två variablerna, utvärderat med det här experimentet för HYPE.

4.5.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE

Både vattenföring och fosfatkoncentrationer studerades i experimentet under tidsperioden 2007-2011. Det korta tidsstegets betydelse för HYPE utvärderades genom att modellera vattenföring och fosfatkoncentrationer. Nio delavrinningsområden användes för både experimentkörningarna och kalibrering och samma databas hölls konstant. Vattenföring modellerades med ett dygn som tidssteg under tidsperioden och följande statistik erhöles. $R^2 = 0,46$, $RE = -11,99 \%$ och $MSE = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$. Samma modellering utfördes men nu med en timme som tidssteg och följande statistik erhöles. $R^2 = 0,61$, $RE = -12,46 \%$ och $MSE = 0,004 \text{ m}^3/\text{s}$. Tydligt var att tidssteget gav en förbättrad modellering av vattenföring på $R^2 = 0,15$. För fosfatkoncentrationer utfördes samma experiment och efter modellering med dygn som tidssteg erhöles följande statistik. $R^2 = -0,583$, $RE = -20,43 \%$ och $MSE = 21029 \text{ ug PO4-P/l}$. Samma modellering utfördes med en timme som tidssteg $R^2 = -0,59$, $RE = -20,57$ och $MSE = 21121 \text{ ug PO4-P/l}$. Gällande modellering av fosfatkoncentrationer hade valet av tidssteg inte så stor betydelse generellt sett. En viss påverkan på vattenföringen fanns, men det bör utvärderas då en bättre kalibrering åstadkommit.

4.6 Källfördelning av fosfat

En massbalans för fosfat (Ekv. 4) användes tillsammans med de olika källornas isotopsignaturer för att fastställa källfördelningen av fosfat vid olika vattenföring.



Figur 14: Procentuell fördelning av fosfatkällor vid olika vattenföring.

Källfördelningen av det fosfat som transporterades ut från området varierade beroende på hur vattenföringen varierade. Vid låg vattenföring härrörde den största andelen av fosfat från avlopp. I takt med att vattenföringen blev högre, byttes avlopp ut som huvudsaklig källa till fosfatläckage och jordbruksmark fick istället en större betydelse. En vattenföring på 23 l/s utgjorde en brytpunkt, där bidragen från de två olika källorna var ungefär lika stora. Vid högre vattenföring än 23 l/s växlades källfördelningen av fosfat från avlopp till jordbruksvatten, som nu istället blev huvudsaklig fosfatkälla. Den andel av källfördelningen som saknas för att summan ska bli etthundra procent i figuren representeras av övriga källor.

5 DISKUSSION

5.1 Uppströms- och nedströmsdynamik för fosfat

En förutsättning för att studera uppströms- och nedströmsrelationer mellan vattenföring och fosfatkoncentrationer var att ta reda på vattenföringen. I uppströmsområdet (dräneringsbrunn 10) användes modellerad vattenföring och nedströms användes uppmätt. För att säkerhetsställa att H-HYPE modellerade vattenföringen korrekt i dräneringsbrunn 10 gjordes en jämförelse mellan vattenstånd och vattenföring. Jämförelsen mellan vattenståndet och den modellerade vattenföring i dräneringsbrunn 10 visade att modellen predicerade vattenföringens dynamik ganska väl, men missade de mindre topparna. Vattenståndet i dräneringsbrunnen användes endast som referens till den modellerade vattenföringen och någon hydrologisk koppling mellan vattenstånd och vattenföring togs inte fram. I slutet av snösmältningsperioden steg brunnens vattenstånd, men den modellerade vattenföringen ändrades inte nämnvärt. Troligen blev dräneringsbrunnen översvämmad, vilket inte nödvändigtvis innebär att vattenföringen blev högre, då maximal dräneringskapacitet kan ha uppnåtts vid ett lägre vattenstånd. Dynamiken var dock så pass överrensstämmande att H-HYPE ansågs fungera och användes för modellering av vattenföring i dräneringsbrunnen.

Den första höga vattenföringen under snösmältningsperioden spolade ut de största mängderna fosfat. De högsta fosfatkoncentrationerna registrerades i början på snösmältningsperioden, både i dräneringsbrunn 10 och utloppet 69. Fosfattransporten var följaktligen högst i början av snösmältningsperioden både uppströms och nedströms i området. Vattenföringen växades från hög till mindre hög i sekvens under snösmältningsperioden och fosfatkoncentrationerna minskade successivt, oavsett hur hög vattenföringen var. Förmodligen tvättades fosfaterna successivt ut ur marken vilket sannolikt förklarar den nedåtgående fosfatkoncentrationstrenden. Motsvarande studier har gjorts (Ulén, 2002) som visade att markförrådet av fosfat inte tömdes ut under en snösmältningsperiod utan istället var fosfatkoncentrationerna relativt konstanta under snösmältningen. Skillnaderna i huruvida markförrådet av fosfat duschas ut eller inte beror möjligen på hur kraftig snösmältningen var, hur länge den varade och vilken jordtyp marken hade. Transporten av fosfat i den här studien var högst i början av snösmältningsperioden med en tydlig nedgång under hela snösmältningsperioden, både uppströms och nedströms i området.

Ett mått på att området var förhållandevis homogent var att fosfatdynamiken i dräneringsbrunn 10 och i utloppet 69 var snarlika. Dock var både fosfatkoncentrationer och vattenföring högre i 69 än i 10. Dräneringsbrunn 10 var ej avloppspåverkad och utloppet 69 tog emot många avlopp. Att fosfatkoncentrationsdynamiken i området var liknande skulle kunna förklaras av att fosfaters ursprung i huvudsak var från jordbruksmark och att avloppens fosfatbidrag var försumbart under hög vattenföring.

5.2 Variation av fosfat i tid och rum

Fosfattransporter varierade i både tid och rum. Vid låg vattenföring under hösten stod avloppsbelastade delavrinningsområden för de högsta specifika fosfattransporterna och de härrörde sannolikt från avlopp. Det var i huvudsak delavrinningsområde 501 och 502 som relativt övriga delavrinningsområden hade flest avlopp per ytenhet och stod för de största specifika fosfattransporterna. Flödet av avloppsvatten var konstant oavsett vattenföring och vid låg vattenföring fick avloppsvatten, med dess höga koncentration fosfat, en stor betydelse. P-AL halterna i delavrinningsområdena 501 och 502 var låga, d.v.s. markdepåerna av fosfat var små, vilket stödjer idén om att avlopp utgjorde en

betydelsefull källa till fosfattransport vid låg vattenföring. Totalt sett hade delavrinningsområde 56 och 69 flest antal avlopp och även härifrån var transporten stor i förhållande till övriga delavrinningsområden. P-AL halterna var fläckvis höga, men låga sett över hela området och lerhalterna kategoriseras som mellanlera, vilket skulle kunna stödja teorin om att avlopp utgjorde en viktig källa. De jordbruks- och skogsdominerade delavrinningsområdena stod för ett väldigt litet läckage av fosfat under låg vattenföring och höst. Förklaringen ligger förmodligen i att det under låg vattenföring knappt dränerades något vatten från områdena. Den lilla volym vatten som senare belastade utloppet innehöll låga koncentrationer fosfat, vilket genererade små fosfattransporter. En stor del av fosfaterna satt sannolikt bundna till lerpartiklar och områdena uppströms har fläckvis styva leror, med fler lerpartiklar, varför fosfaterna stannade i jordbruksmarken och läckaget var litet.

När vattenföringen ändrades från låg till hög under hösten ställdes sannolikt källfördelningen om. Avloppdominerade delavrinningsområden hade nu inte lika stor specifik fosfattransport i förhållande till ej avloppspåverkade jordbruksområden. Det var dock speciellt områdena, avloppspåverkade eller ej, med hög lerhalt som stod för de höga specifika fosfattransporterna. Det skulle kunna förklaras av att leran i jordbruksmarken spolades ut i bäcken och fosfater som satt bundna till lerpartiklarna skakades loss under den turbulenta färden dit. Även jordbruksområden som delavrinningsområde 10, som hade mellanhöga lerhalter och låga P-AL halter och ej var påverkade av avlopp, bidrog under låg vattenföring med en relativt stor specifik fosfattransport. De lätt avloppspåverkade delavrinningsområdena 18 och 30, med höga P-AL halter men med en låg lerhalt bidrog relativt övriga områden med en konstant specifik fosfattransport. Generellt sett fick jordbruksområden en större specifik fosfattransport än de avloppspåverkade delavrinningsområdena när vattenföringen växladades från låg till hög.

Vintertid och under låg vattenföring var transportfördelning av fosfater från de olika delavrinningsområdena likt den vid låg vattenföring under hösten. Det var avloppspåverkade områden som stod för den största specifika fosfattransporten. Vid hög vattenföring på vintern verkade, till skillnad från hösten, skog- och jordbruksområden stå för en större specifik fosfattransport än områden med avlopp. Exempelvis stod uppströmsområde 10 för en större specifik fosfattransport än vad de avloppspåverkade delavrinningsområdena 56 och 69 gjorde. Även det jordbruksdominerade delavrinningsområdet 44, som var lätt påverkat av avlopp och hade låga ler- och P-AL halter hade en signifikant specifik fosfattransport. Det stödjer återigen teorin om att jordbruksområden stod för de stora läckagen av fosfor vid hög vattenföring. Störst specifik fosfattransport stod dock delavrinningsområde 501 och 502 för. Detta berodde troligen på att avloppen tillsammans med de höga lerhalterna gav en stor samlad specifik fosfattransport.

Under våren, oavsett vattenföring, verkade den specifika fosfattransporten i huvudsak komma från delavrinningsområde 501 och 502 samt delavrinningsområde 56 och 69. Vid hög vattenföring under våren provtogs fosfatkoncentrationer vid väldigt höga vattenföringar, uppemot 800 l/s, och trots detta stod jordbruksområden vid dessa provtagningar inte för ett större läckage. Det kan bero på att växtsäsongen precis har börjat och lättgänglig näring tas upp av växter. Tillsammans med att de lättgängliga depåerna i marken har spolats ut under höst och vinter var möjligen mängden fosfat i jordbruksmark väldigt låg nu och följaktligen också den specifika transporten fosfat från jordbruksmark. Det kan även bero på att marken har spolats ur på fosfater i enlighet med studien av uppströms- och nedströmsdynamik under snösmältningsperioder.

Sommartid och under låg vattenföring var det återigen avloppsbelastade delavrinningsområden som hade högsta specifik fosfattransport. Även vid hög vattenföring utgjorde avloppsbelastade delavrinningsområdena den mest betydelsefulla källan till läckage av fosfat. Det kan möjligen förklaras av att växtligheten hade kommit igång ytterligare och ännu mindre fosfat fanns i jordarna tillgängligt för urspolning vid hög vattenföring. Även fosfatläckage från stall och betesmark, där hästar och kor betar, medverkade sannolikt till de högsta koncentrationerna som registrerades under vissa provtagstillfällen.

Generellt sett kan en koppling mellan vattenföring och fosfatkällor konstateras med en viss årstidsvariation. De största fosfattransporterna äger rum under hög vattenföring (Djodjic, 2001) oavsett årstid och fosfattransporterna utgjordes sannolikt av fosfater som skakades loss från lerpartiklar under erosion. Vid låg vattenföring bidrog avloppen med ett större läckage fosfat. Storleken på ytorna i de olika delavrinningsområdena varierar mycket och även om delavrinningsområde 501 och 502 konstant står för ett stort läckage av fosfat per ytenhet så är dess area väldigt liten i förhållande till övriga delavrinningsområden. Ser man på den totala fosfattransporten bidrar samtliga jordbruksområden med mycket mer fosfat till utloppet. Fosfatläckaget varierade även i rummet, där delavrinningsområdets specifika markegenskaper och topografi förmodligen spelar en stor roll (Djodjic, 2001). Som Djodjic skriver så krävs det förmodligen specifika behandlingar med utgångspunkt i egenskaper för varje delavrinningsområde för att reducera fosfatläckaget på effektivaste sätt.

5.3 Syreisotopsammansättning i fosfat ($\delta^{18}\text{O}_p$)

Resultatet av syreisotopsammansättningen i fosfatjonen visade att en naturlig variation i fosfatjonens syreisotopsammansättning förekom. Skillnaden mellan olika källor var tillräckligt stor för att fosfatjoner från olika källor kunde skiljas åt med 99 % konfidens. Fosfatsignaturen i avloppsvatten var högre än den i dräneringsvatten från jordbruksmark. Fosfatsignaturerna provtagna i enskilda avlopp varierade mellan 14 och 16 ‰ och var nästan lika höga som fosfatsignaturer provtagna i reningsverk, 16,5-18,0 ‰ (Gruau m.fl., 2004). Då fosfater från reningsverk inte enbart har sin härkomst från människor, utan även innefattar en del andra källor, var inte signaturerna helt överensstämmande. Gödsel och enskilda avlopp, med sannolikt liknande biologiska miljöer, hade ungefär samma höga signatur. Gödslingsmedel hade signaturer runt 19,5–23 ‰ (Gruau m.fl., 2004). Signaturer hos fosfatjoner extraherade ur jord varierade mellan 9 och 10 ‰ och visade ungefär samma signatur som dräneringsvattnet som hade 8 till 13 ‰. Det påvisar möjligen att dräneringsvatten med tillhörande fosfater till stor del bestod av vatten och fosfater dränerat från jordbruksmark. Vid ett tillfälle fastställdes isotopsignaturen under en snösmältningsperiod i utloppet och dräneringsvattnet uppvisade vid samma tillfälle liknande signatur som i utloppet, vilket sannolikt förklarades av att den största delen av fosfater i utloppet då utgjordes av fosfater från jordbruksmark. Det var inte orimligt då vattenföringen var väldigt hög och en stor mängd fosfat från jordbruksmark, som studien av den rumsliga variationen pekade på, spolades ut under våren. Samlingsisotopen i utloppet (provpunkt 69) var en mix av fosfater från båda källorna och användes vid fastställning av hur stor andel av fosfatet i utloppet som härstammade från respektive källa.

5.4 Kalibrering av H-HYPE

H-HYPE modellerade vattenföringen i området bra under hela tidsperioden med några kraftiga sommarregn och snösmältningsperioder som undantag. Det gick att kalibrera så att sommarregn simulerades bra, men då skulle simuleringen för resterande tid på året

försämras signifikant. Kalibreringen av vattenföring, med ett slutgiltigt R^2 -värde på timsbasis på 0,6, kunde inte bli mycket bättre, då snösmältningsperioder och sommarregn inte fångades med modellen och sänkte R^2 -värdet. S-HYPE, som var regionalt kalibrerad, beskriver området med ett R^2 -värde på dygnsbasis på 0,55 (Rönnerberg, 2012). H-HYPE beskriver alltså området bättre med avseende på vattenföring trots att 24 fler punkter per dygn jämförs än S-HYPE. När H-HYPE kalibrerades eftersträvades ett så högt R^2 -värde som möjligt, men samtidigt eftersträvades en realistisk parametersättning förankrad i litteratur och allmän hydrologi. Parametervärden sattes till rimliga värden och varierades inom rimliga gränser.

Idag finns det på SMHI en automatisk kalibreringsrutin, Autocal, som bygger på att en matematisk funktion söker ett optimum (R^2) och varierar en parameter i steg. Stegvis söker funktionen optimum via derivator och högre R^2 -värden kan på det viset åstadkommas. Parametervärdena som utgör den ”optimala” kalibreringen kan dock sättas orealistiska genom denna automatik. Av det här skälet använde jag mig av ”manuell” kalibrering.

Kalibrering av vattenkvaliteten var betydligt svårare att utföra och målet blev att hitta en parameteruppsättning som gav en dynamik av modellerade fosfatvariationer som överensstämde med uppmätta. Uppmätta fosfatkoncentrationer var konsekvent högre på sommaren och utan att kalibrera orealistiskt kunde inte H-HYPE fånga de höga fosfatkoncentrationerna sommartid. Visuellt sågs det att H-HYPE fångade dynamiken i fosfatkoncentrationer under övriga årstider, men några statistiska mått saknar värde att redovisa då det fanns för lite uppmätt data att kalibrera mot. Förväntningen på H-HYPE var att den skulle fånga den snabba dynamiken i fosfatkoncentrationer under året men det gick inte bra. Den begränsade modelleringen av fosfat ligger möjligen i den underliggande beskrivningen av fosfors processer i HYPE:s struktur. Mer kunskap om hur fosfor beter sig i naturen behövs och HYPE:s beskrivning av fosfors mekanismer behöver fördjupas.

5.5 Jämförelse av modelluppsättningar

5.5.1 Betydelsen av den rumsliga beskrivningen i HYPE

Då en högre rumslig upplösning knappt gav en förbättring i prediktionskraft av vattenföring ($R^2 = 0,602$ kontra $0,567$) för hela perioden, ansågs den rumsliga uppdelningen omotiverad. I och med att avrinningsområdet var så litet och homogent, så genererar inte en noggrannare uppdelning i rummet en märkbart bättre beskrivning av området i HYPE. Det fanns dock andra anledningar till att en högrumslig upplösning var värdefull, exempelvis studier och beräkningar av interna fosfattransporter inom området. För mer inhomogena områden och framförallt större områden kanske det går att motivera. Något som inte kan frångås var att den högupplösta modellen är uppbyggd på data baserad på lokalkännedom. En jämförelse mellan att använda högupplöst geografisk data över t.ex. grödor, jordtyper, vattendelare och mindre högupplöst geografisk data utfördes inte.

5.5.2 Betydelsen av tidssteget i HYPE

Ett kortare tidssteg i HYPE gav en märkbar förbättring av prediktionskraft för vattenföring. Med ett dygn som tidssteg erhöles $R^2 = 0,46$, och med en timme som tidssteg erhöles $R^2 = 0,61$. Tidsstegets storlek hade inte någon nämnvärd betydelse för modellering av fosfatkoncentrationer. Intressant var att vattenföringen blev bättre modellerad med ett kort tidssteg men inte fosfatkoncentrationerna, trots att de var direkt styrda av vattenföringen.

5.6 Källfördelning av fosfat

En massbalans för fosfat tillämpades (Ekv. 4) och den procentuella källfördelningen av fosfat som en funktion av vattenföringen beräknades (Fig. 14). H-HYPE användes för modellering av fosfatkoncentrationer trots den bristande beskrivningen. Eftersom den procentuella fördelningen av källbidrag för fosfat eftersöktes var den absoluta modellerade fosfatkoncentrationen mindre intressant och följaktligen kunde modellen användas. Vid nio tillfällen provtogs isotopsammansättningen i utloppet och med hjälp av en massbalans beräknades källfördelningen. Åtta av tillfällena var under höst och vinter, då H-HYPE modellerade fosfatkoncentrationer bäst och ett tillfälle var under sommaren, då modellen gick sämre. Isotopsammansättningen i utloppet multiplicerades med modellerad fosfatkoncentration och vattenföring från hela området och alla källor. Källorna avlopp, jordbruksmark och övrig mark modellerades separat vid samma tillfälle. Medelvärdet av isotopsammansättningen från provtagningar av dräneringsvatten och avlopp användes vid varje bestämning av källfördelning. Det medförde ett fel, då syreisotopsammansättningarna hos de olika källorna hade en viss säsongsvariation. För validering av hur bra källsepareringen fungerade med syreisotoper beräknades den okända signaturen hos fosfatjoner från övrig mark. Förhoppningen var att den skulle vara förhållandevis konstant inom ett rimligt spann, men så blev det inte. Signaturen varierade från -1280 till 32 ‰. En känslighetsanalys för syreisotopsammansättningen för det okända fosfatvattnet visade att den beräknade signaturen för övrig mark var mycket känslig för fosfatkoncentrationen och vattenföring från denna marktyp. Eftersom fosfatkoncentration och vattenföring var osäkra, med koncentrationsvärden enligt schablon, blev signaturen osäker. Dessutom var antagandet att signaturen skulle vara konstant förmodligen felaktigt. Då övrig mark innefattade både skog, betesmark och grundvatten, som i sig egentligen var tre olika källor, varierade förmodligen signaturen i fosfatjonerna från alla de tre källorna.

Detta till trots så gav källfördelningen ett rimligt resultat, och visade att avlopp utgjorde den största källan för läckage av fosfat vid låg vattenföring. Vid vattenföring över 25 l/s utgjorde jordbruksvatten den största fosfatkällan. Att utloppets fosfater under hög vattenföring främst härstammade från jordbruksvatten var något som påvisades med signaturen (Fig. 11, röda pilar). Samtidiga provtagningar från respektive källa i området skulle behövas för att bättre kunna uttala sig om metodens säkerhet. Även en bättre beskrivning av fosfors mekanismer i HYPE behövs för att noggrannare kunna modellera koncentrationer.

6 SLUTSATSER

- H-HYPE med en timme som tidssteg modellerade vattenföring bra ($R^2=0,6$) och fosfatkoncentrationer mindre bra, men fångade den årliga dynamiken av fosfatkoncentrationer. HYPE behöver en förbättrad beskrivning av fosfors mekanismer i naturen.
- Fosfattransporter var störst i början av en snösmältningsperiod och minskade allteftersom fosfater spolades ut ur marken i takt med att vattenföringen steg.
- Läckage av fosfat varierade i tid och rum. Vid låg vattenföring och under höst och vinter stod de avloppspåverkade delavrinningsområden för den största specifika fosfattransporten. Under hög vattenföring och samma årstider stod jordbruksområden för en större specifik fosfattransport, men de avloppspåverkade delavrinningsområde stod fortfarande för den största specifika fosfattransporten. Under vår och sommar var det, oavsett vattenföring, de delavrinningsområden som var avloppsbelastade som stod för den största specifika fosfattransporten. Sannolikt utgjorde avloppen den mest betydelsefulla källan till fosfat vid låg vattenföring och jordbruksmark vid hög vattenföring.
- Syreisotopsammansättningen i fosfatjoner från avlopp och jordbruksmark varierade. Med 99 % konfidens kunde fosfater från källorna avlopp och jordbruksmark skiljas åt.
- Fosfatkällor separerades under olika vattenföring med hjälp av syreisotopsammansättningen i fosfatjonen från de olika källorna. Under låg vattenföring utgjorde avlopp sannolikt den största källan till fosfat, vid 25 l/s var källorna lika stora och vid en högre vattenföring ökade jordbruksmark som huvudsaklig källa till fosfat positivt linjärt med ökad vattenföring. Metoden gav ett rimligt resultat men behöver mer data för att utvärderas.
- En i rummet och i tiden högupplöst uppsättning av HYPE-modellen gav marginell skillnad vad gäller simulering av fosfatkoncentrationer och vattenföring i de fall olika uppsättningar använde sig av samma databas. Störst inverkan vid modellering hade dock minskning av tidssteget som gav en märkbart bättre prediktion av vattenföring. Fosfatkoncentrationerna påverkades varken av förändringar i den rumsliga eller tidsmässiga upplösningen.
- Sammantaget visade resultaten att det är sannolikt att avlopp utgjorde den huvudsakliga källan till fosfat vid låg vattenföring och att fosfater från jordbruksmark utgjorde den huvudsakliga källan till fosfat under hög vattenföring.

7 PRAKTISKA IMPLIKATIONER

Med kunskap om källfördelning av fosfat skulle lämpliga åtgärder för reduktion av fosfatläckage kunna vidtas. Informationen skulle kunna användas som underlag eller stöd vid planering av reduktionsåtgärder av fosfatförluster. Hur ofta inträffar den här typen av vattenföringssituation? Vilken källa till fosfat är mest betydelsefull då? Hur åtgärdar vi den? Med både HYPE-modellen och källfördelning av fosfater skulle frågorna kunna besvaras och utnyttjas vid planering av åtgärder mot fosfatläckage från jordbruksmark. Resultat som ”utspolningseffekten” under snösmältningsperioden i det här examensarbetet skulle kunna användas för vidareutveckling av HYPE-modellen och parametrisering av fosfat.

8 REFERENSER

Blake, R.E., O'neil, J.R., Garcia, G.A. 1997. Oxygen isotope systematics of biologically mediated reactions of phosphate: I. Microbial degradation of organophosphorus compounds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 61, utgåva 20, 4411–4422.

Carlsson, C. 2001. Växtnäringsförluster till vatten i Averstadåns avrinningsområde. *Ekohydrologi* 61. ISSN 0347-9307.

Djordjic, F. 2001. Lerjord läcker mycket fosfor. *FAKTA JORDBRUK*, Nr 13, SLU.
<http://www.slu.se/Documents/externwebben/overgripande-slu-dokument/popvet-dok/faktajordbruk/pdf01/Jo01-13.pdf>

Ekologgruppen. 2009.
http://www.kavlingeaprojektet.se/res/Rapporter/rapport_hjularod_borrning_2009.pdf

Elsbury, K., Paytman, A., Ostrom, N.E., Kendall, C., Young, M.B., Mclaughlin, K., Rollog, M., Watson, S. 2009. Using Oxygen Isotopes of Phosphate To Trace Phosphorus Sources and Cycling in Lake Erie. *Environ. Sci. Technol.* Vol. 43, 3108–3114.

Eriksson, J., Nilsson I., Simonsson M., 2005. *Wiklanders Marklära*, Författarna och studentlitteratur, Lund.

Greppa Näringen. 2010. Övergödning.
<http://www.greppa.nu/uppslagsboken/naringiomvarlden/overgodning/sjoarochrinnandevatten.4.1c0ae76117773233f7800012882.html> (2010-10-28)

Gruau G., Legeas, M., Riou C., Gallacier E., Martineau, F., Hénin, O. 2004. The oxygen isotope composition of dissolved anthropogenic phosphates: a new tool for eutrophication research?. *Water Research*, vol. 39, 232–238.

Göta älvs vattenvårdsförbund, Götaälvvf.org. 2011.
<http://www.gotaalvvvf.org/resultat/begreppsforklaringar/fosfat.4.271d6b7512e53cf0cf98000878.html> (2012-03-04)

Havet.nu. 2012. Övergödning.
<http://www.havet.nu/?d=31> (2012-01-02)

Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., Arheimer, B. 2010. Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales. *Hydrology Research*, 41.3-4.

McLaughlin, K., Silva, S., Kendall, C., Stuart-Williams H., Paytan, A. 2004. A precise method for the analysis of $\delta^{18}\text{O}$ of dissolved inorganic phosphate in seawater. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 2, 202–212.

Strömqvist, J., Arheimer, B., Dahné, J., Donnelly, C., Lindström, G. 2010. Water and nutrient predictions in ungauged basins – Set-up and evaluation of a model at the national scale. *Hydrological Science Journal*, manuscript id HSJ-2010-0265.R1.

Ulén, B. 2002. Concentrations and transport of different forms of phosphorus during snowmelt runoff from an illite clay soil. *Hydrological Process.* 17, 747–758 (2003).

Ulén, B., Djodjic, F. 2004. Fosforförluster från åkermark. *Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift* avsnitt 26, ISSN 0023-5350, ISBN 91-85205-05-2.
http://www.vaxteko.nu/html/sll/kungl_skogs_lantbr_akad/ksla_tidskrift/SLT04-26/SLT04-26I.PDF

Ulén, B., Fölster, J. 2006. Recent trends in nutrient concentrations in Swedish agricultural rivers. *Science of the Total Environment*, vol. 373, pp. 473-487.

Vattenmyndigheten. 2012. Förvaltningsplan Bottenhavet 2009-2015. Övergödning (kap 7.2)
<http://www.vattenmyndigheterna.se/Sv/bottenhavet/forvaltningsplan/miljoproblem/Pages/overgodning.aspx> (2012-01-02)

Vattenweb. 2010. SMHI.
<http://www.smhi.se/nyhetsarkiv/allt-om-vatten-samlas-i-ny-vattenweb-1.13299>
(2012-02-20)

Webhypro. 2012. Prognosverktyg. SMHI.
<http://www.smhi.se/Produkter-och-tjanster/professionella-tjanster/energi/webhypro-1.2486>

Rönnerberg, Rasmus (2009). Avloppsinventering 2009.

Tonderski-Sundblad, K., Andersson, L., Taubald., H, Rönnerberg, R. 2012. Manuskript.

Tonderski-Sundblad K., Poster Sevilla, 2010. 6th International Workshop on Phosphorus IPW6.

Personlig kommunikation

Lindström, Göran. SMHI. 2011. 2011-10-20 till 2012-03-07.

Heeb, Anuschka. Linköpings Länsstyrelse. 2011. 2011-10-20 till 2012-03-07

APPENDIX

Tabell A1: Jämförelse av geografisk upplösning mellan Sverigemodellen (S-HYPE) och H-HYPE.

Sverigemodellen	Högupplösta modellen (H-HYPE)
<i>Jordart</i>	<i>Jordart</i>
-Lera -Morän -Tunna jordar	En finare karta från SGU har använts för indelning -Lättlera -Mellanlera -Styvlera -Morän -Sandjord -Organiskt jord -Berg
<i>Markanvändning</i>	<i>Markanvändning</i>
-jordbruk -skog -berg -vårsådd (höstplöjd) -höstsådd -radsådd -höstraps -intensiv vall -extensiv vall/vårsådd (vårplöjd) -kärr -sjö -glaciär -mosse	-Jordbruk1 (låg P-AI) -Jordbruk2 (mellan P-AI) -Jordbruk3 (hög P-AI) -Skog -Berg -Extensiv vall/övrigt -Betesmark Jordbruk 1, 2 och 3 är baserad på en markkatering i området och skiljer sig åt i olika P-startpools. Betesmark är inte dränerad enligt lokalkännedom
<i>Grödorgrupper</i>	<i>Grödorgrupper</i>
-vårgrödor -höstgrödor -radgrödor -höstraps -extensiv -vall -skog -fånggrödor -övriga grödor	-vårsådd -intensiv vall -extensiv vall -höstsådd -höstraps -skog Grödorgrupperna har kalibrerats utifrån lokalkännedom.