

Fosfor i infiltrationsbäddar – fastläggning, rörlighet och bedömningsmetoder

*David Eveborn, Jon Petter Gustafsson,
Caroline Holm*



Svenskt Vatten Utveckling

Svenskt Vatten Utveckling (SV-Utveckling) är kommunernas eget FoU-program om kommunal VA-teknik. Programmet finansieras i sin helhet av kommunerna, vilket är unikt på så sätt att statliga medel tidigare alltid använts för denna typ av verksamhet.

SV-Utveckling (fd VA-Forsk) initierades gemensamt av Svenska Kommunförbundet och Svenskt Vatten. Verksamheten påbörjades år 1990. Programmet lägger tonvikten på tillämpad forskning och utveckling inom det kommunala VA-området. Projekt bedrivs inom hela det VA-tekniska fältet under huvudrubrikerna:

Dricksvatten
Ledningsnät
Avloppsvatten
Ekonomi och organisation
Utbildning och information

SV-Utveckling styrs av en kommitté, som utses av styrelsen för Svenskt Vatten AB. För närvarande har kommittén följande sammansättning:

Anders Lago, ordförande	Södertälje Kommun
Olof Bergstedt	Göteborg Vatten
Lena Söderberg	Svenskt Vatten AB
Per Fåhraeus	Varbergs Kommun
Carina Färm	Eskilstuna Energi & Miljö AB
Daniel Hellström	Svenskt Vatten AB
Mikael Medelberg	Roslagsvatten AB
Marie Nordkvist Persson	Sydvatten AB
Lars-Gunnar Reinius	Stockholm Vatten AB
Bo Rutberg	Sveriges Kommuner och Landsting
Ulf Thysell	VA SYD
Susann Wennmalm	Käppalaförbundet
Fred Ivar Aasand	Norsk Vann, adjungerad

Författarna är ensamma ansvariga för rapportens innehåll, varför detta ej kan åberopas såsom representerande Svenskt Vattens ståndpunkt.

Svenskt Vatten Utveckling
Svenskt Vatten AB
Box 47 607
117 94 Stockholm
Tfn 08-506 002 00
Fax 08-506 002 10
svensktvatten@svensktvatten.se
www.svensktvatten.se

Svenskt Vatten AB är servicebolag till föreningen Svenskt Vatten.

Rapportens titel:	Fosfor i infiltrationsbäddar – fastläggning, rörlighet och bedömningsmetoder
Title of the report:	Phosphorus in soil infiltration systems – sorption, mobility and methods for evaluation
Rapportnummer:	2009-07
Författare:	David Eveborn, JTI, Jon Petter Gustafsson, KTH, Caroline Holm, JTI.
Projekt nr:	27-115
Projektets namn:	Fosfor i filterbäddar – fastläggning och sluthantering
Projektets finansiering:	Svenskt Vatten Utveckling, Formas genom projekt nr. 2006-632.
Rapportens omfattning	
Sidantal:	34
Format:	A4
Sökord:	Infiltration, fosfor, mekanismer, reningsgrad, mätteknik, avloppsrening
Keywords:	Soil infiltration, phosphorus, mechanisms, treatment efficiency, measurement, wastewater
Sammandrag:	Fem öppna infiltrationer undersöktes med målet att kunna finna en indikator för bäddarnas fosforavskiljningsförmåga. Aluminium hydroxider/oxider tycktes ha betydelse för avskiljningen. Den totala avskiljningen på en 16 årig bädd undersöktes och uppgick till endast 8 %.
Abstract:	Five open infiltration beds were investigated with the aim of establishing an indicator for the beds' phosphorous sorption capabilities. Aluminium oxides and hydroxides were considered to be significant for the sorption. The phosphorous sorption rate for a specific bed in operation for 16 years was calculated to be 8 %.
Målgrupper:	Tjänstemän inom tillsynsmyndigheter och kommunala verksamheter som arbetar med avloppsfrågor. Forskare och konsulter med intresse för avloppsvattenrening i mindre skala.
Omslagsbild:	Provtagning vid Tullingsås infiltrationsanläggning, David Eveborn
Rapporten:	finns att hämta hem som PDF-fil från Svenskt Vattens hemsida www.svensktvatten.se
Utgivningsår:	2009
Utgivare:	Svenskt Vatten AB © Svenskt Vatten AB

Förord

Detta projekt har skett genom ett samarbete mellan JTI, Institutet för Jordbruks- och Miljöteknik i Uppsala och Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Rapporten har i huvudsak sammanställts av David Eveborn (Projektledare, JTI) och Caroline Holm (JTI). Projektplanering genomförande och datatolkning har skett i nära samarbete med Jon Petter Gustafsson (KTH). Ola Palm (JTI) har bidragit med stöd och synpunkter under arbetets gång. Mikael Gilbertsson (JTI) genomförde provtagning i Blekinge.

Under projektets genomförande har studenter från Uppsala Universitet och Kungliga Tekniska Högskolan i mycket hög grad bidragit till de resultat som redogörs för i rapporten. Vi vill därför rikta ett stort tack till Uppsalastudenterna Johanna Danielsson, Marie Erlandsson, Johanna Fredén, Hanna Hugosson och Malin Wahlqvist samt Deguo Kong, student vid KTH. Därutöver också ett tack till administrativ och operativ personal på Krokoms Kommun, Karlshamns Kommun och Strömsunds Kommun, som gav oss tillåtelse att utföra, och underlättade provtagning av deras anläggningar.

Det råder idag stor osäkerhet kring infiltrationsteknikens potential och begränsningar med avseende på fosforavskiljning. Det är vår förhoppning att denna rapport skall bidra till stärkt kunskap om fosforavskiljningskapaciteten hos infiltrationsbäddar samt tydliggöra vad som behöver prioriteras för att öka den ytterligare.

Uppsala, Mars 2009

David Eveborn

Innehåll

Sammanfattning.....	6
Summary.....	8
1. Introduktion.....	10
2. Historik och kunskapsläge.....	12
2.1 Avskiljningsmekanismer vid fosforavskiljning – en kort sammanfattning	12
2.2 Forsknings- och utvecklingshistorik	14
2.3 Bristande bedömningsgrunder	14
2.4 Kunskapsluckor.....	15
3. Värderingsinstrument för infiltrationsanläggningar	17
3.1 In-/Utflödesprovtagning	17
3.2 Modellering	18
3.3 Analys av bäddmaterial	18
3.4 Vägval	18
4. Bäddmaterialstudie	19
4.1 Genomförande	19
4.2 Resultat	21
5. Massbalansstudie	25
5.1 Genomförande	25
5.2 Resultat	26
6. Diskussion och slutsatser.....	29
6.1 Reduktion.....	29
6.2 Värderingsinstrument	30
6.3 Ythorisontens kemi.....	31
6.4 Sorptionstester	31
6.5 Läckagerisk	31
6.6 Anvisningar utifrån projektets erfarenheter.....	32
Referenser	33

Sammanfattning

I Sverige har infiltrationstekniken under lång tid dominerat bland lösningar för enskilda hushåll och även använts för rening av avloppsvatten från mindre samhällen. På senare år har funktionen hos infiltrationsanläggningar ifrågasatts, speciellt med avseende på fosfor. Tekniken har dock flera fördelar i form av låg resursförbrukning, god ekonomi, begränsat underhåll och hög driftssäkerhet. För att förbättra kunskapsbasen för bedömning av infiltrationsanläggningars fosforavskiljningsförmåga och därmed även underlätta beslutsfattande i samband med nyanläggning och drift av infiltrationsbäddar genomfördes en studie på fem öppna infiltrationsbäddar i landet. Studien inriktades på att undersöka vad som styr fosforlösligheten och fosforfastläggningen i bäddarna samt testa om lakteter eller innehållet av hydroxider eller oxider av aluminium och/eller järn kunde utgöra grund för att avgöra om bäddarna fortfarande var i god kondition med avseende på fosforavskiljningsgraden. Vidare gjordes en massbalans på fastlagd och tillförd fosfor för att fastställa den reningsgrad som en av bäddarna, den i Tullingsås, uppnått sedan idrifttagande.

Bäddprofilen blottades för de fem bäddarna och provtagning skedde på fem olika nivåer i varje bädd. Bäddmaterialproverna analyserades på totalfosfor, oxalatlösligt järn, aluminium och fosfor samt utsattes för en laktetest enligt ISO-standard ISO/TS 21268-1 med påföljande analys av fosfor, magnesium och kalcium. I bädden vars reningsgrad skulle fastställas genom massbalans upprepades provtagningen på fem spridda platser i bädden.

Resultatet från massbalansstudien visade att endast 8 % av den tillförda fosfor hade ackumulerats i bäddmaterialet som kom från en 16 år gammal bädd i Tullingsås. Flera av de andra bäddarna som ingick i studien hade en ännu mindre mängd ackumulerad fosfor i bäddprofilerna vilket tyder på att även dessa hade haft en mycket låg avskiljningsgrad. Resultatet tyder på att den långsiktiga avskiljningen av fosfor i öppna infiltrationsanläggningar är klart lägre än vad som tidigare antagits.

Studien lyckades inte tydligt visa på att fosfatlösligheten i bäddarna kunde relateras till innehållet av järn- eller aluminium-(hydr)oxider. Lösligheten av fosfor i bäddmaterialet, erhållet genom laktetest, tycktes inte spegla fosforhalterna i bäddarnas utgående vatten. Den troliga orsaken är den låga fosfatorsorptionen i materialen, vilket späder ut fosfatkoncentrationerna i laktestet jämfört med de i fält (där marklösningen är fosfatberikad genom avloppsvatten). Lakteter såg därför inte ut att vara en framkomlig väg för att utvärdera bäddarnas status. Däremot fanns indikationer på att mängden ackumulerad fosfor berodde på innehållet av aluminium(hydr)oxider påvisade genom oxalatextraktion. Kraftigt förhöjda halter av oxalatextraherbart järn och aluminium observerades i bäddarnas ytskikt. De höga halterna sammanföll med en förhöjd ackumulation av fosfor och ett samband ansågs vara troligt. Den förhöjda aluminium- och järnhalten i ytan antogs bero på både

på förhöjd vittringshastighet i ytlagret och på transport av metaller från avloppsvattnet. Denna mekanism verkade ha stor betydelse för anläggningens funktion. Även om resultaten tydde på att en viss anrikning av kalciumfosfater kan ha ägt rum i en av lokalerna (Halahult), ansågs denna fastläggningsmekanism generellt sett vara av underordnad betydelse jämfört med sorption till järn- och aluminium-(hydr)oxider.

Summary

In Sweden, soil infiltration beds have long been used for treatment of wastewater from single households and small communities. In recent years such systems have been called into question, particularly with respect to phosphorous leaching. The technology does however retain many advantages, such as low resource consumption, limited maintenance requirement, cost-effectiveness, and reliability.

A study was carried out on five open infiltration beds in Sweden. The aim of this study was to improve the knowledge base concerning the phosphorus sorption capacity of soil infiltration systems and to facilitate decision-making and operation strategies concerning both new and existing systems.

The study examined the factors that determine phosphorus solubility and sorption in the infiltration systems. Experiments were carried out to investigate whether the concentration of aluminium or iron (hydr) oxides could indicate whether or not the infiltration beds showed high phosphorous sorption. Additionally a mass balance was performed by measuring accumulated phosphorus and influent phosphorus for one of the soil infiltration systems to determine the overall treatment efficiency since the system commenced operation.

Infiltration bed profiles were exposed and samples were taken from five different levels for the five systems in question. Each sample was analysed for total phosphorus content and oxalate-extractable iron, aluminium and phosphorus. In addition leaching tests according to ISO-21268-1 were carried out, with subsequent analysis of phosphorus, magnesium and calcium concentrations. For the bed where the total treatment efficiency was evaluated, samples were taken from five different locations within the bed.

The mass balance measurements showed that only 8 % of the incoming phosphorus had accumulated in the infiltration bed that was studied, which had been in operation for 16 years. Many of the other beds had an even smaller proportion of accumulated phosphorus in the bed profiles, indicating a very low phosphorus sorption efficiency. Therefore this study suggests that the potential for long-term P removal in soil infiltration systems is smaller than previously believed.

The study could not verify clearly that phosphate solubility in the beds was related directly to the content of oxides or hydroxides of aluminium or iron. Furthermore phosphorus solubility as indicated by the leaching test of the bed material was not considered to represent the phosphorus concentration in wastewater exiting the bed, due to the low degree of sorption. Leaching tests were therefore not considered an appropriate method for establishing the condition of the bed. However there were indications that the quantity of accumulated phosphorus was dependent on the aluminium (hydr)oxide content as evidenced by oxalate extraction. Significantly increased concentrations of oxalate-extractable iron and aluminium in the surface layer of the beds were also observed. The higher concentrations coincided with an increased

phosphorus accumulation in the beds, indicating a direct connection. The increased aluminium and iron concentrations in the surface layers are hypothesized to be a result of both on increased chemical weathering in the surface layer and on deposition of metals from the wastewater. Although some evidence for calcium phosphate precipitation was obtained for one of the sites (Halshult), this sorption mechanism was considered to be of low overall importance as compared to sorption to iron and aluminium (hydr)oxides.

1. Introduktion

Infiltrationstekniken har en lång historia i Sverige. Den har under lång tid dominerat bland lösningar för enskilda hushåll och har också använts för rening av avloppsvatten från mindre samhällen. För enskilda hushåll har infiltrationsanläggningarna konstruerats som täckta markbäddar (med eller utan tät botten) eller infiltrationer. Större anläggningar har däremot utformats som öppna filterbäddar där avloppsvattnet appliceras över en öppen filteryta, perkolerar genom bäddmaterialet och leds ut genom ett dräneringssystem.

Infiltrationstekniken ägnades intresse i Sverige under studier redan på 40–50 talet, då man med uppdrag från dåvarande ”Statens institut för folkhälsan” utredde avloppsfrågan på landsbygden (SOU, 1955). Kunskapen om avloppsreningens betydelse i ett vattenvårdsperspektiv har ökat sedan dess och uppfattningen om vilka funktioner en avloppsanläggning skall uppfylla har förändrats. Infiltrationsanläggningarna har dock överlevt 60 års samhällsutveckling och är idag vanliga i glesbygden.

På senare år har funktionen hos infiltrationsanläggningar ifrågasatts. Inte minst har man varit skeptisk till reningsteknikens förmåga att avskilja fosfor. Samtidigt har reduktion av fosfor pekats ut som en allt viktigare fråga för Östersjöns framtid. Naturvårdsverkets allmänna råd om enskilda avlopp (Naturvårdsverket, 2006) har idag en restriktiv syn på tekniker som inte inbegriper någon annan fosforavskiljningsfunktion än den som förväntas ske genom infiltration genom naturliga grus- eller sandfraktioner. Osäkerheten är dock stor kring vilken avskiljningsgrad som faktiskt uppnås i systemen. Därför är det också svårt att avgöra vilken roll infiltrationssystem bör ha som avloppslösning både för enskilda anläggningar och som behandlingsmetod för större avloppsströmmar.

Weiss m.fl. (2008) konstaterade att infiltrationssystem ur ett systemperspektiv var mycket resurseffektiva i jämförelse med andra avloppslösningar för enskilt bruk. Bland annat visade sig utsläppen av växthusgaser vara låg jämfört med de andra systemen. Detta faktum i kombination med andra fördelar med infiltrationslösningar så som god ekonomi, begränsat underhåll och hög driftssäkerhet gör att det kan finnas anledning att tillämpa tekniken i den miljö och under de förutsättningar som den hör hemma.

En förutsättning för att korrekta beslut skall kunna fattas om infiltrationsbäddar är dock att man kan avgöra om de krav som gäller i den enskilda situationen uppfylls. Därför är det angeläget att komma till klarhet i vad som på sikt sätter gränserna för fosforavskiljningen i anläggningarna, eller finna metoder som förenklar bedömningen av anläggningens tillfälliga funktion.

Det övergripande syftet med detta projekt var att förbättra kunskapsbasen för bedömning av infiltrationsanläggningars fosforavskiljningsförmåga. Som specifika målsättningar hade projektet att:

1. Fastställa om det finns ett samband mellan fosfors löslighet, mängden järn- och aluminium-(hydr)oxider och mängden fastlagd fosfat.
2. Med bakgrund av ovanstående bedöma möjligheterna att gå vidare med utveckling av värderingsmetoder av infiltrationer baserade på löslighetstester eller andra bäddmaterialsanalyser.
3. Fastställa hur fosfor är distribuerad i bädden, hur lös den är, och hur mycket fosfor som fastlagts.
4. Att med utgångspunkt från punkt 3 bedöma risken för fosforläckage ur utjänta infiltrationer och beräkna bäddarnas reningsgrad.

2. Historik och kunskapsläge

Följande kapitel försöker förmedla en bild av tidigare arbete som gjorts inom området fosforfastläggning i infiltrationsbäddar. Vidare har kunskapsluckor som bör vara avgörande för att kunna bedöma vilken funktion infiltrationstekniken faktiskt kan fylla som reningsteknik i Sverige, identifierats. Kapitlet utgör en översiktlig sammanfattning av de litteraturstudier som genomförts under projektet.

2.1 Avskiljningsmekanismer vid fosforavskiljning – en kort sammanfattning

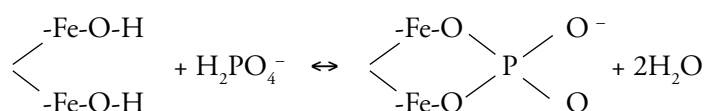
Nedan följer en kort sammanfattning av de fastläggningsmekanismer som i allmänhet diskuteras vid avskiljning av fosfor i infiltrationssystem. De finns här för att läsaren skall kunna orientera sig men flera och mer genomarbetade beskrivningar återfinns i annan litteratur (exempelvis Bäärnhelm (1993) och Nilsson och Englov (1979)). För en mer allmänt hållen redovisning av markkemi inkluderande såväl jämviktsskemiska begrepp som adsorptionsmekanismer rekommenderas Gustafsson m.fl. (2007).

Fastläggning av fosfor sker under infiltrationsförloppet såväl genom fysikaliska, som biologiska och kemiska mekanismer. Till de fysikaliska processerna räknas framför allt ren mekanisk filtrering av fosfor i partikulär form (organisk eller oorganisk). Biologiskt sker upptag av löst fosfat vid uppbyggnad av biomassa. Tillväxten av biomassa påverkas bland annat av tillgången på syre, påväxtyta och temperatur och för alger av solinstrålning. Den biologiska aktiviteten är högst i filterbäddarnas ytskikt. Såvida de biologiska processerna inte bidrar till bildande av långsiktigt stabila fosforföreningar eller den organiskt bundna fosfor avskiljs från bäddmaterialet genom återkommande underhåll så kan man dock inte räkna med någon betydande nettoavskiljning av fosfor genom biologiska processer. Den mikrobiella aktiviteten kommer att nå en jämvikt där upptaget av fosfater kommer att bli den samma som frigörelsen av fosfater genom nedbrytning.

Kemiska mekanismer anses ofta vara av större betydelse för den långsiktiga fosforavskiljningen i infiltrationer. Fastläggning av fosfat kan ske genom adsorption eller utfällning av fosfatmineraler. Det bör dock framhållas att inte heller kemiska mekanismer i allmänhet är irreversibla. Det handlar även här om jämvikter. Jämvikterna kan dock vara starkt förskjutna så att den fosfor som fixeras inte kommer att mobiliseras så länge stora förändringar i den kemiska miljön inte uppstår (exempelvis genom stora förändringar av pH-värdet). Det närmaste en riktigt irreversibel process man kan tänka sig är om den fixerade fosfor genom mekanismer i marken kapslas in och på detta vis fråntas kontakten med jämviktslösningen.

En av de mest omtalade markkemiska processerna i samband med reglering av fosfatlöslighet i marken är adsorption till olika hydroxi-

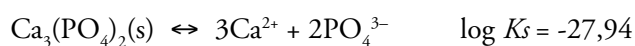
der, oxider eller oxidliknande mineraler av aluminium eller järn (dessa benämns i texten framgent som ”järn- och aluminium-(hydr)oxider). Dessa mineraler har en uppbyggnad som medför att svaga negativa laddningar exponeras på delar av mineralernas ytor. Beroende på markens pH binder hydroxylgrupper på dessa (hydr)oxidtytor i större eller mindre utsträckning till sig vätejoner vilket medför att ytladdningarna förändras. De laddade ytorna med dessa grupper är de som är verksamma vid fastläggning av fosfor. Vid adsorptionen komplexbinds fosfatjonen vid metallatomen och ersätter en eller två ytgrupper som därmed går i lösning. I den typ av reaktion som ofta antas dominera är två intilliggande ytgrupper inblandade som nedanstående reaktion för en järn-(hydr)oxydyta visar:



Både fosfatmolekylens och (hydr)oxydytornas laddning är beroende av pH. Fosfaternas dragningskraft till (hydr)oxiderna är därför också pH-beroende. Låga pH-värden gynnar adsorptionen av fosfatjoner till (hydr)oxydytor.

En annan viktig kemisk avskiljningsmekanism är utfällning av fosfatmineraler. Om jämviktslösningen är mättad med avseende på något mineral som innehåller fosfor så finns det förutsättningar för att fasta faser faller ut. Fosfat lämnar då markvätskan. Utfällning kan fortgå så länge som jämviktslösningen är övermättad. Framförallt skulle utfällning av kalciumfosfater kunna vara en viktig avskiljningsmekanism men även järn- och aluminiumfosfater skulle kunna vara bidragande. Utfällning av kalciumfosfater kräver i allmänhet höga pH-värden medan utfällning av järn- och aluminiumfosfater gynnas av låga pH.

Det har visats att *amorf kalciumfosfat* faller ut i reaktiva filtermaterial för avloppsvattenrening då pH är högt, dvs över 9 (Gustafsson, m.fl., 2008). Reaktionen skrivs så här:



där K_s = löslighetsprodukten för mineralet. Denna utfällning kristalliseras med tiden om till andra kalciumfosfater (t.ex. *oktakalciumfosfat* och *apatit*) som ackumuleras i materialet (Eveborn m.fl., manuskript).

I surare miljöer kan istället aluminiumfosfatet *variskit* bildas (formel $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Detta förutsätter dock att materialet har utfällt eller lättvittrat aluminium som kan frigöras och reagera med fosfor. Om materialet är vattenmättat under längre tid kan *vivianit* fällas ut (formel $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Detta är ett mineral som kan bildas då järnet gått över i tvåvärd form, dvs som vattenlösliga Fe^{2+} -joner.

2.2 *Forsknings- och utvecklingshistorik*

Omfattande kunskapssammanställningar och studier om infiltrationsanläggningar genomfördes i Sverige under 70-talet (Nilsson och Englov, 1979). Den första genomgripande utredningen som berör även infiltrationsbäddar skedde dock redan på 40- och 50-talet (SOU 1955). Det var dock först genom utredningarna på 70-talet som man började intressera sig för reduktion av fosfor. Ytterligare en milstolpe inom den svenska forskningen och utvecklingen av infiltrationsteknik var Peter Nilssons arbeten under 80-talet (Nilsson, 1990). Även i Norge har arbete kring dessa frågor pågått och åren 1994–1997 genomfördes ett forskningsprogram (NAT naturbaserade avløpsteknologi) där vissa delar som bland annat rör infiltrationsanläggningar sammanställdes med uppdrag av Svenskt Vatten (Jensen m.fl., 2006). Därefter har mestadels mindre omfattande och isolerade studier som fokuserar på infiltrationsteknik genomförts (ex, Nilsson m.fl.1998; Norin m.fl. 2005; Bylund 2003; Wiklund 2003). Under årens lopp har också flera litteratursammanställningar genomförts där infiltrationsteknik belyses (ex, Palm m.fl. 2002).

Internationellt har det pågått forskning kring avloppsinfiltration i bland annat Nordamerika, som har en liknande situation som Norden. Det vill säga, en stor andel av befolkningen bor utanför tätbebyggda områden och saknar kollektiva avloppslösningar. Bland den modernare forskningen kan nämnas ett flertal studier av William Robertson (Robertson 2008; Robertson 2003; Robertson 1995 och Robertson m.fl. 1998). Det bör dock påpekas att de geologiska förutsättningarna kan skilja sig märkbart mellan Nordamerika och Sverige, vilket betyder att resultat från undersökningar med naturliga infiltrationsmaterial inte nödvändigtvis gäller under svenska förhållanden. Undersökningarna av Robertson har framförallt berört fosfat i grundvattenzonen; utbredningen av, transporten och de reglerande kemiska processerna som råder i grundvattenzoner med förhöjda fosfathalter som påträffas i närheten av infiltrationsanläggningar.

Den forskning som har gjorts inom området infiltrationsteknik i Sverige har varit starkt präglad av målet att få fram praktisk handledning för byggande och dimensionering av anläggningar. Allt eftersom att kraven på avloppsrening har skärpts, så har man också i allt högre grad intresserat sig för reningskapaciteten med avseende på fosfor. I de satsningar som gjorts har det dock inte funnits resurser eller motivation/kompetens att i större grad öka förståelsen av de mekanismer som styr fosforavskiljningen vid infiltrering. Med dimensioneringsgrunder som målsättning har man arbetat nästan uteslutande med avskiljningsstudier där anläggningar betraktats som en ”black box”.

2.3 *Bristande bedömningsgrunder*

Om man hade erhållit entydiga eller likvärdiga resultat beträffande fosforreduktionen i infiltrationsanläggningar och de orsakssamband som där råder så hade kanske de resultat som finns från våra nordiska utredningar varit tillräckliga för att bedöma status och kapacitet hos in-

filtrationsanläggningar. Så är dessvärre inte fallet. Sammanställningen av Palm m.fl.(2002) pekar på en mycket stor variation bland resultaten hos infiltrationer och markbäddar vad gäller fosforavskiljning. Den faktiska livslängden är det få studier som över huvud taget berör. För enskilda avlopp har detta lagmässigt varit i princip en ickefråga eftersom regeltolkningen fram till och med år 2006 har varit att infiltrationer är en acceptabel avloppslösning under förutsättning att de utförs enligt gällande norm. Inga krav på uppföljning av anläggningarna har krävts. Sedan Naturvårdsverkets nya allmänna råd (Naturvårdsverket, 2006), har dock regelverket skärpts .

Större infiltrationsanläggningar (>200 pe) är undantagna från den utsläppskontroll som annars enligt SNFS:1990:14 gäller dessa anläggningar (Naturvårdsverket, 1990). Kravet på egenkontroll medför dock att även dessa anläggningars funktion skall övervakas. Att kontrollera funktionen hos infiltrationsanläggningar med traditionell inflödes/utflödesteknik är dock en utmaning.

2.4 Kunskapsluckor

Få studier har ägnats åt att försöka visa vilka underliggande mekanismer som är verksamma och dominerande vid fosforavskiljningen i infiltrationssystem. Man har däremot arbetat med empiriska uppskattningar av funktionen. Exempelvis förekommer det att man försökt fastställa sorptionskapaciteten i olika material empiriskt genom Langmuirs- eller Freundlich ekvation som anpassas till försöksdata från isotermer. För svenska förhållanden är sådan data sällsynt men någon studie av relevans för infiltrationssystem har genomförts (Carlsson och Horkeby 1976). Dessvärre vet vi inte i vilken grad sorptionstester av detta slag har någon praktisk relevans. Flera studier hävdar att man kunnat visa en större avskiljningskapacitet än vad som skulle vara möjligt utifrån sorptionstester.

De empiriska ekvationerna är avsedda för att beskriva adsorptionsprocesser och är därför mindre relevanta när utfällningsreaktioner kan förväntas. Även fastläggningsbidraget från badsorptionsprocesser kan bli dåligt uppskattat om nya adsorptionsytor genereras i tillräckligt snabb takt genom vittringsprocesser, vilket somliga forskare hävdar. Sist men inte minst så är det svårt att utföra labbförsök (isotermer) så att de verkliga fältförhållandena kan återspeglas. Cucarella och Renman (2009) redogör för alla de brister som finns med den traditionella empiriska bestämningen av fosforfastläggningskapaciteten.

För att kunna komma närmare en korrekt beskrivning och bestämning av fosforfastläggningen i infiltrationer behövs en bättre förståelse av underliggande mekanismer och dess bidrag på lång och kort sikt. De följande styckena tar upp några av de nyckelområden där vi funnit att kunskapen är otillräcklig.

2.4.1 Reglerande processer

Trots den mängd litteratur som redogör för de initiala fastläggningsprocesser som förväntas ske då fosfor fastläggs i infiltrationssystem, så

är det få studier som utifrån dessa teorier kunnat påvisa att någon av dessa processer dominerar eller reglerar fosfatfastläggningen. Det är nödvändigt att komma till insikt om detta samt vad som avgör vilka processer som kommer att dominera.

2.4.2 Utfällnings- och ombildningsprocesser

Vid bildandet av kalciumfosfater är reaktionshastigheten och en närmare förståelse av kristalliseringsprocessen önskvärd. En övermättnad med avseende på hydroxyapatit påträffas ofta i naturliga system men dess långsamma bildningstakt medför att man sällan räknar med den som en viktig faktor vid avskiljningen. På många håll finner man diskussioner kring fastläggningskapacitet som betonar att initial adsorption skulle kunna vara ett första steg i en process som på sikt leder till bildning av svårslösliga kristallina föreningar (exempelvis hydroxyapatit). Detta är dock teorier som vi inte funnit några studier som faktiskt påvisat i infiltrationssystem. Den här typen av mekanismer som öppnar för en fastläggningskapacitet i bäddarna som är högre än den som fastställts för olika typer av sand och grus i labbmiljö (skak och kolonn-försök) är det viktigt att finna bevis för. Annars måste dessa hypoteser förkastas.

2.4.3 Betydelsen av avloppsvattnet

En annan avgörande punkt som till stor del är okänd är i vilken mån avloppsvattnet påverkar fastläggningsprocesserna. Det är exempelvis känt att organiska syror som finns i avloppsvattnet i viss grad kan inhibera kristallisering av kalciumfosfater. Det finns också hypoteser om att slamavlagringarna och den mikrobiella tillväxten på kornen kan främja bildandet av stabila fosforminerale. De mikrobiella processerna kan också bidra till att upprätthålla kemiska förhållanden som påverkar både utfällnings och adsorptionsprocesser. Därutöver kan avloppsvattnets kemiska sammansättning i sig vara avgörande för fastläggningsprocesserna.

2.4.4 Vittring

Adsorption av fosfor till järn- eller aluminium(hydr)oxider är en process som är beroende av materialets tillgång på bindningsytor. Bindningsytorna betraktas normalt som en begränsande faktor för materialets bindningskapacitet, men om materialet genom vittring kan erhålla nya bindningsytor och vittringsprocessen har ett relevant tidsberoende, så kan även detta vara en viktig process för fastläggningskapaciteten i vissa infiltrationsbäddar. Även kring denna fråga är kunskapen otillräcklig.

3. Värderingsinstrument för infiltrationsanläggningar

Eftersom man inte kunnat fastställa en allmängiltig avskiljningsgrad eller livslängd för infiltrationsanläggningar så finns det behov av att finna enkla metoder som utan omfattande undersökningar kan användas för att bedöma statusen hos en anläggning. Detta för att möjliggöra kontroll av att anläggningar möter de krav som gäller. Metoderna bör vara så enkla och billiga att de kan appliceras i stor skala. Den huvudsakliga avsikten vid planeringen av detta projekt var att utvärdera några alternativa metoder för bedömning av status. Tre principiellt olika angreppssätt befanns vara möjliga att arbeta utifrån.

1. *In-/Utflödesprovtagning*. Genom lämplig teknik för provtagning av fosforhalten i in- och utgående vatten skulle statusen kunna övervakas kontinuerligt eller en kortare tid för en kontroll.
2. *Modellering*. Fosforavskiljning och kapacitet hos en anläggning skulle eventuellt kunna bedömas på förhand genom att modellera avskiljningsförloppet med utgångspunkt från avgörande parametrar.
3. *Analys av bäddmaterial*. Bedömning av funktionen skulle kunna vara möjlig genom att ta prov på det använda filtermaterialet och genomföra enklare tester på detta.

3.1 In-/Utflödesprovtagning

Den klassiska principen att bestämma avskiljningsgrad genom in och utflödesprovtagningar kan vid en första anblick kännas rationell. Närmare kännedom om fastläggningsprocesser är inte heller nödvändiga. Detta angreppssätt för provtagning av infiltrationsanläggningar har dock flera nackdelar varav några av de viktigaste listas nedan:

- Definition av utlopp är inte givet för vissa typer av anläggningar.
- Påverkan av eventuell grundvatteninträngning, nedebröd och evapotranspiration mm är svårt att kompensera för.
- En säker bestämning av reningsgraden kräver i allmänhet att man utgår från massflöden. Detta förutsätter vanligen att flödesproportionell provtagning utförs (såvida anläggningen inte är helt tätsluten).
- En rättvisande bild av funktionen kräver en lång provtagningsserie.

Projektet har med bakgrund av detta inte berört detta alternativ vidare. Det kan dock nämnas att det finns metoder för fosfatövervakning som kan vara intressanta att studera närmare. Vi tänker då närmast på fosforabsorberande kapslar – DGT (Zang m.fl., 1998) och elektroniska sensorer (Zoua m.fl., 2007). Vår uppfattning är dock att det är önskvärt att undvika regelrätt övervakning (speciellt av enskilda avlopp) eftersom det skulle kräva stora resurser.

3.2 Modellering

Tillförlitlig modellering av fosforavskiljning kräver en bättre förståelse av de mekanismer som reglerar fosfatreduktionen i infiltrationssystem än den som råder i dag. Med hjälp av en modell som beskriver de underliggande mekanismerna på rimlig detaljnivå, skulle man kunna arbeta fram underlag för bestämning av livslängd hos bäddmaterial med olika egenskaper. En förutsättning för att denna metod skulle vara framkomlig är att den eller de parametrar som är avgörande för systemet går att bestämma med relativt enkla medel.

3.3 Analys av bäddmaterial

Analys av bäddmaterial kan göras i flera syften (bland annat för att bestämma parametrar för modellering eller för att empiriskt försöka fastställa livslängd). I detta fall avser vi dock att analys av bäddmaterialet utförs på bäddar under drift för att genom studie av dess egenskaper fastställa bäddens aktuella status. Fördelen med materialprovtagning är att man kan komma runt en del av de problem som nämnts i samband med in- och utflödesprovtagning i alternativ 1 om man väljer att utföra ett test på materialet istället. Nackdelen är däremot att det kan vara svårt att verifiera metodens giltighet samt inte minst att utförande av materialprovtagning i praktiken kan vara svårt för vissa typer av infiltrationssystem. Det bedöms dock som ett rimligare sätt att handskas med statusbedömning än att utföra in-/utflödesprovtagning.

3.4 Vägval

I projektet har vi i en bäddmaterialstudie undersökt vilken påverkan järn- och aluminium(hydr)oxider har för fastläggningen av fosfater genom att studera lösligheten av fosfor i de studerade infiltrationsbäddarna i relation till oxalatlösligt järn och aluminium. Projektet genomförde också laktester med avseende på fosfor enligt ISO standard (ISO/TS 21268-1) för att utröna möjligheten att använda sådana som bas för bedömning av status av infiltrationer. Dessa metoder bedömdes båda vara rimliga att utföra för att klassa bäddmaterial eftersom de bygger på välkänd extraktionsteknik. Oxalatextraktionen används också i Nederländerna i metodik för bedömning av läckagerisk från jordbruksjordar (Gasparatos m.fl. 2006). Analyserna kompletterades med test på sorptionskapaciteten och resultaten jämfördes med äldre reningsresultat fastställda genom traditionella in- och utflödesprovtagningar. Det äldre underlaget kom från ett relativt omfattande mätprogram som genomfördes under början av 90-talet (Bylund 2003).

4. Bäddmaterialstudie

Bäddmaterialstudien utfördes på fem utvalda öppna infiltrationsbäddar. Merparten av dessa var belägna i Jämtland. Bäddarna valdes ut av skälet att de tidigare varit föremål för undersökningar beträffande dess reningsfunktion med traditionell in-/utflödes metodik. Studien på filterbäddsmaterialen hade två huvudsakliga syften:

- Att utröna möjligheten att använda lakteter på bäddmaterialet som underlag för bedömning av statusen på bäddarna
- Att utröna betydelsen av adsorptionsmekanismerna till järn- och aluminium(hydr)oxider för fosforreningsförmågan hos bäddmaterialet och avgöra om information om bäddmaterialets innehåll av dessa oxider/hydroxider skulle kunna vara underlag för att bedöma bäddens livslängd.

4.1 Genomförande

Provtagning skedde i början på maj 2008. Alla de provtagna bäddarna var så kallade öppna infiltrationsbäddar. Fyra av dem var belägna i Jämtland och en i Blekinge. Bäddarna beskrivs i Tabell 1 vars data har sammanställts ur Bylund (2003). En öppen infiltrationsbädd utgörs av grus-/sandbäddar som belastas med slamavskilt avloppsvatten. Avloppsvattnet appliceras intermittent över bäddens yta, perkolerar sedan genom materialet för att fångas upp i ett dräneringssystem som leder ut vattnet till recipienten. Öppna infiltrationsbäddar är vanligen utrustade med flera parallella infiltrationsytor, så att de kan användas växelvis vilket underlättar underhåll och förbättrar den hydrauliska livslängden.

Infiltrationsanläggningar med uppsamlade dräneringssystem går ofta under benämningen markbäddar. Ur processynpunkt finns det i regel ingen anledning att skilja mellan system med eller utan uppsamlade dränering. I rapporten använder vi begreppet *öppna* infiltrationsanläggningar/infiltrationsbäddar för de system som denna studie undersökt (beskrivs ovan) och som ett samlande begrepp; infiltrationsbäddar/infiltrationssystem.

Tabell 1. Sammanställning av uppgifter om de provtagna anläggningarna och deras skötsel

Namn, plats	Förbehandling	Belastning (pe)	Yta (m ²)	Skötsel*	Byggår
Sikås, Strömsunds kommun	Dammar	300	4x250	Bytt	1991
Tullingsås, Strömsunds kommun	Slamavskiljare	225	2x196	Intakt	1992
Rötviken, Krokoms kommun	Dammar	-	-	Bytt	-
Alsen, Krokoms kommun	Dammar	350	3x440	Bytt	1991
Halahlult, Karlshamns kommun	Slamavskiljare	100	2x50	Intakt	1986

* Avser om bäddmaterialet har förblivit intakt eller om ytskiktet skummats. Vid skumning skrapas eller grävs ytmaterialet av/ur och ersatts vanligtvis med nytt material. Hur djupt skumningen utförs varierar.

4.1.1 Provtagning

Provtagning möjliggjordes genom att en profil ner till en meters djup (där bäddjupet tillät detta) blottades genom handgrävning. Profilen dokumenterades och samlingsprover från (cm) 0–5, 5–15, 15–30, 30–60 och 60–100 skrapades ihop med en trädgårdsspade. Provtagningen skedde på bäddar som för tillfället var i viloperiod.

4.1.2 Provberedning

Proverna siktades för att avskilja grövre fraktioner än 4 mm. Eftersom mycket små provvolymen används vid analyser vill man ha ett homogent material att arbeta med. Större partiklar bedöms inte heller vara avgörande för fastläggningsmekanismerna. Den avskilda fraktionen utgjorde mellan 0% och 28% av provets totalvikt.

4.1.3 Analyser

Projektet utförde analyser av totalfosfor. Vidare utfördes ett laktest med avseende på fosfor i princip enligt ISO-standard ISO/TS 21268-1, dock med längre skaktid, 70 h istället för 24 h i standarden, för att underlätta jämvikt. Vid laktestet skakas materialet i en svag kalciumkloridlösning (0,001 M) med en L/S kvot (Liquid/Solid) motsvarande 2:1. Dessutom bestämdes oxalatextraherbar P, Al och Fe.

Genom laktesten kan man få ett mått på koncentrationen av olika ämnen i marklösningen och därmed också en bild av den lättlösliga fraktionen fosfor i bädden. Oxalatextraktionen ger istället ett mått på mängden järn- och aluminium(hydr)oxid i materialen samtidigt som den fosfor som är bunden till dessa (hydr)oxidtyper kommer att lösas ut i extraktionen. I Tabell 2 ges uppgifter om de analyser som genomfördes i projektet (Danielsson m.fl., 2008).

Tabell 2. Sammanställning av de analysmetoder som använts i projektet

Analys	Metod	Anmärkning
Totalfosfor (Tot-P)	Uppslutning i salpetersyra. Påföljande analys med ICP.	
Torrsubstans (TS)	Torkning 105 grader	
Oxalatlöslig Fe (Fe-ox)	Oxalatextraktion, 4h skaktid, L/S=100, Fe-bestämning genom ICP efter filtrering	Ett mått på järn(hydr)oxider
Oxalatlöslig Al (Al-ox)	Oxalatextraktion, 4h skaktid, L/S=100, Al-bestämning genom ICP efter filtrering	Ett mått på aluminium(hydr)oxider. Dock ingår även organiskt komplexbundet Al
Oxalatlöslig P (P-ox)	Oxalatextraktion, 4h skaktid, L/S=100, P-bestämning genom ICP efter filtrering	
Lättlöslig P (P-aq)	Extraktion i 0,001 M kalciumklorid. Skaktid 70h, L/S=2. Kolorimetrisk P-bestämning (aquatec) efter uppslutning av provet i salpetersyra.	Laktest med metodik från ISO/TS 21268-1
Lättlöslig PO ₄ (PO4-aq)	Extraktion i 0,001 M kalciumklorid. Skaktid 70h, L/S=2. Kolorimetrisk P-bestämning (aquatec) efter filtrering.	Laktest med metodik från ISO/TS 21268-1
Lättlöslig Ca (Ca-aq)	Extraktion i 0,001 M kalciumklorid. Skaktid 70h, L/S=2. Ca-bestämning genom ICPMS efter filtrering.	Laktest med metodik från ISO/TS 21268-1
Lättlöslig Mg (Mg-aq)	Extraktion i 0,001 M kalciumklorid. Skaktid 70h, L/S=2. Ca-bestämning genom ICPMS efter filtrering.	Laktest med metodik från ISO/TS 21268-1

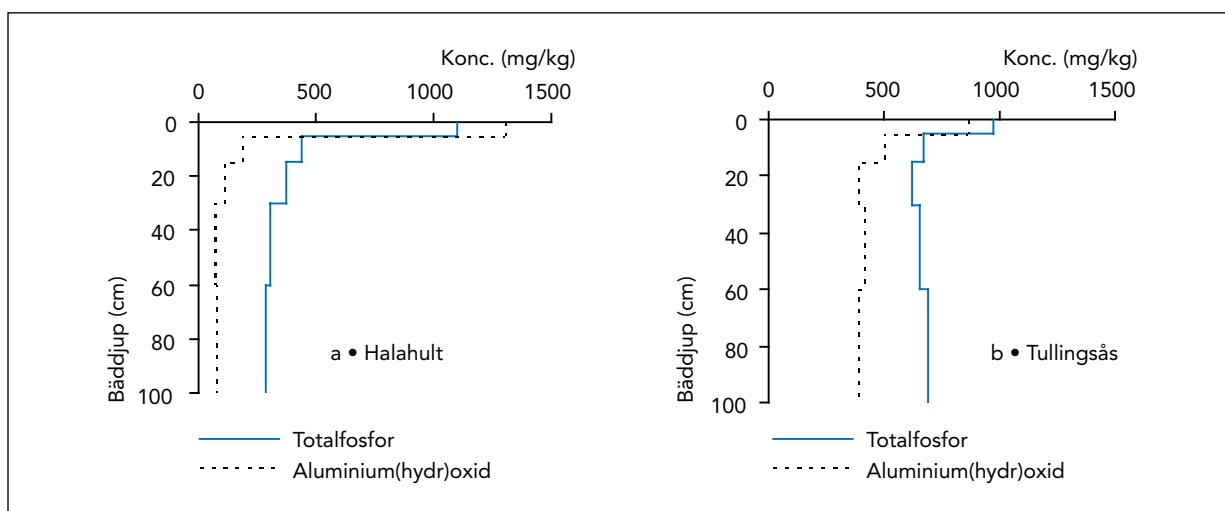
4.1.4 Jämviktsmodellering

Resultaten från laktestet användes för modellering i det kemiska jämviktsmodelleringsprogrammet Visual MINTEQ. I programmet beräknas specieringen av olika joner i jämviktslösning med utgångspunkt från värden för de joner som fastställts genom analys. Beräkningen sker utifrån kända jämviktskonstanter (ett stort bibliotek av jämviktskonstanter finns tillgänglig i MINTEQs databas). Man kan också se om jämviktslösningen är övermättad med avseende på någon kemisk förening samt studera om lösligheten för fosfor är i överrensstämelse med någon reglerande utfällningsreaktion.

4.2 Resultat

4.2.1 Fördelningen i bädden

Fosforackumuleringen var genomgående förhöjd i bäddarnas ytskikt. Särskilt tydligt var detta i Halahult och Tullingsås där filterbäddsytan aldrig bytts ut. För bäddarna i Halahult och Tullingsås bestämdes bakgrundshalten av fosfor genom referensproven till 250 mg/kg respektive 420 mg/kg. Vi fann också att oxalatextrakten innehöll kraftigt förhöjda aluminiumhalter i ytlagen (figur 1). Ett liknande samband gällde för järnhalterna. Detta betyder att metallerna antingen har tillförts med avloppsvattnet eller lakats ur modernmaterialet genom vittring. Oavsett ursprung, så kan tillförseln av aluminium och järn i ytskiktet ha haft en avgörande roll för infiltrationsanläggningens prestanda då den initiala kapaciteten i materialet var förbrukad. En hypotes är att den mikrobiella aktiviteten i ytan snabbar på vittringsprocessen och frigör aluminium och järn som eventuellt kan delta i fastläggningsprocesserna i ytlagret. Att mikroorganismer avsevärt kan snabba upp vittringen av silikatmineral har visats av bland annat Barker m.fl. (1998). Dock finns även möjligheten att fosforackumuleringen till ytan delvis kan förklaras med ackumulering av organisk fosfor. För att belysa det studeras i ett pågående examensarbete (Deguo Kong) fördelningen av organiskt material i bäddarna.



Figur 1. Halten totalfosfor och oxalatlöslig aluminium vid olika djup i bäddarna Halahult (a) och Tullingsås (b).

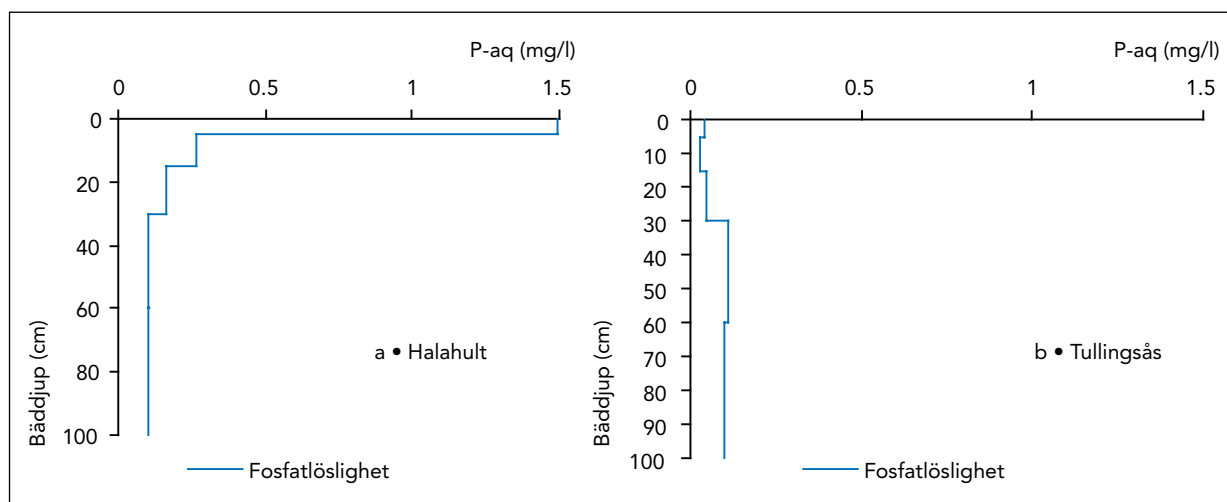
4.2.2 Fosfatlöslighet

Någon tydlig korrelation mellan löslig fosfat och oxalatlösligt järn och aluminium kunde inte fastställas. En förklaring kan vara att de studerade bäddarna har så pass olika kemiska förutsättningar (pH varierade exempelvis avsevärt mellan vissa bäddar).

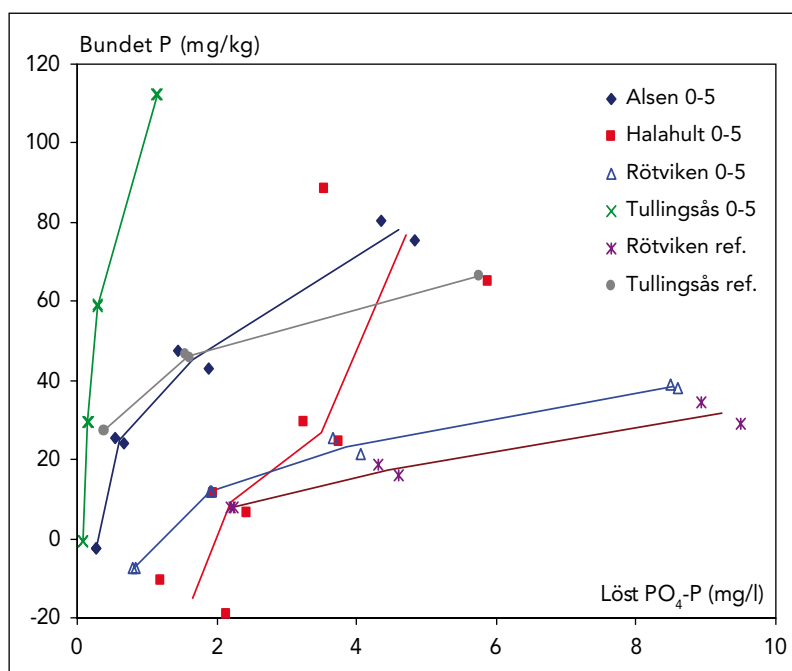
En hypotes var att en löslighetsfront skulle kunna indikera om delar av profilen fortfarande var opåverkad och kunde förväntas vara aktiv i avskiljningen. Någon sådan front kunde dock inte påvisas. Det närmaste löslighetsfront som kunde observeras var att ytskiktet som i flera fall hade förhöjda halter av fosfor också hade hög löslighet av fosfor (Figur 2a). Detta skulle i så fall ha tolkats som att större delen av bädden var omättad. Det finns dock ingen rimlighet i en sådan tolkning. Påföljande sorptionsförsök där det använda materialet jämviktades mot en fosfatlösning med koncentration mellan 3 mg/l och 12 mg/l visade också att flera bäddar inte var kapabla att binda praktiskt taget någon fosfor alls. I Figur 3 visas resultaten från sorptionsförsök från de översta 5 cm från fyra av de belastade bäddarna samt för två av referensmaterialen (Kong, pågående arbete). Figuren visar att endast i Tullingsås ythorisont binds mer än 100 mg/kg tillfört P då jämviktskoncentrationen fosfor är 2 mg/l – i de övriga bäddarna binds mindre än 50 mg/kg. Referensproverna, trots att de inte belastats med avloppsvatten, klarade sig inte bättre än de redan belastade materialen, snarare tvärtom.

Vidare finns det anledning att ifrågasätta om den uppmätta lösligheten i bottenskiktet på bäddarna verkligen återspeglade de utgående halterna. Exempelvis uppvisade prov från nedersta skiktet i Halahults infiltrationsanläggning en löslighet på ca 0,1 mg/l P. En så låg halt på utgående vatten från bädden i Halahull återfinns inte under hela den provtagningsserie som genomfördes 1992/1993 (Bylund 2003).

Bädden i Tullingsås stack ut ifrån övriga bäddar vad gällde lösligheten. Bäddens ytskikt hade lägre löslighet än de djupare segmenten (Figur 2) trots förhöjd fosforackumulering. Den lägre lösligheten kan vara en effekt av det låga pH som Tullingsås ytskikt visade (pH 4,5) i jämförelse med andra bäddars ytskikt (pH 6,5–7,8). Det låga pH-värdet gynnar adsorptionsprocesserna.



Figur 2. Halahult (a) representerar den typiska löslighetstrenden i de studerade infiltrationsbäddarna medan Tullingsås (b) utgör undantaget.



Figur 3. Bunden fosfor (av det som tillsatts) i sorptionsförsök för bäddmaterialen som funktion av koncentrationen löst fosfatfosfor (mg/l) vid jämvikt (efter Kong, pågående arbete).

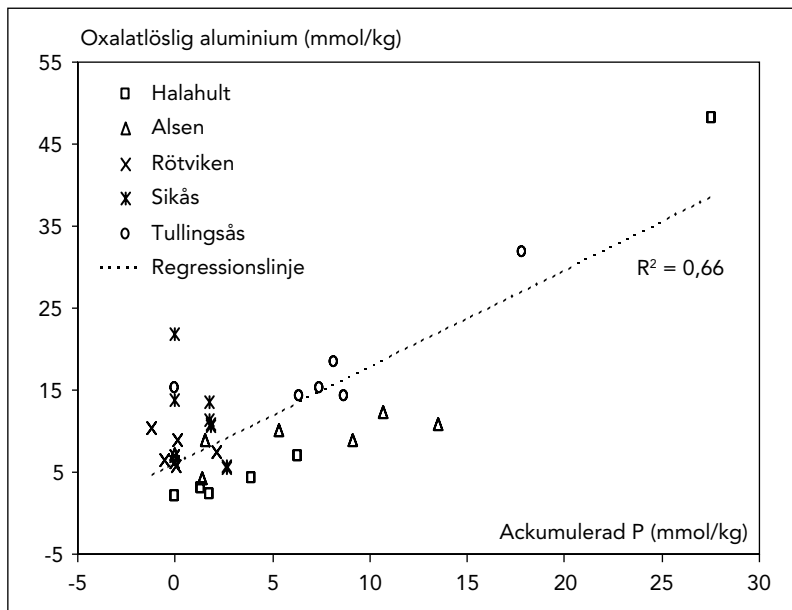
4.2.3 Vikten av adsorptionsprocesser

Att fosfatlösligheten i bäddarna inte kunde korreleras till innehållet av aluminium- eller järn(hydr)oxid betyder inte att dessa adsorptionsmekanismer inte har betydelse för avskiljningen. Den ackumulerade fosfor visade en tendens att öka med mängden aluminium(hydr)oxider (figur 4). I Figur 4 har den ackumulerade mängden fosfor beräknats som uppmätt totalfosfor i prov minus uppmätt totalfosfor i referensprov. Korrelationen var sämre till oxalatlösligt järn. Vid en närmare granskning av värdena för de orörda bäddarna Tullingsås och Halahult framgår att trenden är mer uttalad för dessa bäddar jämfört de andra. Orsaken kan vara att ythorisonten i flera andra bäddar kontinuerligt har bytts ut vilket gör att exponeringstiden för avloppsvatten har varierat.

4.2.4 Jämviktsmodellering

Genom att modellera jämviktssystemet i infiltrationsbäddarna kan man i princip ta hänsyn till flera av de kemiska parametrar som är avgörande för regleringen av fosfatlösligheten samtidigt. Dessvärre är adsorption till partikelytor problematiskt att simulera i modellerna mestadels beroende på osäkerhet gällande specifik yta för (hydr)oxiderna samt konkurrens med organiskt material som är svårt att hantera. Under projektet användes modellerna uteslutande för att få klarhet i vilken roll kalciumfosfater eventuellt kan ha haft i de studerade bäddarna.

Genom att bearbeta resultaten från lakttesterna med det geokemiska jämviktsprogrammet Visual MINTEQ erhöles ett så kallat stabilitetsdiagram där möjlig jämvikt med amorf kalciumfosfat, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2(\text{s})$, utvärderades. Amorf kalciumfosfat har visat sig vara det kalciumfosfat-

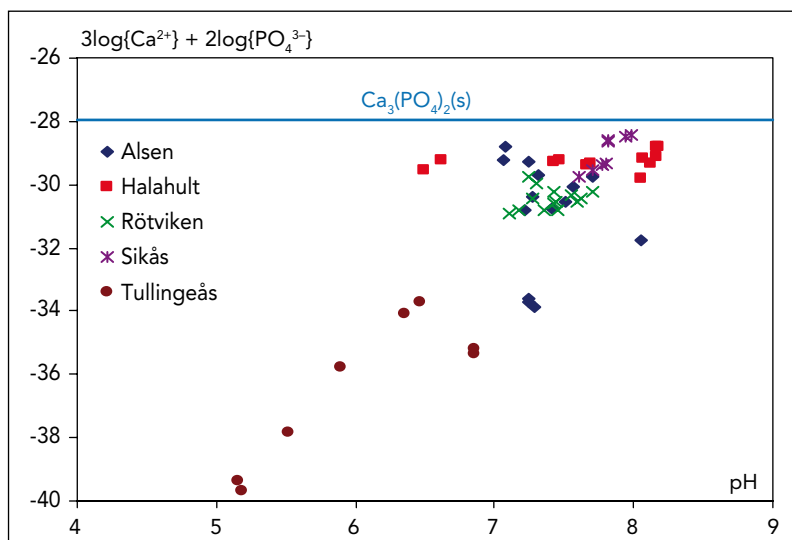


Figur 4.

Ackumulerad fosfor i bäddarna som funktion av tillgänglig mängd aluminium(hydr)oxider.

mineral som styr fosforbindningen till reaktiva filtermaterial som till exempel Filtra P och Polonite (Gustafsson m.fl., 2008).

Figur 5 visar att samtliga prover var undermättade gentemot amorft kalciumfosfat. Dock var flera bäddar (särskilt Halahult och Sikås) ganska nära mättnad med kalciumfosfat och det är möjligt att fosforavskiljningen i dessa bäddar delvis kan äga rum genom bildning av kalciumfosfat. Åtminstone i fallet Halahult stöds detta antagande av att man tycks uppnå jämvikt då ytterligare fosfat tillförs i skakförsök (Kong, pågående arbete). Dock – under de aktuella pH-förhållandena fordras det mycket höga fosfatkoncentrationer för att kalciumfosfater ska kunna fällas ut. Så snart fosfatkoncentrationerna sjunker kan fosfatmineralen lösas upp igen, och därför representerar denna mekanism säkerligen ingen långsiktigt effektiv process för kalciumfosfatavskiljning i bäddarna. Tidigare erfarenheter från undersökningar av filtermaterial tyder på att ett pH-värde på över 9 är önskvärt för en långsiktigt effektiv P-avskiljning genom kalciumfosfater (Gustafsson m.fl., 2008).



Figur 5.

Relationen mellan pH och termen $3\log\{Ca^{2+}\} + 2\log\{PO_4^{3-}\}$ för laktestvatten i de fem bäddarna. Den blå linjen visar mättnad med avseende på amorft kalciumfosfat.

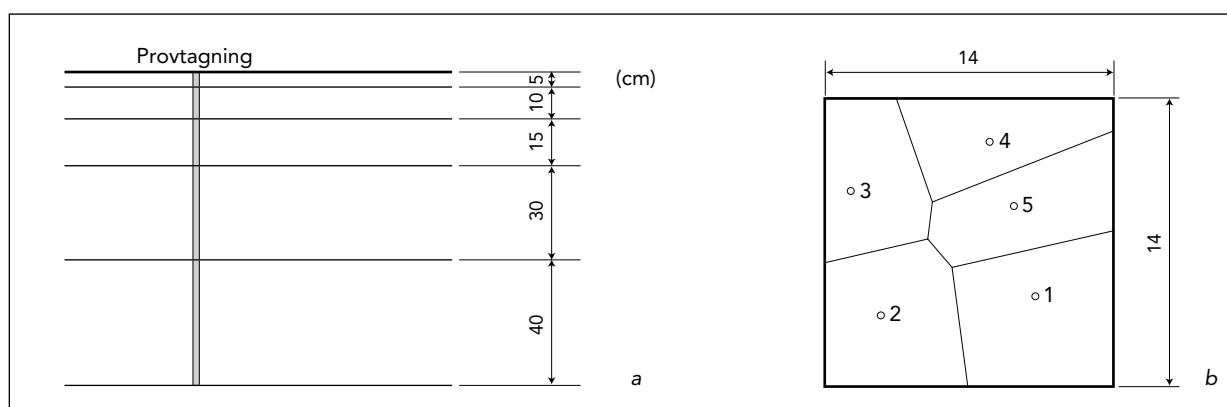
5. Massbalansstudie

Utöver bäddmaterialstudien ingick i projektplanen att en massbalansstudie skulle genomföras på en av de fem bäddar som även ingick i bäddmaterialsstudien. Avsikten var att undersöka vilken reningsgrad som uppnåts i bädden fram till undersökningsdatumet. Valet föll på anläggningen i Tullingsås som var en av två anläggningar som vi vet har varit orörd ända sedan den uppfördes. Anläggningen i Tullingsås består av en slamavskiljare samt två öppna filterbäddar à 196 m² som belastas intermittent, så att varje bädd får hälften av anläggningens totala belastning. Bäddarna har varit i bruk sedan 1992 och renar avloppsvatten från 225 pe. Filterbäddarna har förblivit orörda sedan konstruktion av bäddarna. Ansvarig drifttekniker uppger att belastningsgraden har varit likvärdig för de två bäddarna (Blomkvist, 2009).

5.1 Genomförande

Provgropar grävdes på totalt fem platser i den bädd i Tullingsås som vid provtagningstillfället var i viloperiod. Samlingsprover uttogs sedan för delsegment i bäddprofilen motsvarande intervallen (cm) 0–5, 5–15, 15–30, 30–60, 60–100 (Figur 6a). Varje provgrop fick representera en delvolym av bädden (Figur 6b). Ytan delades in med hjälp av så kallade Thiessen-polygoner eller Voronidiagram (en klassisk metod för att fördela representativa ytor för punktdata). Ett referensprov togs också i bäddvallen för att bestämma bäddmaterialets ursprungliga innehåll av fosfor. För att uppskatta anläggningens fosforavskiljningsförmåga under driftsperioden 1992–2008 jämfördes den totala mängden fastlagd fosfor i bädden med den totala mängden fosfor som bädden belastats med.

Den årliga belastningen av fosfor på bäddarna sedan de togs i drift 1992 till provtagningen 2008 antogs vara densamma som belastningen under augusti 1992 till september 1993. Under denna period utfördes flödesproportionell provtagning på inkommande vatten (Bylund, 2003).



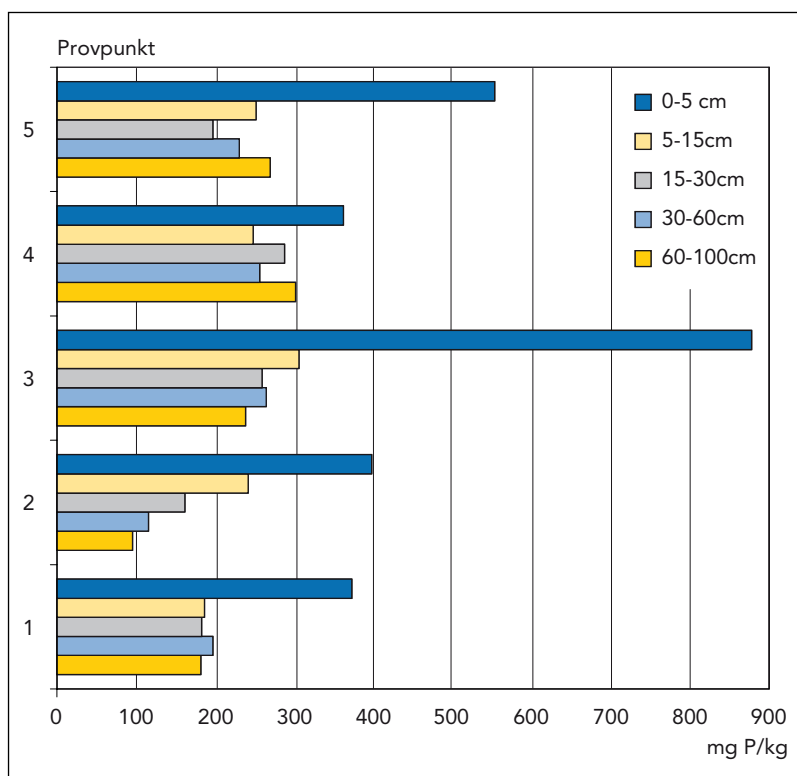
Figur 6. Vertikal (a) och horisontell (b) uppdelning av infiltrationsbädden för provtagning och databearbetning.

5.2 Resultat

5.2.1 Fördelning i bädden

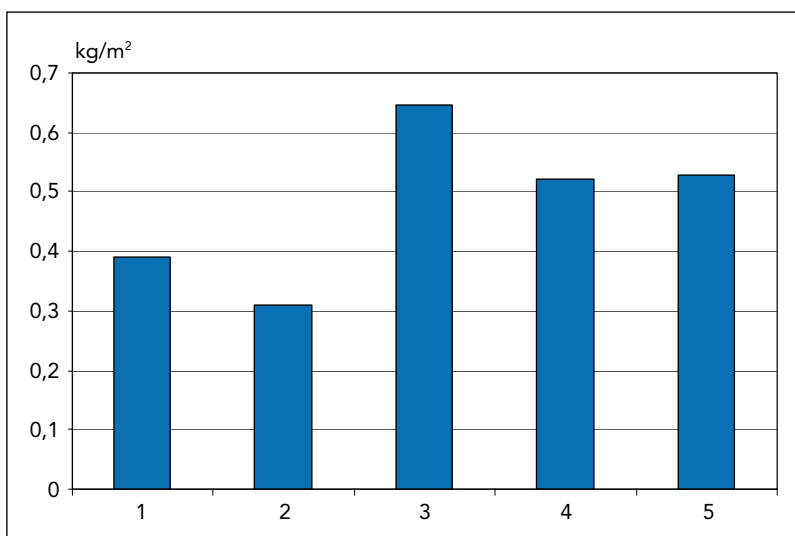
Den fastlagda mängden fosfor per kg bäddmaterial visade sig vara störst i det översta lagret i bädden för alla fem provtagningspunkterna, se Figur 7. Prov tre utmärker sig med en mycket hög fastläggning i det översta lagret. I de undre lagren är den fastlagda mängden per kg bäddmaterial lägre, och skillnaderna sinsemellan lagren är relativt små.

I genomsnitt har det ner till 1 m djup ackumulerats 0,349 kg fosfor per kvadratmeter bädd. Provtagning på filtermaterialet gjordes ner till 1 meters djup. Bäckens djup uppmättes dock till i genomsnitt 1,15 m. I samtliga massbalansberäkningar har det antagits att mängden fastlagd fosfor i de



Figur 7.

Den fastlagda fosforhalten i bäddprofilen. Fastlagd fosfor har beräknats som totalfosforhalten i bäddprovet minus totalfosforhalten i referensprovet.



Figur 8.

Mängden fastlagd fosfor per ytenhet (ner till 1,15 m djup) för de olika provareorna.



Figur 9. De två filterbäddarna vid Tullingsås reningsverk. Proven togs på bädden närmast fotografen.

understa 15 centimetrarna var densamma som i lager 60–100 cm, vilket ger en genomsnittlig ackumulation i bädden på 0,464 kg P/m². Om avloppsvattnet sprids dåligt över bädden kan man få en ojämn belastning och en ojämn fastläggning i filtermaterialet. Den fastlagda mängden fosfor per ytenhet av bädden presenteras i Figur 8. Resultaten indikerar att område 1 och 2 har blivit mindre belastade än områdena 3, 4, och 5. Detta överensstämmer också med hur det ser ut på plats i fråga om växtlighet och bäddytans lutning, se Figur 9.

5.2.2 Fosforbelastning, ackumulation och reduktionsgrad

I Tabell 3 redovisas avgörande indata samt resultaten från massbalansberäkningar på den bädd som provtagningen utförts på. Baserat på Bylund (2003) var medelbelastningen under undersökningsåret 1992/1993 sammanlagt 0,394 kg/dygn på de två bäddarna. En kontrollberäkning visade att detta motsvarar ca 175 pe (Naturvårdsverket, 2006). Under förutsättning att denna belastning är representativ även för övriga år som anläggningen varit i drift, samt att de två bäddarna belastats likvärdigt så har den undersökta bädden under de 16 år som anläggningen varit i drift belastats med totalt 1 150 kg fosfor.

Den ackumulerade fosfor beräknades som totalt ackumulerad fosfor minus bakgrundsinnehållet (totalfosforvärdet i referensprovet) (Tabell 3). Efter subtraktion konstaterades att bädden ackumulerat totalt 90,9 kg. Detta gav en reningsgrad på 8 % över bäddens livstid.

Den aktuella mängden sorberad fosfor i bädden beräknades till i snitt 0,262 g P/kg bäddmaterial. Denna siffra är rimlig i jämförelse med experimentellt fastställda sorptionsmaxima för naturliga sandfraktioner. I en sammanställning av experimentella sorptionsstudier finner man värden på fastläggningskapacitet för sand mellan 0,13–0,44 g P/kg (Cucarella & Renman, 2009).

Resultaten från Bylund (2003) visade på en genomsnittlig rening på 67 % med avseende på fosfor i inledningsskedet av bädden brukande. För att kunna bibehålla denna rening under hela driftsperioden skulle

Tabell 3. Indata och beräknade parametrar vid massbalansberäkningarna.

Parameter	Värde	Ursprung
Area	196 m ²	Uppmätt
Djup	1,15 m	Uppmätt
Bulkdensitet bäddmaterial	1,54 kg/dm ³	Uppmätt
Driftstid	16 år	Uppgift om driftsstart från Bylund (2003)
Genomsnittlig belastning på anläggningen	0,394 kg P/dygn	Beräknat från Bylund (2003)
Ursprungligt fosforinnehåll i bäddmaterialet	0,422 g P/kg	Från analys av referensprov
Totalvikt bäddmaterial	347 116 kg	Beräknat
Total belastning på en bädd	1150 kg P	Beräknat
Total fosformängd i bädden	237,4 kg P	Beräknat utgående från analyser
Ackumulerad P i bädden	90,9 kg P	Beräknat

det krävas att bäddmaterialet hade en fosforbindningskapacitet på 2,22 g P/kg, vilket är av samma storleksordning som experimentellt bestämd kapacitet hos exempelvis Filtralite P, som är ett av de mer kända reaktiva fosforsorptionsmaterialen som finns kommersiellt tillgängliga.

5.2.3 Känslighetsanalys

För att uppskatta ingående parametrars betydelse för den beräknade reningskapaciteten genomfördes en mindre känslighetsanalys.

För att uppskatta betydelsen av eventuella underskattningar på grund av mätfel av fosforhalten, beräknades bäddens reningskapacitet utifrån att hela bädden haft samma fosforadsorption som area 3 (det fosforrikaste området). Reningen av fosfor uppgick då till 11 %.

En uppenbar källa till fel är referensprovet. Det finns risk för att vårt försök att ta ett representativt referensprov misslyckats. I Tullingsås togs referensprovet i invallningen av bäddarna. Halten i referensprovet var genomgående lägre än bäddproven. För att undersöka vilket fel som referensprovet skulle kunna utgöra gjordes en beräkning på vilken reningsgrad som skulle ha uppnåtts om det ursprungliga materialet varit helt fritt från fosfor (en utopi eftersom mer än en halvering av bakgrundshalten egentligen inte skulle vara realistiskt). Bädden skulle i detta scenario uppnått en reningsgrad motsvarande 23%.

6. Diskussion och slutsatser

6.1 Reduktion

Massbalansstudien indikerar att ackumuleringen av fosfor avtar kraftigt med tiden och att de resonemang som förts om obegränsad kapacitet genom irreversibla ombildningsprocesser i hög grad bör ifrågasättas. Orsaken till den stora avvikelsen mellan de uppmätta resultaten av in/utflödesstudierna och massbalansresultaten är sannolikt en med tiden avtagande reningskapacitet. Vi utesluter inte heller att bäddarna skulle kunna dräneras på fosfor under viloperioden eller då särskilda betingelser uppnås i bädden och att man på så sätt skulle kunna uppmäta en relativt god avskiljning med in-/utflödesmetoden även längre fram i bäddens historia trots att kapaciteten totalt sett är dålig. Bylund (2003) uppgav att man tidvis fått värden som pekat på negativ reduktion i bäddarna men försökte förklara dessa avvikelser med mätfel. Det finns flera svårigheter med in/utflödesmätning i filtrerbäddar och eventuella frigörelsemekanismer gör naturligtvis metoden ännu mera osäker. Även om det finns många felkällor även i en massbalans på tillförd och ackumulerad fosfor, så bedömer vi det som en säkrare bestämning av bäddens hittillsvarande reningskapacitet. Den fastlagda fosfor måste kunna återfinnas i bädden och i Tullingsås återfanns endast 8 % av den uppskattade belastningen. Känslighetsanalysen visade att även grova fel i vårt beräkningsunderlag leder till en mycket låg fosforavskiljning för bädden.

Med tanke på att i det närmaste alla övriga bäddar hade en mindre mängd ackumulerad fosfor i bäddprofilerna än Tullingsås hade så talar det mesta för att även dessa har haft en mycket blygsam avskiljning och därmed varit mättade under stor del av sin driftstid. Bädernas bristande avskiljningsförmåga styrks också av de sorptionstester som genomfördes på referensproven. Dessa tester pekade på att avskiljningsförmågan i de ursprungliga materialen var mycket begränsad. Studien som helhet tyder därför på att fosforavskiljningsförmågan hos infiltrationsbäddar tidigare har överskattats. Man bör dock poängtera att fler bevis än en enstaka studie behövs för att generellt våga påstå detta.

Bedömningen av infiltrationsbäddar kompliceras av svårigheten att fastställa anläggningens tekniska gränser. Avskiljning kan förutsättas fortskrida åtminstone ner till grundvattennivån (detta gäller i första hand odränerade bäddar). Den fastläggning som kan förväntas i grundvattenzonen har däremot visat sig vara minimal (Robertson m.fl. 2008). Markprofilens mäktighet ovanför grundvattenytan bör därför vara avgörande för odränerade system. I Tullingsås där massbalansen utfördes utnyttjas dock inte passagen ner till grundvattenytan, såvida inte en väsentlig del av avloppsvattnet passerar förbi dräneringssystemet.

Ytterligare en viktig aspekt vid tolkning av resultaten är att belastningen av olika typer av infiltrationsbäddar kan variera kraftigt. Öppna

infiltrationsbäddar är i allmänhet hårdare belastade än den typ av täckta bäddar som återfinns bland privata fastighetsägare. Å andra sidan är det troligt att ett effektivare nyttjande av infiltrationsytan kan ske i öppna infiltrationsbäddar. I den studerade anläggningen var belastningen knappt 1 pe/m². De gamla svenska riktlinjerna för enskilda infiltrationsanläggningar ligger på 3,5–6,5 m² per pe (Naturvårdsverket, 2003). Dimensioneringsgrunderna i Norge anvisar 4–33 m² per pe (Jenssen m.fl 2006).

6.2 Värderingsinstrument

Projektet lyckades inte tydligt visa på att fosfatlösligheten i bäddarna kunde relateras till järn- eller aluminium(hydr)oxidinnehållet. Lösligheten tycktes inte heller spegla fosforhalterna i bäddarnas utgående vatten, vilket hindrar oss från att bedöma statusen direkt av lösligheten i bäddarnas bottenkikt (i varje fall med nuvarande kunskaper). Inte heller tycktes någon löslighetsfront avslöja vilket livsskede bädden befann sig i. Det sistnämnda misstänks dock delvis vara en följd av att de bäddar som projektet studerat sannolikt redan har nått sin övre kapacitetsgräns. Konsekvensen av mättnad bör vara att lösligheten blir likvärdig genom hela bädden (under förutsättning att andra avgörande parametrar är konstanta). En mer eller mindre konstant löslighet observerades också i de nedre lagren i de orörda bäddarna Halahult och Tullingsås. Det faktum att projektet har bearbetat data från vad som sannolikt varit redan uttjänta bäddar, medför att resultaten från bäddmaterialsstudien utifrån ett värderingsinstrumentperspektiv inte har kunnat komma till sin fulla rätt eftersom inget bra exempel på en fungerande bädd fanns representerad.

Att fosfatlösligheten inte kunnat kopplas direkt till järn- eller aluminium(hydr)oxidinnehållet betyder sannolikt att de verkliga processerna i bäddarna är beroende av flera faktorer och att dessa måste inkluderas i beskrivningen för att ett samband skall kunna åskådliggöras. Indikationen på att den ackumulerade fosfor beror av mängden aluminium(hydr)oxider tyder på att (hydr)oxiderna ändå är delaktiga i fastläggningsprocessen.

Det finns också en möjlighet att den dåliga beskrivning av lösligheten som funktion av innehållet av järn- och aluminium(hydr)oxider beror av att den adsorberade fosfor på något sätt kapslas in i materialet och därmed inte exponeras för markvätskan. Den deltar i det fallet inte i jämviktsreaktionerna.

Fortsatt arbete med värderingsinstrument kräver att man tar hänsyn till variabler som exempelvis pH. Jämviktsmodellering som också hanterar adsorption är kanske det verktyg som krävs för att ett en modell som kan tillämpas i praktiken skall kunna utvecklas. För att detta skall vara möjligt krävs också en fördjupad kunskap om adsorptionsprocessernas jämviktskemi samt eventuella fenomen som medför inkapsling och blockering av fosfat.

6.3 Ythorisonstens kemi

En viktig insikt är att mekanismerna i ythorisonsten tycks vara annorlunda än de längre ner i bäddmaterialet och att kraftig ackumulation är möjlig i ytlagret. Förhöjda halter av aluminium- och järn(hydr)oxider i ytan pekar på att dessa metaller tillförs genom vittring eller genom transport med avloppsvattnet. Vad som är källan är oklart. Med en litteraturuppgift om aluminiumhalten i avloppsvatten från hushåll på 0,4 mg/l (Naturvårdsverket, 1995), beräknades den mängd aluminium som teoretiskt skulle kunna tillföras Tullingsås filterbädd via avloppsvattnet om vattenförbrukningen varit 200 l/pd. Den uppgick då till knappt 7 gånger mer än den uppmätta ackumulationen i ytlagret. Detta betyder att en tillförsel via avloppsvattnet är möjlig. Men eftersom vi vet att stor del av metallinnehållet i avloppsvatten ofta fastläggs i slamavskiljaren så står det inte klart att källan måste vara avloppsvattnet. Det är däremot rimligt att anta att den förhöjda halten av aluminium och järn i ythorisonsten är en bidragande orsak till den höga fosforackumulationen i denna del av bäddprofilen. Både Tullingsås och Halahults infiltrationsbäddar visade en flerfaldig ackumulation i ytskiktet jämfört med resten av bädden. I övriga bäddar har ythorisonsten periodvis bytts ut eller tagits bort och trenden var därför inte lika framträdde i dessa. Sikås var ett undantag som faktiskt hade lägre halt i ytskiktet. För täckta infiltrationer och bäddar där ythorisonsten inte byts ut kan processerna i ytskiktet på längre sikt vara en av de viktigaste fastläggningsprocesserna.

6.4 Sorptionstester

Vad som inte redogjorts för i detalj i denna rapport är de sorptionstester som skett i samband med projektet. Sorptionstesterna var den enda mätmetoden som tycktes kunna ge en direkt respons om materialet var helt utarmat. Möjligen skulle upprepade sorptionstester i bäddmaterialet kunna ge svar på när ett visst material utarmats och därmed hur tätt det skulle behöva bytas. Ett problem är dock att man inte känner kinetiken för fastläggningsprocessen och därför inte vet hur bra materialet presterar under olika faser av dess livstid. Dessutom är sorptionstester inte standardiserade och finns därför inte heller i de kommersiella laboratoriernas standardutbud.

6.5 Läckagerisk

Det potentiella fosforläckaget från infiltrationsbäddar bör kunna återspeglas väl av den löslighet som uppmättes i bäddmaterialet genom laktest. Variationen var stor och uppgick till mellan ca 1,5 mg/l och 0,1 mg/l. Lösligheten var i allmänhet högre i bäddarnas toppskikt varför det speciellt finns anledning att handskas ansvarsfullt med material som rivits av eller grävts ur från ytskiktet men även övrigt material kommer antagligen på sikt att läcka fosfor. En av de besökta anläggningarna utgör ett dåligt exempel där man hade lagt upp det urgrävda

materialet i en hög på en plan endast ett tiotal meter från recipienten. Det är troligt att en sådan hög kan dräneras på stora delar av sitt fosforinnehåll under en relativt kort tidsrymd eftersom materialet får en stor exponeringsyta.

6.6 Anvisningar utifrån projektets erfarenheter

Av projekts resultat framgår att en ansvarsfull skötsel av öppna filterbäddar bör inkludera kontinuerligt utbyte av bäddmaterial/ythorisont. Hur mycket man kan vinna på detta beror i stor utsträckning på hur snabbt ackumulationen i ytlagret sker (vilket är okänt). Sker ackumulationen i ytlagret snabbt, så skulle återkommande skumning kunna vara värdefull. Är däremot ackumulationen långsam så kommer det inte ha så stor betydelse.

Utgår man från den fastläggningskapacitet som materialen i snitt uppvisat i denna studie så räcker sannolikt inte skumning för att upprätthålla god fosforrening. Det skulle istället krävas täta byten av hela materialvolymen. Med hänsyn till den varierande ackumulationen i de olika bäddarna framgår det att sorptionsförmågan skiftar. Vissa bäddmaterial (exempelvis det i Rötvikens) tycktes i dess ursprungliga form i princip vara oförmöget att adsorbera fosfor varför ett byte troligen inte skulle göra någon större skillnad. Tullingsås som var en av de fosforrikaste bäddarna hade bundit in ca 0,2 g P/kg. Vid fullständig avskiljning så skulle hela bäddvolymen varit uttjänt efter ett år. Matematiskt betraktat följer därav en reningsgrad av 50 % vid byte vart annat år. Resultaten indikerar därför att infiltrationstekniken inte är lämpad i områden där det finns krav på hög fosforreduktion. Flera av teknikens fördelar skulle förloras i ett scenario där fullständigt materialutbyte måste utföras med täta intervall. Det är därför inget realistiskt alternativ att sköta en anläggning så att de uppfyller högt ställda krav på fosforrening såvida anläggningen inte kompletteras med separat fosforfälla (exempelvis kemisk fällning eller reaktivt filter).

Vad som bör vara den primära utgångspunkten för var en infiltrationsanläggning är en passande teknik är förutsättningarna i närmiljön och de förväntade effekterna av en fosforbelastning både lokalt och regionalt. Det finns platser i Sverige där man löper en mycket liten risk att negativt påverka ytvatten. Det kan bero på att ytvattenförekomsten i området är låg, men det kan också bero på att recipienten är så näringsfattig att påverkan kan betraktas som acceptabel eller rent av positiv. Det kan och bör vara kontroversiellt att tillåta en medveten belastning av fosfor på ytvatten men det vore dumt att utesluta sådana beslut inte minst med tanke på att de i vissa fall bör kunna bidra till att uppnå andra miljömål än just *Ingen övergödning* som vanligen står i fokus vid avloppsfrågor (exempelvis *Begränsad klimatpåverkan* och *Ett rikt växt- och djurliv*).

Referenser

- Barker, W.W., Welch, S.A., Chu, S. & Banfield, J.F. (1998). *Experimental observations of the effect of bacteria on aluminosilicate weathering*. American Mineralogist 83(11-12), 1551-1563.
- Bylund, S. (2003). *Studie av funktion och reningsresultat i öppna filterbäddar* (VA-Forsk rapport Nr 2003-12). Svenskt Vatten.
- Bäärnhelm, A. (1993). *Anrikning av fosfor i öppna infiltrationssystem* (examensarbete nr 83). Institutionen för markvetenskap, avd. för växtnäringslära, SLU.
- Carlsson L. & Horkeby B. (1976). *Transport, utspädning och fastläggning av föroreningar i grundvatten. Föroreningstransport i grus och sand. Experimentella studier av adsorptionsförlopp av fosfor och vissa tungmetaller*. Publ. B 76:4, Inst för VA-teknik, CTH.
- Cucarella, V., Renman, G. (2009). *Phosphorus sorption capacity of filter materials used for on-site wastewater treatment determined in batch experiments – a comparative study*. Journal of Environmental Quality 38, 381-392.
- Gasparatos, D., Haidouti, C., Haroulis, A. & Tsaousidou, P. (2006) *Estimation of phosphorus status of soil Fe-enriched concretions with the acid ammonium oxalate method*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 37. 2375— 2387.
- Danielsson J., Erlandsson M., Fredén J., Hugosson H. och Wahlqvist M (2008). *Fosforfastläggning i infiltrationsanläggningar*. Projektarbete inom kursen markvetenskap 1TV260. Institutionen för markvetenskap SLU.
- Gustafsson, J. P., Renman, A., Renman, G., & Poll, K. (2008). *Phosphate removal by mineral-based sorbents used in filters for small-scale wastewater treatment*. Water Research, 42(1-2), 189–197.
- Gustafsson, J. P., Jacks, G., Simonsson, M., Nilsson, I. (2008). *Mark- och vattenkemi Teori*. Institutionen för mark- och vattenteknik, KTH. Stockholm.
- Jenssen, P. D., Jonasson, S. A., & Heistad, A. (2006). *Naturbasert rensing av avloppsvann, en kunskapssammenstilling med hovedvekt på norske erfaringer* (VA-Forsk rapport Nr 2006-20). Svenskt Vatten.
- Naturvårdsverket (2006). *Naturvårdsverkets allmänna råd om små avloppsanordningar för hushållspillvatten*, NFS 2006:7.
- Naturvårdsverket (2003). *Små avloppsanläggningar – Hushållspillvatten från högst 5 hushåll*. Naturvårdsverket. Stockholm.
- Naturvårdsverket (1995). *Vad innehåller avlopp från hushåll* (Rapport 4425). Naturvårdsverket. Stockholm.

- Naturvårdsverket (1990). *Kungörelse med föreskrifter om kontroll av utsläpp till vatten- och markrecipient från anläggningar för behandling av avloppsvatten från tätbebyggelse*. SNFS 1990:14.
- Nilsson, K., & Englov, P. (1979). *Avloppsinfiltration* VIAK AB.
- Nilsson, P. (1990). *Infiltration of wastewater, an applied study on treatment of wastewater by soil infiltration*. University of Lund.
- Nilsson, P., Nyberg, F., & Karlsson, M. (1998). *Markbäddars funktion, kontroll och utvärdering av markbäddar* (Rapport 4895). Naturvårdsverket.
- Norin, E., Bellander, F., & Johansson, L. (2005). *Uppföljning av funktionen hos öppna filterbäddar* (VA-Forsk rapport Nr 2005-16). Svenskt Vatten.
- Palm Ola, Malmén Linda, Jönsson Håkan (2002). *Robusta uthålliga små avlopp En kunskapssammanställning*. Rapport 5224, Naturvårdsverket, Stockholm.
- Robertson, W. D. (1995). *Development of steady-state phosphate concentrations in septic system plumes*. Journal of Contaminant Hydrology, 19(4), 289–305.
- Robertson, W. D. (2003). *Enhanced attenuation of septic system phosphate in noncalcareous sediments*. Ground Water, 41(1), 48–56.
- Robertson, W. D. (2008). *Irreversible phosphorus sorption in septic system plumes?* Ground Water, 46(1), 51–60.
- Robertson, W. D., Schiff, S. L., & Ptacek, C. J. (1998). *Review of phosphate mobility and persistence in 10 septic system plumes*. Ground Water, 36(6), 1000–1010.
- SOU. (1955). *Undersökningar rörande små avloppsanläggningar, 1950 års avloppsutredning* Statens Offentliga Utredningar (SOU).
- Weiss, P., Eveborn, D., Kärrman, E., & Gustafsson, J. P. (2008). *Environmental systems analysis of four on-site wastewater treatment options*. Resources, Conservation and Recycling, 52, 1153–1161.
- Wiklund, U. (2003). *Infiltration av avloppsvatten i öppna dammar i kallt norrlandsklimat* (VA-Forsk rapport Nr 2003-4). Svenskt Vatten.
- Zhang, H., Davison, W., Gadi, R., & Kobayashi, T. (1998). *In situ measurement of dissolved phosphorus in natural waters using dgt*. Analytica Chimica Acta(370), 29–38.
- Zoua, Z., Hana, J., Jang A., Bishop, P. L., Ahna, C. H. (2007). *A disposable on-chip phosphate sensor with planar cobalt microelectrodes on polymer substrate*. Biosensors and Bioelectronics 22 (2007), 1902–1907.

Personliga meddelanden

Blomqvist, Konrad (2009). Drifttekniker, Strömsunds Kommun, Mars 2009. Tel 070-3481638.



Box 47607, 117 94 Stockholm
Tel 08 506 002 00
Fax 08 506 002 10
E-post svenskvatten@svenskvatten.se
www.svenskvatten.se