

Fosforretention i små nya våtmarker nedströms jordbruksmark med höga fosforförluster

Barbro Ulén, Pia Kynkäänniemi, Karin Tonderski

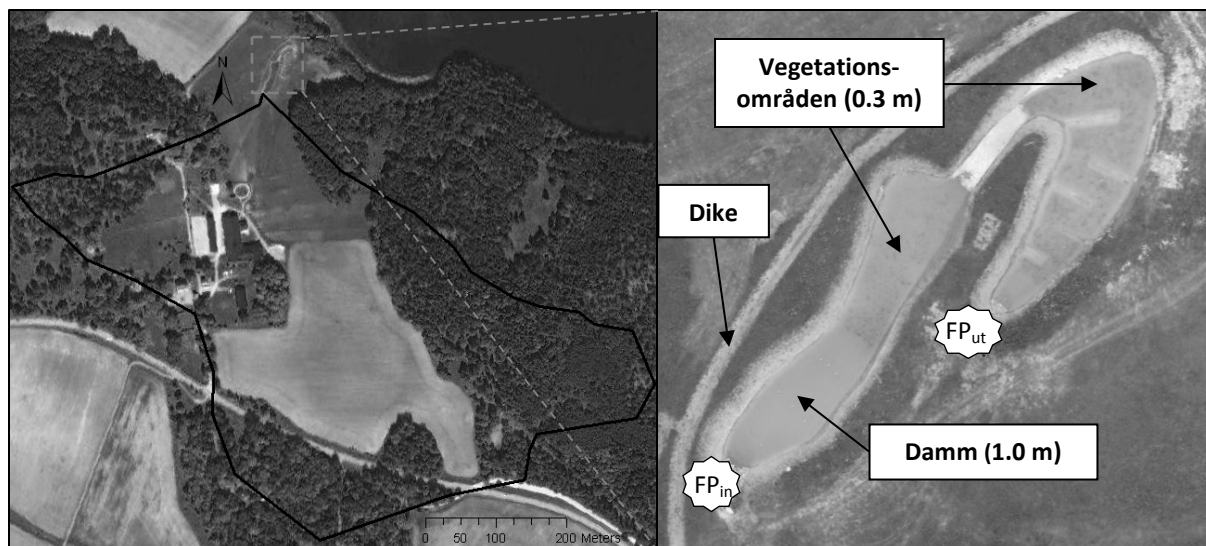
BAKGRUND

I Sverige beräknas 40 % av fosfor som når Östersjön komma från jordbruksmark (Brandt m.fl., 2008) och fosfor är en nyckelfaktor för övergödningen av Östersjön. Algbloomningen varje sommar har genererat internationella överenskommelser för att minska fosforbelastningen. Dessutom har de nationella miljömålen och EU:s Vattendirektiv ökat kraven på förbättrad vattenkvalité med minskning av både kväve och fosfor. Mycket av fosfor kommer via eroderad fosfor (fosforerosion) via diken och dräneringsledningar.

En viktig motåtgärd mot fosforerosionen är konstruerade, alternativt återskapade, våtmarker. Våtmarker med fri vattenspegel (FWS) har etablerats som naturliga sänkor nedanför kritiska områden i jordbrukslandskapet ("hot-spots") t.ex. rasthagar för djur (Gottschall m.fl., 2007) och gårdsplaner (Dunne m.fl., 2005). Man kan idag få miljöersättning för våtmarker men det finns fortfarande otillräckligt med kunskap om hur effektiva de är som sänkor för fosfor, speciellt för områden med lerjord som ofta har en stor fosfortransport till sjöar och vattendrag (Ulén m.fl., 2007). För fosfor är sedimentationen den viktigaste processen, men fosfor hålls också kvar genom kemisk sorption och biologiskt upptag av växter och alger (Reddy et al., 1999). Därför behövs det en noga utformning av våtmarkerna för att nå en så hög fosforretention som möjligt.

Effektiviteten i fosforvåtmarkerna varierar avsevärt inte bara på grund av utformningen men också beroende på variationerna i vattenflöden och fosforbelastning (Braskerud m.fl., 2005; Tonderski m.fl., 2005). Hydraulisk belastning är en viktig faktor för fosforretentionen i våtmarker (Koskiaho, 2006), och under olika årstidsvariation och belastning (Richardson, 1985). Under en månad kan våtmarken vara en fälla och nästa månad en källa för fosfor. Tillfällena med höga flöden under vår och höst är mest betydelsefulla för retentionen i tempererade regioner. Under dessa perioder transporteras fosfor och partiklar från jordbruksmarken och den biologiska aktiviteten är låg. Under höglödestillfällena medför den korta uppehållstiden minskad sedimentation av partiklar med vidhäftad fosfor, och de som sedimenterat tidigare kan t.o.m. resuspendera. Våtmarksytan (A_w) i relation till tillrinningsområdet uppströms (A_c) är därför en bestämmande faktor för belastningen och därmed för våtmarkens effektivitet. På en viss plats kan en högre kvot A_w/A_c öka retentionstiden för vattnet och därmed ge mera tid för partiklarna att sedimentera och låta sorptionen ske. Detta har också minskad re-suspensionen, och också så att våtmarken inte släpper redan fångad fosfor i våtmarken (Koskiaho, 2006), vilket resulterar i en mer effektiv relativ retention beräknad i förhållande till fosforbelastningen på våtmarken. I motsats till detta kan den specifika retentionen minska om man ser en positiv relation mellan fosforbelastning och specifik fosforretention (t.ex. Braskerud, 2002; Kadlec, 2005).

Andra parametrar i tillrinningsområdet påverkar också fosforbelastningen på våtmarken. 17 våtmarker i Skandinavien, Schweiz och USA som utvärderades av Braskerud m.fl. (2005) varierade i storlek från 0,007 till 8,7 % av tillrinningsområdet och den relativa retentionen av både partikelbunden fosfor (PP) och löst fosfor (DP) ökade med ökad våtmarksyta. I Finland, var rekommendation för våtmarkens yta relativt tillrinningsområdet 1-2% (Ruohtula, 1996) eller >2% (Puustinen, m.fl., 2001). I linje med detta fann Koskiaho (2006) att Alastro våtmark (0,5 % av tillrinningsområdet) med relativt liten yta bara höll kvar 6 kg TP ha⁻¹ år⁻¹ (7 % av belastningen av TP) och verkade som en källa snarare än en fälla för DP med -19 kg ha⁻¹ år⁻¹ (-22 % av TP). Författarna drog slutsatsen att kvoten A_w/A_c var för liten för det flacka avrinningsområdet som dominerades av lerjord, vilket resulterade i att retentionstiden var alltför kort för att de fina partiklarna skulle sedimentera. Också i relation till den relativt stora våtmarksytan (>1 % av avrinningsområdet), varierar fosforretentionen avsevärt under året. Den årliga retentionen var från -11 till + 59 % för en våtmark som täckte 9 % av våtmarksytan (Jordan m.fl., 2003), medan en variation från -54 till 80 % observerades av Kovacic m.fl. (2000) för en våtmark som täckte 2-3 % av våtmarksytan. Tanner



Figur.1. Flygfoto över tillrinningsområdet till vänster och Bergaholms våtmark utformad för fosforretention till höger. Flödesproportionell (FP) provtagning vid inlopp och utlopp.

m.fl. (2005) rapporterade -101 % för det första året och +12 % för det andra med en kvot A_w/A_c på 1 %. Utsträckta perioder av fosforfrigörning visades också i 3 andra våtmarker och detta berodde på det faktum att det inkommande vattnet framför allt var i löst form och att våtmarken hade konstruerats på fosforrik jord (Tanner & Sukias, 2011). av TP) och verkade som en källa snarare än en fälla för DP med $-19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (-22 % av TP). Författarna drog slutsatsen att kvoten A_w/A_c var för liten för det flacka avrinningsområdet som dominerades av lerjord, vilket resulterade i att retentionstiden var alltför kort för att de fina partiklarna skulle sedimentera. Också i relations till den relativt stora våtmarksytan (>1 % av avrinningsområdet), varierar fosforretentionen avsevärt under året. Den årliga retentionen var från -11 till +59 % för en våtmark som täckte 9 % av våtmarksytan (Jordan m.fl., 2003), medan en variation från -54 till 80 % observerades av Kovacic m.fl. (2000) för en våtmark som täckte 2-3 % av våtmarksytan. Tanner m.fl. (2005) rapporterade -101 % för det första året och +12 % för det andra med en kvot A_w/A_c på 1 %. Utsträckta perioder av fosforfrigörning visades också i 3 andra våtmarker och detta berodde på det faktum att det inkommande vattnet framför allt var i löst form och att våtmarken hade konstruerats på fosforrik jord (Tanner & Sukias, 2011).

I Norge brukar man konstruera små våtmarker (0,06-0,4 % av avrinningsområdet) som fokuserar på sedimentation med ett djupare damm följt av ett vegetationsområde. Retentionen sker mest i partikelform motsvarande upp till 45 % av belastningen. Man föreslår lokalisering nära källan. Med ett kort avstånd kan nedbrytningen av leraggregaten vara mindre innan de når våtmarken. Våtmarkerna hade en högre sedimentation än vad man kunde förvänta sig med dispergerade lerpartiklar vilket senare bekräftades av en sedimentationsstudie (Sveistrup m.fl., 2008).

År 2010 införde Jordbruksverket en ny subvention för fosfordammar på grund av de positiva erfarenheterna från de norska dammarna. Motsvarande våtmarker har dock ännu inte studerats under vanliga svenska förhållanden med lerjordar, flackare topografi och med betydande fosforförluster genom dräneringssystem. Studier har visat att dräneringsvattnet ofta innehåller upp till 40 % fosfor bunden till mycket fina lerpartiklar och kolloider (Ulén, 2004). Det är därför troligt att storleken på partiklarna i inflödet har en väsentlig betydelse för effekten hos våtmarker som är konstruerade som fosforfällor. Följaktligen är det viktigt att bestämma om det kan ske fosforretention i våtmarker som belastas av lerjordar från dräneringsledningar. Avsikten var att utvärdera: i) de första två årens effektivitet för en våtmark som belastas av dräneringsvatten från ett litet tillrinningsområde med lerjord och måttlig lutning och ii) dynamiken i fosforkoncentrationen och retentionen under olika årstider.

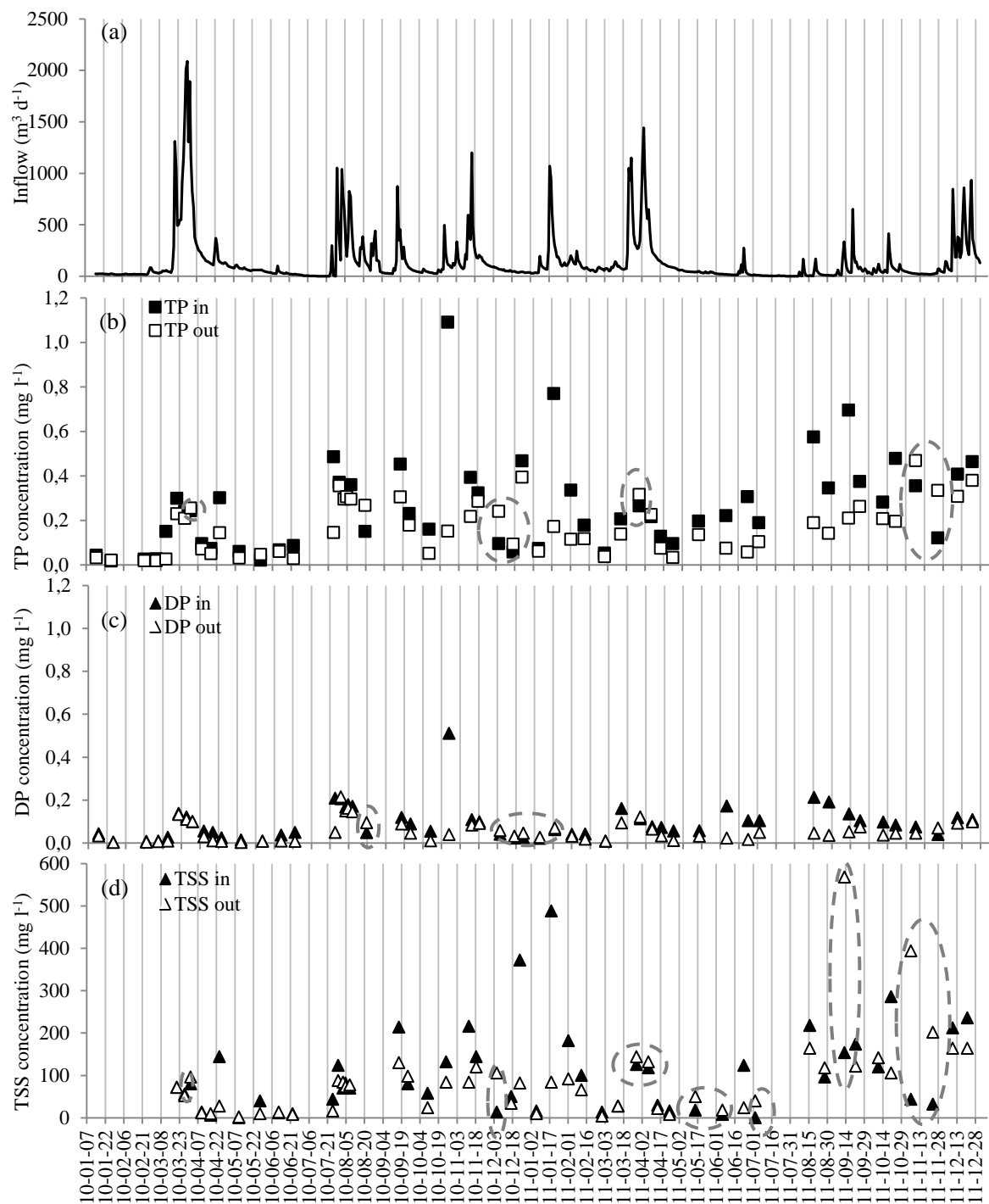
MATERIAL OCH METODER

Våtmarken Bergaholm (59°14'2.47"N, 17°42'44.82"E) konstruerades augusti 2009 för att minska fosforbelastningen till Stockholms stads reservvattentäkt Bornsjön. Årsnederbörden (30-årsmedelvärdet) är 576 mm med ett snötäcke av varaktigheten drygt 2 månader och medeltemperaturen 6.4 °C. Under den studerade perioden (2009/2010 and 2010/2011) var vintrarna ovanligt långa (3-5 månader) med nästan permanent snötäcke som bara avbröts av en eller två korta perioder med snösmältning. Tillrinningsområdet (26 ha) består av odlad jordbruksmark (11 ha), hästhagar (3 ha) och skog (12 ha). Den genomsnittliga djurtätheten i hagarna är hög, 3,75 djurenheter ha⁻¹ (Parvage m.fl, 2011). Fosforstatusen är mycket hög med ett P-AL tal på omkring 50 (mg 100g⁻¹), dvs. mer än 80-ggr högre än median värdet för svensk åkermark (Eriksson m.fl., 2010). Matjorden har omkring 60 % lera.

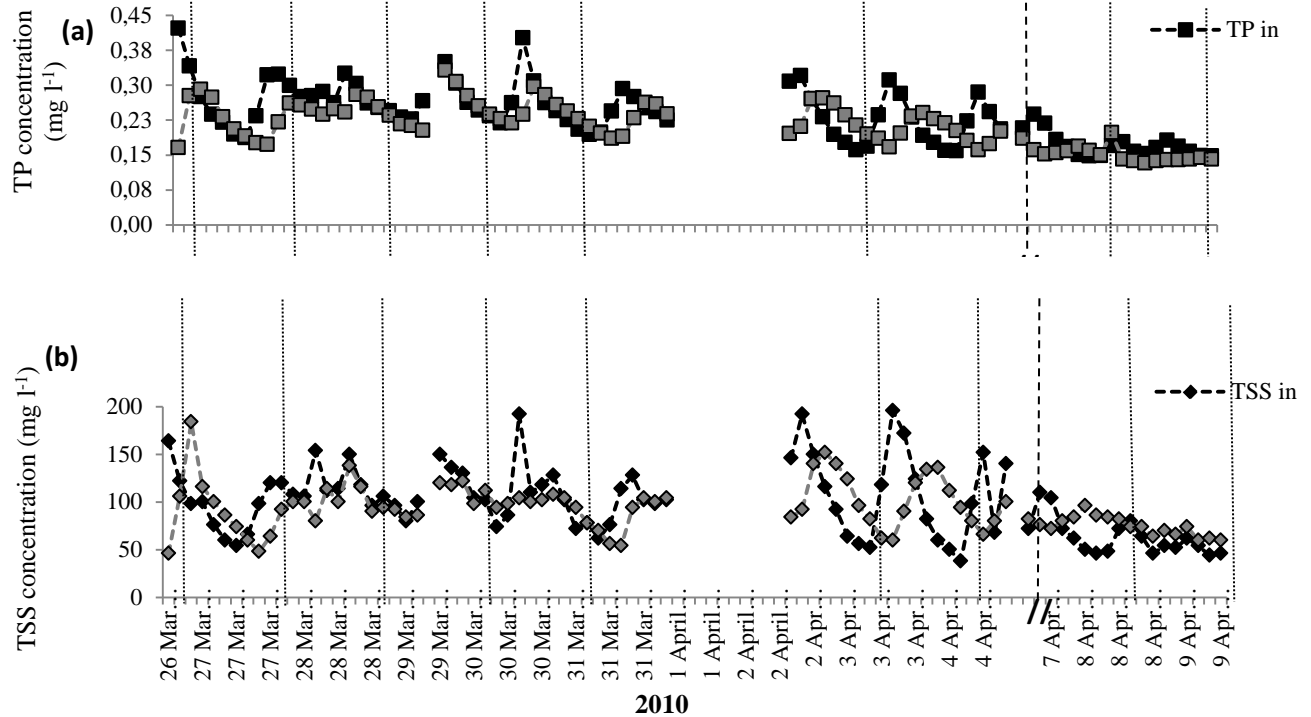
Den 0,08 ha stora våtmarken (0,3 % av avrinningsområdet konstruerades genom att öppna en kulvert och leda vattnet i en stor våtmarksslinga innan det når Bornsjön genom sitt gamla utflöde (Fig.1). Den smala formen i kombination med en djup inloppsdamms gör skötseln enklare och underlättar bortförel av sedimentfosfor som kan återbördas till åkern. För att minska vattenhastigheten och underlätta sedimentationen är inloppsdammen 1 m djup och 27 m lång (0,02 ha). Dammen följs av två 0,3 m djupa vegetationsområden (0,03 ha vardera) med en total längd av 73 m. Deras funktion är att filtrera partiklarna och också förhindra resuspensionen genom att stabilisera sedimentet med växtrötterna. För att förhindra erosion, är de branta kanterna av hela fosforvåtmarken täckt med en gles grovmaskig kokosmatta och besådd med en blandning av ängsgräs och örter. Några få meter väster om våtmarker finns ett långt öppet dike för att förhindra vatten från den västra förhöjningen i området att nå våtmarken. För att snabba på etableringen av vegetationen planterades vattenväxter från sjön t.ex. fläckstarr, gul svärdslilja, igelknopp och fackelblomster i den grunda delen under september 2009. Växtligheten ökade och nya arter koloniserades naturligt. Trådformiga alger (grönslick) blommade under båda somrarna.

Vattenflöden och grundvatten In och utlopp försågs med utjämningsbassäng, V-överfall och lastcell (Scaime, Annemasse, France) som sammankopplad med en Campbell CR1000 datalogger (Campbell Scientific, Inc., Logan, USA) för att registrera medelnivån varje timme. Vid mycket höga flöden i utloppet uppstod mätproblem och flödet sattes lika med inflödet över nivån 135 mm. Mönstret för grundvattnets rörelser bedömdes från trycknivåer i 12 smala grundvattentrör placerade parvis runt våtmarken. Rören var täta i botten och vardera paret hade slitsar vid 0,4 m resp. 0,8 m under markytan för att följa om grundvattnet rörde sig uppåt eller nedåt. Grundvattensnivån bestämdes med hjälp av ljudet från ett blåsrör.

Vattenprovtagning och analys Flödesproportionella vattenprov provtogs i in- och utlopp (Figur 1) veckovis eller vart 14:e dag under hela året. När 20 m³ vatten passerat startar en peristaltisk pump som pumpade ung. 20 mL av ett delprov till en 20 L glasflaska placerad i ett kylskåp. Proven samlades vid 54 tillfällen under de två åren: 30 gånger under 2010 och 24 gånger under 2011. Värmekablar hindrade att pumpar och slangar frös och gjorde provtagning möjlig året om. Dessutom provtogs vattnet tidsstyrt under kritiska perioder vid snösmältningen samtidigt vid in- och utlopp. Dessa prov (tretimmars) bestod av samplingsprov tagna var 30:e minut med två kontinuerliga provtagare av märket ISCO GLS. Vattnet analyserades enligt europeiska kommittén för standardisering (ECS, 1996); totalfosfor som molybdat-reaktiv fosfor efter sur oxidation med K₂S₂O₈ och löst fosfor efter förfiltrering med filter som har en pordiameter på 0.2 µm (Schleicher & Schüll GmbH, Dassel, Germany). Skillnaden mellan totalfosfor i icke-filtrerat och filtrerat beräknades som partikelbunden fosfor. Totalt suspenderat material (TSS) bestämdes genom vägning före och efter filtrering med samma typ av filter.



Figur 2. (a) Inflöde ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) och inkommande (svarta) och utgående (vita) koncentrationer (mg L^{-1}) av flödesproportionella samlingsprover av (b) totalfosfor (TP) (c) löst fosfor (DP), och (d) total suspenderat material s (TSS). Cirklarna indikerar när inflödeskoncentrationerna var lägre än koncentrationerna i utflödet.



Figur 3 a). Koncentrationerna av totalfosfor (TP) och b) suspenderat material (TSS) (mg L^{-1}) med tidsproportionella prov (samlingsprov vart 3:e timme) under 2010. Koncentrationerna följde variationerna i lufttemperatur och flöden under dygnet under snösmältningen.

Dataanalys och statistik Hydrauliska belastningen ($\text{m} \text{år}^{-1}$) beräknades genom att dividera det kumulativa årliga inflödet (m^3) med våtmarkens yta (m^2). Specifik retention (kg ha^{-1}) bestämdes genom att subtrahera fosfortransporten ut ur våtmarken från fosforbelastningen. Relativa retentionen (%) bestämdes genom att dividera den kvarhållna fosformängden med belastningen. Relationerna mellan fosforkoncentrationer, halterna suspenderat material inflöde och lufttemperatur under snösmältningen 2010 analyserades med en multipel linjär regressionsmodell med autoregressiva fel. Tidsfördröjningen valdes att matcha provtagningsfrekvensen för varje prov (3 timmar) respektive vartannat prov (6 timmar) respektive. Analysen gjordes i programmet SAS 9.2. Statistiska skillnader mellan in- och utlopp bestämdes enligt Zwiers & von Storch (1995). Effektiva provstorleken justeras genom att ta hänsyn till storleken på i tidsserierna korrelationer vilket sedan används i formeln för t-test, varvid jämförelser gjordes med tabellvärden från Zwiers & von Storch (1995). Denna metod användes eftersom våra seriella observationer var korrelerade i tid.

RESULTAT OCH DISKUSSION

Vattenbelastning Vattenflödet varierade storligen med flera extrema toppar (Fig. 3a), vilken resulterade i en omsättningstid som varierade mellan 5 timmar till flera månader (median 7 dagar). Vintrarna 2009/2010 och 2010/2011 var kalla med ett snötäcke upp till 0,5 m tjocka. Detta följdes av snösmältning i mars (Figur 2a) och också en kortare snösmältning i januari 2011. När dessa snösmältningar inträffade de högsta dagliga inflödena under hela perioden. Under sommaren 2010, ägde två extremt intensiva regn rum inom fem dagar under slutet av juli. Dessa medförde det högsta uppmätta timflödet: $248 \text{ m}^3 \text{ tim}^{-1}$. Under en allmänt regnig augusti-månad var flödena höga. Medelvärde för den hydrauliska belastningen var $60 \text{ m} \text{år}^{-1}$, vilket var ganska lågt i jämförelse av vad som rapporterats från sju andra övervakade

våtmarker som anlagts i jordbruksområden i Sverige (7-725 m år⁻¹, median 128 m år⁻¹; Strand & Weisner, in press). Data täcker våtmarker som varierar i storlek från 0,06 till 2,2 % av avrinningsområdet, med de flesta är mindre än 0,3 % och är lokaliserade till regioner med hög avrinning. De norska våtmarkerna mottar mycket högre belastningar (241-661 m år⁻¹; Braskerud, 2002), medan den hydrologiska belastningen på våtmarker i jordbruksområden i Finland är lägre (7-47 m år⁻¹; Koskiaho m.fl., 2003). Utflödet under hela perioden var 88 % av inflödet. Mönstret för grundvattens trycknivåer visade att vatten från de omgivande områdena infiltrerade till grundvattnet hela året, vilket kan förklara att våtmarkens in- och utflöde skiljde sig åt. Det kan bero på att våtmarken ligger nära Bornsjön som innebär att det finns en hydraulisk gradient mot sjön.

Fosfordynamik Fosfor i inflödet varierade mycket (Figur 2c). Medelhalterna i inflödet på 0,30 TP mg L⁻¹ och 0,10 mg DP L⁻¹ visade att ungefär 2/3 av fosfor var partikelbunden vilket bekräftas av de höga halterna suspenderat material (Tabell 1). Partikelbunden fosfor i procent av suspenderat material var i genomsnitt 0,15 %. Medelhalten totalfosfor i utflödet var (statistiskt säkert) lägre än i inflödet, 0,18 mg TP L⁻¹, men variationen var hög. Halten löst fosfor var lägre (men inte statistiskt säkert) jämfört med inflödet. Den högsta fosforkoncentrationen i inloppet inträffade under oktober 2010 men i utflödet under november 2011 i de flödesproportionella proven. Det fanns flera korta perioder när fosfor och sedimenterat material var högre i utflödet än i inloppet. Det inträffade under båda snösmältningsperioderna i mars med höga flöden. Den 25 mars 2011, rensades inloppsbrunnen och innan tömningen kunde sediment därifrån antagligen belasta våtmarken. Inloppsbrunnen tömdes en gång till (19 oktober 2011). Hög avrinning i augusti 2010, som följde intensive regn under slutet av juli medförde utflöde från våtmarken. Det kan ha berott på utflödes av algceller eftersom våtmarken var täckt av sådana. Under perioder efter isläggning i december 2010, var koncentrationerna av både total- och löst fosfor högre i utflödet. Möjligen kan perioden av isläggning ha orsakat syrefria perioder som reducerat järn i våtmarks-sedimentet. Samma observationer gjordes i en annan svensk våtmark och man föreslog att ackumulerat organiskt material i sedimentet förorsakade syrefria förhållanden som medförde frigöring av järnbunden fosfor under perioder med isläggning. (Johannesson m.fl., 2011).

Under snösmältningen medförde dygnsvariationerna i lufttemperaturen att det blev en dygns-variation också i halterna fosfor och suspenderat material (Figur 3). Det var en fördröjning på några timmar mellan topparna. Variationerna under ett dygn var avsevärda: under en 18-timmarsperiod varierade totalfosforkoncentrationen med en faktor mer än 2 och det suspenderade materialet med en faktor på 4. De högsta koncentrationerna inträffade under den initiala fasen av flödestoppen. Vattnets uppehålls tid var 3-16 timmar under sådana skeden. Trots att alltså retentionstiden var kort minskade fosforkoncentrationen i utflödet. Retentionen var tydligt korrelerad med hur bra våtmarken fungerar som en fosforfälla under perioder som samtidigt har höga flöden och höga koncentrationer. Beräkningar baserad på flödesproportionella mätningar (en eller två veckor) visade på en nettofrigöring av totalfosfor 1 april 2010, då den tidsstyrda provtagningen olyckligtvis inte fungerade. Detta indikerar att det kan finnas ett tröskelvärde (>130 m³ tim⁻¹) över vilken Bergaholmsdammen inte fungerade som en fälla för fosfor och partiklar. För en av de norska våtmarkerna rapporterades en flödestopp på 4400 m³ tim⁻¹ (Braskerud, 2001). De norska våtmarkerna hade en hydraulisk belastning som var mer än 10 ggr högre än Bergaholmsdammen samtidigt som partiklarna i inflödet var större och hade en sedimentationshastighet som motsvarar mjälapartiklar jord (Sveistrup m.fl., 2008) vilket skulle kunna förklara den högre kritiska gränsen under norska förhållanden.

Fosforbelastning och retention Totalt läckte 0,6 kg ha⁻¹ år⁻¹ totalfosfor och 267 kg ha⁻¹ år⁻¹ suspenderat material från fältet och hästhagarna i det 26 ha stora tillrinningsområdet. Detta är mycket för svenska förhållanden där medelförlusten för totalfosfor är 0,4 kg ha⁻¹ år⁻¹ (Ulén m.fl., 2007). Lerjorden frigör lätt partiklar och detta, i kombination med att delar av hästhagarna har extremt hög fosforstatus, renderar tillrinningsområdet till att vara ett 'hot-spot-område' för höga fosforförluster. Belastningen till våtmarken var 193 kg ha⁻¹ totalfosfor (Tabell 2), vilket var mer än 2 ggr högre än den fosforbelastning som vanligen rapporterats för andra våtmarker på jordbruksmark (Higgins m.fl., 1993; Jordan m.fl., 2003, Koskiaho mf.

Tabell 1. Hydraulisk belastning och medelkoncentration av totalfosfor (TP) och löst fosfor (DP) i inlopp och utlopp i Bergaholmsdammen under perioden 15/1 2010 - 31/12 2011

År	Hydraulisk Belastning m yr ⁻¹	Medelkoncentration		DP _{in}	DP _{out}
		TP _{in}	TP _{out}		
----- mg L ⁻¹ -----					
2010	53	0.25	0.17	0.10	0.06
2011	67	0.36	0.20	0.10	0.06
Medel	60	0.30	0.18	0.10	0.06

2003, Kovacics, 2000, Reinhardt m.fl., 2005, Tanner m.fl., 2005). Tre av de våtmarkerna som hade låg kvot Aw/Ac i studien av Strand och Weisner (in press) mottar belastningar som är jämförbara med belastningen på våtmark Bergaholm, dvs. de ligger inom gränserna 100 – 200 kg ha⁻¹ år⁻¹. De två svenska våtmarker som hade högre belastning (400 - 700 kg ha⁻¹ år⁻¹) hade mer än sjufaldig hydraulisk belastning men samtidigt en lägre fosforkoncentration i inflödet (0,06-0,16 mg L⁻¹). En hög hydraulisk belastning var också huvudskälet till den upp till 10-faldigt högre totalfosforbelastningen på de norska våtmarkerna (vanligen 970-1910 kg ha⁻¹ år⁻¹; Braskerud, 2002).

Bergaholmsdammen var en nettosänka för fosfor och suspenderat material, som kvarhöll 69 kg resp. 30 ton per ha⁻¹ år⁻¹. (Tabell 2), vilket motsvarar en årlig retention på 0,22 kg TP per ha tillrinningsområde. Detta är betydligt högre än vad som rapporterats för våtmarker med lägre belastning. Retentionen var också 2 ggr högre än vad som rapporterats för våtmarker med 2-3 ggr högre belastning (Strand & Weisner, in press). Det goda resultatet för Bergaholmsdammen beräknades trots att den var nykonstruerad och att bottenytan antagligen inte hade stabiliserats. Detta innebär att det lätt borde kunna ske erosion från bottarna och från kanterna eftersom vegetationen inte hade etablerat sig fullständigt. Under det andra året var belastningen av fosfor och partiklar högre, vilket antyder att retentionen skulle kunna förbättras än mer inom några år (Tabell 2).

Med hänsyn till att den studerade perioden täckte två år med ovanligt mycket snösmältning och låg omsättningstid skulle retentionen antagligen kunna bli högre under normala vintrar. Å andra sidan var den arealspecifika fosforretentionen högre i Norge (260-720 kg ha⁻¹ år⁻¹), antagligen beroende på högre fosforbelastning och olika markegenskaper (Braskerud, 2002; Sveistrup m fl., 2008). Specifika retentionen varje månad varierande mycket, -0,8 till 36,6 kg TP ha⁻¹ år⁻¹, med en låg retention under sommarsäsongen och en hög retention under hösten. Under den kalla vintern 2009/2010, var fosforretentionen låg och med låga flöden. Under den korta snösmältningsperioden i januari 2011, var belastningen av partikelbunden fosfor hög, liksom retentionen.

Tabell 2. Belastning av totalfosfor (TP) och totalt suspenderat material (TSS), arealspecifika och den relativa retentionen av TP, DP, partikulär fosfor (PP) och TSS. Alla värden är baserade på flödesproportionella vattenprov under perioden 15/1 2010 - 31/12 2011

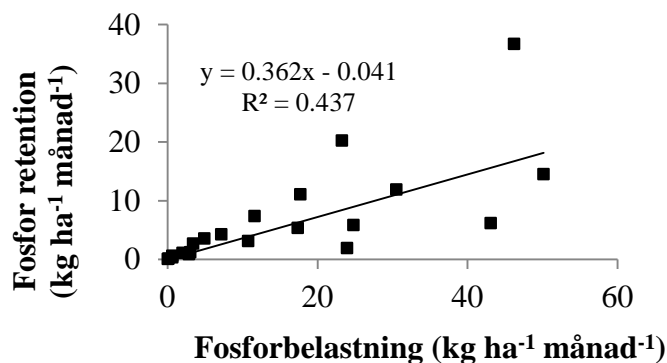
År	Belastning		Retention		DP		PP		TSS	
	TP	TSS	TP							
----- kg ha ⁻¹ år ⁻¹ (%) -----										
2010	192	70400	54	(28)	20	(10)	24	(12)	22000	(31)
2011	194	95200	84	(43)	15	(8)	68	(35)	37000	(39)
Medel	193	83000	69	(36)	17	(9)	46	(24)	29700	(36)

Under snösmältningen i mars 2011 var fosforbelastningen bara hälften så stor som i januari och halten partikelfosfor i inflödet var lågt jämfört med i januari. Detta, kombination med en hög hydraulisk belastning under mars, resulterade i en lägre retention under mars månad. De korta tillfällena då våtmarken tycktes släppa ifrån sig fosfor, påverkade inte nettoförlusterna under hela månaden så mycket. Det fanns två undantag nämligen augusti 2010, med intensiva regn och december 2010, med lågflöde. En mindre frigöring av suspenderat material observerades i mars, maj och november 2011 men framför allt i september 2011 (+ 2,8 ton ha⁻¹ månad⁻¹). Som väntat kunde en del av variationen i månadsretentionen förklaras av variationen av belastningen (Figur 3). Som tidigare diskuterats kan både extrema flödes-tillfällen och årstidsförändringar av biogeo-kemiska förhållanden i våtmarken bidra till tillfälliga avvikelser från denna allmänna relation.

Bergaholmsdammen kvarhöll 36 % av den inkommande totalfosfor, vilket var högre än för tre av fem norska våtmarker (21-44%) med mycket högre belastning (Braskerud, 2002). Förvånande var emellertid att den reaktiva retentionen var högre än vad som tidigare funnits i de flesta svenska studierna (10-38%), de finska h (7-62%) och i studier från Schweiz och Nya Zeeland (12-23%) (Jordan m.fl. 2003; Higgins m.fl., 1993; Kovacics m.fl., 2000; Koskiaho m.fl., 2003; Reinhardt m.fl., 2005; Strand & Weisner, in press; Tanner et al., 2005). Två undantag med 62 och 88 % medelretention hade en hög kvot A_w/A_c (5 % and 9 %) och en hög halt fosfor i inflödet (Koskiaho m.fl., 2003; Higgins m.fl. 1993). Detta antyder att utformningen av Bergaholmsdammen underlättade fosforretentionen. Dock har Alastro våtmark i Finland en liknande utformning (0.5 % av avrinningsområdet och en djupare damm som följs av en grundare vegetationsdel) men en betydligt lägre retentionseffektivitet (7 %). En möjlig förklaring är det lägre längd:bredd förhållandet (L:W) på 5 i Alastro våtmark (att jämföra med 14 i våtmark Bergaholm), vilket kan ha påverkat den hydrauliska effektiviteten negativt (Persson & Wittgren, 2003).

Konstanten för första ordningens retentionskoefficient k (m år⁻¹) kan användas för att jämförta effektiviteten av fosforretentionen i olika våtmarker samtidigt som man tar hänsyn till skillnader i hydraulisk belastning och halter i inflödet (Kadlec & Knight, 1996). Braskerud m.fl. (2005) föreslog att koefficienten k kan användas som ett ungefärligt värde för att karakterisera sedimentationshastigheten för fosfor. Om de hydrauliska belastningarna är snarlika kan värdet på k användas för att mera direkt jämföra fosforretentionen mellan våtmarker. I Bergaholms- våtmarken var k 30, vilket var högre än i alla våtmarker i Finland, Schweiz och USA som utvärderades av Braskerud m fl. (2005). De hade alla en hydraulisk belastning under 124 m år⁻¹. Detta understöder slutsatsen att utformningen av Bergaholms våtmarken förbättrade möjligheterna för partikelfosfor att hållas kvar i våtmarken.

Trettio ton sediment fångades under två år vilket antyder att den första dammen kan bli halvfull efter sju år och att sedimentet då måste tas bort. Detta måste ske regelbundet framöver men det är ännu okänt med vilket intervall. Det behövs mera långtidsstudier av våtmarkens funktion för att förstå hur sedimentationen beror på tillrinningsområdets karaktär. Sådana studier skulle också bidra till goda råd hur våtmarker ska utformas och hur stora de behöver vara för ett visst område.



Figur 3. Relationer mellan månatlig (P) fosforbelastning och fosforretention.

Effektiviteten för att hålla kvar fosfor är ofta starkt relaterad till i vilken form fosfor kommer till våtmarken och det är fördelaktigt med mer partikelbunden fosfor än löst fosfor (Hoffmann m.fl., 2009). Det är emellertid intressant att notera att också löst fosfor hölls kvar i Bergaholmsdammen, fastän i en relativ mindre proportion (9 % jämfört med 24 % av den totala fosforbelastningen, Tabell 2). Över 2 år kvarhölls 28 % av belastningen av den lösta fosfor. Detta är också i överensstämmelse med vad som vanligen iakttagits från andra våtmarker (Braskerud m.fl., 2005), trots att motsatta observationer har rapporterats. Tanner m fl (2011) beräknade en dålig fosforretention i tre konstruerade våtmarker som alla mottog dräneringsvatten med den mesta fosfor i löst form. Under hela perioden (3-5 år) var dessa våtmarker en nettokälla för fosfor. I Bergaholmsdammen, inträffade en period med fosforfrigörelse (löst fosfor) efter de intensiva regnen sommaren 2010, vilket följdes av en koncentration av 0,22 mg löst fosfor per liter i utflödet. Den vanligt uppmätta halten i utflödet under sommaren var betydligt lägre < 0,05 mg L⁻¹, och den totala transporten av denna biotillgängliga fosforform var låg. Totalt hade våtmarken en gynnsam effekt även under de känsliga sommarmånaderna. Även reduktionen av partikelbunden fosfor kan bidra till att behålla en god sorptionskapacitet för löst fosfor. Det behövs dock mer undersökningar för att identifiera hur sedimentationen av partikelbunden fosfor hänger ihop med sorptionen av löst fosfor.

Referenser Brandt M., m fl. 2008. *Nutrient loads to the Swedish marine environment in 2006*.SEPA. Rep. 5815. Braskerud, B.C. 2001. *J. Environ. Qual.* 30:1447-1457. Braskerud, B.C. 2002. *Ecol. Eng.* 19:41-61. Braskerud, B.C., m.fl. 2005. *J. Environ. Qual.* 34:2145-2155. Carleton, J.N., m.fl. *Wat. Res.* 35 (6): 1552–1562. Dunne, E.J., m.fl. 2005. *Ecol. Eng.* 24: 221–234. Eriksson, J., L. Mattson, & M. Söderström. 2010. *Current status of Swedish arable soils and cereal crops*. Data from the period 2001-2007. SEPA Rapport 6349. Gottschall N., m.fl. 2007., *Canada. Ecol. Eng.* 29: 154-163. Higgins, M.J., m.fl. 1993. Controlling agricultural runoff by use of constructed wetlands. 359–367. In G.A. Moshiri (ed.) *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Pub., Boca Raton, FL. Hoffmann, C.C., m.fl. 2009. *J. Environ. Qual.* 38:1942-1955. Johannesson, K.M., m.fl. 2011. *Hydrobiologia* 674:179-190. Jordan, T.E., m.fl. 2003.. *J. Environ. Qual.* 32:1534–1547. Kadlec, R.H. 1994. in: W. J. Mitsch (Ed.) *Global Wetlands: Old and New*, Elsevier Science B.V. Kadlec, R.H. & R. Knight. 1996. *Treatment wetlands*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, FL. Kadlec, R.H. 2005. *J. Environ. Sci. Health*, 40:1293–1306. Koskiaho, J. 2006. *Retention performance and hydraulic design of constructed wetlands treating runoff waters from arable land*. Ph.D. theses. Oulu Univ., Oulu. Koskiaho, J., m.fl. 2003. *Ecol. Eng.* 20:89-103. Kovacic, D.A., m.fl. *J. Environ. Qual.* 29:1262–1274. Parvage, M., m. fl. 2011. *Soil Use Manage.* 27: 367-375. Persson, J. & Wittgren. 2003. *Ecol. Eng.* 21:259- 269. Puustinen, M., m.fl. 2001. *Constructed wetlands for agricultural water protection*-Final report of the VESIKOT-project. The Finnish Environment 499. SYKE 61 pp. Reddy, K.R., m.fl. *Critical Reviews in Environ. Sci. Technol.* 29:83-146. Richardson C.J. 1985. *Science* 228:1424-1427. Ruotula, J. 1996. *Planning of constructed wetlands and sedimentation basins*. Mimeograph series of the Finnish Environment Institute 11. SYKE Helsinki, Finland. Smith, V.H. 1998. In: *Successes limitations and frontiers in ecosystem science* (eds M L Pace & P.M.-Groffman) pp 7-49. Springer, New York. Strand, J. & S.E.B. Weisner. (in press) Combating eutrophication of the sea and enhancing biodiversity of the agricultural landscape - *Ecol. Eng.* Sveistrup, T.E. m.fl. 2008.. *Boreal Environ. Res.* 13:275-284. Tanner, C.C, 1994. *Water Sci. Technol.* 29:85-93. Tanner, C.C, m.fl. 2005. *Agric. Ecosyst. Environ.* 105:145-162. Tanner, C.C. & J.P.S. Sukias. 2011. *J. Environ. Qual.* 40:620–633. Tonderski K.S., m.fl. 2005. *Ambio* 34:544-551. Ulén B. & K. Persson. 1999. *Hydrological Processes* 13:2801-2812. Ulén B. 2004. *Water Air Soil Pollut.* 157: 331-343. Ulén B., m.fl. 2007. a review. *Soil Use Manage.* 23:5-15. Ulén, B. & S. Snäll. 2007. *Geoderma* 137, 455-465. Withers, P.J.A. & P.M. Haygarth, 2007. *Soil Use Manage.* 23: 1-4. Zwiers F.W. & H. von Storch. 1995. Taking serial correlation into account in tests of the mean. *J. Climate* 8, 336 – 351.

Granskad internationell publicering

Kynkäänniemi, P., Ulén, B., Torstensson, G. & Tonderski, K. 2013. Phosphorus retention in a newly constructed wetland receiving agricultural tile drainage water. Accepted with minor revisions in *Journal of Environmental Quality*.

RESULTATFÖRMEDLING TILL NÄRINGEN MYNDIGHETER MM.

Demonstration av våtmarkerna

20/4 2010 (Bergaholm) målgrupp: Latbruksproducenter, myndigheter och forskare från SV Finland.

27/4 2010 (Bergaholm) målgrupp: Länsstyrelsen, Jordbruksverket.

11/5 2010 (Bergaholm) målgrupp: internationella studenter, SLU

18/5 2010 (Bergaholm) målgrupp: lantbrukare och representanter för Lst i U län.

26/10 2010 (Bergaholm) målgrupp: lantbrukare och rådgivare i Stockholms län.

31/5 2011 (Bergaholm) målgrupp: amerikanska och norska forskare.

2012 Filmen *Fosfordammar – om hur, var och varför* på YouTube producerad av Västerviks kommun och med stöd från Jordbruksverket. http://www.youtube.com/watch?list=PLAB63E4526EA46594&feature=player_detailpage&v=WLE7AI6Qhio

16/10 2012 (Nybble) målgrupp: rådgivare, entreprenörer, lantbrukare och myndigheter.

Föredrag i Sverige

Nordisk workshop” Mitigation of diffuse phosphorus from agricultural land” KSLA 16/11 2010. Föredrag Jönåker 10/10 2012 Kursen ”Fånga fosfor” med HS och stöd från Jordbruksverket.

Föredrag Anderslöv 18/10 2012 Kursen ”Fånga fosfor” med HS och stöd från Jordbruksverket.

Föredrag och efterföljande posterutställning på ”Fosfor i fokus – ökad kunskap ger en bra strategi för fosforhushållning” Greppa näringen kurs i Uppsala 20 november 2012.

Svenska rapporter och informationsblad

Fånga fosfor – Dammar, filter och tvåstegsdiken tillgänglig på

<http://www.slu.se/PageFiles/49748/F%C3%A5nga%20fosfor%20dammar%20filter%20och%20tv%C3%A5stegsdiken.pdf> samt <http://www.hush.se/?p=22139>

Olika åtgärder beskrivs, med fokus på fosfordammar – hur den ska utformas och hur man steg för steg går till väga för att anlägga en. Broschyren riktar sig främst till lantbrukare och ger även råd till handläggare och rådgivare om vad som är viktigt att tänka på vid planering och anläggning av en fosfordamm – vilka aspekter som man bör prioritera.

Designed wetlands for reducing phosphorus losses from hotspots in agricultural areas

http://www.slu.se/PageFiles/49748/Handout_2011_eng.pdf

Internationella workshops och konferenser

‘*Novel methods for reducing agricultural loading and eutrophication*’. EU-COST 869 meeting Joikoionen, Finland. 13-16 June 2010

Föredrag 6th International Phosphorus Workshop (IWP6) Sevilla, Spain 27/9-1/10 2010

Föredrag 12th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control Venice 4-9/10 2010.

Föredrag Constructed Wetlands Workshop. Lancaster Environment Centre, UK. 10-11 Jan 2011.

Föredrag ‘Joint Meeting of Society of Wetland Scientists, Wetpol and Wetland Biochemistry Symposium’. Prague. 4-8 July 2011.

Föredrag Workshop Warsaw Agricultural University, Poland Researcher and PhD students from Ukraine, Belarus, Poland and Sweden 28/6 2012.

Wetland workshop ‘Using wetlands as traps for nitrogen and phosphorus in Sweden Prage Tjechen, Oct 2012 (Jan Vymazal).