



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 15041

Examensarbete 30 hp
September 2015

Kapacitetsminskning hos långsamfiltren vid Lovö och Norsborgs vattenverk

Studie av påverkande faktorer samt åtgärdsförslag

Mattis Mellander

Referat

KAPACITETSMINSKNING HOS LÅNGSAMSANDFILTREN VID LOVÖ OCH NORSBORGS VATTENVERK – STUDIE AV PÅVERKANDE FAKTORER SAMT ÅTGÄRDSFÖRSLAG

Mattis Mellander

Invånarantalet i Stockholm ökar och därmed också efterfrågan på dricksvatten. Stockholm Vatten VA AB fastslog i sin senaste prognos att kapaciteten hos deras vattenverk i Norsborg och på Lovö kommer att vara otillräcklig inom femton år och därmed måste ökas. Båda vattenverken tar vatten från Mälaren och renar detta genom flockning, sedimentering, snabbfiltrering, långsamfiltrering, UV-bestrålning samt tillsats av kloramin. Baserat på de senaste årens drifterfarenheter har långsamfiltrens kapacitet skrivits ned och är ett begränsande produktionssteg på båda verken. Detta examensarbete syftade till att fastställa orsakerna till kapacitetsminskningen och föreslå åtgärder. Undersökningen begränsades till Lovö vattenverk, men resultaten anses relevanta även för Norsborgs vattenverk.

De senaste åren har långsamsandfiltrens drifttid mellan rensningar minskat och tryckfallet i genomsnitt ökat. Här sågs att tryckfallet direkt efter rensning var högre i den undersökta periodens slut än under periodens början. Då filtrens belastning undersöktes konstaterades att filtreringshastigheten inte ökat och vattenkvaliteten inte försämrats. Utifrån detta drogs slutsatsen att kapacitetsminskningen inte berodde på ökad belastning.

Med hjälp av rör satta i filtersanden kunde tryckfallets fördelning över filterbäddens djup undersökas. I två av de undersökta filtren sågs ett kraftigt tryckfall i filtrens undre del. Då provgropar grävdes i filtren sågs ett tydligt gråaktigt lager vid den nivå där tryckfallet skett. Analyser av sandprover från filtren tydde på att en ackumulering av finkorniga sandpartiklar och organiskt material samt en lågporositet, gav det gråa lagret en låg mättad hydraulisk konduktivitet. Ackumuleringen av finkorniga sandpartiklar skulle kunna bero på att finkornigt material lyfts från filtrens hörn, där sandlagret är tunnare, och fördelas över resterande delar av filtret vid återfyllnad efter rensning.

Mätningar av porositet visade att filterbädden kompakteras då det belastas av de fordon som används vid rensning. Resultaten tyder dock på att packningens utbredning och omfattning är sådan att den inte har någon större effekt på tryckfallet i filtret.

SÖKORD

Vattenverk, dricksvatten, långsamfilter, långsamsandfilter, kapacitet, tryckfall.

*Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Villavägen 16
SE-752 36 Uppsala*

Abstract

REDUCED SLOW SAND FILTRATION CAPACITY AT THE WATER TREATMENT PLANTS AT LOVÖ AND NORSBORG – REASONS AND WAYS OF INCREASING THE CAPACITY.

Stockholm is growing and with it the demand for drinking water. To meet the demand the capacity of the two water treatment plants in Norsborg and at Lovö must be increased. Both plants use water from the lake Mälaren which is treated using flocculation, sedimentation, rapid filtration, slow sand filtration, UV-light and the addition of chloramine. The estimated capacity of the slow sand filters has decreased at both plants during the last few years and is limiting the total production capacity. This study aims to find the cause of the capacity decrease and make suggestions for how the capacity could be increased. Only the water treatment plant at Lovö was examined in this study, but the results are considered to be relevant for the water treatment plant in Norsborg as well.

During recent years the runtime of the filters has been decreasing and the overall loss of hydraulic head has increased. In several filters it was noted that the hydraulic head loss after filter cleaning had increased over time. Filter load was examined during the period in which the loss in capacity took place. Neither had the filtration rate increased nor had the water quality decreased. A higher load could therefore be ruled out as the source of the capacity loss.

Hydraulic head loss distribution over the depth of the filter beds was examined using steel pipes placed in the filter bed at different depths. In two filters a large hydraulic head loss was found at a narrow section in the bottom of the filters. Holes were dug in the filter beds, from which a distinct grey layer could be observed. Sand analyses showed that an accumulation of fine sand particles and organic matter combined with a low porosity could have been what caused the large hydraulic head loss in the layer. This material could have originated from the corners of the filters. During filter refill, fine material was observed being suspended from the corners and spread across the filter.

Measurements of sand porosity suggested that the filter bed is compacted by the machines used to clean the filters. This however seemed to have a negligible effect on the hydraulic head loss in the filters.

KEYWORDS

Water treatment plant, drinking water, slow sand filtration, clogging, hydraulic head, capacity loss.

*Department of Earth Sciences, Uppsala university
Villavägen 16
SE-752 36 Uppsala*

Förord

Denna studie är ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Examensarbetet genomfördes i samarbete med Stockholm Vatten VA AB.Handledare var Ida Bodlund på Stockholm VA AB. Ämnesgranskare var Roger Herbert vid Uppsala universitets institution för geovetenskaper.

Utöver dessa personer skulle jag vilja framföra ett varmt tack till samtlig personal på Lovö vattenverk som välkomnat mig med öppna armar och tålmodigt hjälpt mig med allt ifrån insamlande av data till att flytta mina mätuppställningar mellan filtren. Särskilt tack till Ida Bodlund, Ulf Eriksson och Ebru Poulsen, som varit ovärderliga för projektets genomförande.

Institutionen för mark och miljö på SLU i Uppsala var mycket behjälpliga under projektet och jag vill tacka Christina Öhman, Ingmar Messing, Kerstin Berglund och Ararso Etana för hjälp med sandanalys, tolkning av resultaten och ett trevligt bemötande.

Jag vill även tacka John Östh på Uppsala universitets kulturgeografiska institution för hjälpen med den statistiska analysen. Till familjerna Östh och Gårdmark vill jag rikta ett stort tack för all hjälp under min studietid. Det hade varit betydligt svårare och tråkigare utan er!

Till sist vill jag framföra ett tack så stort att det överskuggar alla andra till min älskade sambo Maria Gustavsson, för att hon stöttat och stått ut med mig under projektets gång!

Uppsala, augusti 2015



Mattis Mellander

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Syfte.....	2
1.2	Frågeställningar	2
1.3	Disposition.....	2
2	Tidigare studier	3
2.1.1	Igensättning av långsamfilter i Östby vattenverk i Kramfors – studie av påverkande faktorer.....	3
2.1.2	Övertäckning av långsamfilter – En fullskalestudie utförd vid Norsborgs vattenverk	3
2.1.3	Rensningsmetoder för långsamfilter	4
3	Teori	5
3.1	Introduktion till långsamfilter.....	5
3.1.1	Långsamfiltrets utformning.....	5
3.1.2	Långsamfiltrets funktion	6
3.1.3	Rensning av långsamfilter	6
3.1.4	Kända problem med långsamfilter	7
3.2	Långsamfilterbäddens uppbyggnad	8
3.2.1	Sand	8
3.2.2	Porositet.....	8
3.2.3	Densitet.....	9
3.2.4	Kompression av sandbädden	9
3.3	Vattenströmning i långsamfilterbädden.....	10
3.3.1	Potential.....	10
3.3.2	Darcys lag.....	11
3.3.3	Tryckfall	11
3.3.4	Porositets och kornstorleken betydelse för den hydrauliska konduktiviteten	12
3.3.5	Tryckytan i filterbädden	13
3.4	Kemisk fällning	15
3.4.1	Flockning.....	15
3.4.2	Aluminiumsulfat.....	15
4	Lovö vattenverk.....	16
5	Långsamfiltren på Lovö vattenverk	18
5.1.1	Konstruktion.....	18
5.2	Rensningsförfarande	19
5.2.1	Avtappning	19
5.2.2	Skrapning	19

5.2.3	Sandtvätt.....	22
5.2.4	Sandåterfyllnad vid djuprensning.....	22
5.2.5	Återfyllnad och tagande i drift	23
5.2.6	Maskinpark.....	24
5.2.7	Tidigare rensningsförfarande	24
5.3	Sandhöjden i filtren	25
6	Metod och material.....	27
6.1	Hypoteser.....	27
6.2	Metodval	28
6.2.1	Kartläggning av filterfunktion och belastning	28
6.2.2	Undersökning av filterbädden	28
6.3	Val av filter för vidare studie.....	28
6.4	Kartläggning av filterfunktion, belastning och vattenkvalitet	29
6.4.1	Metodbeskrivning.....	29
6.4.2	Filtreringshastighet samt rensningar och frysningar	29
6.4.3	Tryckfall	30
6.4.4	Pordiameter	31
6.4.5	Vattenkvalitet	31
6.5	Mätningar med nivåör	32
6.5.1	Mätupställning och utrustning.....	32
6.5.2	Tillvägagångssätt vid isättande av grundvattenrör	33
6.5.3	Mätning av vattennivåer	34
6.6	Provtagning.....	34
6.6.1	Positionsangivelse för provplatser och märkning av prover	34
6.6.2	Provtagningsutrustning.....	35
6.6.3	Provtagningsförfarande för cylinderprov	35
6.6.4	Provtagningsförfarande för lösa sandprover	36
6.6.5	Förvaring och transport av prover	36
6.6.6	Torkning av sandprover	36
6.7	Analyser av sandprover	37
6.7.1	Kornstorleksfördelning.....	37
6.7.2	Torr skrymdensitet och porositet.....	38
6.7.3	Turbiditetsanalyser av lakvatten.....	38
6.7.4	Hydraulisk konduktivitet.....	39
6.7.5	Aluminium och glödrest.....	40
6.8	Statistisk analys av resultaten från sandprovtagningen	40
7	Resultat.....	41

7.1	Filtreringshastighet, rensningar och frysningar	41
7.1.1	Antal rensningar och frysningar per år	41
7.1.2	Rensningarnas och frysningarnas fördelning mellan filtren	42
7.1.3	Filtreringshastighet och Medeldrifttid.....	43
7.1.4	Sammanfattning	44
7.2	Tryckfall	45
7.2.1	Årliga medelvärden	45
7.2.2	Dygnsmedelvärden.....	46
7.2.3	Före och efter rensning.....	47
7.2.4	Sammanfattning	49
7.3	Pordiameter.....	50
7.3.1	Dygnsmedelvärden.....	50
7.3.2	Beräknat tryckfall.....	52
7.3.3	Sammanfattning	54
7.4	Kvalitet hos vattnet som tillförts långsamfiltren	54
7.4.1	Turbiditet.....	55
7.4.2	Aluminiumhalt	55
7.4.3	pH.....	56
7.4.4	Sammanfattning	56
7.5	Mätningar med nivåör, hydraulisk konduktivitet.....	57
7.5.1	Mätningar med nivåör	57
7.5.2	Hydraulisk konduktivitet.....	60
7.5.3	Samlad bedömning av tillståndet i filter 3, 4 och 14.....	61
7.6	Sandanalyser.....	62
7.6.1	Filter 3 och packningstest.....	62
7.6.2	Filter 4	66
7.6.3	Filter 14	70
7.6.4	Filter 15	76
7.7	Statistisk analys av resultaten	77
7.7.1	Mättad hydraulisk konduktivitet	77
7.7.2	Ackumulation i filtrets undre del	78
8	Diskussion	80
8.1	Kapacitetsminskningens form och utsträckning.....	80
8.1.1	Sammanfattning	81
8.2	Långsamfiltrens belastning.....	81
8.2.1	Turbiditet.....	81
8.2.2	Aluminium	81

8.2.3	pH och temperatur	81
8.2.4	Filtreringshastighet	81
8.2.5	Belastning under 1973-2008	81
8.2.6	Sammanfattning	82
8.3	Utvärdering av hypoteser kring orsaker till kapacitetsminskningen	82
8.3.1	Högre belastning av filtren	82
8.3.2	Ackumulering av material i filtrets undre del	82
8.3.3	Kompaktering vid rensning	85
8.4	Åtgärdsförslag	86
8.5	Förslag till vidare studier	87
9	Slutsats	88
10	Referenser.....	89
	Tryckta referenser	89
	Personliga referenser	91
	Webbaserade referenser	91
	Bilagor	92
	Bilaga 1. Koordinatsystem och provtagningsplatsernas koordinater	92
	Koordinatsystem.....	92
	Provplatsernas koordinater	92
	Filter 3	92
	Filter 4	92
	Filter 14	92
	Bilaga 2. Sammanfattning av samtlig provtagning	93
	Bilaga 3. Rådata: Långsamfiltrens belastning och prestanda.....	95
	1967-1973.....	95
	2008-2014.....	95
	Bilaga 4. Rådata: Vattenkvalitet hos vattnet som tillförts långsamfiltren.....	96
	2008- 2014.....	96
	1967-1973.....	96
	Bilaga 5. Rådata: Mätningar med grundvattenrör	96
	Filter 10	96
	Filter 14	97
	Bilaga 6. Rådata: Siktning.....	97
	Filter 3	97
	Filter 4	98
	Filter 14	98
	Bilaga 7. Rådata: Torr skrymdensitet och porositet	98

Filter 3	98
Filter 4	99
Filter 14	99
Bilaga 8. Rådata: Turbiditetsanalyser av lakvatten	100
Filter 3	100
Filter 4	100
Filter 14	100
Bilaga 9. Rådata: Hydraulisk konduktivitet	100
Filter 3	100
Filter 4	101
Filter 14	101
Bilaga 10. Rådata: Aluminium.....	101
Filter 3	101
Filter 4	101
Filter 14	102
Bilaga 11. Rådata: Glödrest	102
Filter 3	102
Filter 4	102
Filter 14	102

1 Inledning

År 1858 började Stockholm stads allmänna vattensystem byggas, och under en lång tid ökade efterfrågan på dricksvatten. Staden expanderade med nya industrier och allt fler hushåll som anslöts till ledningsnätet. Den ökande trenden varade fram till år 1974, då många industrier flyttade från Stockholm. Detta ledde tillsammans med en minskad befolkning till en minskad efterfrågan fram till 1980-talets början. Därefter har ytterligare minskningar i industriförbrukning, samt användning av vattensnål VA-teknik i hushåll hållit efterfrågan på en relativt konstant nivå, trots befolkningsökningen. Stockholm Vatten VA AB uppskattar regelbundet den framtida efterfrågan, för att kunna anpassa sin verksamhet. I den senaste rapporten "Produktionsbehov av dricksvatten 2040 samt åtgärder för att tillgodose detta", uppskattades att produktionsbehovet kommer öka med 17-27% till år 2040. De befintliga vattenverkens praktiskt uthålliga kapacitet bedöms överskridas år 2030 och vara otillräcklig för att täcka produktionsbehovet 2040, se tabell 1.

Tabell 1. Nuvarande produktionskapacitet och beräknat produktionsbehov år 2040 (Bodlund et al., 2014).

	Praktiskt uthållig kapacitet 2014 [m ³ /h]	Produktionsbehov uthålligt 2040 [m ³ /h]	Maximal kapacitet 2014 [m ³ /h]	Produktionsbehov maxdygn 2040 [m ³ /h]
Norsborg	12 000	13 000	18 000	15 600
Lövö	7 500	8 700	10 800	10 400
Totalt	19 500	21 700	28 800	26 000

Den praktiskt uthålliga kapaciteten definieras här som den basproduktion som i princip kan bibehållas under hela året. Vid uppskattningen tas därför hänsyn till normalt förekommande underhåll, rengöring och liknande. Verkens kapacitet har uppskattats utifrån drifterfarenheter och till viss del kapacitetsutredningar.

Vid båda vattenverken är det begränsande produktionssteget långsamfiltren. Långsamfiltrens kapacitet bedöms ha minskat över tiden på båda vattenverken. På Norsborgs vattenverk har långsamfiltrens uppskattade uthålliga kapacitet de senaste åren skrivits ned från 13 000 till 12 000, baserat på drifterfarenheter (Bodlund et al., 2014). På Lovöverket bedöms den uthålliga kapaciteten idag vara 7 500 m³/h, vilket är minst 500 m³/h mindre än vad långsamfiltren producerade under åren 1970-1973.

För att kunna möta den framtida ökande efterfrågan utreds nu olika sätt på vilka verkens kapacitet kan ökas. Då långsamfiltren i dagsläget är den begränsande processen är en kapacitetsökning hos dessa ett viktigt steg för att kunna möta den ökade efterfrågan. Kan orsaken till långsamfiltrens kapacitetsminskning fastställas och åtgärdas fås därmed en kapacitetshöjning för hela verken samtidigt som en framtida kapacitetsminskning skulle kunna undvikas.

Utifrån examensarbetets omfattning begränsades undersökningen till att endast omfatta Lovö vattenverk. Vattenverken har dock samma reningsprocess och vattentäkt, varför resultaten i stor utsträckning även kan anses giltiga även för Norsborgs vattenverk.

1.1 Syfte

Syftet med projektet var att fastställa orsakerna till den vid vattenverken på Lovö och Norsborg upplevda försämringen av långsamfilternas kapacitet. Utredningen syftade vidare till att utifrån resultaten ge förslag på hur kapaciteten kunde höjas.

1.2 Frågeställningar

Projektet utgick från följande frågeställningar:

- Varför är långsamfiltrens kapacitet lägre idag än för 40 år sedan?
- Hur kan befintliga långsamfilters kapacitet ökas?

1.3 Disposition

Rapportens inledning följs av avsnittet ”Tidigare studier”. Gemensamt för studierna som redovisas här är att de innefattar någon form av analys av ackumulering av föroreningar i filterbädden. Nästa kapitel är ”Teoretiskt ramverk”. Kapitlet innehåller en sammanfattning av all för studien relevant teori kring filterbäddens uppbyggnad och flöde. I nästföljande två kapitel ges en introduktion till Lovö vattenverk i allmänhet, samt en mer ingående beskrivning av långsamfiltrens uppbyggnad och drift. Här redovisas även hur driften av långsamfiltren förändrats över åren samt övriga reparationer och dylika åtgärder. I metoden beskrivs först översiktligt vilka undersökningar som genomförts samt vilket syfte de haft. Detaljerna för respektive undersöknings genomförande redovisas sedan i separata avsnitt. I resultatkapitlet redovisas resultaten i samma ordning som undersökningarna presenterades i metodavsnittet. Här redovisas resultaten huvudsakligen i grafiskt format, men samtliga mätvärden finns redovisade i tabellform i rapportens bilagor. Resultatkapitlet följs av ett diskussionskapitel där analysresultaten diskuteras. Rapporten mynnar slutligen ut i en slutsats samt åtgärdsförslag.

2 Tidigare studier

Här sammanfattas de för denna studie viktigaste resultaten av liknande svenska studier.

2.1.1 IGENSÄTTNING AV LÅNGSAMFILTER I ÖSTBY VATTENVERK I KRAMFORS – STUDIE AV PÅVERKANDE FAKTORER

Studien genomfördes 2006 av K. Andersson som ett examensarbete inom civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik. Vattenverket i Östby hade problem med för snabba igensättningar av sina långsamfilter, där samtliga filter satte igen bara en månad efter rensning. Igensättningar under vintern kunde göra att filtren helt behövde tas ur bruk, vilket hade en starkt negativ effekt på vattenkvaliteten. Verket i fråga var ett ytvattenverk där vattnet initialt flockades med ekoflock 91 varefter det filtrerades i kontaktfilter. Vattnet alkaliserades sedan för att därefter släppas ut på verkets långsamfilter. Långsamfiltren hade ett 50-100cm tjockt lager filtersand med kornstorlek mellan 0,2-2mm. I studien undersöktes råvattnets kemi och biologi, filtrat från snabb- och långsamfilter samt tryckfall på olika nivåer i långsamfiltren.

Slutsatsen blev att igensättningarna sannolikt berodde på en ökad belastning av aluminiumflock, något som i sin tur orsakats av ökande halter organiskt material i råvattnet. Denna slutsats drogs efter observationer av filterhuden samt mätningar av aluminiumhalter i långsamfiltrets in- och utgående vatten. Utifrån dessa mätningar beräknades även att aluminium ansamlades i filtren med en takt av $0,2 \text{ kg år}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

I studien slogs plaströr ned i filterbädden för att mäta vattnets yta på olika nivåer. Utifrån dessa resultat beräknades sedan flödesmotståndet på olika djup i sandbädden. Resultaten från de två filter där dessa mätningar utfördes visar att filtrens underdel har ett förhöjt flödesmotstånd jämfört med ovanliggande sand. Detta antyder någon form av igensättning eller kompaktering.

2.1.2 ÖVERTÄCKNING AV LÅNGSAMFILTER – EN FULLSKALESTUDIE UTFÖRD VID NORSBORGS VATTENVERK

Denna text bygger på J. L. Abrahamssons projektrapport R-nr-2006. I studien utvärderades övertäckningens effekt genom att ett antal analyser utfördes på det täckta filtret och ett icke övertäckt filter vilket användes som referens. Försöket pågick mellan år 2002-2006. Under denna period behövde det icke övertäckta filtret rensas två gånger per år och behövde dessutom frysas en gång. Det täckta filtret behövde däremot inte rensas under hela försöksperioden, men var tvunget att frysas två gånger då motståndet ökade kraftigt under vintrarna 2004 och 2005. I studien ansågs dessa motståndsökningar bero på restflock som bildat ett lager på filterytan då stora volymer vatten filtrerats. Lagret gav dock främst upphov till motståndsökning då temperaturen understeg 5°C . Vid okulär besiktning av filtren sågs stor skillnad i alg tillväxt. I det täckta filtret kunde ingen alg tillväxt observeras. Trots att alltså ingen synlig filterhud utvecklats erhöles fullgod reningseffekt. Vidare togs sandprover vid fem olika djup i filterbäddens översta 30cm. Proverna analyserades med avseende på COD_{Cr} , TOC, aluminiumhalt och glödrest. COD_{Cr} och TOC är två mått på innehåll av organiska föreningar och användes tillsammans med övriga analyser för att bedöma nedsmutsningen av filterbädden. På djup under 5cm förekom ingen som helst ackumulation av organiska ämnen, mätt som COD_{Cr} , över tiden. Inte heller mätt som TOC sågs någon ökande trend i den undre delen av det undersökta profildjupet. Glödresten var högre än 99% för samtliga sandprover, med en trend att de ytligare proven hade något lägre glödrest än proven från större djup. Inte heller någon ackumulation av aluminium på ett djup under 10cm kunde observeras. Aluminiumhalten tolkades som ett mått på mängden oorganiska föroreningar.

2.1.3 RENSNINGSMETODER FÖR LÅNGSAMFILTER

Denna text bygger på VA-forsk rapport Nr 39 2003, författad av H.S. Jabur och J.Mårtensson. Filtren som undersöktes fanns på vattenverk i Nässjö respektive Jönköping. Som en del i utvärderingen av en ny rensningsmetod för långsamfilter mättes antal bakterier och glödförlust på olika djup i filterbäddarna hos två filter med konventionell ”traktorgrävarrensning”. I resultaten av mätningarna i dessa filter sågs att bakteriehalten efter 7 dagar var högre vid 50cm djup än vid 20cm djup i filterbädden. Även glödresten högre vid 50cm än vid 20cm. Dessa båda resultat skulle kunna innebära en ackumulation av mikroorganismer och organiskt material i filtrets undre del.

3 Teori

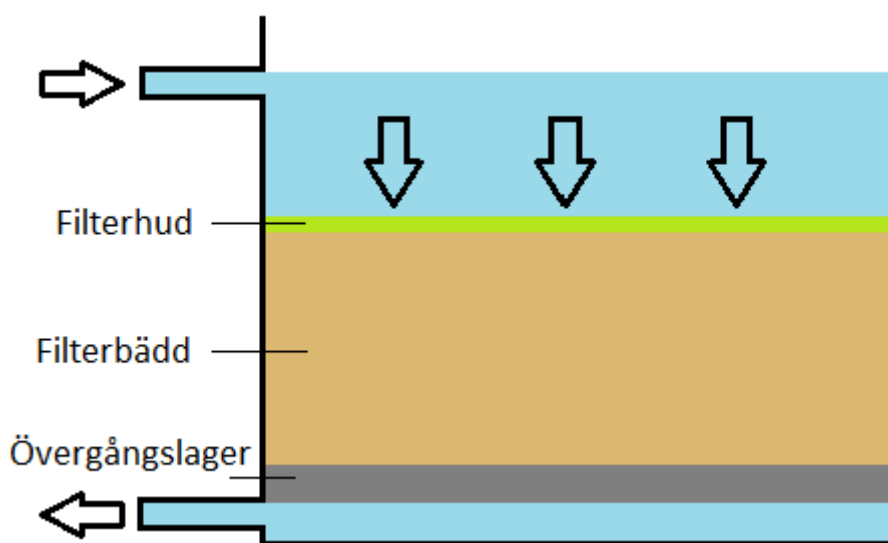
Kapitlet inleds med en övergripande introduktion till långsamfilter, där dess funktion, utformning och drift presenteras. Därefter ges mer ingående teori kring uppbyggnaden av filterbädden och flödet i den. Slutligen ges en teoretisk bakgrund till kemisk fällning, vilket är det sätt på vilket vattnet renas på Lovö vattenverk innan det leds ut på långsamfiltren.

3.1 Introduktion till långsamfilter

Långsamfiltrering innebär i princip att vatten filtreras genom ett lager granulärt material, vanligtvis sand. Jämfört med snabbfiltrering sker filtreringen långsamt och den biologiska aktiviteten i filtret är central för reningsprocessen. Filtrering genom sand som reningsmetod för vatten har använts i cirka 4000 år och är än idag en vida använd metod (Crittenden et al., 2005). Långsamfiltreringen som vi känner den idag utvecklades i Skottland under 1800-talets början och började användas i svenska vattenverk redan före 1900-talet (Johansson, 2010).

3.1.1 LÅNGSAMFILTRETS UTFORMNING

Långsamsandfiltret har en drygt metertjock sandbädd, vanligtvis med kornstorlekar från 0,2 till 2mm. Under sanden finns ofta ett övergångslager med grövre sand och grus. Tidigare byggdes sandfiltren i betongbassänger men idag har det blivit allt vanligare att istället gräva ut bassängen direkt i marken och använda tät plastduk i sidor och botten (Johansson, 2010).



Figur 1. Principskiss över långsamfilter.(Figur: M. Mellander)

Vatten leds in vid filtrets ovansida och vattenståndet i filtret är vanligtvis cirka en meter ovanför filterbäddens yta. Härifrån infiltrerar vattnet ned genom sandbädden, enbart drivet av gravitationen, för att sedan samlas upp i ett dräneringssystem vid filtrets undersida (Crittenden et al., 2005). Flödes hastigheten, se ekvation 1, genom filtret är cirka 0,1m/h. Jämfört med snabbfiltrering är detta långsamt, vilket gör att det ofta krävs stora filtertytor för att få ett tillräckligt högt flöde (McFeters, 1990).

Ekvation 1. Flödeshastigheten genom långsamsandfiltret.

$$\text{Flödeshastigheten [m/h]} = \frac{\text{Vattenflödet [m}^3\text{/h]}}{\text{Filterytan [m}^2\text{]}}$$

3.1.2 LÅNGSAMFILTRETS FUNKTION

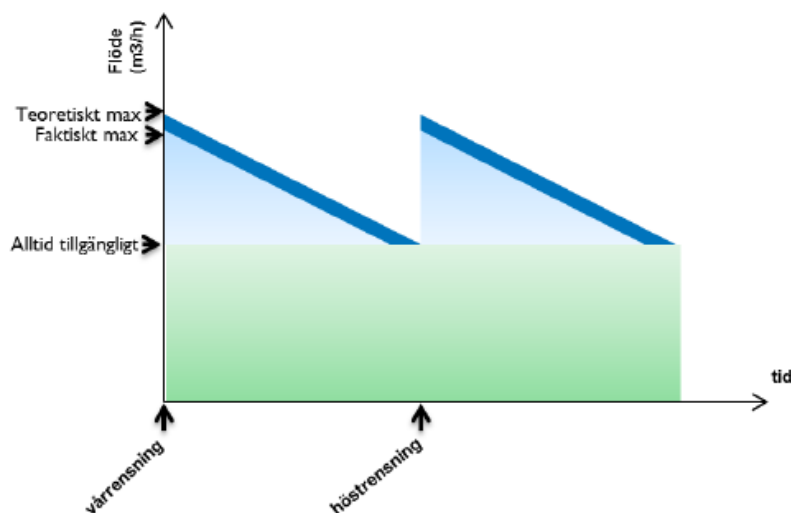
I långsamfilter renas vatten genom filtrering, adsorption och biologisk nedbrytning (Johansson, 2010). Den långsamma filtreringshastigheten i kombination med den fina kornstorleken gör att avskiljningen av partiklar främst sker i filtrets översta centimetrar (Crittenden et al., 2005). Avskilda partiklar och mikroorganismer bildar över tiden en så kallad filterhud på filterbäddens ovansida, med en komplex mikrofauna. Tillväxten av de mikroorganismer som utför den biologiska reningen sker i de översta 40-50cm av filterbädden. Filterhuden ökar filtereffekten genom att absorbera mikroorganismer, slampartiklar och kolloider ur vattnet (Johansson, 2010). I öppna långsamfilter sker en tillväxt av alger på filterytan, vilket försämrar vattengenomströmningen avsevärt över tiden (Blomberg, 2000). Observera att algtillväxten inte inverkar negativt på vattenkvaliteten.

När vattnet fortsätter ned i filterbädden sker ytterligare filtrering och nedbrytning av organiskt material. Utöver detta avskiljs här partiklar genom adsorption till sandkornen i filtret (McFeters, 1990). Den livfyllda zonen, där bakterier, protozoer och bakteriofager lever i ett tunt lager kring sandpartiklarna och bryter ned organiskt material, sträcker sig 0,4-0,5m ned i filterbädden (Oomen & Van Dijk, 1978).

Nedbrytningen av organiskt material gör att långsamfilter bland annat kan användas för att reducera smak och lukt. Långsamfilter lämpar sig därför utmärkt för vattenverk där ytvatten används. Långsamfilter har vidare en god reningseffekt avseende bakterier, virus, parasiter, alger och andra mikroorganismer (Jabur & Mårtensson, 2003). Bakteriehålln reduceras med cirka 99%. Slutligen erhålls reducerad grumlighet och en minskning av COD_{Mn} med upp till 20% (Johansson, 2010).

3.1.3 RENSNING AV LÅNGSAMFILTER

Partiklar avskiljs kontinuerligt och fastnar på och i filterbädden. Denna igensättning tillsammans med den mikrobiella tillväxten av bland annat alger gör att filtermotståndet ökar över tiden och filtrets kapacitet minskar därmed. Till skillnad från övriga processer i ett vattenverk varierar alltså långsamfiltrets kapacitet över tiden. När motståndet når en viss nivå rensas filtret genom att filterbäddens översta centimetrar, där normalt tryckfallet är koncentrerat, avskiljs och deponeras eller tvättas (Jabur & Mårtensson, 2003), se figur 2. Detta förfarande kallas allmänt ”ytrensning”. Ofta används någon form av traktor för att med skopa skrapa av filterhuden, men det finns även maskiner som kan sänkas ned i vattnet och rensa filtret under drift. För att undvika kompaktering av filterbädden är det viktigt att maskinerna som används för rensningen har ett så litet marktryck som möjligt (Johansson, 2010).



Figur 2. Principskiss över ett långsamfilters årliga variationer i kapacitet (Bodlund et al., 2014).

Hur ofta ett långsamfilter måste rensas beror på tillgängligt tryck, kornstorleksfördelningen hos filtersanden, kvaliteten på ingående vatten, väderförhållanden och säsongsmässiga algblomningar (Jabur & Mårtensson, 2003). Efter rensningen vattenfylls filtret underifrån för att undvika att luftbubblor fastnar i filterbädden. Filterhuden och det mikrobiella livet i filtret måste sedan ges tid att återetableras för att återfå fullgod reningseffekt. För varje rensning blir filterbädden tunnare och når till slut den minsta möjliga tjocklek som krävs för fullgod rening, ca 0,5-0,8m. När denna nivå nåts genomförs en djuprensning där ett extra tjockt lager skrapas bort, varefter filtret återfylls med ren sand (Johansson, 2010). Alternativt kan ren sand tillföras vid varje rensning (Jabur & Mårtensson, 2003).

Efter en djuprensning krävs längre tid för det mikrobiella livet att återhämta sig för att filtret skall återfå fullgod reningseffekt. Under återhämtningsperioden kan långsamfiltratet inte användas i dricksvattenproduktionen, vilket innebär att vattenverkets kapacitet minskar. Ett antal olika idéer om hur återhämtningsprocessen kan påskyndas finns, men ingen har fått något branschövergripande genomslag i Sverige. Bland annat föreslår J. Oomen i sin bok från 1978 att den nytvättade sanden skall tillföras under den kvarvarande sanden i filtret (Oomen & Van Dijk, 1978). Detta genom att den kvarvarande sanden först skottas undan, för att sedan placeras ovanpå den nypålagda sanden.

3.1.4 KÄNDA PROBLEM MED LÅGSAMFILTER

Sandtvätt

Vid sandtvätt kan det vara svårt att hitta en bra nivå gällande hur kraftigt vattenflöde som används. Tvättningen skall vara tillräckligt kraftig för att få bort de partiklar som fastnat i filtersanden, men får inte vara så kraftig att den mest finkorniga filtersanden följer med tvättvattnet (Geza 1998). Den genomsnittliga kornstorleken riskerar då att öka vid upprepad tvätt vilket kan förändra filteregenskaperna.

Packning

Tyngden och vibrationer från personal och maskiner på filterytan kan ge effekter långt ned i filterbädden (Jabur & Mårtensson, 2003; Johansson, 2010).

Akkumulering av föroreningar i filtrets bottenlager

Om djuprensningar sker med långa intervall eller om tvättad eller ny sand tillförs filtret vid varje rensning, kan föroreningar ackumuleras i filtrets undre delar. Detta kan orsaka igensättning och leda till kortare drifttider (Gleeson & Gray, 1997). Bäckens bottenlager kan få påväxt av bakterier och svamp. Problemet kan åtgärdas genom att höjklora botten i filtret (Johansson, 2010).

Gasblåsor i filterbädden

Allt eftersom igensättningen av filtret ökar, minskar trycket i filterbädden. Beroende på filtrets utformning kan till och med undertryck uppstå i vissa fall (Crittenden et al., 2005). Då trycket minskar, minskar även gasers löslighet i vattnet. Således kan gasblåsor lösas ut vid tillräckligt låga tryck i filterbädden. Ofta är det syrgas som bildar dessa bubblor. Detta då fotosyntes i filter huden ger höga syrehalter i vattnet. Fotosyntesen drivs av det direkta solljus filtren utsätts för då de ofta står utan överbyggnad (Johansson, 2010).

3.2 Långsamfilterbäckens uppbyggnad

Filterbädden i långsamfilter består av sand och följande teoriavsnitt avhandlar olika aspekter av en sandmassas uppbyggnad.

3.2.1 SAND

”Med sand avses geologiskt en jordart bestående av 0,2-2mm stora mineralkorn, som bildats genom nedbrytningen av olika bergarter. Huvudmineralet i sådan sand är vanligen kvarts. I överförd bemärkelse används benämningen sand för varje kornigt material inom det ungefärliga kornstorleksområdet 0,02mm till 12mm och ibland större oavsett materialets natur och det sätt på vilket det bildats eller framställts.” (Ågren, 1958, s.5). Formen för den enskilda mineralpartikeln beror av ursprungsmineralen och bildningssättet. Mineralkornen kan vara mer eller mindre rundade, vilket påverkar sandens hållfasthet (Axelsson, 2005). I en sandmassa stödjer sig sandkornen på varandra genom direkta kornkontakter mellan kornen. Då kornen ofta är oregelbundna blir många av dessa kontaktytor små, vilket kan ge upphov till brott med en ökad kontaktyta som följd. På så vis sker en viss rundning av mineralkornen (Axelsson, 2005).

3.2.2 POROSITET

Porositet är ett mått på hur stor andel av en sandvolymen som består av luft. Utifrån en given sand kan kornen packas på olika sätt, vilket ger upphov till olika stort utrymme mellan kornen. Utifrån en modell med sfäriska korn kan porositeten variera mellan 26-48%, beroende på hur de packas. I en sand tillkommer ytterligare effekter som påverkar porositeten, utifrån att sandkornen inte är perfekt symmetriska. Valvverkan kan uppstå, där regioner inte utsätts för tryck då detta istället fördelas över närliggande sandpartiklar. Denna effekt kan i naturliga sandjordar bidra till att en porositet upp emot 50% erhålls. Består sanden däremot av korn av mer varierande storlek kan de mindre kornen lägga sig i hållrummen mellan de stora partiklarna och skapa ett tätt sandlager med låg porositet (Axelsson, 2005).

Porositet som måttenhet

Porositet är en kvot mellan porvolym och total volym och är därmed enhetslös, se ekvation 2. Viktigt att notera är att två jordar med samma porositet kan ha olika hydrauliska egenskaper. Detta då porositetsmättet inte ger någon information om porsystemets uppbyggnad och porstorleksfördelning. Porositeten kan beräknas utifrån kompakt densitet och torr skrymdensitet, se ekvation 3 (Messing, 2012).

Ekvation 2. Porositet utifrån volym.

$$\phi = 100 \frac{V_n}{V_d}$$

Ekvation 3. Porositet utifrån densitet.

$$\phi = 100 \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_d}\right)$$

ϕ - Porositet [enhetslös]

V_n - Porvolym [m^3]

ρ_d - Torr skrymdensitet [kg m^{-3}]

ρ_s - Kompaktdensitet [kg m^{-3}]

3.2.3 DENSITET

Torr skrymdensitet

Genom att ta ett jordprov av bestämd volym vilket torkas och vägs, kan den torra skrymdensiteten bestämmas, se ekvation 4 (Messing, 2012). För en filterbädd, vilken har stor homogenitet vad gäller sammansättning, blir detta ett mått på hur hårt packad bädden är.

Kompaktdensitet

Kompaktdensiteten är ett mått på det fasta materialets densitet i en jord och kan beräknas enligt ekvation 5 nedan (Messing, 2012). Natursand består till 98% av β -kvarts, vilken har en densitet på $2,65 \text{gcm}^{-3}$ (Lisell).

Ekvation 4. Torr skrymdensitet.

$$\rho_d = \frac{m_d}{V_d}$$

Ekvation 5. Kompaktdensitet

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s}$$

ρ_d - Torr skrymdensitet [kgm^{-3}]

ρ_s - Kompaktdensitet [kgm^{-3}]

m_d - Vikt för torrt jordprov [kg]

V_d - Jordprovets volym [m^3]

V_s - Jordmineralens volym [m^3]

3.2.4 KOMPRESSION AV SANDBÄDDEN

Som nämndes tidigare i porositetsstycket kan porositeten variera utifrån hur sandkornen packas. Genom att påföra sandmassan tryck, genom till exempel framförandet av tunga fordon, kan sandkornens packning förändras och porvolymen minska. I försök med olika packningsutrustning har visats att effekten av packning är störst i de översta sandlagren (Talme & Almén, 1995).

Vattenhaltens inverkan

Vatten minskar friktionen mellan sandkornen och underlättar på så sätt omlagringen av sandkornen, som leder till en tätare packning. Vid höga vattenhalter fyller dock vattnet ut stora delar av porutrymmet och förhindrar omlagringen (Talme och Almén, 1995). I geotekniska sammanhang används begreppet vattenkvot som definieras som förhållandet mellan porvattnets massa och den fasta substansens massa enligt ekvation 6 nedan.

Ekvation 6. Definitionen av begreppet vattenkvot (Axelsson, 2005).

$$Vattenkvoten = \frac{\text{vattnets massa}}{\text{fasta materialets massa}}$$

Sand är som mest packningsbenäget vid en vattenkvot på 10-18%. Både högre och lägre vattenkvot gör alltså sand mer motståndskraftigt mot packning (Talme & Almén, 1995).

3.3 Vattenströmning i långsamfilterbädden

I detta avsnitt förs ett allmängiltigt resonemang kring faktorerna som påverkar strömningen i granulära material. Jord är ett granulärt material där vattenflöde studerats utförligt, vilket lett till att stora delar av materialet nedan är hämtat från litteratur kring strömning i mark. I marken sker flödet i tomrummen mellan markpartiklarna, vilka utgör markens porsystem. För att modellering skall vara möjlig utgår många modeller från förenklingen att porsystemet kan beskrivas som ett antal rör. Därför tar detta kapitel även upp teori kring strömning i rör.

3.3.1 POTENTIAL

Precis som elektrisk ström drivs vattenströmning av en potentialgradient.

Vattnets totala potential i en punkt utgörs av dess lägespotential och tryckpotential, se ekvation 7 och figur 3.

Ekvation 7. Totalpotential.

$$\Phi = \psi + Z$$

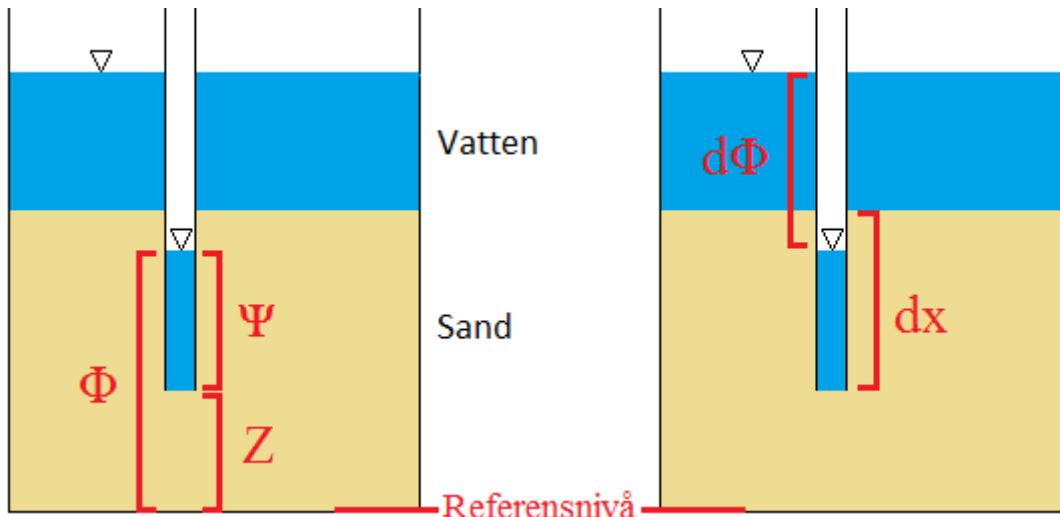
Φ - Totalpotential [m]

Z – Lägespotential [m]

ψ - Tryckpotential [m]

Lägespotentialen - Z , är det arbete som tyngdkraften skulle utföra på vattnet om det flyttades från en referensnivå till den aktuella punkten. Detta arbete kan uttryckas som meter vattenpelare och blir då avståndet mellan punkten och referensnivån.

Tryckpotentialen - ψ , är ett mått på trycket i den aktuella punkten och mäts i meter vattenpelare. Potentialen är avståndet från punkten till en fri vattenyta som står i jämvikt med vattnet i punkten (Harald & Rohde, 2009).



Figur 3. Schematisk figur av sandfilter med nedstucket nivåvattenrör. Till vänster: läges-, tryck- och totalpotential. Till höger: skillnad i totalpotential mellan sandytan och rörets underkant samt dx . (Figur: M. Mellander)

3.3.2 DARCYS LAG

Utifrån potentialgradienten $d\Phi/dx$ uppstår vattenrörelse, där vattnet rör sig från högre till lägre totalpotential. När vatten accelererar till följd av en potentialgradient, uppstår friktion mot porväggarna i mediet men även mellan vattenmolekylerna själva. Friktionskraften ökar till dess att accelerationen helt upphör och vattnet har då uppnått en konstant hastighet (Messing, 2012).

Vid laminär vattenmättad strömning i ett poröst medium finns ett linjärt förhållande mellan potentialskillnad och resulterande flödeshastighet. Detta förhållande är ett resultat av att friktionen som uppstår vid vattenflödet är proportionell mot flödeshastigheten. Sambandet beskrivs av Darcys lag, se ekvation 8, där hydraulisk konduktivitet är ett mått på jordens ledningsförmåga (Harald & Rohde, 2009). Vid beräkningar av grundvattenflöden är Darcys lag giltig för flöden med Reynolds tal lägre än 10 (Allaby, 2013).

Ekvation 8. Darcys lag för mättade laminära flöden.

$$Q = -KA \frac{d\Phi}{dx}$$

Q – Vattenflöde [m^3/s]

A – Den area genom vilket flödet sker [m^2]

K – Mediets hydrauliska konduktivitet [m/s]

Φ – Vattnets totalpotential [m]

x – Sträcka [m]

$\frac{d\Phi}{dx}$ – Ändring i totalpotential per längdenhet ”potentialgradient” [m/m]

3.3.3 TRYCKFALL

Tryckfall, även kallat tryckförlust, uppstår i en strömmande vätska på grund av friktion inom vätskan och mellan vätskan och omgivningen.

Den mekaniska energin i vätskan omvandlas på så vis till värme. Porens geometri och storlek avgör i sin tur hur stor denna friktion blir. För att kunna utföra beräkningar på flödet i porerna beskrivs porsystemet ofta förenklat som ett antal kapillärrör med radie D . För tryckfall i ett cirkulärt rör med diameter D gäller ekvation 9 under förutsättning att vätskan är newtonisk, flödet ej är varierande, samt att flödet är fullt utvecklat och laminärt (Clayton et al., 2010).

Ekvation 9. Tryckfall i ett cirkulärt rör under ovanstående förutsättningar.

$$h_f = \frac{32\mu L \bar{V}}{\gamma D^2}$$

h_f – Tryckfall [m]

μ – Dynamisk viskositet [$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$]

γ – Specifik vikt [Nm^{-3}]

$\bar{V}$ – Genomsnittlig hastighet [ms^{-1}]

D – Diameter [m]

L – Rörets längd [m]

Porerna är generellt inte raka utan slingrar sig istället fram genom bädden. Den extra väg vattnet behöver färdas genom porsystemet på grund av dess slingrighet behöver vägas in med hjälp av en så kallad tortuositetsfaktor, τ_w . Denna faktor sätts ofta till 2 i de sammanhang då man beräknar vattenflöden i mark (Messing, 2012). Utifrån ekvation 9 kan därmed tryckfallet i en enskild por i långsamfilterbädden beskrivas enligt ekvation 10, där L nu istället blir filterbäddens tjocklek.

Ekvation 10. Tryckfall i en enskild por i långsamfilterbädden.

$$h_f = \frac{32\mu\tau_w L \bar{V}}{\gamma D^2}$$

3.3.4 POROSITETENS OCH KORNSTORLEKENS BETYDELSEFÖR DEN HYDRAULISKA KONDUKTIVITETEN

Vid försök med sfäriska glaskulor visade fetter 2001 att den hydrauliska konduktiviteten har ett proportionellt förhållande till glaskulornas diameter, vilket kan ses i ekvation 11. I ett naturligt material, såsom sand, är inte alla partiklar perfekt sfäriska. För att kompensera för detta ingår i ekvation 11 en formfaktor, C .

Konduktiviteten beror av kornstorleken på grund av att när kornstorleken minskar ökar den totala kontaktytan mellan mediet och vattnet. För naturliga sandjordar har följande samband kunnat visas (Fetter, 2001):

- När medianen för sandens kornstorlek ökar, ökar även den hydrauliska konduktiviteten. Detta på grund av att porerna blir större då kornstorleken ökar.
- Den hydrauliska konduktiviteten minskar då standardavvikelsen för kornstorleken ökar. I en sand med stora skillnader i storlek mellan sandkornen kan mindre korn lägga sig i utrymmena mellan de stora sandkornen och täppa igen dessa, vilket ger denna effekt. Sambandet har visats ge större effekt ju grövre den genomsnittliga kornstorleken är.
- Sand med en dominerande kornstorlek har visats ha högre hydraulisk konduktivitet än sand där kornstorleken är fördelad mellan två olika dominerande storlekar. Detta av samma anledning som punkten ovan.

Ekvation 11. Den hydrauliska konduktivitetens beroende av kornstorlek (Fetter, 2001).

$$K = \frac{C d^2 \gamma}{\mu}$$

d – Genomsnittlig kornstorlek [m]

C – Formfaktor

K – Mediets hydrauliska konduktivitet [m/s]

μ – Dynamisk viskositet [$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$]

γ – Specifik vikt [Nm^{-3}]

Formfaktorn, C

Formfaktorn beror av sandkornens geometri och packning (Fetter, 2001). I en studie av sandsediment (Hazen, 1991) visades att följande formfaktorer var lämpliga att använda vid effektiv kornstorlek på mellan 0,1mm och 3mm, se tabell 2. Effektiv kornstorlek är den korndiameter vilken endast 10%_{vikt} av sandkornen är mindre än.

Tabell 2. Formfaktor för olika sandtyper (Hazen, 1991).

Sandtyp:	Formfaktor:
Finkornig sand, osorterad	40-80
Medelgrov sand, väl sorterad	80-120
Grov sand, osorterad	80-120
Grov sand, väl sorterad, ren	120-150

Porositet, n

Porositeten är i sig ett mått på packningsgrad och används i flera olika modeller istället för formfaktor. Ett exempel är Kozeny-Carmen ekvationen (Bear, 1972), se ekvation 12.

Ekvationen tas upp här för att visa vilken effekt en eventuell kompaktering skulle kunna få på den hydrauliska konduktiviteten i långsamsandfiltren och därmed deras prestanda.

Ekvation 12. Kozeny-Carmen ekvationen.

$$K = \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \left[\frac{n^3}{(1-n)^2} \right] \left(\frac{d^2}{180} \right)$$

K – Mediets hydrauliska konduktivitet [m/s]

n – Porositet [enhetslöst]

μ – Dynamisk viskositet [$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$]

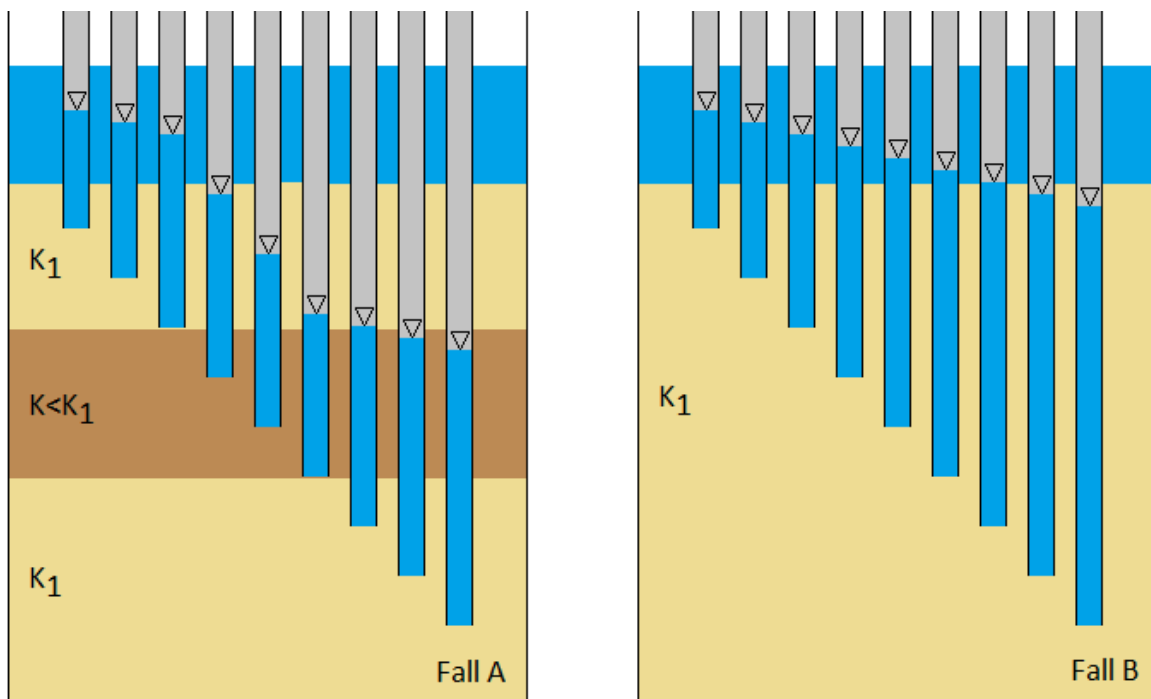
γ – Specifik vikt [Nm^{-3}]

d – Genomsnittlig kornstorlek [m]

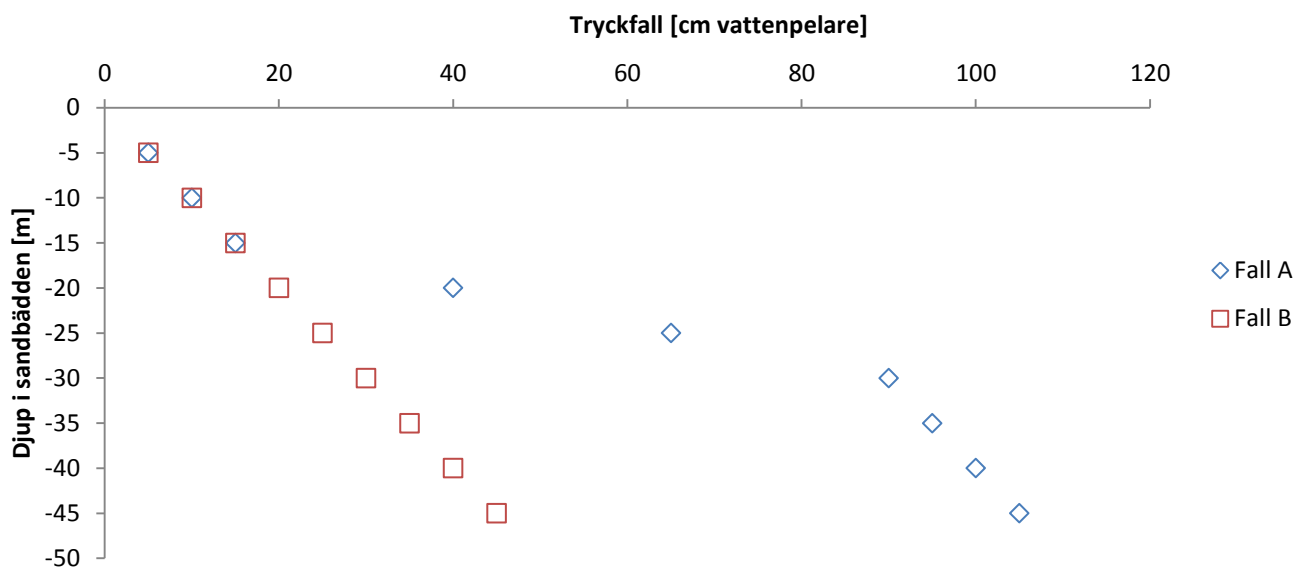
3.3.5 TRYCKYTAN I FILTERBÄDDEN

Detta avsnitt utgår från teori kring stationär nedåtriktad strömning i en vattenmättad jordkolumn. Då ett långsamfilter i princip är en stor vattenmättad sandkolumn kan denna flödesteori appliceras direkt. Då vatten flödar nedåt i en homogen sandkolumn minskar totalpotentialen linjärt med djupet till följd av friktionen som uppstår.

I en jord med låg hydraulisk konduktivitet uppstår större friktion än i en jord med högre hydraulisk konduktivitet. Sker strömningen i en sandkolumn med olika hydraulisk konduktivitet kommer därmed totalpotentialen sjunka snabbare i den del av kolumnen där den hydrauliska konduktiviteten är lägre. I ett långsamfilter kan totalpotentialen mätas genom att rör förs ned i sandbädden varefter vattennivån i och utanför rören mäts, se figur 4. Har hela sandbädden samma mättade hydrauliska konduktivitet kommer vattenytorna i rören att sjunka linjärt i förhållande till djupet, se figur 4 fall B. Detta motsvarar att tryckfallet är jämnt fördelat över filterbäddens djup. Sätts däremot ett antal rör, jämnt fördelade över djupet, i ett filter där något lager med lägre hydraulisk konduktivitet förekommer, kommer skillnaden i vattenhöjden i rören vara större i de filter som sitter i lagret med lägre mättad hydraulisk konduktivitet, se figur 4 fall A.



Figur 4. Principskiss över rörsättning i långsamfilterbädden under drift. Till vänster ses ett filter med ett lager med en lägre mättad hydraulisk konduktivitet (K). Till höger ses ett filter där hela sandbädden har samma mättade hydrauliska konduktivitet. (Figur: M. Mellander)



Figur 5. Hur tryckfallet i fall A och B, se figur 4, skulle fördelats över sandbädden.

3.4 Kemisk fällning

Kemisk fällning är en vanlig behandlingsmetod vid ytvattenverk och består vanligtvis av tre stegen flockning, sedimentering och snabbfiltrering. Den kemiska fällningen har betydelse för långsamfiltret, då denna ofta utgör föregående reningssteg och dess funktion därmed påverkar kvaliteten på det vatten som tillförs långsamfiltren. I K. Andersons studie 2006, av igensättningar av långsamfilter på Östby vattenverk, drogs slutsatsen att just rester av aluminiumflockar sannolikt var vad som orsakade dessa problem.

3.4.1 FLOCKNING

I sjövattnet förekommer partiklar, såsom humusämnen och alger, som är för små för att sedimentera eller kunna filtreras bort i ett snabbfilter. Partiklarna är normalt sett negativt laddade och repellerar därför varandra. Genom att tillsätta speciella fällningsmedel neutraliseras partiklarnas negativa laddning. Attraherande van der Waals-krafter mellan partiklarna gör nu så att partiklar slås samman och bildar sedimenterbara ”flockar”. Flockningsmedlen baseras ofta på aluminiumsulfater eller järnsalter. Själva anläggningarna som används för flockning består ofta av en rad bassänger med omrörning för att stimulera flockbildningen. Utöver omrörning är pH och temperatur viktiga faktorer för en lyckad flockning (Johansson, 2010).

3.4.2 ALUMINIUMSULFAT

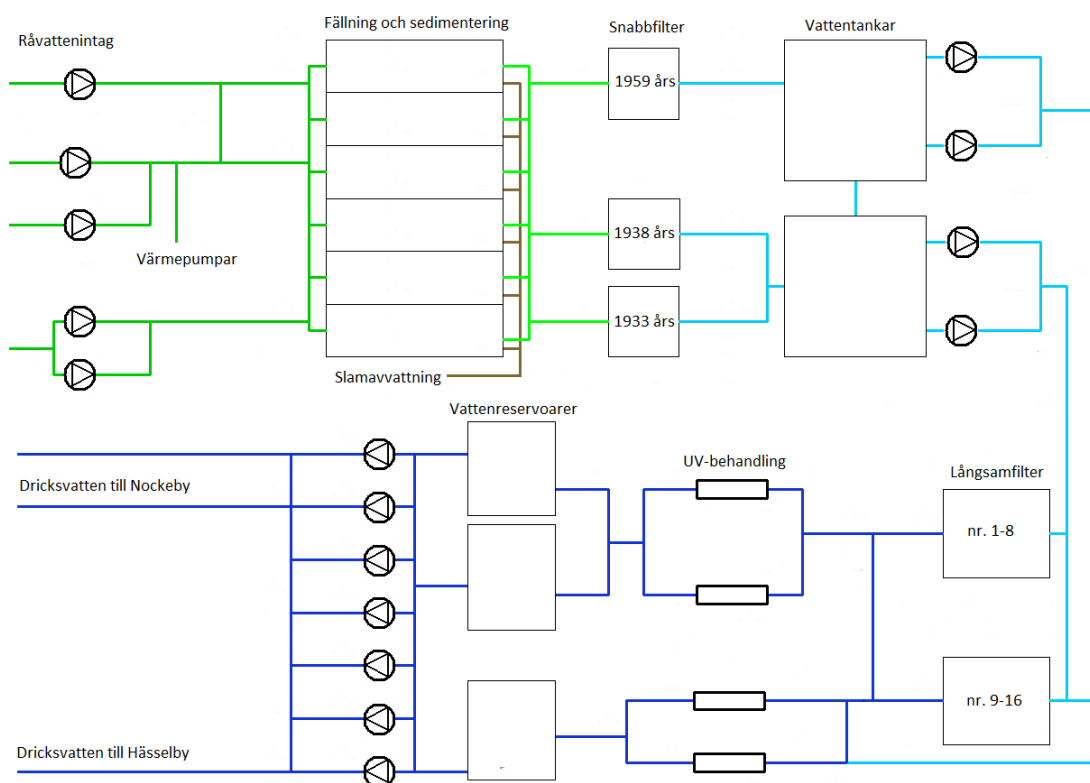
Aluminiumsulfatet levereras ofta som ett salt där aluminiumsulfatet har formeln $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Antalet vattenmolekyler oftast är 14, men även kan vara 18. När saltet löses upp i vatten uppstår en reaktionsjämvikt mellan en lång rad föreningar mellan vatten och aluminium. Det aluminium som inte kan lösas i vattnet bildar aluminiumhydroxid, $2\text{Al}(\text{OH})_3$ (s) som är den gelartade substans som primärt orsakar flockning. Aluminiumhydroxidens löslighet beror på både pH och temperatur. För att få bästa flockningsresultat regleras vattnets pH för att erhålla minsta möjliga löslighet, vilket vid normal temperatur är inom pH-intervallet 5,5–7,7 (Crittenden et al., 2005; Johansson, 2010).

4 Lovö vattenverk

Här ges en kort presentation av Lovö vattenverk som främst syftar till att ge en överblick över reningsprocessen på verket. Lovö vattenverk byggdes år 1933 och är beläget på Lovö i Ekerö kommun. Verket förser de norra och västra delarna av Stockholm med vatten och levererar årligen cirka 57 miljoner kubikmeter dricksvatten.

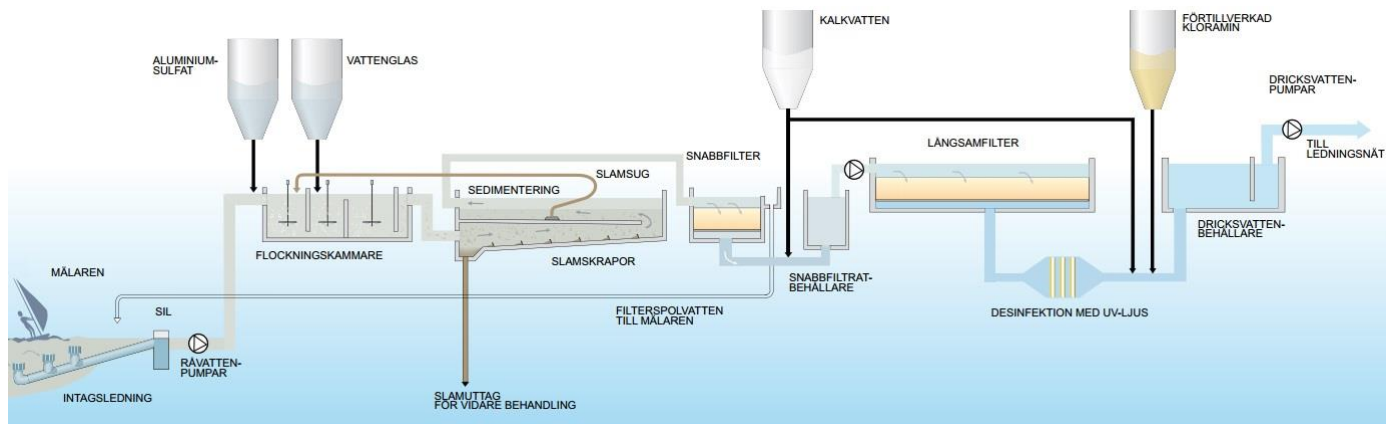


Figur 6. Flygfoto över Lovö vattenverk i början på 2000-talet.



Figur 7. Processkedjan vid Lovö vattenverk, ritad utifrån processbild i styrsystemet Cactus. (Figur: M. Mellander)

Råvattnet tas in på mellan 5 och 23 m djup i Mälaren och silas. Vattnet flockas därefter med aluminiumsulfat och vattenglas samt sedimenteras. Efter sedimenteringen sker en snabbfiltrering. Nya snabbfilter byggdes till 1938 och 1959, vilka nu går parallellt med filtren från 1933. Efter snabbfiltreringen kalkas vattnet, för att höja dess pH, och leds ut på långsamfiltren. Som ses i figur 7 förses långsamfilter nr 1-8 främst av snabbfiltren från 1933 och 1938, medan långsamfilter nr 9-16 huvudsakligen får sitt vatten från 1959 års snabbfilter. Efter långsamfiltreringen sker ytterligare kalkning och tillsats av kloramin. Slutligen UV-behandlas vattnet och lagras i tankar innan det pumpas ut till konsumenten.



Figur 8. Processkedjan vid Lovö vattenverk. (Stockholm Vatten, 2015)

5 Långsamfiltren på Lovö vattenverk

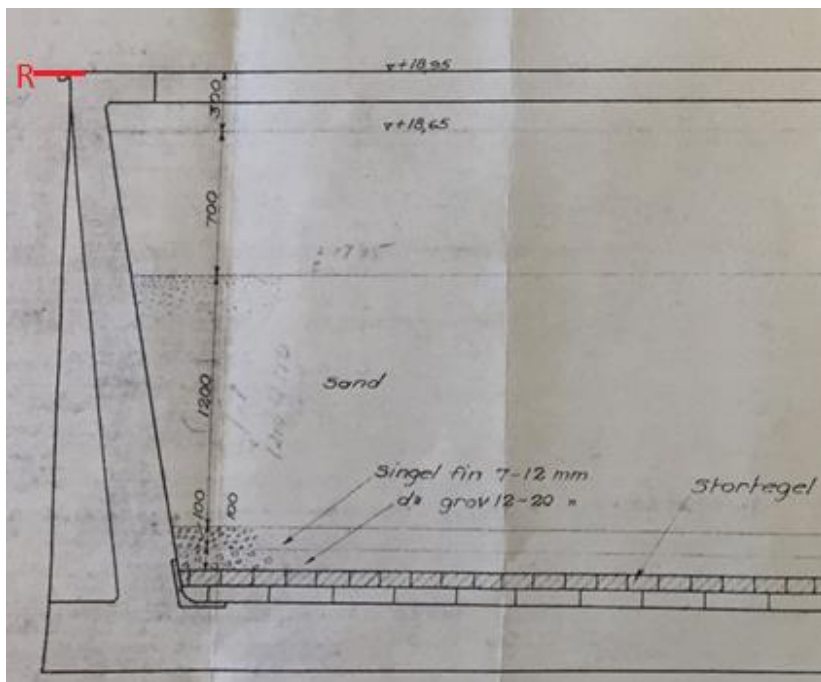
Kapitlet börjar med att beskriva långsamfiltrens konstruktion för att därefter redogöra för de olika stegen i filterrensningen.

5.1.1 KONSTRUKTION

Filtren utgörs i grunden av betongbassänger, vilka är 60m långa och 36m breda. I botten ligger stortegel, vilket använts för att bygga upp ett dräneringssystem i filtrets botten. Ovanför teglet ligger två övergångslager med singel, på vilket filtersanden vilar. Filterkonstruktionen visas i detalj på figur 9-10. Flödet styrs med hjälp av flödesmätare och reglerventil på utloppet. I normalfallet fördelas flödet jämnt mellan filtren, men flödet kan minskas eller ökas i varje filter individuellt efter behov.



Figur 9. Miniaturmodell av sandfiltren. Till vänster ses en tvärsektion av ett filter, där en tvärsektion av en kanal kan ses. Till höger ses en längdsektion i kanalen, där även utloppet ses i filtrets underdel. I den högra delen av bilden visas även inloppet som en ränna i filtrets ovandel. (Foto: M. Mellander)



Figur 10. Ritning som beskriver uppbyggnaden av tegelbädden, övergångslagren och sandbädden. Filtrets ovkant används som referensnivå i övriga delar av rapporten och är utmärkt i figuren med ett rött "R" i figurens övre vänstra hörn. (Foto: M. Mellander)

5.2 Rensningsförfarande

Rensningsförfarandet kartlades till stor del genom intervjuer med personal vid Stockholm Vatten. Nuvarande rensningsförfarande studerades även genom att närvara vid rensningar. Långsamfiltren rensas rutinemässigt två gånger per år, en gång på våren och en gång på hösten. Under själva rensningsförfarandet och en kortare tid därefter tas filtret ur produktion, vilket reducerar vattenverkets totalakapacitet under denna period. Tiden då det rensade filtret är ur produktion är längre då en djuprensning genomförs. Blir tryckfallet för högt i något filter kan detta rensas en extra gång, utöver de två schemalagda årliga rensningarna. På vintern genomförs inga rensningar eftersom maskinen som används för att tvätta sanden då riskerar att frysa sönder. Istället åtgärdas kritiskt höga tryckfall genom frysning. Detta innebär att vattennivån i filtret sänks av så att is bildas i sandbäddens överdel. Isbildningen medför att filterhuden spricker upp och skapar kanaler där vattnet kan flöda genom.

5.2.1 AVTAPPNING

Då ett filter skall rensas stoppas tillflödet till filtret dagen innan själva rensningsförfarandet är planerat att genomföras och töms under natten. Vatten töms ut med en hastighet av $210\text{m}^3/\text{h}$ och när vattenytan står 10cm ovanför sandytan stoppas tömningen. Då morgonskiftet tar vid nästföljande dag återupptas tömningen, vilken fortgår ett par timmar. Mängden vatten som töms är en avvägning utifrån drifterfarenhet. Töms för lite blir filtret svampigt att köra på, men ju mer filtret töms desto längre tid tar återfyllnaden (Lindquist, pers. medd.).

5.2.2 SKRAPNING

När filtret väl är torrlagt läggs en flyttbar metallramp ned i filtret, vilken används för att transportera ned en liten hjullastare av typen Volvo L30B Zsx i filtret. Hjullastaren är försedd med en speciell skopa, försedd med en i höjdled justerbar metallcylinder, se figur 11. Denna ställs in så att en ca 4cm stor glipa bildas mellan skopans underkant och cylindern.

Mängden sand som skalas av är dock även beroende av hur skopan vinklas och i praktiken uppskattas att 1,5-3cm skalas av filterytan. Vid normal rensning skrapas hela filterytan systematiskt av en gång på detta sätt. Vid djuprensning används samma inställning på skopan, men filtret skrapas istället fler gånger. Detta tills att det uppskattas att ett ca 15cm tjockt lager skrapats av (Larsson, pers. medd.).

Då metallcylindern på skopan gör det omöjligt att rensa filtrets kanter rensas dessa istället med en skopa utan metallcylinder. Denna rensning kompletteras även med att för hand ta bort den sand som maskinen missat. Sanden som skrapats av transporteras med hjälp av ett transportband, se figur 12, till ett traktorflak, med vilket sanden sedan transporteras till sandtvätten där den tvättas omgående. När hela filterytan skrapats av jämnas den till genom att en skrapa dras i en kätting efter den lilla hjullastaren, se figur 13. Hjullastaren tas upp ur filtret med hjälp av den flyttbara rampen.



Figur 11. Den mindre hjullastaren under rensningen av filter 4. Notera den för avskrapningsdjupet viktiga vinkeln på skopan. (Foto: M. Mellander)



Figur 12. Transport av avskrapad sand med hjälp av transportband. (Foto: M. Mellander)



Figur 13. Filterbädden jämnas till sedan hela ytan skrapats av. Till vänster ses en av provgroparna som grävdes för provtagning. (Foto: M. Mellander)

5.2.3 SANDTVÄTT

Sanden som skrapats av från filterbädden körs direkt till Lovös sandtvätt. Här töms den ned i ett förvaringsutrymme, för att där blandas med vatten och pumpas in i själva sandtvätten, se figur 14. I sandtvätten hamnar sanden först i en cylinderformad bassäng, där en stor skruv transporterar den framåt, allt medan sanden sköljs med rent vatten. Vid bassängens ände samlas sanden upp av perforerade skovelhjul. Under fortsatt sköljning med rent vatten transporterar dessa sanden till ett transportband. Detta förflyttar sanden till högarna med tvättad sand, där den förvaras tills ren sand behövs för återfyllnad av något filter.



Figur 14. I förgrunden ses sandtvätten. I bakgrunden ses traktorkärran som precis tippat av sand ned i förvaringsutrymmet. (Foto: M. Mellander)

5.2.4 SANDÅTERFYLLENAD VID DJUPRENSNING

För varje rensning minskar sanddjupet i filtren, vilket till slut når en lägsta nivå för vad som är önskvärt. Då sker en djuprensning, varefter filtret återfylls med tvättad sand till den ursprungliga sandnivån. Vid återfyllnaden används en släpförsedd traktor av typen Valmet 8150, en hjullastare av typen Caterpillar IT 14G samt den mindre hjullastaren av typen Volvo L30B Zsx, se figur 16. Den stora hjullastaren och traktorn används i huvudsak till att lasta och transportera tvättad sand från upplaget till filtret. Här byggs en sandramp upp på ett ställe vid filtrets kant, vilken sedan används för att köra ned i filtret, se figur 15. Traktorn och den stora hjullastaren kör därefter ned i filtret och tömmer sanden, varefter den mindre hjullastaren används för att jämna ut sanden. Filtret återfylls från sandrampen och bortåt, där de sista ställena som återfylls är utrymmet vid sidan av rampen. När en tillräcklig mängd sand har tillförts filtret jämnas filterytan ut och en flyttbar metallramp används slutligen för att få upp den mindre hjullastaren ur filtret.



Figur 15. Sand transporteras ned i filtret med hjälp av sandrampen. (Foto: M. Mellander)



Figur 16. Den större hjullastaren och traktorn med släp lämnar sand (till höger) medan den mindre hjullastaren jämnar ut sanden (till vänster). (Foto: M. Mellander)

5.2.5 ÅTERFyllnad och Tagande i Drift

Då rensningen är avslutad påbörjas återfyllnaden omedelbart. Dricksvatten tillförs filtret underifrån för att undvika att luft fastnar i filterbädden.

Påfyllnaden underifrån fortgår tills vattennivån står i nivå med filtrets inlopp, detta för att undvika att sand spolats bort vid de delar av filtret som ligger nära inloppet. Då denna vattennivå uppnåtts övergår återfyllnaden till att ske via inloppet. Det rensade filtret körs därefter med ett lågt flöde, ca 200m³/h, där vattnet leds tillbaka till Mälaren de första 10 timmarna. Då filtermotståndet ofta är högt direkt efter rensningen körs det nyrensade filtret ofta med ett relativt lågt flöde ytterligare en tid, till dess motståndet gått ned något.

5.2.6 MASKINPARK

Traktor: valmet 8150. Tjänstevikt 5090kg Införskaffad i juni -99

Hjullastare liten: Volvo L30B Zsx Införskaffad 2004

Hjullastare stor: Caterpillar IT 14G

5.2.7 TIDIGARE RENSNINGSFÖRFARANDE

Skrapning

Hjullastaren Volvo L30B Zsx införskaffades 2004 och ersatte då en bandförsedd kompaktlastare av modell Mustang 2070 som fram till dess använts för skrapning av filtren, se figur 17. Av bilden framgår att även mustangen använde den cylindarförsedda skopan vid rensning. Mustangen köptes i sin tur in 1984 och innan dess skrapades filterhuden av för hand med något slags skrapor. Gällande mängden sand som skrapades av så rensades filtren tidigare ända ned till singlet i botten vid djuprensningar. Övergången till att istället endast avlägsna ca 12cm skedde någon gång under 1980-talet (Svedberg, pers. medd.).

Återfyllnad

Gällande exakt vilket vatten som använts vid återfyllnaden råder delade meningar kring huruvida snabbfiltrat eller dricksvatten använts tidigare.

Sandtvätt

Den sandtvätt som används idag införskaffades i slutet av 2009. Tvättningen av sanden har dock alltid skett på ett liknande sätt, där tidigare sandtvättar haft en konstruktion och funktion lik den som används idag (Svedberg, pers. medd.).

Sandåterfyllnad

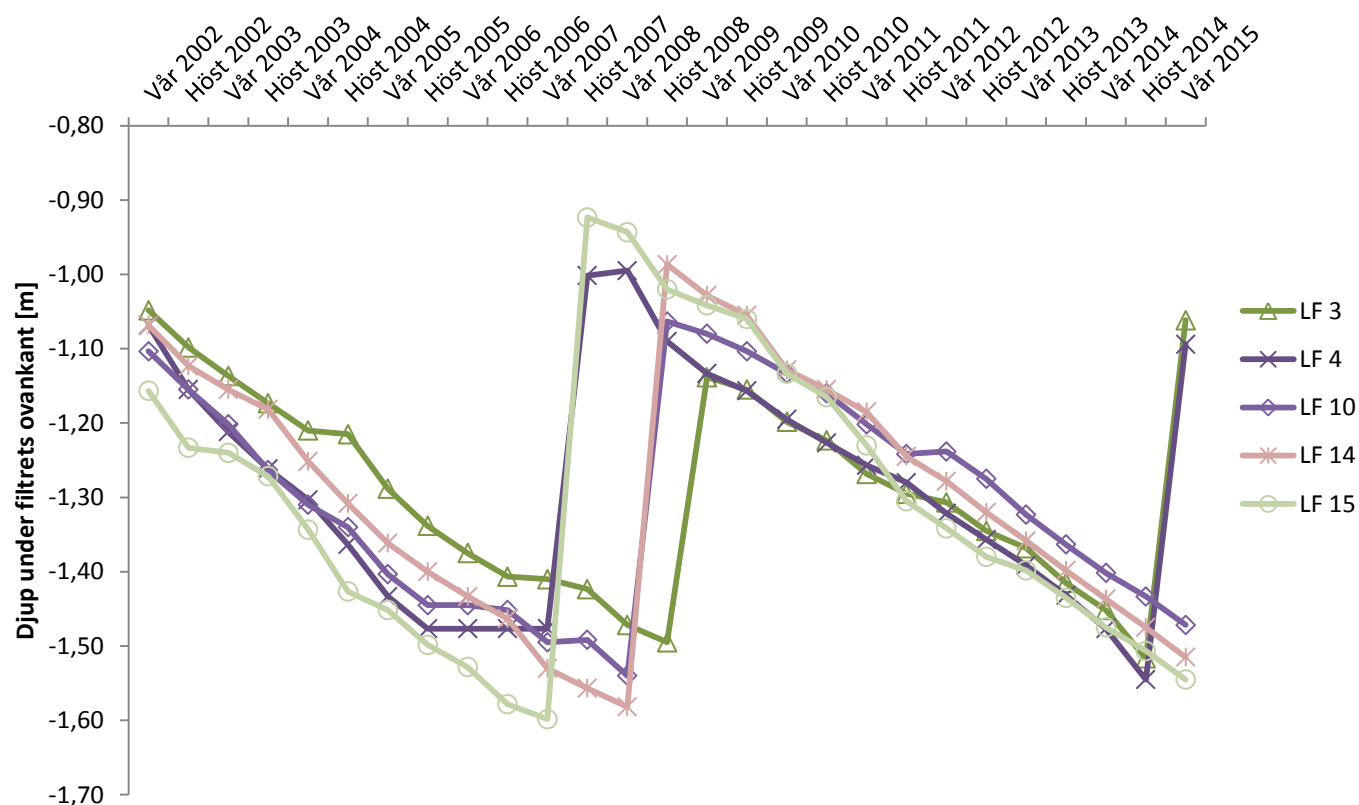
Återfyllnaden med sand skedde tidigare med hjälp av transportband som ställdes på rad, se figur 17. År 1999 införskaffades traktorn av modellen Valmet 8150 som tillsammans med kärran idag används för att transportera sanden till filtren.



Figur 17. Sandåterfyllnad efter djuprensning år 1989. Foto tillhandahållet av Börje Larsson vid Stockholm Vatten.

5.3 Sandhöjden i filtren

Praktiska faktorer så som rådande efterfrågan och personaltillgång begränsar antalet djuprensningar som kan genomförs årligen och vanligtvis genomförs 2st. Då det finns 16 långsamfilter totalt djuprensas filtren ungefär vart 8:e år, se figur 18. Under 80-talet övergick rensningsförfarandet vid djuprensning från att omfatta samtlig kvarvarande sand, till att endast omfatta ca 15cm (Svedberg, pers. medd.). Således finns ett lager i filtrens underkant som inte rensats sedan denna övergång. Det aktuella rensningsförfarandet medför variationer i hur mycket sand som tillförs filtren vid återfyllnad, samt hur mycket som skrapas av vid rensningarna. Således uppstår en variation gällande sandnivån i filtren innan rensning. Om samtliga filter under de senaste 13 åren tas med i bedömningen varierar sandnivån innan djuprensning mellan 1,61 och 1,50m under filtrens ovankanter. Till detta tillkommer variationen då själva skrapningen vid djuprensningen genomförs. Således kan ingen exakt nivå bestämmas under vilken sanden inte rensats sedan övergången på 80-talet. Vid djuprensning är för närvarande målet att skrapa av 15 cm innan tvättad sand tillförs. Utifrån detta och data över sandnivåer kan dock en ungefärlig nivå, på ca 1,76m under filtrets ovankant, fastställas, under vilken sanden inte rensats på minst 16 år. Sanden på ett djup av 1,76m till 1,65m under filtrets ovankant blir ett slags övergångslager vilket ibland rensas vid vissa men inte alla djuprensningar.



Figur 18. Sandhöjden i de långsamfilter som undersöktes vid efter respektive ytrensning. Figur utifrån data tillhandahållen av Börje Larsson vid Stockholm vatten.

6 Metod och material

I kapitel 6.1 beskrivs ett antal hypoteser kring vad som kan ha orsakat kapacitetsminskningen. Metodvalet presenteras i nästföljande kapitel, där metoderna motiveras utifrån de uppställda hypoteserna. Därefter ges en kort redogörelse för vilka filter som valts att studeras samt en motivering till valet. Kapitel 6.4-6-8 beskriver själva genomförandet.

6.1 Hypoteser

Nedan beskrivs hypoteserna kring orsakerna till den upplevda kapacitetsminskningen samt hur dessa kan ha uppkommit. Hypoteserna låg till grund för undersökningens metodval.

1. *Ackumulering av materia i filtrets undre del.* Filterkapaciteten är som störst när filtret är nyrensat, varefter den minskar med tiden fram till nästa rensning, se kapitel 3.1.4. Filtrens understa 60-70cm rensas aldrig och en ackumulering av materia här skulle därför orsaka en permanent kapacitetsminskning. En tidigare undersökning av K. Andersson 2006 antydde att detta problem kan förekomma hos långsamfilter. Gällande vad som kan ha orsakat ackumuleringen finns följande hypoteser:
 - *Fina sandpartiklar*
Finare sandpartiklar skulle ha kunnat röra sig nedåt i filterbädden och ackumuleras i filtrets undre del. En sådan ackumulation skulle orsaka sandlager med mindre porer och därmed större flödesmotstånd (Berglund, pers. medd.).
 - *Aluminiumflock*
K. Andersson kom i sin studie 2006 fram till att de problem som upplevdes vid Östby vattenverks långsamfilter sannolikt berodde på en ökad belastning av aluminiumflock.
 - *Organiskt material*
Vid djuprensningen på Lovö vattenverk skrapas endast ca 15cm bort vid djuprensningen, vilket är mindre än det djup där en tillväxt av mikroorganismer sker. Således borde en ackumulation av organiskt material kunna ske i filtrets understa lager.
2. *Kompaktering vid rensning.* Dagens användning av maskiner vid filterrensningen skulle kunna ge upphov till en kompaktering som inte förekom tidigare. En eventuell kompaktering skulle då minska filtrens kapacitet både genom att filterbäddens yta skulle vara mer kompakterad efter rensning än tidigare och genom att filtrets undre del skulle vara mer kompakterad.
3. *Högre belastning av filtren.* Då partiklar ackumuleras i ett filter ökar dess hydrauliska motstånd. Tillförs mer partiklar per tidsenhet idag torde därför motståndet öka proportionellt snabbare idag än för 40 år sedan. Denna ökning skulle kunna orsakas såväl av en förändrad vattenkvalitet som av en högre filtreringshastighet.

6.2 Metodval

6.2.1 KARTLÄGGNING AV FILTERFUNKTION OCH BELASTNING

En kapacitetsminskning skulle kunna ske på många olika sätt. För att skapa en bättre bild av hur kapacitetsminskningens former undersöktes därför hur filtrens funktion och kapacitet förändrats över tiden. Filtrens funktion undersöktes utifrån tryckfall, pordiameter, rensningar och frysningar. För att undersöka om filterbelastningen hade ökat undersöktes även filterbelastningen över tiden, med avseende på snabbfiltratets kvalitet och långsamfiltrens filtreringshastighet.

6.2.2 UNDERSÖKNING AV FILTERBÄDDEN

För att utreda kompaktering av filterbädden samt ackumulering av materia i filterbäddens underdel gjordes följande undersökningar:

Mätningar med nivåör

Kompaktering eller ackumulering av materia i filterbädden ger upphov till regioner med låg hydraulisk konduktivitet, som skapar relativt stora tryckfall då vatten strömmar genom dem. Med hjälp av rör nedstuckna olika djupt ned i filterbädden mättes vattennivån vid olika nivåer i filterbädden. Utifrån dessa nivåer kunde tryckfallet beräknas mellan olika nivåer i filterbädden och regioner med stora tryckfall identifieras.

Provtagning och analys av filtersand

Kompaktering av filterbädden och ackumulering av materia i filtrets underdel undersöktes genom provtagning och analys av sand från ett antal olika platser och nivåer i filterbädden. För att undersöka eventuell ackumulering av aluminiumflock eller organiskt material analyserades aluminiumhalt, glödrest och turbiditet hos provers lakvatten. För att undersöka eventuell ackumulering av fina sandpartiklar analyserades provers kornstorleksfördelning. I ett av filtren genomfördes även en mikroskopering för att försöka identifiera eventuella skillnader i sandkornens form och storlek samt för att visuellt undersöka sandens renhet.

Eventuell kompaktering undersöktes genom analys av provers porositet och torra skrymdensitet. För att undersöka kompakteringseffekter av maskinerna som användes vid rensningen av filtren togs prover vid platser vilka bedömdes som olika hårt trafikerade. Som ett komplement till tryckfallsmätningarna analyserades provernas hydrauliska konduktivitet för att kunna identifiera kompakterade eller igensatta lager. I samband med provtagningen genomfördes även en okulär besiktning av filterbäddens profil och eventuell sandrörelse vid återfyllnaden av filtren. Själva provtagningen, grävandet av provgropar och nedstickandet av rören i sanden gav även en uppfattning om kompakteringsgrad i filtrens olika delar.

6.3 Val av filter för vidare studie

De filter som undersöktes valdes utifrån att det var av intresse att studera både hög- och lågpresterande filter. Detta för att få en uppfattning om vilka faktorer som har störst inverkan på kapaciteten. Filtervalen skedde i samråd med personal på verken och redovisas i tabell 3.

Tabell 3. Valda filter för provtagning och deras uppskattade kapacitet.

Filter, nr:	Uppskattad kapacitet:
4	hög
10	hög
3	medel
14	låg
15	låg

6.4 Kartläggning av filterfunktion, belastning och vattenkvalitet

6.4.1 METODBESKRIVNING

I denna del av studien jämfördes sentida data med data från perioden 1967-1973, då Lovöverket producerade som mest vatten. Den sentida tidsperioden valdes till 2008-2014, då filtren under denna period bedömts ha en lägre kapacitet. Undersökningen syftade till att ge en djupare förståelse till hur filtrens funktion förändrats. Vidare syftade den till att ytterligare kartlägga skillnader i filtrets belastning och drift, för att försöka identifiera möjliga orsaker till den upplevda kapacitetsminskningen.

6.4.2 FILTRERINGSHASTIGHET SAMT RENSNINGAR OCH FRYSNINGAR

Filtreringshastighet och medeldrifttid

Filtreringshastigheten är ett mått på filterbelastning, där en högre filtreringshastighet innebär en högre tillförsel av partiklar och därmed en snabbare igensättning. När filtret sätter igen ökar tryckfallet över filtret och når till slut en nivå där det måste rensas eller frysas. Medeldrifttiden är den genomsnittliga tiden mellan rensningar samt frysningar och påverkas därmed indirekt av filtreringshastigheten. Lovö vattenverk producerar idag mindre vatten än under 1967-1973 och medeldrifttiden borde därför vara lägre. För perioden 1967-1973 hämtades data för filtreringshastighet och medeldrifttid ur dessa års utgåvor av skriften "Förvaltningen", (Agrenius, 1967-1969; Blom L., 1970-1973). För perioden 2008-2014 hämtades data från Stockholm Vattens månadsrapporter över total producerad volym långsamfilterfiltrat. Utifrån dessa data beräknades sedan filtreringshastigheten utifrån förenklingen att vattenproduktionen fördelats jämnt under månaden och jämnt över filtren. Utifrån arkivmaterial med nedtecknade datum och filternummer för rensningar samt frysningar kunde drifttiden mellan rensningarna beräknas.

Antal rensningar och frysningar per år

Eftersom extra rensningar sätts in om tryckfallet blir för högt i något filter, blir det årliga antalet rensningar ett enkelt mått på filtrens funktion. För perioden 1967-1973 hämtades data över antalet rensningar och frysningar per år ur dessa års utgåvor av skriften "Förvaltningen", se (Agrenius, 1967-1969; Blom, 1970-1973). För perioden 2008-2014 hämtades data från arkivmaterial med nedtecknade datum och filternummer för rensningar och frysningar.

Rensningarnas och frysningarnas fördelning mellan filtren

För att kunna avgöra om vissa filter rensades oftare än andra studerades hur rensningarna och frysningarna fördelades mellan filtren. En hög rensningsfrekvens indikerar någon form av störning, där en igensättning i filtrets underdel skulle kunna vara en trolig orsak. Data kring fördelningen av rensningar och frysningar mellan filtren fanns endast tillgänglig för perioden 2008-2014 och därmed har dessa endast undersökts för denna period. Data hämtades från arkivmaterial med nedtecknade datum och filternummer för rensningar och frysningar.

6.4.3 TRYCKFALL

Storleken på det tryck som går förlorat då vattnet strömmar genom sandbädden beror bland annat på hur stora porerna är i sandbädden, se ekvation 10 i kapitel 3. Tryckfallet kan därmed ge viktig information kring en eventuell igensättning av filtrets undre del samt i utvärderingen kring om marktrycket från maskinerna komprimerar filterbädden. Finns trender med ökande tryckfall kan detta alltså tyda på denna typ av problem. Data för perioden 1967-1973 fanns endast att tillgå för filter 4 och 14, vilket gjorde att undersökningarna utgick från dessa filter. Då tryckfallet ansågs vara en central parameter för utvärderingen av filterfunktionen och projektets hypoteser, studerades det både som årliga medelvärden, dygnsmedelvärden och i samband med rensning. På Lovö vattenverk mäts tryckfallet med tryckfallsgivare.

Årliga medelvärden

Årliga medelvärden för tryckfallen ger en överblick över filtrens funktion och om några problem med igentäppta eller komprimerade porer förekommer. För perioden 1967-1973 hämtades data från Stockholm Vattens fysiska arkiv. I arkivmaterialet fanns två värden angivna för varje dag. Då årsmedelvärdena skapades utifrån dessa data användes förmiddagsvärdet för vardagarna i vecka 1, 10, 20, 30 och 40. För perioden 2008-2014 användes data från Stockholm Vattens it-system "Cactus CSX". Härifrån hämtades dygnsmedelvärden för tryckfallet, vilka sedan användes för att beräkna årsmedelvärdet.

Dygnsmedelvärden

Att studera tryckfallet som dygnsmedelvärden möjliggör identifiering av trender och ger en mer detaljerad bild av filtrets funktion. För perioden 1967-1973 fanns endast det ovan nämnda fysiska arkivmaterial att tillgå. En digitalisering av de dryga 2500 datapunkterna ansågs för tidskrävande, varför denna period utelämnades från denna undersökning. För perioden 2008-2014 användes data från Stockholm Vattens it-system "Cactus CSX". Där hämtades dygnsmedelvärden för alla dagar i perioden.

Före och efter rensning

Enligt rådande teori kring långsamfilters funktion sker igensättningen främst i filtrets översta centimetrar, vilka därmed ger upphov till en stor del av tryckfallet över filtret. Vid rensning avlägsnas detta lager och tryckfallet faller därmed. Skulle en igensättning eller komprimering av filtrets undre del ha skett skulle detta minska rensningens effekt. Tryckfallet efter rensning skulle då vara förhöjt jämfört med ett filter utan någon störning i undre delen. Då sandbäddens tjocklek påverkar tryckfallet hade det varit önskvärt att jämföra motståndet efter rensning vid två tillfällen då sandnivån varit densamma. För den tidigare perioden fanns dock ej data över sandhöjd i filtret att tillgå, varför ett sådant val ej var möjligt. Istället valdes att jämföra de bägge filtren utifrån ett godtyckligt valt år i varje tidsperiod.

För perioden 1967-1973 hämtades data från Stockholm Vattens fysiska arkiv. I arkivmaterialet fanns två värden angivna för varje dag. Identifieringen av rensningstillfällena skedde utifrån kunskap om när på året filterrensningen sker, samt genom att identifiera kraftiga fall i tryckfallsvärdena. Utifrån varje identifierad rensning togs förmiddagsvärdena för varje dag 14 dagar före och efter rensningarna. För perioden 2008-2014 identifierades tidpunkten för rensningarna från arkivmaterial med nedtecknade datum och filternummer för rensningar och frysningar. Via Stockholm Vattens it-system "Cactus CSX" hämtades dygnsmedelvärden för tryckfallet 14 dagar före och efter rensningarna.

6.4.4 PORDIAMETER

Igensättning av filtrets undre del och kompaktering av filterbädden är två av hypoteserna kring vad som skulle kunna orsaka den upplevda kapacitetsminskningen. I båda fallen är det en minskning av porernas storlek som skulle orsaka kapacitetsminskningen. Kan en minskning av pordiametern påvisas skulle det tala för att en igensättning eller kompaktering skett. Fördelen med att använda pordiametern som mått på filterfunktion jämfört med tryckfall är att tryckfallet till viss del påverkas av vattentemperaturen och sandbäddens tjocklek.

Beräkningarna av långsamfiltrens pordiameter utfördes för filter 3, 4 och 14 samt som ett medelvärde för filter 1-16. Beräkningarna utgick från ekvation 10 i kapitel 3, där pordiametern löstes ut. Data över flöde, vattentemperatur och tryckfall hämtades som dygnsmedelvärden från Stockholm Vattens it-system "Cactus CSX". Det totala tryckfallet över filterbädden användes, vilket gjorde att den pordiameter som erhöles var ett genomsnitt av hela filterbäddens vattenförande porsystem. Vid de två årliga schemalagda rensningarna mäts sandnivån i filtret och mätvärdena arkiveras. Av de två perioderna som undersöktes fanns data bara tillgänglig för perioden 2008-2014. Vid det fåtal rensningar som utförs utöver de schemalagda görs ingen mätning av sandnivån. Beräkningarna av den genomsnittliga pordiametern för samtliga filter utgick från dygnsmedelvärden över flöde och tryckfall i filter 1-16. Sandnivån som användes var ett medelvärde av sandnivån i samtliga filter. Här gjordes dock förenklingen att vårrensningen skedde den 10/4 och höstrensningen skedde 10/11 i samtliga filter.

I ekvation 10 sattes tortuositetsfaktorn till 2, för att kompensera för porsystemets "krokighet". Vattentemperaturen som användes var uttemperaturen i verkets tre utgående ledningar, från vilka en medeltemperatur beräknades för varje dag. Temperaturen användes sedan för att fastställa dynamisk viskositet och specifik vikt med hjälp av tabell 4 nedan. Specifik vikt och dynamisk viskositet mellan de angivna datapunkterna beräknades med utifrån linjära regressioner för varje temperaturintervall.

Tabell 4. Specifik vikt och dynamisk viskositet för ett antal temperaturer (Clayton et al., 2010).

Temperatur [°C]	Specifik vikt [N/m ³]	Dynamisk viskositet [10 ⁻³ Ns/m ²]
0	9810	1,79
5	9810	1,51
10	9810	1,31
15	9800	1,14

Beräknat tryckfall

För att ge en bild över hur pordiameterens minskning påverkar tryckfallet användes ovan nämnda data och ekvation 10 för att beräkna ett teoretiskt tryckfall utifrån en fast pordiameter. Denna fasta pordiameter valdes individuellt för filtren till värden nära de största beräknade pordiametrarna de haft under mätperioden.

6.4.5 VATTENKVALITET

På Lovö vattenverk har ytterligare snabbfilter och långsamfilter byggts till under åren. I dagsläget finns i praktiken två parallella produktionslinjer med snabbfilter och långsamfilter. Snabbfiltren byggda 1959 levererar vatten till långsamfilter nr. 9-16, medan snabbfiltren byggda 1933 och 1938 levererar vatten till långsamfilter nr. 1-8. I undersökningen valdes att hålla värdena för de olika linjerna separata. Detta för att kunna se om den ingående vattenkvaliteten skiljde sig mellan långsamfiltren nr. 1-8 och långsamfiltren nr. 9-16.

Turbiditet

Ju högre turbiditet vattnet som tillförs långsamfiltren har, desto mer partiklar tillförs filtret. En ökad partikeltillförsel kan leda till snabbare igensättningar. En ökad turbiditet kan därmed påverka filtrets kapacitet. Årsmedelvärden för turbiditeten sammanställdes och jämfördes för att identifiera eventuella skillnader. För perioden 1967-1973 hämtades data från Stockholm Vattens fysiska arkiv. Den parameter som användes var turbiditeten i det okalkade snabbfiltratet (betecknades "S" i arkivmaterialet). Då årsmedelvärdena skapades utifrån dessa data användes förmiddagsvärdet för vardagarna i vecka 1, 10, 20, 30 och 40. I detta arkivmaterial fanns turbiditeten angiven i enheter baserade på formazin, vilka angavs ungefärligt motsvara ZP-enheter. Enligt (Johansson, 2003) motsvarar en ZP-enhet ungefär 0,012 FNU, vilket användes för att konvertera turbiditeten till FNU. För perioden 2008-2014 användes digital data som tillhandahölls av Stockholm Vatten.

Aluminiumhalt

På Lovöverket används en aluminiumbaserad fällningskemikalie i de tidiga reningsstegen. Denna avskiljs till största del vid sedimenteringen och snabbfiltreringen, men rester kan finnas kvar i snabbfiltratet. I K. Andersons studie 2006 av igensättningar av långsamfilter på Östby vattenverk drogs slutsatsen att just rester av aluminiumflockar sannolikt var vad som orsakade dessa problem. För perioden 1967-1973 hämtades data från Stockholm Vattens fysiska arkiv. Den parameter som användes var aluminiumhalten i det okalkade snabbfiltratet (betecknades "S" i arkivmaterialet). För perioden 2008-2014 användes digital data som tillhandahölls av Stockholm Vatten.

pH

pH är en viktig parameter främst för att den reglerar aluminiums löslighet, se kapitel 3.4.2. Ett förändrat pH kan därmed innebära att mer aluminium fälls ut och bidrar till igensättning av långsamfiltren. pH studerades här som årsmedelvärden för att tillsammans med aluminiumhalten kunna ligga till grund för en bedömning om filtren idag har en högre aluminiumbelastning. För perioden 1967-1973 hämtades data från Stockholm Vattens fysiska arkiv. Den parameter som användes var pH i det kalkade snabbfiltratet (betecknades "SK" i arkivmaterialet). För perioden 2008-2014 användes digital data som tillhandahölls av Stockholm Vatten. (Mätpunkterna som användes var SP12 och SP34)

6.5 Mätningar med nivåör

6.5.1 MÄTUPPSTÄLLNING OCH UTRUSTNING

För att komma ut en bit från filtrets kant konstruerades två träspänger som lades över de aktuella filtrens hörn, se figur 19. Spängerna stack upp 11 cm över filterkantens ovansida. Den del av spängerna som vette bort från filtrens hörn var 7,4m långa och det var här rören senare fästes. På spängernas utsida fästes plastklämmor av typen "scp 10-12s". Dessa fästes på olika höjd i två parallella rader, där varje par justerades med vattenpass för att sitta precis ovanför varandra.

Nivårören

Rören som användes för mätningarna var av rostfritt stål. Rören kapades utifrån vilka djup i sandbädden de var avsedda att mäta. Se tabell 5 för rörlängder.

Mätdjup

För att få en mer noggrann bild av det stora tryckfall som enligt teorin skulle sker vid ytan, valdes att mäta tryckfallet med kortare intervall nära ytan. Två mätpunkter i filtrets bottenlager användes, då undersökningen delvis syftade till att undersöka eventuell igensättning där. Efter att ha prövat metoden beslutades att tillföra ytterligare ett rör. Detta för att avståndet mellan grundvattenrören i ytan och de invid botten upplevdes som otillfredsställande stort. Dubbla rör användes för de minsta mätdjupen eftersom dessa ansågs vara mest störningskänsliga. Mätdjup och rörlängder redovisas i tabell 5.

Tabell 5. Längder och sättningsdjup för de nivå-rör som användes vid varje mätupställning.

Rörnummer:	1	2	3	4	5	6
Antal rör [st]:	2	2	1	1	1	1
Totallängd [cm]:	182	187	192	215	245	217
Planerat avstånd från sandyta [cm]	5	10	15	75*	105*	40
Planerat avstånd från filterbotten [cm]	-	-	-	30	1	-

*Ungefärligt värde, uppskattat utifrån uppmätt sandhöjd i de aktuella filtren.



Figur 19. En av de två spängerna, med monterade nivå-rör, som användes i studien. (Foto: M. Mellander)

6.5.2 TILLVÄGAGÅNGSSÄTT VID ISÄTTANDE AV GRUNDVATTENRÖR

Vid isättandet av rören spändes de först fast i den övre klämman och därefter i den undre. De var således fastspända i båda klämmorna när röret trycktes ned mot botten. När rörmynningen nuddade sandytan mättes avståndet mellan rörets ovankant och spångens ovankant. Utifrån vilket djup ned i sandbädden som var av intresse för mätning beräknades sedan vilken höjd över spångens ovankant röret skulle ha efter neddrivningen i sandbädden. Spångens höjd över filterkantens ovansida uppmättes till 11cm. För att undvika att sand kom in i röret användes en stång som försiktigt fördes ned i röret tills även denna kom i kontakt med sandytan. Detta läge markerades på stången med en spritpenna vid rörets ovankant. Härifrån trycktes röret ned i sanden, medan stången hölls stilla i förhållande till röret. Ju djupare röret trycktes ned i filterbädden, desto större motstånd möttes.

Detta resulterade i att endast rör 1, 2 och 3 kunde sättas till önskat djup enbart med hjälp av denna metod. Övriga rör trycktes ned så långt det var möjligt, varefter de drevs ned med hammare resterande sträcka. Detta gick till så att stängen slogs ned med en hammare ca 3cm, varefter ett förlängningsrör trädde på stängen. Förlängningsröret hade samma dimension som grundvattenröret. Påsättandet av förlängningsröret gjorde att de bägge rören tillsammans blev längre än stängen. På så sätt kunde då grundvattenröret drivas ned genom att hammaren slogs mot förlängningsrörets ovansida. Röret drevs ned till dess att det återtagit sitt ursprungliga läge i förhållande till stängen, vilket avgjordes med hjälp av markeringen på stängen. På detta sätt drevs grundvattenrören stegvis ned till sitt avsedda djup.

6.5.3 MÄTNING AV VATTENNIVÅER

Rörets höjd över vattenytan i filtret mättes med en tumstock. För att mäta vattenytan i röret användes ett egentillverkat mätinstrument. Detta instrument bestod av en koaxialkabel som var fäst till en ohm-meter. Den ände av kabeln som fördes ned till vattenytan var skalad och den inre delen av kabeln stack ut ca 1,2cm längre än kabelns yttre del. Kabelns nedre del var träd genom ett smalt rör och fastgjord i denna med eltejp vid rörets ovansida. Detta hade gjorts för att hålla kabeln rak. På röret hade även trätts en tättsittande o-ring. När den inre delen av kabeln kom i kontakt med vattenytan inne i röret gav ohm-metern utslag. Vid mätningen fördes kabeln försiktigt ned i röret till dess att mätaren gav utslag. Då drogs o-ringen ned så att den kom i kontakt med grundvattenrörets ovankant. Därefter drogs kabeln upp och avståndet mellan o-ringen och kabelns skalade ände mättes. För att vattennivåerna i grundvattenrören skulle hinna ställa in sig utfördes mätningarna först en dryg vecka efter det att grundvattenrören satts ned i filtren. En ytterligare förhoppning med detta var att filterhuden skulle hinna återbildas i någon mån och täppa igen den springa som oundvikligen uppstår mellan röret och sanden vid isättning.

6.6 Provtagning

I de olika filtren togs prover vid olika djup och platser i sandbädden, för att undersöka eventuella skillnader. Valen av provtagningsdjup gjordes till stor del med syfte att kunna undersöka eventuella avvikelser i filterbäddens understa ca 65cm, vilka aldrig rensas. För att undersöka eventuell kompaktering av filterbädden till följd av framförande av maskiner i filtren togs även prover på platser vilka uppskattades vara olika hårt trafikerade. Två typer av prover togs, cylinderprov och lösa sandprov. Cylinderprover togs för mätning av mättad hydraulisk konduktivitet och skrymdensitet, medan de lösa sandproverna användes för övriga analyser som utfördes. Provtagning nere i filterbädden skedde genom att en provgrop grävdes. Provgroparna grävdes så att en slät vertikal sida skapades. På denna sida mättes aktuella provtagningsdjup ut och markerades. Utifrån markeringen grävdes sedan ett trappsteg ut i sidan av provgropen, där provtagningen skedde.

6.6.1 POSITIONSANGIVELSE FÖR PROVPLATSER OCH MÄRKNING AV PROVER

Provplatsernas position mättes in enligt ett koordinatsystem och nedtecknades tillsammans med filternummer och provtagningsdatum. Denna mätning och märkning skedde för samtliga prov. Märkningen gjordes direkt på provbehållarna, utom vid cylinderprovtagningen. Varje cylinder hade ett stämplat nummer, vilket istället nedtecknades separat tillsammans med koordinaterna för det specifika provet. För enkelhetens skull anges de olika provtagningsplatserna i filtren som "plats 1", "plats 2" och "plats 3". Provtagningsplatsernas exakta position i filtren finns angivet i bilaga 1 där även det använda koordinatsystemet beskrivs. Notera att platsernas koordinater skiljer sig mellan groparna.

6.6.2 PROVTAGNINGSUTRUSTNING

Vid cylinderprovtagningen användes metallcylindrar avsedda för användning vid mätning av mättad hydraulisk konduktivitet. Dessa hade en innerdiameter på 72mm och var 10cm höga. Cylinderns undre kant var vassad för att underlätta provtagningen. Till cylindern användes även tätsittande plastlock och för ändamålet avsedda runda pappersark, av märket "Munktel". För neddrivandet användes en provtagningsanordning, vilken bestod av en metallstång fäst i en metallplatta. Metallplattan var rund med en upphöjning vid dess ytterkant, vilket gjorde att provtagningsanordningen passade på provtagningscylindrarna som ett lock. Plattan sattes mot provtagningscylinderns ovkant vid neddrivning, för att fördela trycket från hammarslagen jämnt över cylinderkanten. Vid provtagningen av lös sand användes plastburkar med en ungefärlig volym på 0,5L för förvaring av proverna. Ytterligare utrustning som användes under försöket var en gummihammare och ett 30m måttband.

6.6.3 PROVTAGNINGSFÖRFARANDE FÖR CYLINDERPROV

I de fall provtagningen inte skedde direkt på sandytan placerades provcylindern en bit in på de horisontella trappsteg som grävts i provgroparna. Den drevs lodrätt ned i marken med hjälp av provtagningsanordningen och en klubba. Cylindern drevs ned tills jordnivån i den överskred dess överkant med en dryg centimeter. En del av jorden intill cylindern grävdes bort för att komma åt att sätta på ett lock på cylindern. Den jord som överskred cylinderns överkant skrapades av med en förskärare så att en jämn sandyta bildades. På sandytan i cylindern placerades ett tunt runt papper och sedan ett lock. Därefter grävdes sanden bort runt cylindern och förskäraren drevs in ca 5cm och skapade en springa i sanden där en hand stacks in. Cylindern togs upp, alltmedan handen hölls kvar under jordprovet för att undvika att sand rann ut, vändes, och den överflödiga sanden skrapades av från cylinderns undersida. Undersidan försågs med runt papper och lock. De olika stegen i provtagningen kan ses i figur 20. Den jordfyllda cylindern vägdes och vikten jämfördes med den tidigare mätta vikten för den tomma cylindern, papper och lock.



Figur 20. Förfarande vid cylinderprovtagning, där första steget visas uppe till vänster och sista steget visas nere till höger. (Foto: M. Mellander)

6.6.4 PROVTAGNINGSFÖRFARANDE FÖR LÖSA SANDPROVER

För att dessa prover skulle vara så jämförbara med cylinderproverna som möjligt, uppsamlades även de lösa sandproverna med hjälp av en cylinder. Förfarandet var således detsamma som vid cylinderprovtagningen, men i detta fall tömdes sanden över i plastburkar istället för att fortsätta förvaras i cylindrarna. Två olika typer av plastburkar användes för uppsamlandet av de lösa sandproverna, utifrån vilka analyser som skulle utföras på proverna. De prover som skulle skickas till Eurofins för analys lades i plastburkar med rött lock, vilka sedan skakades väl för att blanda om sanden. Övriga lösa sandprover lades i plastburkar med vitt lock, vilka ej skakades. Totalt insamlades fyra burkar lös sand vid varje provdjup och grop.

6.6.5 FÖRVARING OCH TRANSPORT AV PROVER

Alla cylinderprover som skulle användas för mätning av mättad hydraulisk konduktivitet förvarades i kylskåp efter provtagning fram tills det att de transporterades till SLU i Uppsala för analys. För att möjliggöra mån undvika att utsätta proverna för stötar samt för att hålla dem kylda, transporterades proverna väl paketerade i en frigolitlåda med lock. Förvaringstiden varierade något för proverna men överskred aldrig 7 dagar innan de lämnades in för analys.

Av de fyra lösa sandprov som togs på varje plats ställdes två i kylskåp för kyld förvaring. Av dessa skickades en vidare till utomstående institut för analyser av glödrest, torrs substans och aluminiumhalt. Samtliga burkar märktes enligt följande "Filter Z, X[m], Y[m], A[m], B[m], Datum för provtagning".

6.6.6 TORKNING AV SANDPROVER

De prover som skulle genomgå analys av skrymdensitet och eller kornstorleksfördelning, torkades. Torkningen utfördes på geologiska institutionen i Uppsala. Här överfördes sanden från de cylindrar eller plastburkar de tills dess hade förvarats i, till formar i aluminiumfolie. Formarna var av typen "Ica basic folieform 8,5dl". Behållarna borstades noggrant ur för att ingen sand skulle gå förlorad vid överföringen. Då all sand var överförd ställdes proverna in i en torkugn av märket "Elektro Helios", vilken ställdes till 105°C. Proverna torkades på detta sätt i drygt 24 timmar. Prover och torkugn kan ses på figur 21.



Figur 21. Sandprover överförda i aluminiumfolieformar och inställda i torkugnen. (Foto: M. Mellander)

6.7 Analyser av sandprover

6.7.1 KORNSTORLEKSFÖRDELNING

Kornstorleksfördelningen bestämdes genom siktnings.

Mätuppställning och utrustning

För siktningsen användes ett antal siktråg med varierande maskstorlek. Utifrån siktningsresultaten från "filter 3-sanden" valdes att modifiera uppställningen genom att välja en något mer finmaskig grövsta sikt. Vidare lades ytterligare en sikt till uppställningen, se tabell 6. Vid siktningsen staplades trågen på varandra, med det mest grovmaskiga tråget överst och därefter med minskande maskstorlek. Översta tråget försågs med lock och understa tråget försågs med ett uppsamlingstråg. Under siktningsen användes utöver siktarna en skakmaskin av typen "Fritsch analysette typ 03-502". Mätuppställning och skakmaskin kan ses i figur 22.



Figur 22. Staplade siktråg, försedda med uppsamlingstråg samt lock och isatta i skakmaskinen. (Foto: M. Mellander)

Tabell 6. Maskstorlek för de olika siktrågen som användes vid försöken. Observera att inte samma siktuppställning användes till samtliga filter.

<i>Filter 3</i>	<i>Filter 10 och 14</i>
Maskstorlek [mm]	Maskstorlek [mm]
4	2
1	1
0,5	0,85
0,25	0,5
0,125	0,25
0,063	0,125
	0,063

Utförande

Varje siktskiva rengjordes och vägdes, varefter siktrågen staplades enligt ovan och försågs med uppsamlingstråg i botten. Sandprovet som skulle siktas tillsattes i det översta siktråget, varefter detta försågs med lock. Stapeln ställdes därefter in i siktmaskinen där den skakades i 10 minuter. Siktrågen togs därefter loss från varandra och vägdes.

6.7.2 TORR SKRYMDENSITET OCH POROSITET

Beräkningen av torr skrymdensitet och porositet utfördes enbart på cylinderprover, då beräkningarna byggde på att sandprovets volym var känd. Alla utom fyra cylinderprov hade genomgått en analys av hydraulisk konduktivitet innan analys av porositet och torr skrymdensitet utfördes.

Utförande

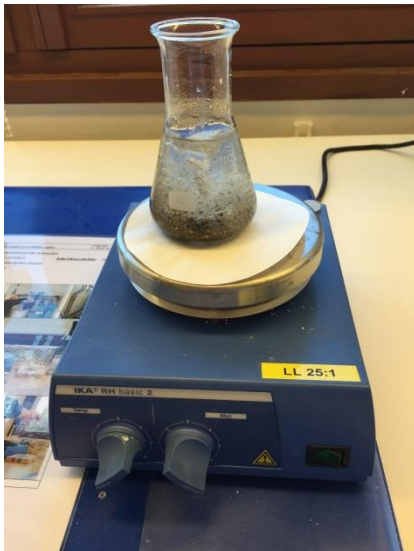
Volymen beräknades utifrån provtagningscylindrarnas mått (innerdiameter: 72mm, höjd: 100mm) till 407cm³. Cylinderproverna torkades, se ”6.6.6 Torkning av sandprover”, varefter proverna vägdes. Provets vikt och volym användes i ekvation 4 för att beräkna torr skrymdensitet. För beräkning av porositeten gjordes antagandet att sanden i huvudsak bestod av β -kvarts och därmed hade en kompaktdensitet på 2,65gcm⁻³. Den beräknade torra skrymdensiteten och den antagna kompaktdensiteten användes sedan i ekvation 3 för att beräkna porositeten.

6.7.3 TURBIDITETSANALYSER AV LAKVATTEN

Denna analys syftade till att ge ett mått på sandprovernans relativa halter av fina partiklar, vilka skulle kunna bidra till igensättning av filtren. Testerna genomfördes genom att delar av de lösa sandproven blandades med vatten, varefter turbiditeten mättes i detta vatten.

Metodbeskrivning och utrustning

Från det lösa sandprov som skulle analyseras vägdes 10g sand upp och lades i en 100ml E-kolv. Vikten antecknades och en 1,87g omrörarmagnet lades i kolven tillsammans med sanden. 100ml vatten mättes upp med en 100ml pipett och tillsattes till E-kolven. Vattnet som användes hade renats med ett PURELAB ultra filter. Provet ställdes på en omrörare, vilken sattes till maximal. Omröraren som användes var en IKA® RH basic 2, se figur 23. Denna omrörning fortgick i 1min, varefter E-kolven avlägsnades från omröraren. Efter detta hölls en mindre mängd av provvätskan ned i en kyvett, skakades runt och hölls ut. Detta för att kvarvarande droppar av renat vatten från tvätt skulle ersättas av vätska från provet. Kyvetten fylldes därefter med vätska från sandprovet, genom att denna hölls direkt från E-kolven ned i kyvetten. Provet försågs med lock och vändes upprepade gånger för att säkerställa att alla partiklar fördelades jämnt i kyvetten. Locket avlägsnades därefter och kyvetten ställdes i mätutrymmet på turbidimetern och mätningen påbörjades. Två värden lästes därefter av, turbiditeten efter 30 sekunder och det maximala värdet under denna mätperiod. Turbidimetern som användes var en HACH 2100N IS Turbidimeter.



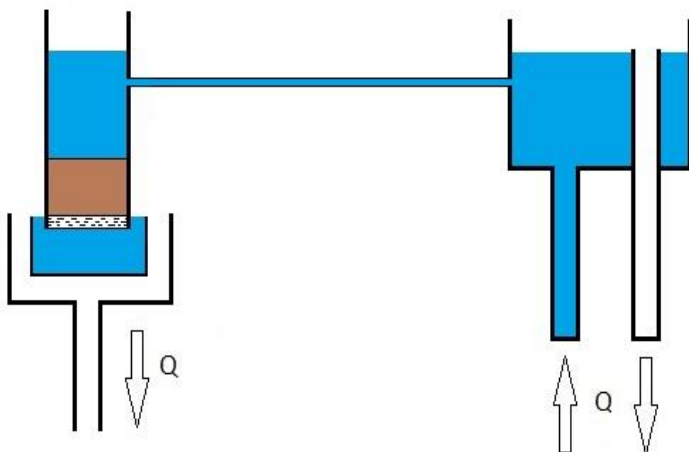
Figur 23. Sandprov under omrörning. (Foto: M. Mellander)

Kommentarer till metoden

Vid denna typ av mätning tillåts prover ofta att ställa in sig under en längre tid innan avläsning sker. Under metodutvecklingen uppmärksammades dock att det pågick en märkbar sedimentation i kyvetten under mätningen. Detta sågs genom att mätvärdet först fluktuerade något med en svagt stigande trend, varefter det påbörjade en stadigt sjunkande trend. För att undvika allt för stor inverkan av sedimentation sattes tiden innan avläsning därför till relativt korta 30 sekunder.

6.7.4 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

För analys av hydraulisk konduktivitet lämnades cylinderprover in till markfysiklaboratoriet på SLU i Uppsala. Här analyserades den hydrauliska konduktiviteten via en experimentuppställning där en konstant vattenyta sattes över provet, se figur 24. Vattenmängden som rann igenom provet under en viss tid uppmättes och utifrån detta beräknades den hydrauliska konduktiviteten med hjälp av Darcys lag.



Figur 24. Principskiss över experimentuppställningen för mätning av hydraulisk konduktivitet vid SLU i Uppsala. (Figur: M. Mellander)

6.7.5 ALUMINIUM OCH GLÖDREST

Analyserna utfördes av Eurofins Enviroment Sweden AB (Lidköping).

Torrsubstans bestämdes med metod SS-EN 12880:2000 (mätosäkerhet 10%).

Glödrest bestämdes med metod SS-EN 12879:2000 (mätosäkerhet 10%).

Aluminiumhalt bestämdes med metod SS028311/IPC-AES (mätosäkerhet 15%).

6.8 Statistisk analys av resultaten från sandprovtagningen

Den mättade hydrauliska konduktiviteten genom filtren beskriver i princip filtrens kapacitet.

Den hydrauliska konduktiviteten mättes på ett antal olika punkter i filtren tillsammans med effektiv kornstorlek, aluminiumhalt, glödrest, porositet och turbiditet hos provens lakvatten.

Resultaten analyserades med linjär regression utifrån minsta kvadratmetoden samt med flernivåregressionsanalys. Detta för att kunna dra slutsatser kring hur filterkapaciteten påverkades av de olika parametrarna. Programmet som användes för den statistiska analysen var Stata ® 13. I båda fallen sattes mättad hydraulisk konduktivitet som beroende variabel, och effektiv kornstorlek, aluminiumhalt, glödrest, porositet och turbiditet hos provens lakvatten som oberoende variabler. I flernivåanalysen jämfördes resultaten utifrån deras uppdelning mellan filtren. I båda undersökningarna användes samtliga prover där alla parametrar analyserats. De erhållna sambanden utvärderades utifrån deras signifikansnivå, där samband som med 95% sannolikhet inte berodde på slumpen sades vara signifikanta.

7 Resultat

I detta kapitel presenteras först resultaten av funktions- och belastningsutredningen. Därefter presenteras resultaten från mätningarna med nivåör och analysresultaten gällande hydraulisk konduktivitet. Resultaten från samtliga filter presenteras samlat för att möjliggöra en jämförelse mellan filtren och identifiering av eventuella filter med tydliga störningar.

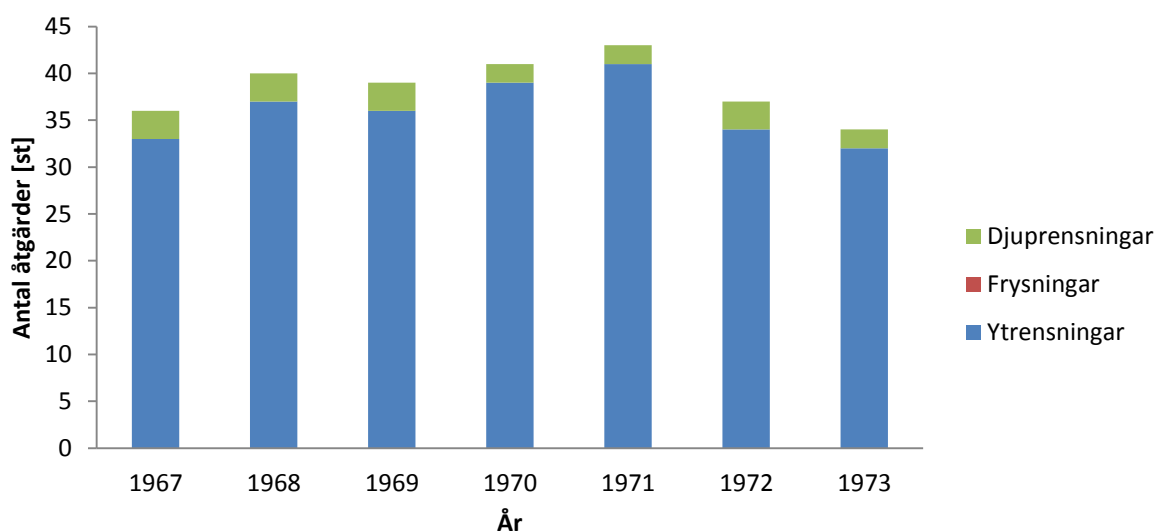
Undersökningen av eventuell packning vid sandåterfyllnad studerades vid djuprensningen i filter 3, och dessa resultat presenteras tillsammans med övriga sandanalyser i filtret i kapitel 7.6.1. Resultaten från övriga sandanalyser presenteras därefter samlat för respektive filter. Detta för att ge en samlad bild av om kompaktering eller ackumulering förekommer i filtret. För att underlätta jämförelsen mellan filtren användes långsamfiltrens ovankant som referensyta, utifrån vilken provernas höjd angavs. Med filtrets ovankant menas ovankanten på det betongfundament som omger långsamfiltren, se figur 10.

Resultaten presenteras i detta kapitel som figurer men finns även att tillgå i tabellform i bilagorna 3-11. För en sammanställning över samtliga prover som tagits i projektet, exakt position för provtagningarna samt vilka analyser som utförts på respektive prov, se bilaga 1. ”Sammanfattning av samtlig provtagning”.

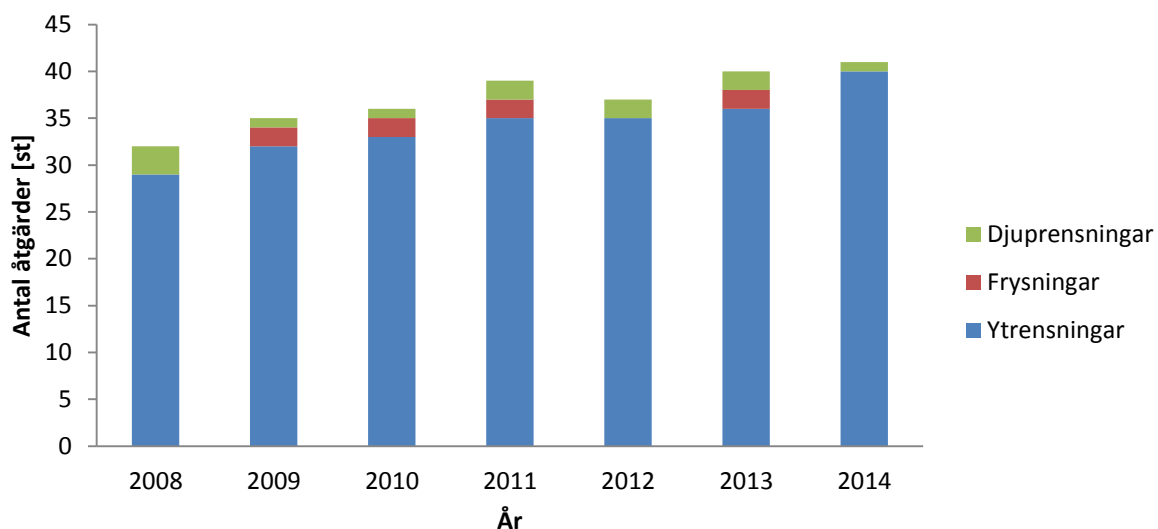
7.1 Filtreringshastighet, rensningar och frysningar

7.1.1 ANTAL RENSNINGAR OCH FRYSNINGAR PER ÅR

Nedan presenteras det totala årliga antalet åtgärder i form av rensningar och frysningar som utförts på Lovö vattenverk, se figurena 25-27.



Figur 25. Totalt antal åtgärder (djup- och ytrensningar samt frysningar) mellan 1967-1973. Totalt gjordes 270 rensningar mellan åren 1967-1973.

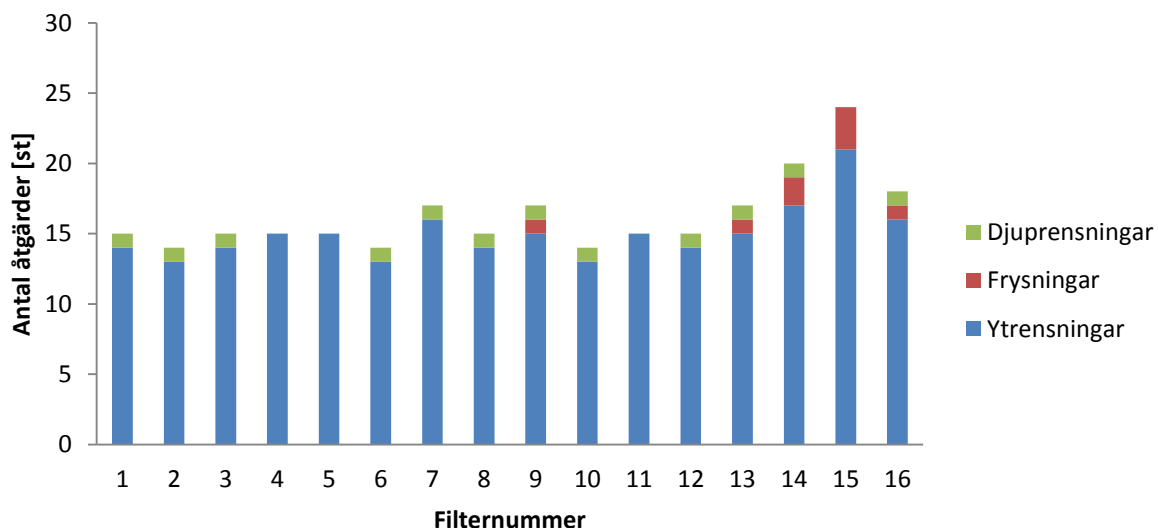


Figur 26. Totalt antal åtgärder (djup- och ytrensningar samt frysningar) mellan 2008-2014. Totalt gjordes 260 rensningar mellan åren 2008-2014.

Under perioden 1967-1973 genomfördes totalt 270st åtgärder medan motsvarande siffra för perioden 2008-2014 var 260st. Under 2008-2014 ses dock en ökande trend gällande totalt antal åtgärder.

7.1.2 RENSNINGARNAS OCH FRYSNINGARNAS FÖRDELNING MELLAN FILTREN

Hur det totala antalet åtgärder under 2008-2014 fördelat sig mellan filtren redovisas i figur 27.



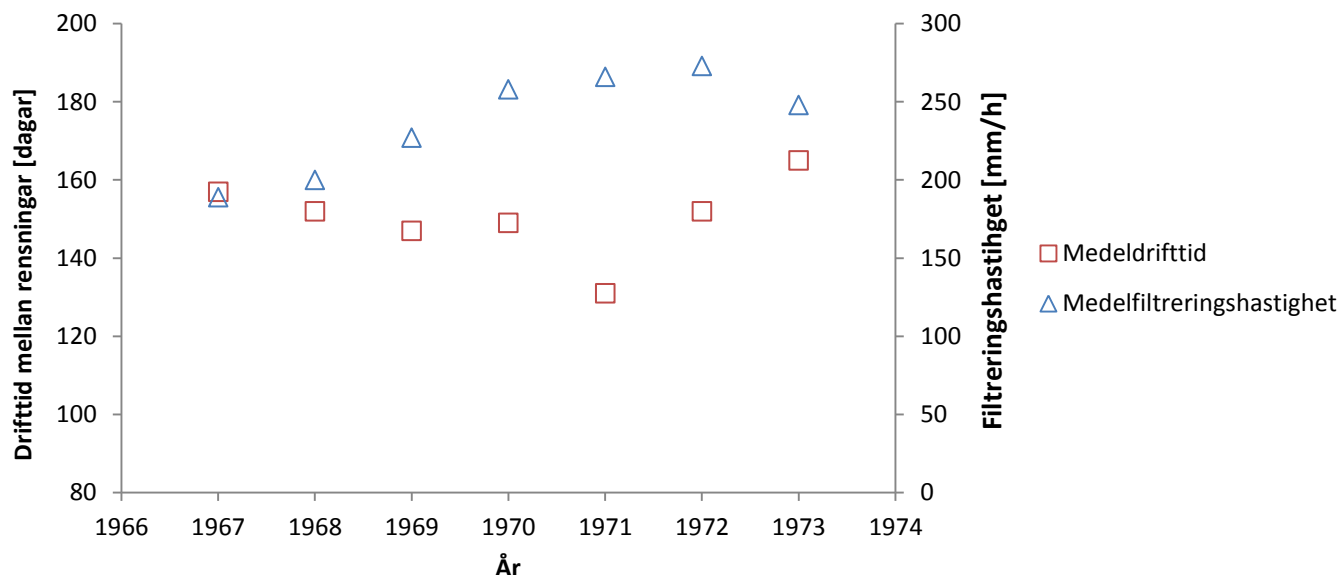
Figur 27. Totala antalet utförda åtgärder under perioden 2008-2014, där antalet redovisas för varje filter individuellt.

I genomsnitt genomfördes 16,25 åtgärder, i form av rensningar och frysningar, i varje filter under perioden 2008-2014. I figur 27 ses att antalet åtgärder inte varit jämnt fördelat mellan filtren, där filter 14, 15 och 16 genomgått flest åtgärder. Åtgärderna har i övrigt varit relativt jämnt fördelade mellan filtren. Att ett filter rensas ofta tyder på problem med att tryckfallet snabbt når en kritiskt hög nivå. Skulle någon form av ackumulering eller kompaktering i filtrens undre del finnas, skulle tryckfallet efter rensning vara relativt högt.

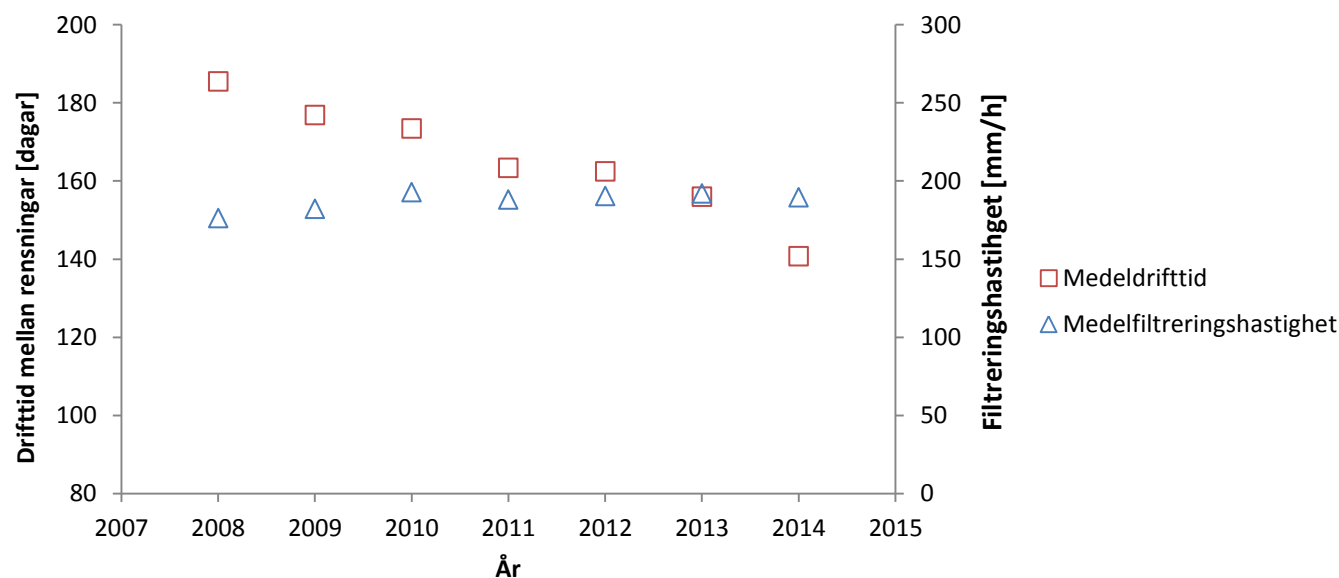
Filtret skulle därmed behöva rensas snart igen och rensningarna skulle därmed ske relativt ofta, jämfört med ett filter utan störning i underdelen. Resultaten i figur 27 skulle därmed kunna antyda att någon form av störning fanns i den undre delen av filter 14 och 15.

7.1.3 FILTRERINGSHASTIGHET OCH MEDELDRIFTTID

Nedan presenteras årlig medeldrifttid och medelfiltreringshastighet för långsamfiltren på Lovö vattenverk i figur 28-30.



Figur 28. Medeldrifttid och medelfiltreringshastighet för långsamfiltren på Lovö mellan åren 1967-1973.



Figur 29. Medeldrifttid och medelfiltreringshastighet för långsamfiltren på Lovö mellan åren 2008-2014.

Utifrån figur 28 och 29 ses att medeldrifttiden för perioden 1967-1973 var 150 dagar medan motsvarande siffra för perioden 2008-2014 var 165 dagar. Att medeldrifttiden ökade från den tidigare perioden var väntat, då filtreringshastigheten minskat avsevärt.

Intressant här är medeldrifttidens avtagande trend under 2008-2014, vilket stämmer överens med den ökande trend som ses i figur 26. Medelfiltreringshastigheten är under perioden relativt konstant och tycks inte vara orsaken till den avtagande trenden. Då antalet rensningar var högt i filter 13-16 undersöktes om dessa ensamma stod för den minskande trenden, se figur 30. I figur 30 ses att medeldrifttiden sjunkit i filter 1-12 och att det alltså inte bara var filter 13-16 som med sitt höga antal rensningar drog ned snittet.



Figur 30. Medeldrifttiden under perioden 2008-2014, uppdelat mellan filter 1-12 och 13-16.

En kort drifttid har i sig en negativ inverkan på vattenverkets totala kapacitet genom att filter oftare måste tas ur produktion för att rensas eller frysas. En kortare medeldrifttid innebär även att filtermotståndet snabbare når en nivå där det är nödvändigt att sätta in en extra rensning eller frysning.

7.1.4 SAMMANFATTNING

Medelfiltreringshastigheten var lägre under 2008-2014 än under den tidigare perioden. Under 2008-2014 var även medeldrifttiden längre och därmed antalet rensningar färre, vilket var väntat utifrån den lägre filtreringshastigheten. Medeldrifttiden hade dock en tydlig avtagande trend under 2008-2014. För denna period var rensningarna inte jämnt fördelade mellan filtren. Filter 14 och 15 var de två filter som genomgått flest antal åtgärder, se figur 27.

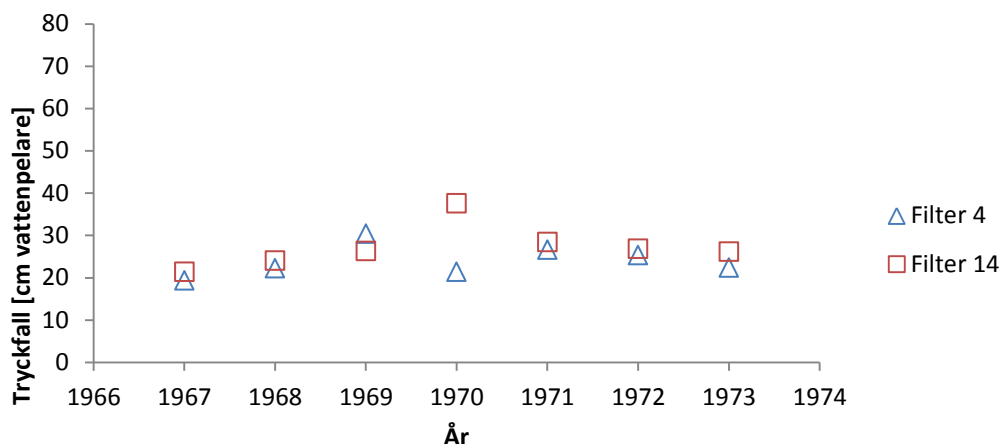
Tabell 7. Sammanställning av antal rensningar och frysningar samt medeldrifttiden för samtliga långsamfilter. I tabellen redovisas medelvärden för perioderna. En negativ differens innebär att parametervärdet var lägre under 2008-2014 än under 1967-1073.

	Antal filterrensningar och frysningar [st]	Medeldrifttid [dagar]	Medelfiltreringshastighet [mm/h]
2008-2014:	260	165	187
1967-1973:	270	150	237
Differens:	-10	15	-50

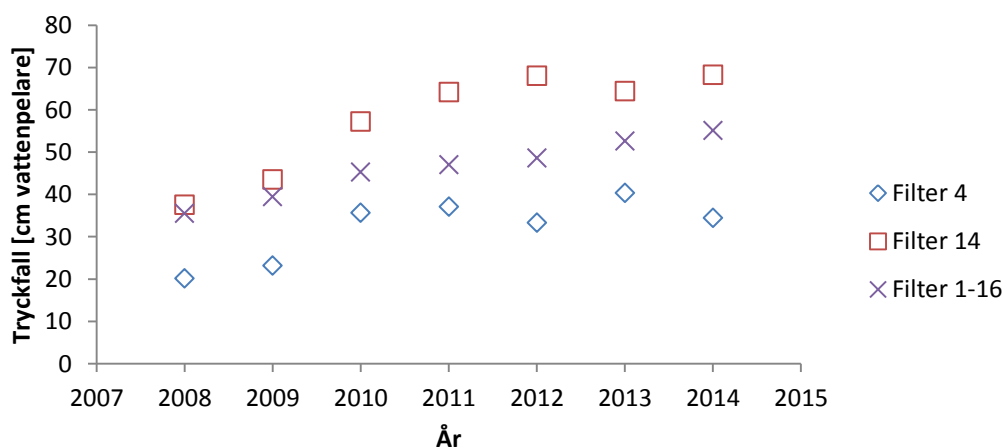
7.2 Tryckfall

7.2.1 ÅRLIGA MEDELVÄRDEN

Årsmedelvärdet av tryckfallet i filter 4 och 14 redovisas för perioderna 1967-1973 och 2008-2014 i figur 31 och 32. I figur 32 presenteras även det genomsnittliga tryckfallet för samtliga filter. Denna data fanns inte tillgänglig för den tidigare perioden.



Figur 31. Genomsnittligt årligt tryckfall mellan åren 1967-1973.



Figur 32. Genomsnittligt årligt tryckfall mellan åren 2008-2014.

Tabell 8. Tryckfall som medelvärden över respektive period.

Period:	Genomsnittligt tryckfall över perioden [cm vattenpelare]			
	Filter 4	Filter 14	Filter 4+14	Filter 1-16
2008-2014	32	58	45	46
1967-1973	24	27	26	

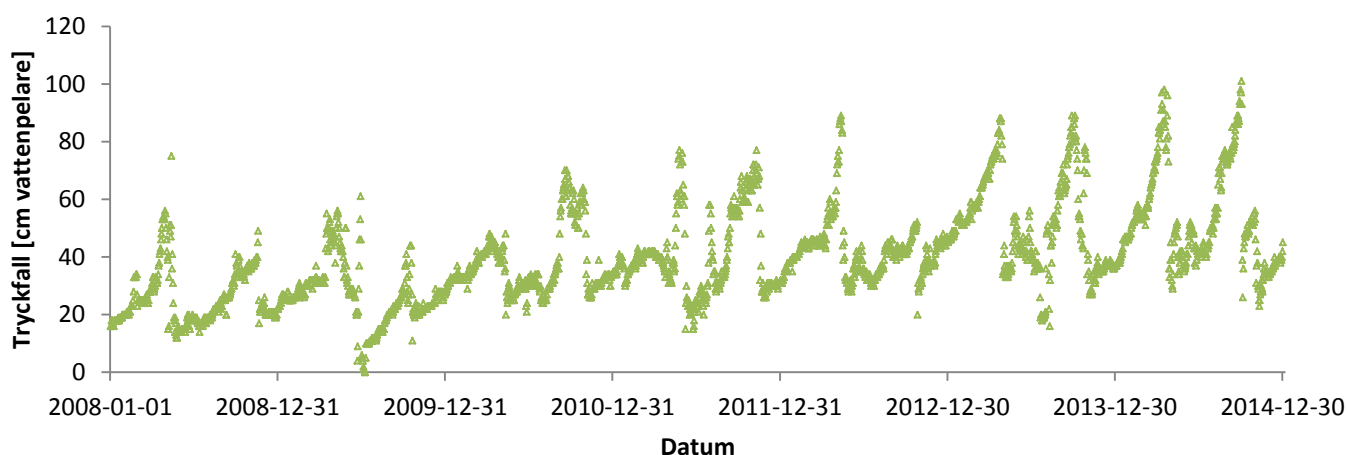
I tabell 8 samt figur 31 och 32 ses att tryckfallet hade ökat både för både filter 4 och 14, jämfört med 1967-1973. Här ses också att tryckfallen i filter 4 och 14 är lägre respektive högre än medeltryckfallet under 2008-2014. Under 1967-1973 tvättades fortfarande samtlig sand i filtren vid djuprensning och det är därmed rimligt att anta att filterprestandan var relativt likvärdig i samtliga filter.

Det genomsnittliga tryckfallet i filter 4 och 14 under perioden kan därför antas ligga nära det genomsnittliga tryckfallet för samtliga filter. Det genomsnittliga tryckfallet i verkets samtliga filter var därmed 20cm vattenpelare högre under 2008-2014 än under 1967-1973, vilket motsvarar en ökning på 77%.

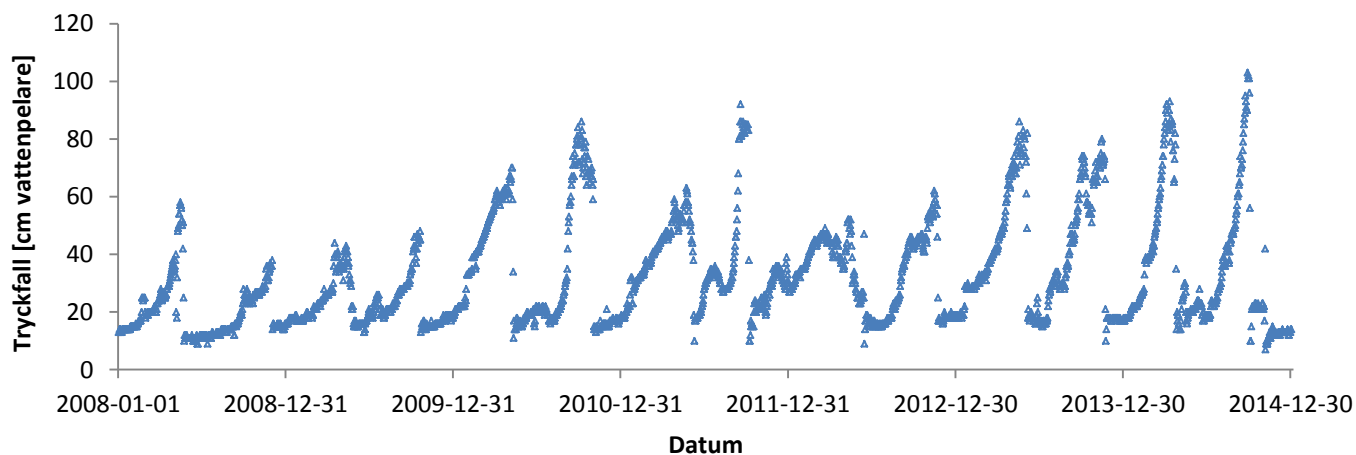
Under 2008-2014 ökade tryckfallen och årsmedelvärdet för samtliga filter var 2014 hela 55cm vattenpelare. Jämfört med medelvärdet under perioden 1967-1973 motsvarar detta en ökning på 112%. Filter 4 hade ett tryckfall under medel, men även här var nivån 2014 knappa 31% högre än medeltryckfallet för perioden 1967-1973.

7.2.2 DYGNSMEDELVÄRDEN

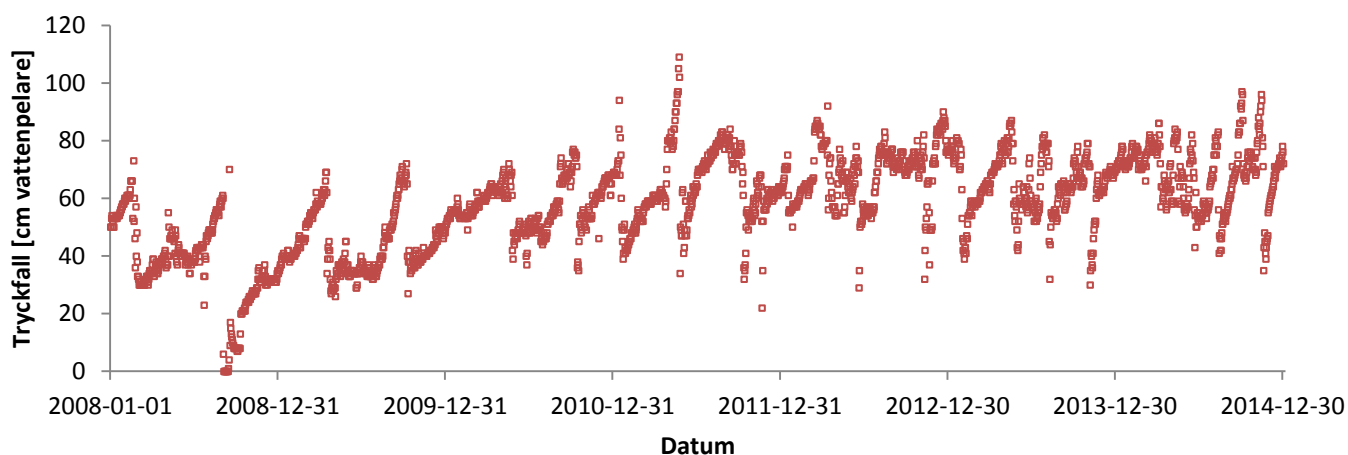
Dygnsmedelvärden av tryckfallet i filter 3,4 och 14 redovisas för perioden 2008-2014 i figur 33-36. I figuren ses filterrensningarna tydligt som avbrott i kurvorna, varvid tryckfallet kraftigt sjunker. Under rensningsförfarandet är tryckfallet noll, vilket ger upphov till enstaka datapunkter som ligger väldigt nära noll då dygnsmedelvärden skapats. Filtren körs även med lägre hastighet direkt efter rensning, vilket också ger ett lågt tryckfall.



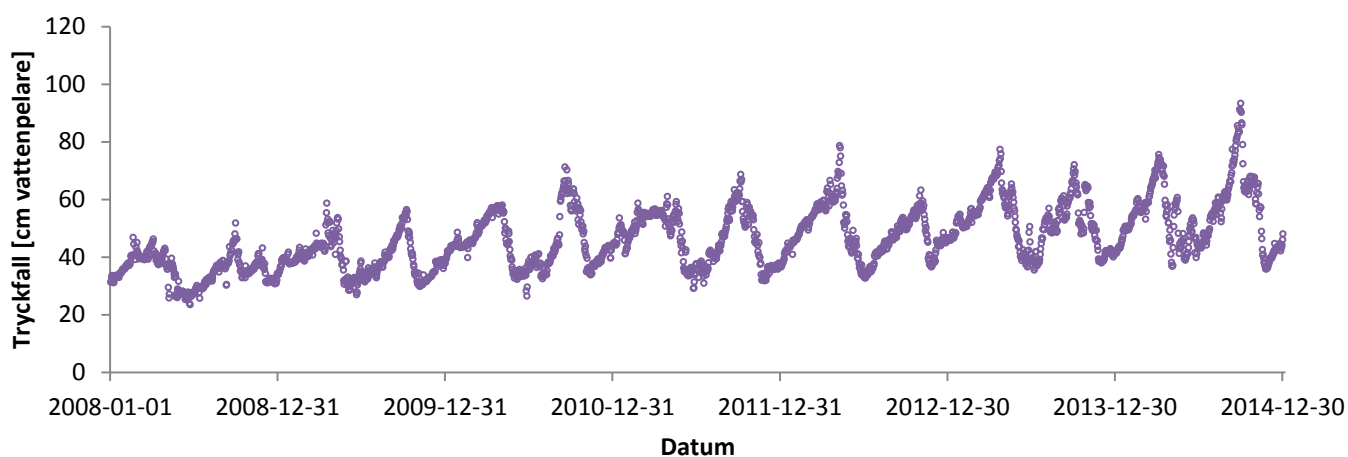
Figur 33. Tryckfall i filter 3 som dygnsmedelvärden för perioden 2008-2014. Filtret djuprensades 21/6 2009.



Figur 34. Tryckfall i filter 4 som dygnsmedelvärden för perioden 2008-2014. Filtret har ej djuprensats under perioden.



Figur 35. Tryckfall i filter 14 som dygnsmedelvärden för perioden 2008-2014. Filtret djuprensades 3/9 2008.

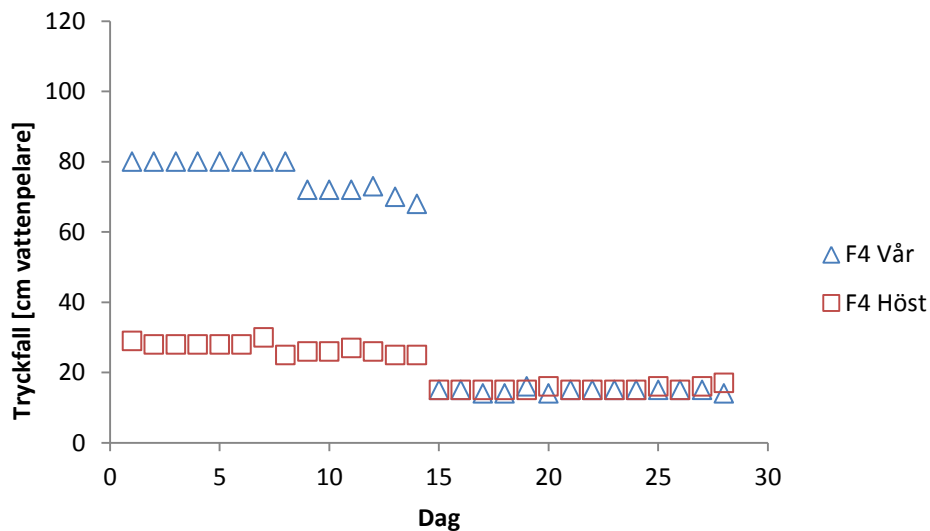


Figur 36. Medelvärden av dygnsmedelvärden för tryckfallen i filter 1-16.

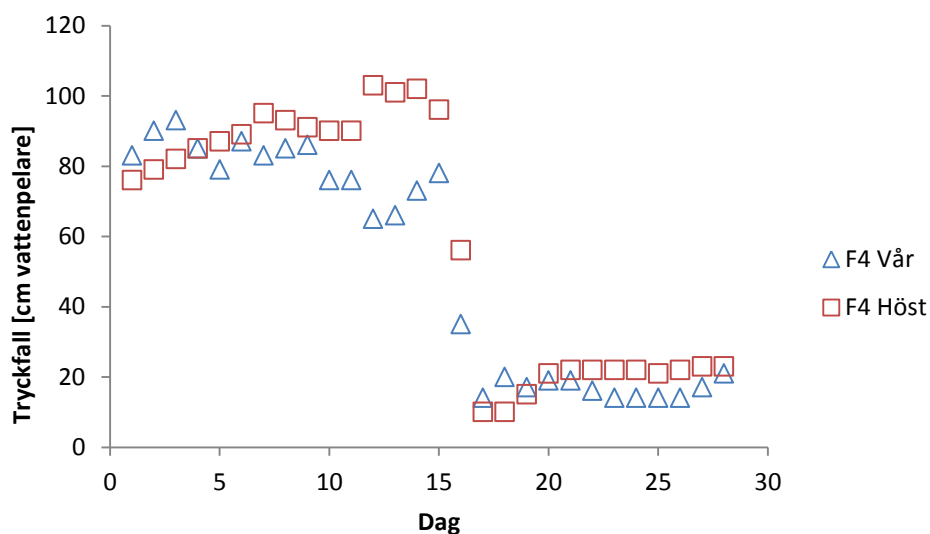
Något som är intressant att titta på här är tryckfallet efter rensning. Ett ökat tryckfall över nyrensat filter kan bero på kompaktering eller ackumulering av material i filtrets underdel. I filter 14 ses den tydligaste ökningen, där tryckfallet efter rensning ökar med ca 10cm under perioden. Även i filter 3 och det genomsnittliga tryckfallet för filter 1-16 ses en ökning i tryckfall över nyrensat filter under perioden. För filter 4 kan ingen lika tydlig trend ses gällande tryckfall över nyrensat filter. Ökningen i genomsnittligt årligt tryckfall tycks här istället bero på att tryckfallet är betydligt högre innan rensning.

7.2.3 FÖRE OCH EFTER RENSNING

Tryckfall före och efter rensning i filter 4 och 14 redovisas i figur 37-40. För den tidigare tidsperioden redovisas här data från år 1973. För den senare tidsperioden redovisas data från 2014. För båda tidsperioderna redovisas tryckfallet 14 dagar före och efter rensningen. I figurerna har dagarna numrerats så att dag 14 är dagen för rensning och dag 15 är dagen efter rensning. Nedan kommer figurerna i filterordning, med data från den tidigare tidsperioden först.

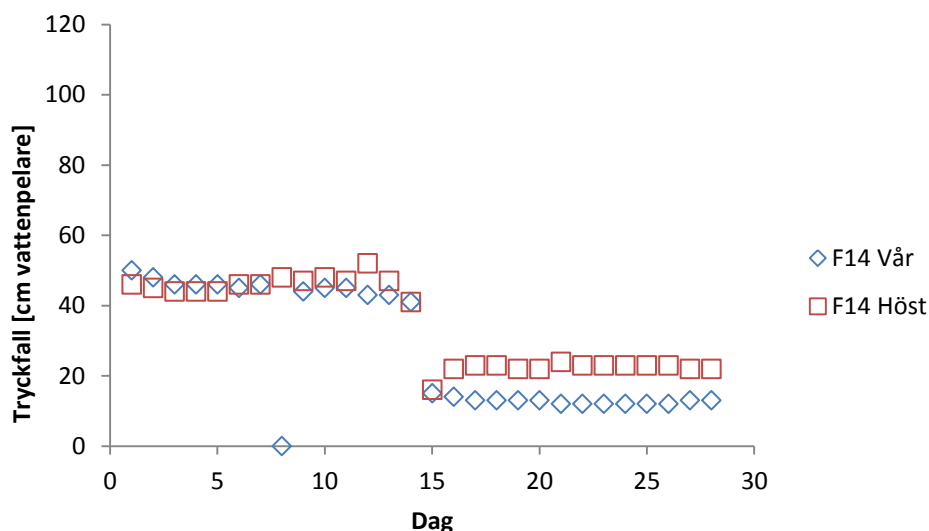


Figur 37. Tryckfall före och efter rensning år 1973 i filter 4. Vårrensning 8/5, höstrensning 6/11.

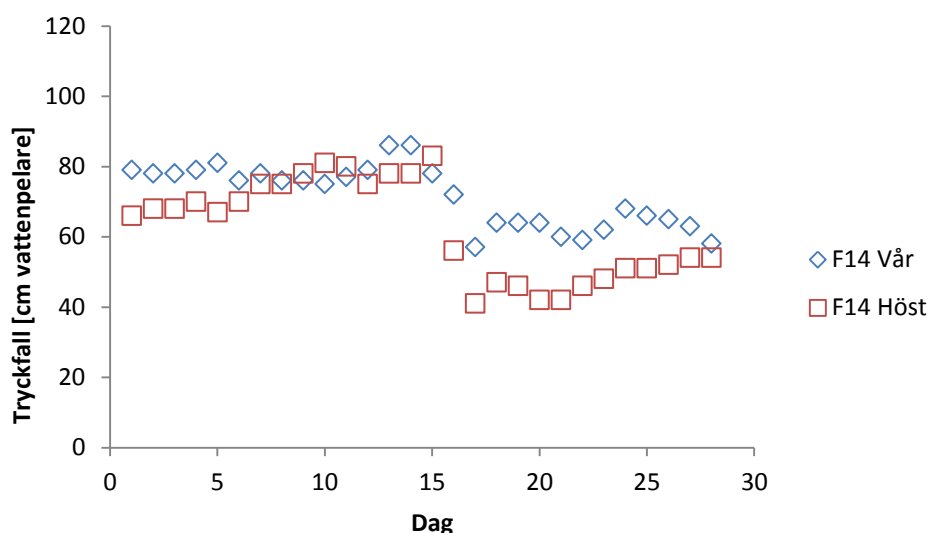


Figur 38. Tryckfall före och efter rensning år 2014 i filter 4. Vårrensning 6/4, höstrensning 11/8.

För filter 4 var det genomsnittliga tryckfallet efter rensning 1973 15,1cm vattenpelare och för år 2014 var det 18,5 cm vattenpelare, se figurerna 37-38. Tryckfallet påverkas dock av bland annat sanddjup och vattenflöde, vilka sannolikt har skiljt sig mellan perioderna i sådan utsträckning att dessa kunnat orsaka ökningen.



Figur 39. Tryckfall före och efter rensning år 1973 i filter 14. Vårrensning 12/4, höstrensning 17/10.



Figur 40. Tryckfall före och efter rensning år 2014 i filter 14. Vårrensning 23/4, höstrensning 1/10.

För filter 14 var det genomsnittliga tryckfallet efter rensning 1973 17,6 cm vattenpelare och för år 2014 var det 55,7 cm vattenpelare, se figur 39-40. En ökning på 38,1cm vattenpelare, vilket bedöms för stor för att helt kunna förklaras av eventuella skillnader i sanddjup, flödes hastighet och övriga påverkande faktorer. Denna ökning kan indikera någon form av störning i filtrets undre del.

7.2.4 SAMMANFATTNING

Både för filter 4 och 14 var de årliga genomsnittliga tryckfallen högre under 2008-2014 än under 1967-1973. Ökningen var dock betydligt större för filter 14 än för filter 4. En ökande trend kunde identifieras hos dygnsmedelvärdena av tryckfallet efter rensningar i filtren. Detta stärker hypotesen om en ackumulering av materia eller kompaktering i filtrens underdel.

Vid jämförelsen av tryckfall före och efter rensning mellan perioderna ses en tydlig ökning ses hos filter 14. Detta stärker hypotesen om ackumulering eller igensättning av filtrets undre del.

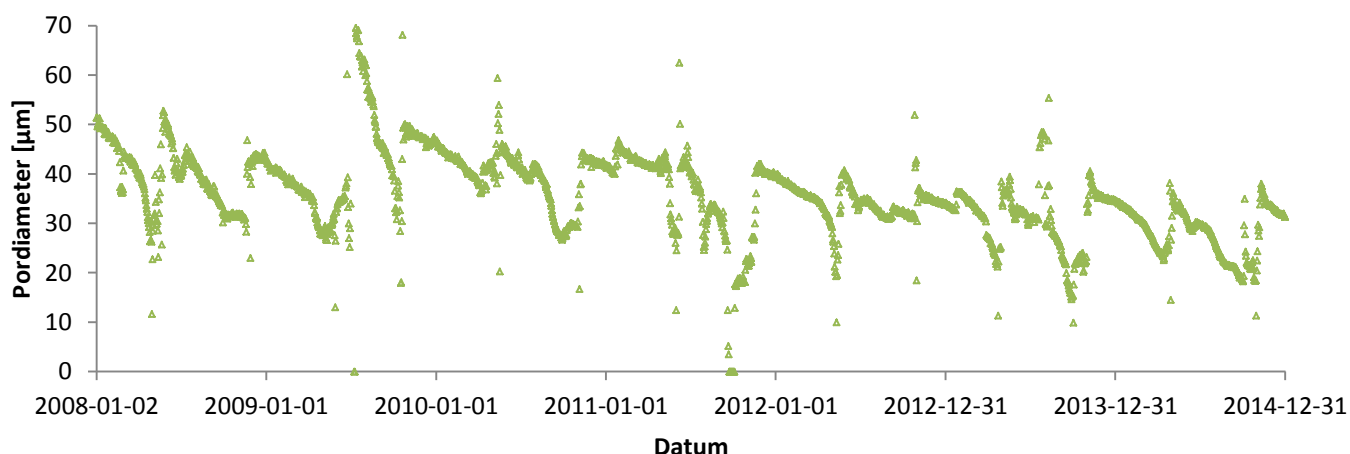
Tabell 9. Sammanställning av tryckfallen i långsamfilter 4 och 14. I tabellen redovisas medelvärden för perioderna. En negativ differens innebär att parametervärdet var lägre under 2008-2014 än under 1967-1973.

	Medeltryckfall [cm vp.]	Medeltryckfall efter rensning [cm vp.]
2008-2014:	44,8	37,1
1967-1973:	26	16,3
Differens:	19	20,8

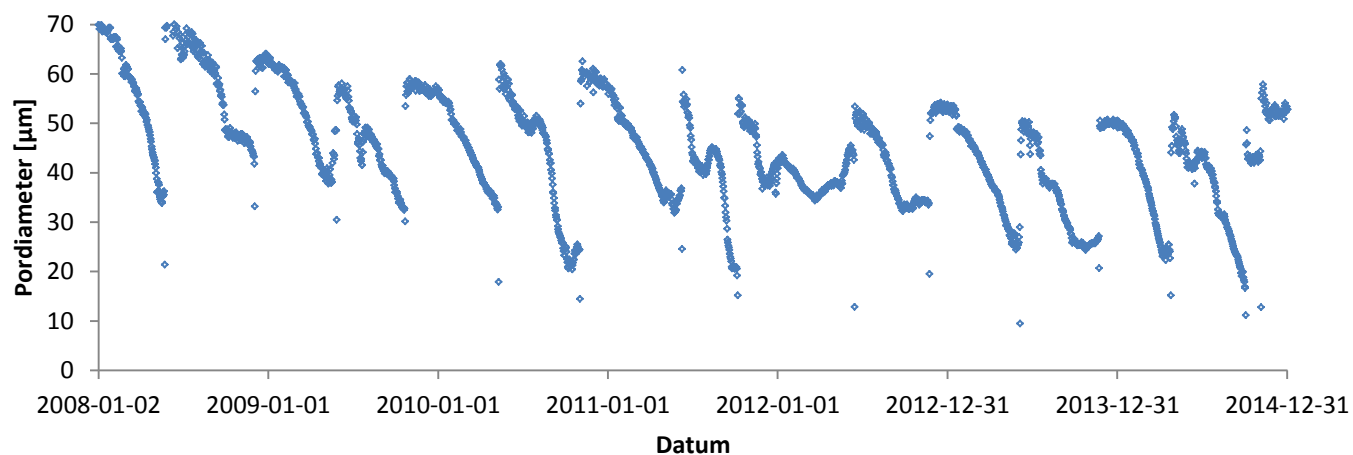
7.3 Pordiameter

7.3.1 DYGNMEDELVÄRDEN

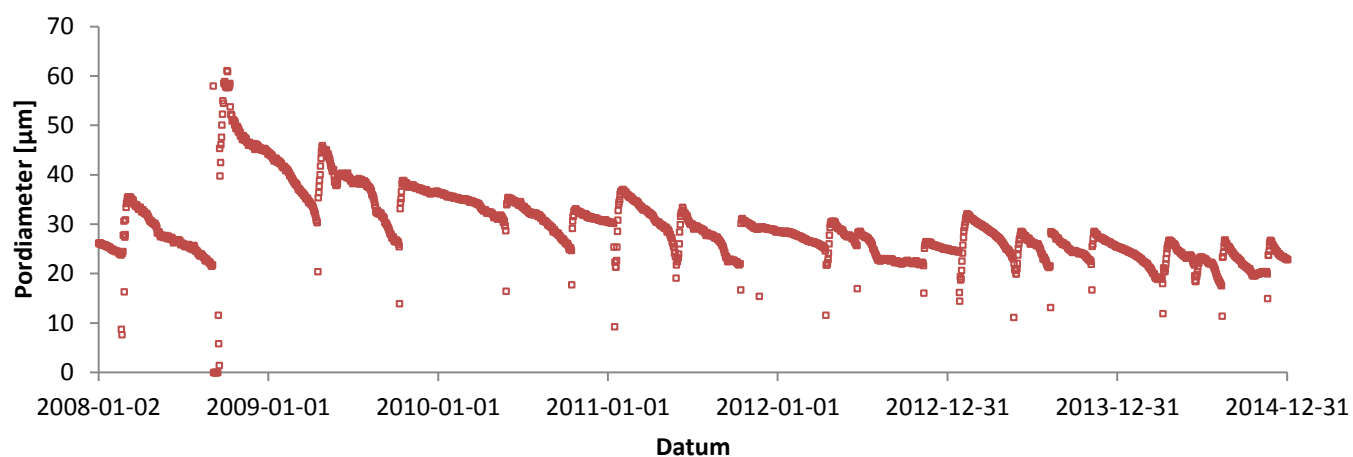
Pordiametern beräknades utifrån ekvation 10, där tortuositetsfaktorn sattes till 2. Beräknad genomsnittlig pordiameter i filter 3,4 och 14 redovisas i figur 41 - 43. Genomsnittlig pordiameter för filter 1-16 redovisas i figur 44.



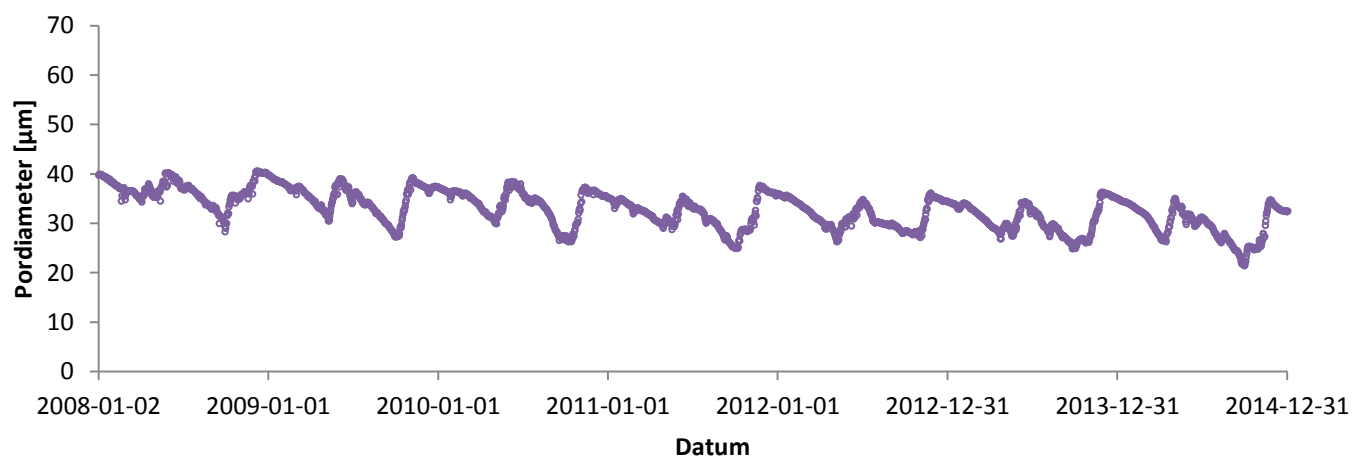
Figur 41. Genomsnittlig pordiameter för filter 3.



Figur 42. Genomsnittlig pordiameter för filter 4.



Figur 43. Genomsnittlig pordiameter för filter 14.



Figur 44. Genomsnittlig pordiameter för filter 1-16.

I samtliga figurer ses samma sågtandade utseende som hos tryckfallskurvorna. Detta beror på den igensättning som sker i filtrets översta centimetrar, vilken sänker genomsnittet i hela filtret. Precis som för tryckfallet är här intressant att studera kurvornas utseende direkt efter rensning, det vill säga överdelen på de upphackade kurvorna. Både filter 4 och 14 har en avtagande trend gällande pordiameter i allmänhet och efter rensning. Under denna tidsperiod genomfördes djuprensning i filter 3 och 14. I filter 4 genomfördes djuprensningen under våren 2009 och i filter 14 genomfördes den under hösten 2008. Både i figur 41 och 43 ses tydliga toppar vid tidpunkterna för djuprensning, vilket indikerar att filtrets undre del var igensatt eller kompakterad.

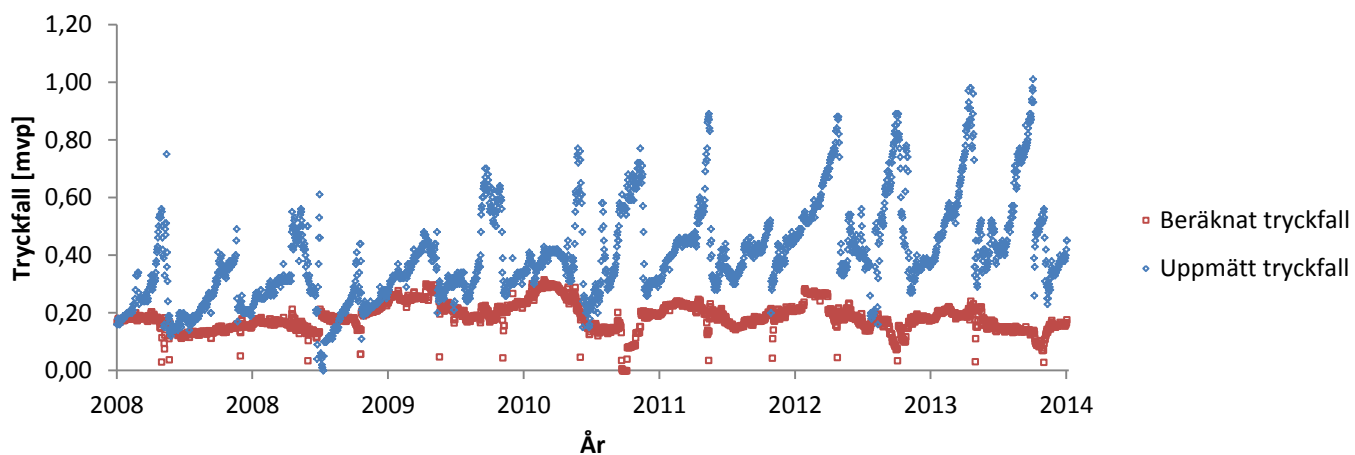
Hade sanden i filtrets underdel haft samma genomsnittliga pordiameter som den nypålagda sanden hade sandbäddens genomsnittliga pordiameter inte förändrats. En ökning av sandbäddens genomsnittliga pordiameter vid djuprensning måste därmed betyda att sanden i filtrets underdel hade en mindre genomsnittlig pordiameter än den nypålagda sanden. Enligt samma resonemang var även den avtagande trenden i pordiameter efter rensning ett tecken på att filtrets undre del var igensatt eller kompakterad. Detta eftersom avskrapningen av sand vid rensningarna gör att sandbäddens underdel blir en större del av hela filterbädden och därmed får större genomslag i medelvärdet. Därmed skulle den avtagande trenden i genomsnittlig pordiameter efter rensning hos filter 4 indikera att någon form av igensättning eller kompaktering i filtrets underdel förekom även i filter 4.

Bäst bild av den genomsnittliga pordiametern i sandbäddens undre lager fås genom att studera värdet direkt efter den sista ytrensningen innan filtret djuprensades. Detta eftersom filterbädden då nästan uteslutande utgjordes av den del av filterbädden som aldrig rensas. För filter 14 ses att den genomsnittliga pordiametern efter vårrensningen 2008 var ca 35µm. I slutet av tidsperioden har den genomsnittliga pordiametern i filtret dock minskat till ca 25µm. Detta indikerar att hastigheten på den process som minskar pordiametern i filtret är så pass hög att processen ger en mätbar skillnad på sju år.

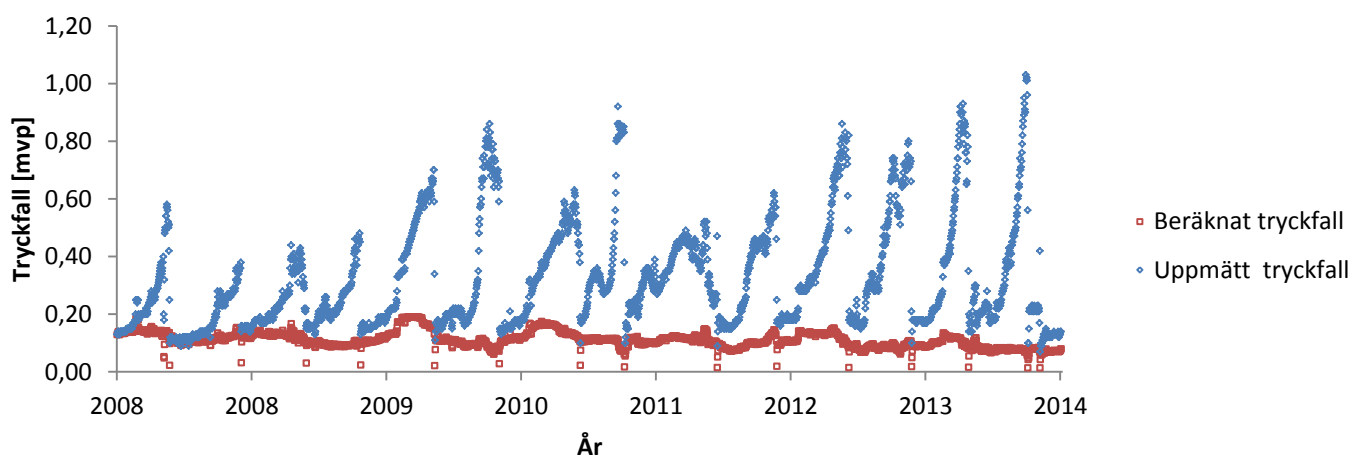
7.3.2 BERÄKNAT TRYCKFALL

Nackdelen med att enbart utvärdera långsamfiltrens funktion utifrån tryckfall är att faktorer så som sanddjup, flödeshastighet och vattentemperatur påverkar tryckfallet. Det kan därför vara svårt att dra några slutsatser kring filterfunktion utifrån enbart uppmätt tryckfall. Uppmätt tryckfall är dock en vanligt förekommande och lättillgänglig parameter som mycket av arbetet kring långsamfiltren utgår ifrån.

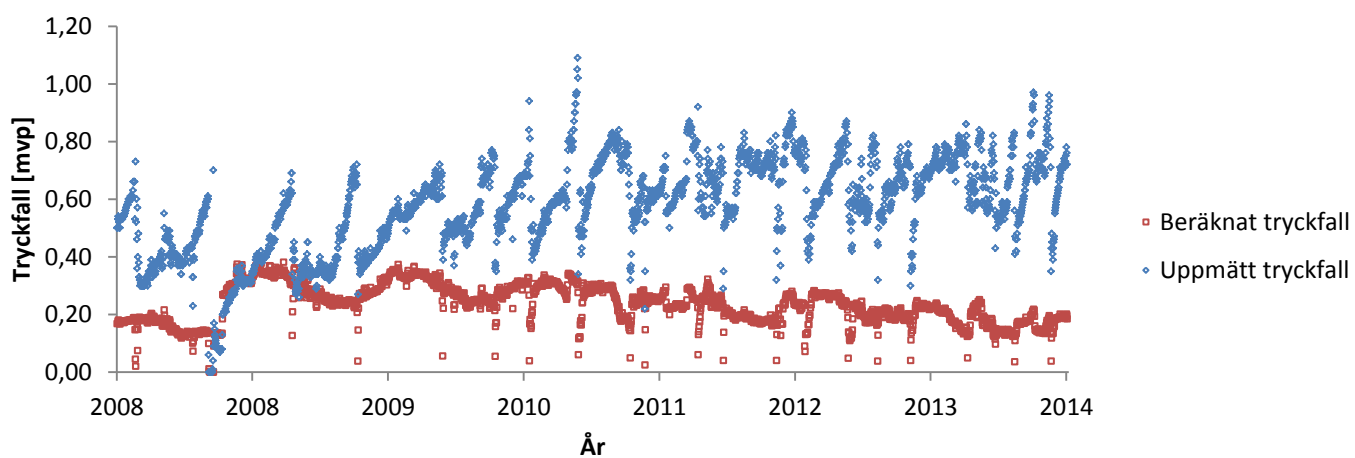
Det konstaterades redan i föregående kapitel att den genomsnittliga pordiametern i filtren sjunkit under tidsperioden. Detta kapitel syftar istället till att tydliggöra kopplingen mellan pordiameter och tryckfall, samt att påvisa vilket genomslag minskningen av pordiametern fått i filtren. Beräknat och uppmätt tryckfall i filter 3,4 och 14 utifrån en fast pordiameter, redovisas i figur 45-47. Pordiametern valdes individuellt för varje filter för att vara nära den största pordiameter det aktuella filtret haft under perioden. I samtliga figurer förkortas ”meter vattenpelare” till ”mvp”.



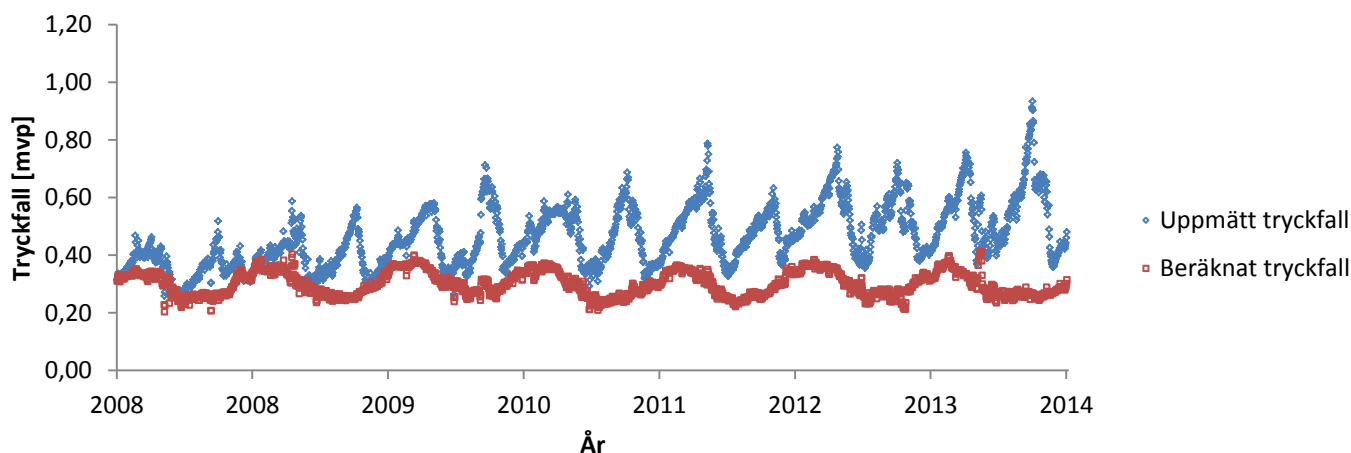
Figur 45. Beräknat och uppmätt tryckfall för filter 3, utifrån en fast genomsnittlig pordiameter på 50 μm .



Figur 46. Beräknat och uppmätt tryckfall för filter 4, utifrån en fast genomsnittlig pordiameter på 70 μm .



Figur 47. Beräknat och uppmätt tryckfall för filter 14, utifrån en fast genomsnittlig pordiameter på 45 μm .



Figur 48. Beräknat och uppmätt tryckfall som ett genomsnitt av filter 1-16, utifrån en fast pordiameter på 40 μ m.

Tydligast skillnad mellan beräknat tryckfall och uppmätt tryckfall ses för filter 14 i figur 47, där det uppmätta tryckfallet är klart högre i periodens slut. Samma trend ses även tydligt i filter 3 och kan anas i genomsnittet för filter 1-16. För filter 4 ses i figur 46 att tryckfallet efter rensning skiljer sig från det beräknade i slutet av tidsperioden. Det beräknade tryckfallet sjunker under perioden, något som till stor del beror på att filterbäddens tjocklek minskar genom rensningar. Däremot är det uppmätta tryckfallet efter rensning relativt konstant under perioden, med antydning till svag ökning. En ökning i motstånd efter rensning, jämfört med tidigare år, skulle kunnat bero på skillnad i temperatur eller flöde. Det beräknade tryckfallet i figur 46 tar dock hänsyn till dessa faktorer och har en avtagande trend. Således måste en ökande trend här innebära en pågående process där pordiametern minskar. Hade ingen sådan process funnits skulle nämligen tryckfallet efter rensning minskat för varje rensning. Detta eftersom sandjupet minskar.

7.3.3 SAMMANFATTNING

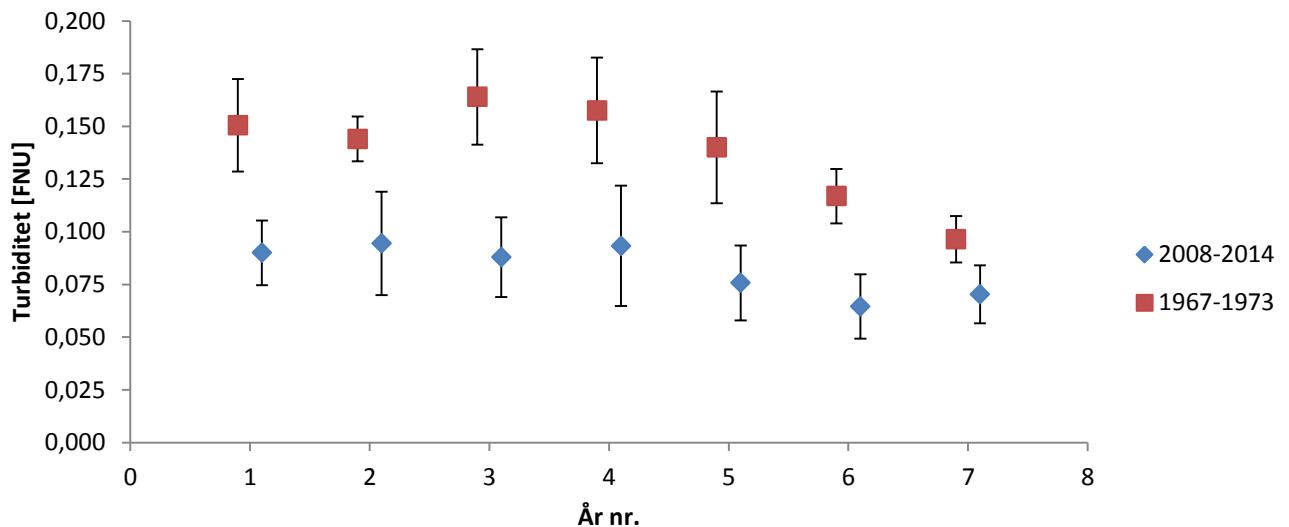
Resultaten antyder att pordiametern i filtrens undre del är mindre än hos nytvättad sand, något som sannolikt skulle bero på en kompaktering eller ackumulering av material här. Vidare finns skäl att tro att detta är en pågående process som ger mätbara skillnader i pordiameter på sju år.

7.4 Kvalitet hos vattnet som tillförts långsamfiltren

I detta kapitel presenteras data från perioderna 2008-2014 och 1967-1973 tillsammans i figurerna för att underlätta jämförelsen. Åren i perioderna numreras från 1 till 7, där de första åren i respektive period fick nummer 1. För perioden 2008-2014 betecknades alltså år 2008 "år 1" och år 2014 betecknades "år 7". För varje datapunkt visas även standardavvikens storlek, i form av streck från respektive datapunkt. För att hålla isär respektive periods felstaplar gjordes en mindre förskjutning mellan perioderna i x-led.

7.4.1 TURBIDITET

Turbiditet i det vatten som tillförs långsamfiltren, även kallat ”snabbfiltrat”, under perioderna 1967-1973 respektive 2008-2014 redovisas i figur 49 som årsmedelvärden.

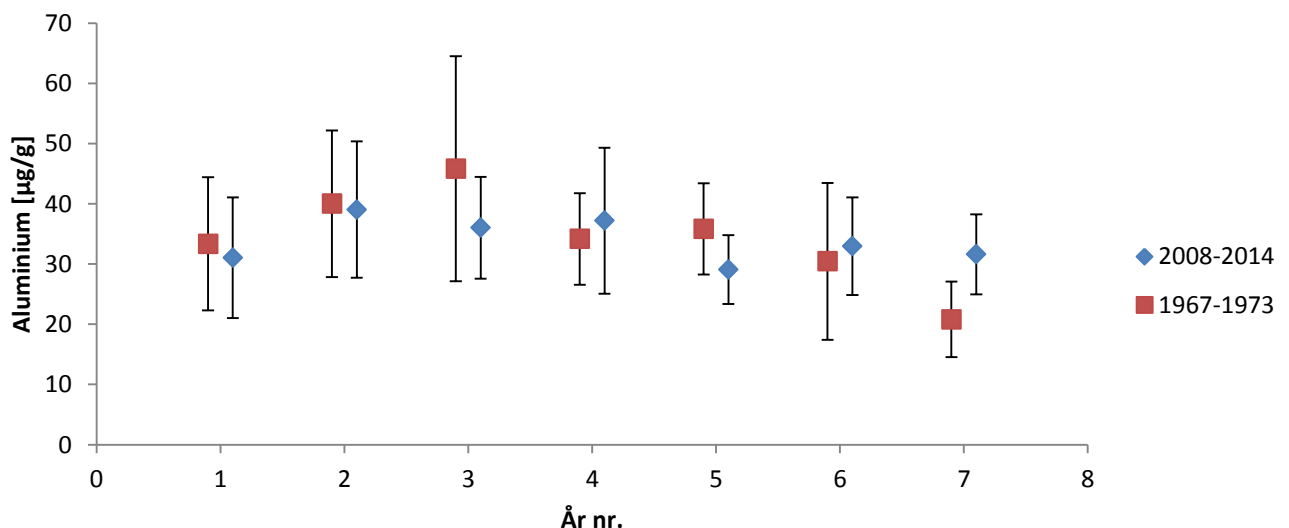


Figur 49. Årsmedelvärden för turbiditet i snabbfiltratet mellan åren 1967-1973 och 2008-2014. Observera att år nr 1 är det första året i respektive årsintervall.

I figur 49 ses att turbiditeten i det vatten som tillfördes långsamfiltren 1967-1973 var högre än under 2008-2014. Utifrån detta kan en ökad turbiditet uteslutas som orsak till kapacitetsminskningen och en eventuell igensättning av filtrens underdel.

7.4.2 ALUMINIUMHALT

Aluminiumhalten i det vatten som tillförs långsamfiltren under perioderna 1967-1973 respektive 2008-2014 redovisas i figur 50 som årsmedelvärden.



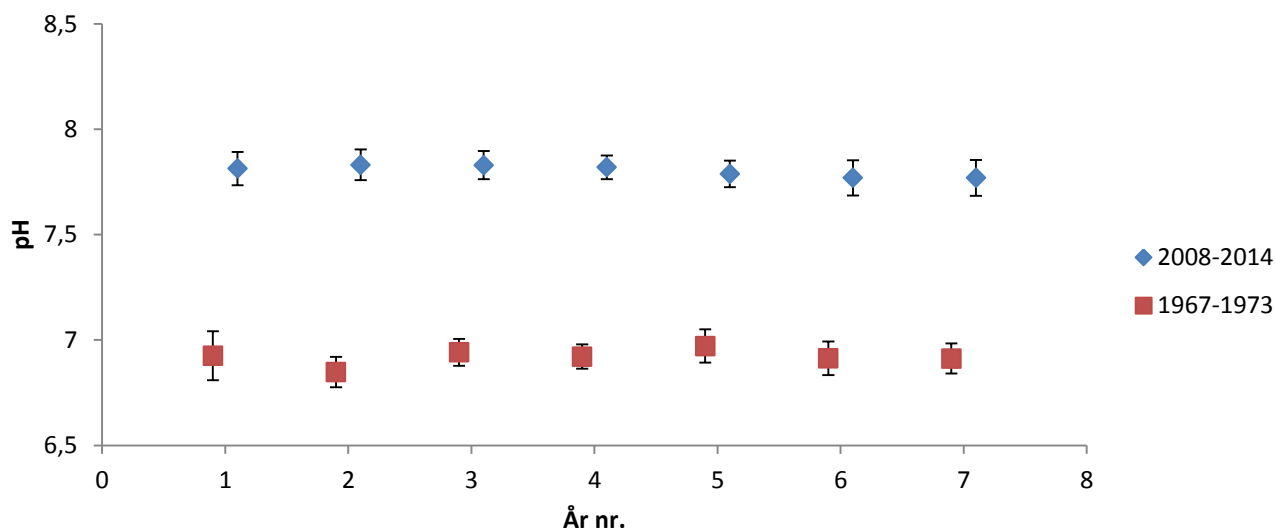
Figur 50. Årsmedelvärden för aluminiumhalten i snabbfiltratet mellan åren 1967-1973 och 2008-2014. Observera att år nr 1 är det första året i respektive årsintervall.

Aluminiumhalten i vattnet som tillfördes långsamfiltren var under 1967-1973 i genomsnitt 0,03mg/l. Under 2008-2014 var motsvarande den genomsnittliga aluminiumhalten 0,034mg/l.

Utifrån detta och den stora överlappning som kan ses mellan standardavvikelseerna för perioderna, tycks halterna ha legat på likvärdiga nivåer under de bägge perioderna. Beroende på pH kan aluminiumet ha förekommit i olika former, där främst aluminium som fällts ut skulle kunna bidra till en igensättning av långsamfiltren.

7.4.3 PH

pH i det vatten som tillförs långsamfiltren under perioderna 1967-1973 respektive 2008-2014 redovisas i figur 51 som årsmedelvärden.



Figur 51. Årsmedelvärden för aluminiumhalt i snabbfiltratet mellan åren 1967-1973 och 2008-2014. Observera att år nr 1 är det första året i respektive årsintervall.

pH i vattnet som tillfördes långsamfiltren var under 1967-1973 i genomsnitt 7,9. Under 2008-2014 var den motsvarande den genomsnittliga aluminiumhalten 7,8. Vid 8°C och pH 7,9 har $\text{Al}(\text{OH})_3$ en löslighet på 0,068mg/l (Herbert, pers. medd.). Att de uppmätta aluminiumhalterna ligger under detta värde tyder på att all aluminium i snabbfiltratet förekommer i löst form. Detta eftersom aluminiumhalten ligger under löslighetsgränsen. Lösligheten beror dock även av vattentemperaturen, vilken inte har kartlags för den tidigare perioden.

7.4.4 SAMMANFATTNING

Undersökningen av kvalitet hos det vatten som tillförts långsamfiltren tyder på att mindre mängd partiklar tillfördes långsamfiltren under 2008-2014 än under 1967-1973. Mängden tillförd utfällt aluminium var sannolikt likvärdig under perioderna. Tillsammans med ett lägre vattenflöde genom filtren under 2008-2014 tyder detta på att belastningen av långsamfiltren varit lägre under 2008-2014 jämfört med perioden 1967-1973.

Tabell 10. Sammanställning av kvalitet hos vattnet som tillförts långsamfiltren. I tabellen redovisas medelvärden för perioderna.

	Aluminium [mg/l]	pH	Turbiditet [FNU]
2008-2014:	0,034	7,8	0,08
1967-1973:	0,03	7,9	0,14**
Differens:	0*	-0,1	-0,02

*Mätnoggrannheten för perioden 1967-1973 omöjliggör ett mer exakt svar.

**Turbiditeten angavs utifrån en "Sigrist Fotometer" i originalkällan. Ingen väletablerad konverteringsmetod till FNU fanns.

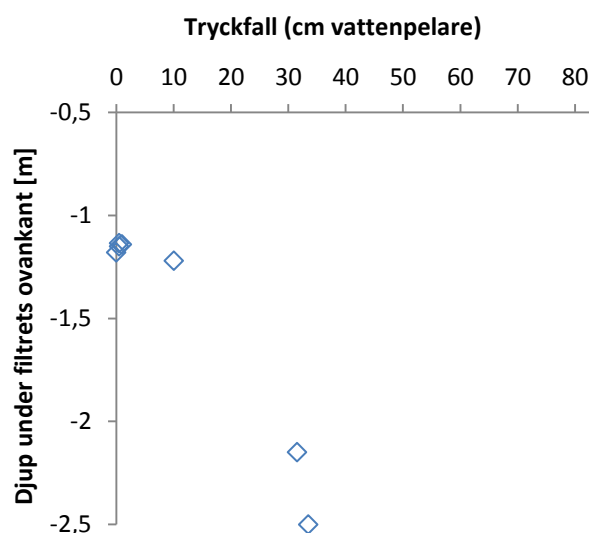
7.5 Mätningar med nivåör, hydraulisk konduktivitet

7.5.1 MÄTNINGAR MED NIVÄRÖR

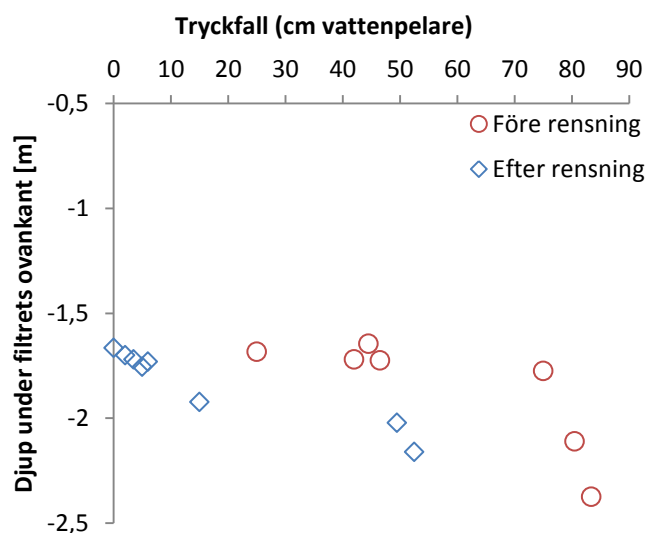
Resultaten från mätningarna med nivåör presenteras i figur 52-56. Mätningar gjordes både före och efter rensning. Tiden mellan att rören sattes i filtren och avläsningen av vattennivåerna skiljde sig något mellan filtren och presenteras i tabell 11. Sandhöjden skiljde sig mellan filtren och var i respektive filter belägen 5cm ovanför mätpunkterna närmast filtrets ovankant i figur 52-56. Till exempel var sandytan alltså belägen 1m under filtrets ovankant i filter 4. I den fria vattenmassan ovanför filterbädden var tryckfallet noll. Då ett ”betongartat” lager påträffades ca 20 cm över filterbotten i filter 4 i början på 2000-talet, togs samtlig sand ut ur filtret och tvättades (Svedberg, pers. medd.). Filterbädden är därmed relativt nytvättad jämfört med de övriga filtren i studien, där det undre lagret inte tvättats sedan filtren byggdes. Då filtrets pordiameter beräknades och studerades i kapitel 7.3 sågs antydningar till att någon form av ackumulering eller kompaktering i filtret. Utifrån hur nytvättat filtret är kan dess tryckfallskurva trots detta antas överensstämma väl med en tryckfallskurva för ett nytvättat filter.

Tabell 11. Tid mellan rörens sättning i filtren till avläsning.

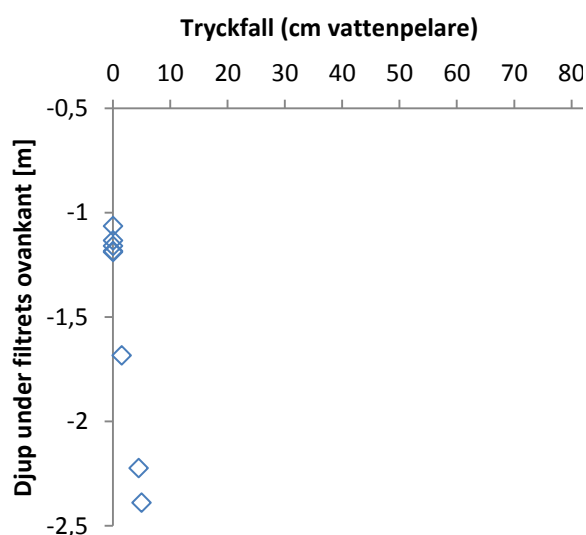
Långsamfilter [nr.]	Datum då rören sattes	Tid mellan sättning av rör och avläsning [dagar]
3	21/7	25
4	9/6	13
10 (före rensning)	20/4	13
10 (efter rensning)	15/5	11
14 (före rensning)	20/4	13
14 (efter rensning)	4/5	6
15	9/6	13



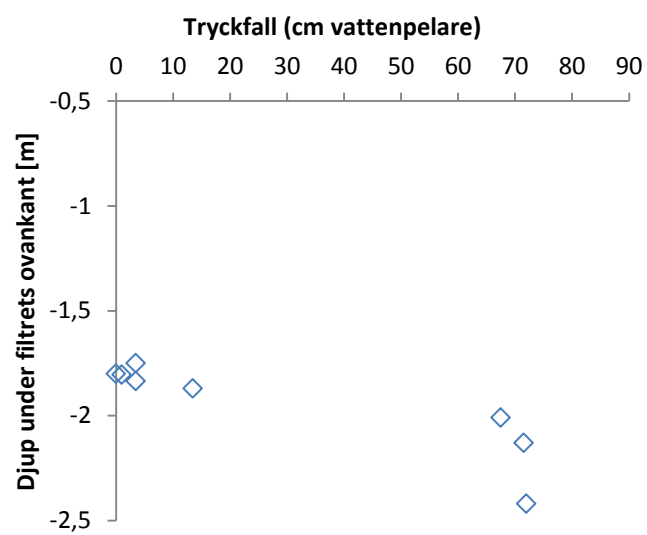
Figur 52. Tryckfall i långsamfilter nr 3.



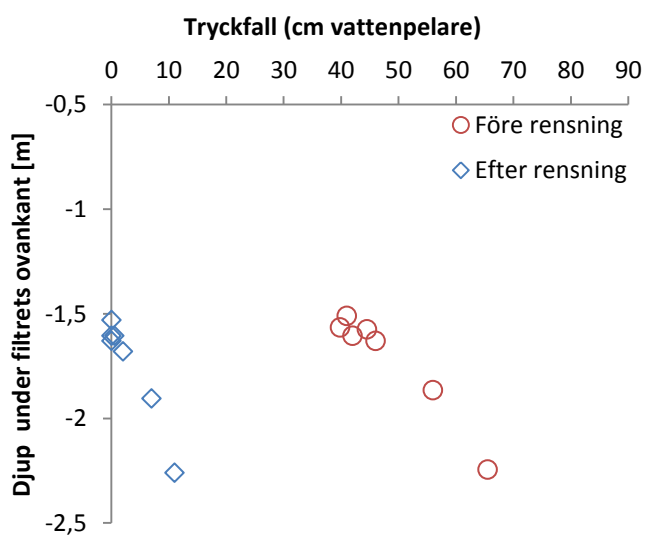
Figur 54. Tryckfall i långsamfilter nr 14.



Figur 53. Tryckfall i långsamfilter nr 4.



Figur 55. Tryckfall i långsamfilter nr 15.



Figur 56. Tryckfall i långsamfilter nr 10.

I filter 4 och 10 är tryckfallskurvan linjär, vilket indikerar att inga stora skillnader i hydraulisk konduktivitet finns mellan sandbäddens olika delar, se figur 54 och 56. En ackumulering av materia eller kompaktering skulle minska den hydrauliska konduktiviteten, varför en jämn fördelning av denna tyder på att ingen ackumulering eller kompaktering förekommer.

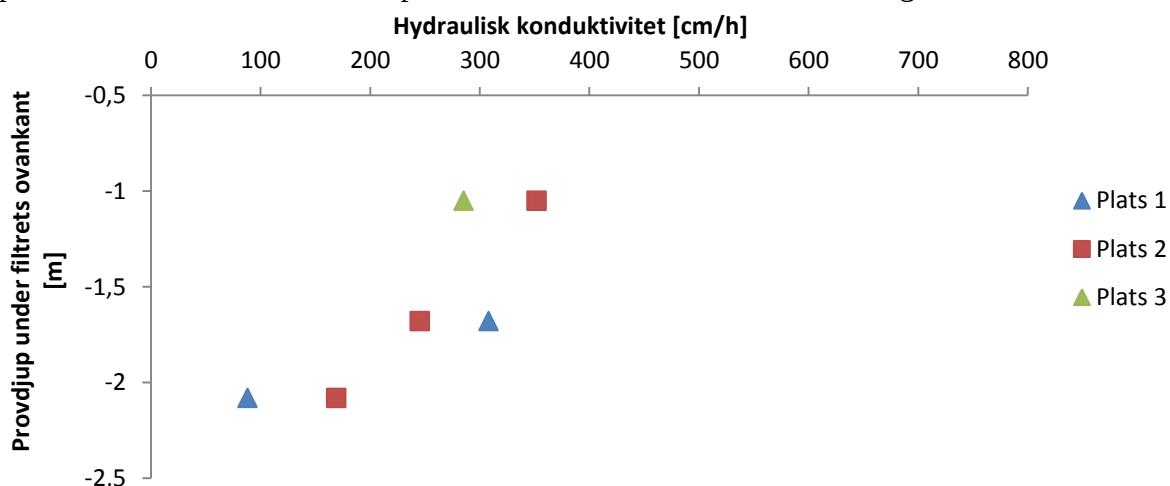
För både filter 14 och 15 ses ett tydligt språng i kurvan vilket tyder på en region med lägre hydraulisk konduktivitet, se figur 53 och 55. För filter 14 sker språnget något djupare efter rensningen, då det i likhet med filter 15 sker ca två meter under filtrets ovkant. Det totala tryckfallet över filtren är dessutom avsevärt mycket högre i filter 14 och 15 än i övriga filter, vilket ytterligare tyder på någon form av störning.

I tryckfallskurvan för filter 3 har rör 6 tagits bort då detta indikerade att tryckfallet vid 1,6m under filtrets ovkant var orimligt nära noll, se figur 52. Detta antogs bero på den springa mellan röret och filtersanden som observerades vid rörsättningen och mätpunkten har tagits bort.

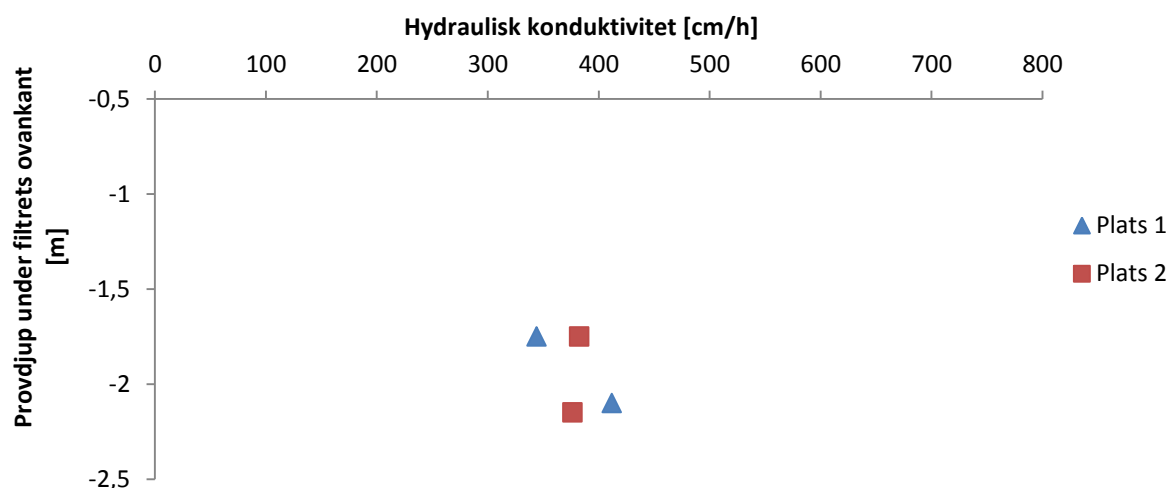
Bortfallet av denna mätunkt lämnar ett stort gap mellan mätpunkterna i filtret. Detta gör det svårt att bedöma om tryckfallet ökar linjärt med djupet eller om ökningen sker mer plötsligt genom ett språng. Det totala tryckfallet över filtret, 33cm vattenpelare, är dock högt jämfört med filter 10 och 4 där det totala tryckfallet var 17 respektive 5cm vattenpelare. Av dessa 33cm vattenpelare utgjordes dessutom endast 10 cm vattenpelare av tryckfall i filtrets översta 15cm. Således är det inte orimligt att anta att filter 3 har en nedsatt funktion.

7.5.2 HYDRAULISK KONDUKTIVITET

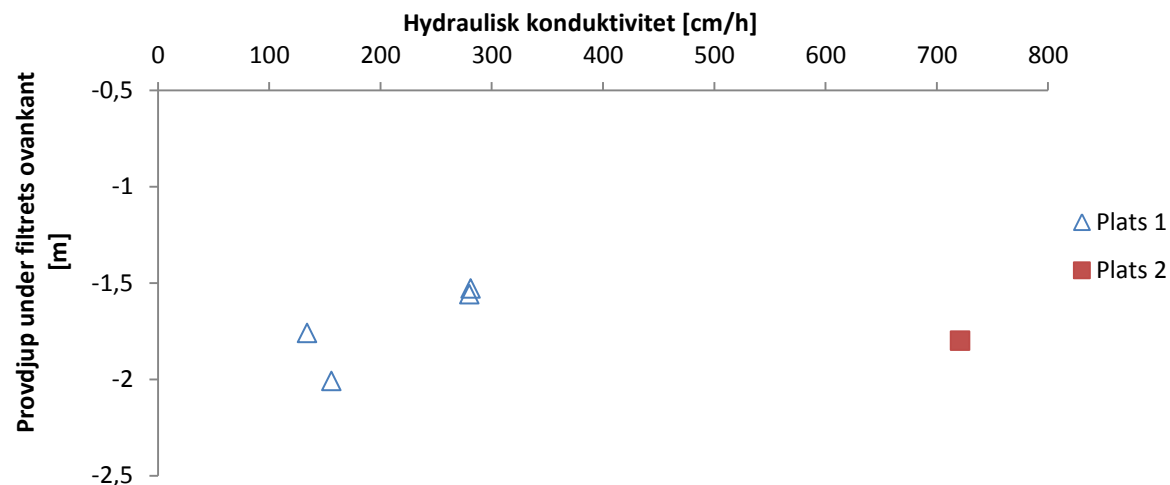
Resultaten från analysen av hydraulisk konduktivitet i de olika filtren presenteras i figur 57-59. Observera att plats 1,2 och 3 motsvarar olika platser i de olika filtren. Plats 1,2 och 3 i filter 3 har alltså inte samma plats som plats 1,2 och 3 i filter 4 och 14. Sandnivån i respektive filter motsvaras av datapunkterna närmast filtrets ovkant i figur 57-59.



Figur 57. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 3.



Figur 58. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 4.



Figur 59. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 14.

I filter 3 togs prover i filterbäddens yta direkt efter återfyllnaden med tvättad sand, vilka är de översta datapunkterna i figur 57. I filter 3 genomfördes undersökningen av packningseffekten och plats 3 valdes precis nedanför sandrampen som användes för att köra ned maskinerna i filtret. Plats 3 ansågs därmed vara den mest trafikerad platsen i filtret medan plats 2 valdes då denna ansågs vara en plats som endast utsattes för lättare trafikering. Mätningen visade att den hydrauliska konduktiviteten var 66,7cm/h lägre vid den hårdare trafikerade platsen. Enbart utifrån detta resultat kan dock inga slutsatser dras då endast ett prov togs på vardera plats samt att variationer av samma storleksordning uppmättes mellan plats 1 och 2 i filter 3. En viktig slutsats som kan dras utifrån mätningarna i den nytvättade sanden i filter 3 är dock att nytvättad sand av denna typ har en mättad hydraulisk konduktivitet på ca 285-352 cm/h.

Utöver de sandprov som togs av den nytvättade sanden i filter 3, togs samtliga prover efter det att skrapningen av filtren var klar. I filter 3 och 4 togs proverna i samband med en djuprensning. I figur 18 ses att sandnivån i filtren var högre innan föregående djuprensning. Därmed är det rimligt att anta att sanden i proverna som togs i filter 3 och 4 efter den senaste djuprensningen inte hade tvättats på minst 16 år. Utifrån sandhöjden före föregående djuprensning i filter 14 kan antas att sanden under ca 1,73cm under filtrets ovankant inte rensats på minst 16 år. I filter 14 togs proverna på följande djup under filtrets ovankant: 1,53m, 1,76m och 2,01m.

7.5.3 SAMLAD BEDÖMNING AV TILLSTÅNDET I FILTER 3, 4 OCH 14.

Filter 3

Bortfallet av mätpunkten i filtrets mitt gjorde det omöjligt att avgöra om trycket föll linjärt med ett ökande filterdjup eller om kurvan hade något språng. Det totala tryckfallet över filtret var dock relativt högt i förhållande till filter 4 och 10 som båda uppvisade ett linjärt tryckfall, vilket tydde på att någon form av nedsatt funktion kunde förekomma i filter 3. Analyssvaren från sandproverna visade att den mättade hydrauliska konduktiviteten i filtrets underdel var lägre än hos de övriga undersökta filtren. Utifrån detta antas att någon form av nedsatt funktion finns hos den undre delen av filter 3.

Filter 4

Jämförs resultaten från filter 4 med de från den nytvättade sanden i filter 3, ses att sanden i filter 4 till och med har en något högre hydraulisk konduktivitet än den nytvättade sanden. Detta, tillsammans med resultaten från mätningarna med nivårör, antyder att ingen form av nedsatt funktion finns hos filter 4.

Filter 14

Tidigare konstaterades att den genomsnittliga pordiametern i filter 14 var mindre än i filter 4, vilket skulle sänka sandens hydrauliska konduktivitet och antyda att porerna kompakterats eller att materia ackumulerats i dem. Vidare indikerade ett tydligt språng i tryckfallskurvan att filtret hade en region med lägre hydraulisk konduktivitet. Resultaten från analysen av sandproven bekräftar existensen av en region med lägre hydraulisk konduktivitet, ca 1,75m under filtrets ovankant.

7.6 Sandanalyser

7.6.1 FILTER 3 OCH PACKNINGSTEST

7.6.1.1 Iakttagelser vid provtagning

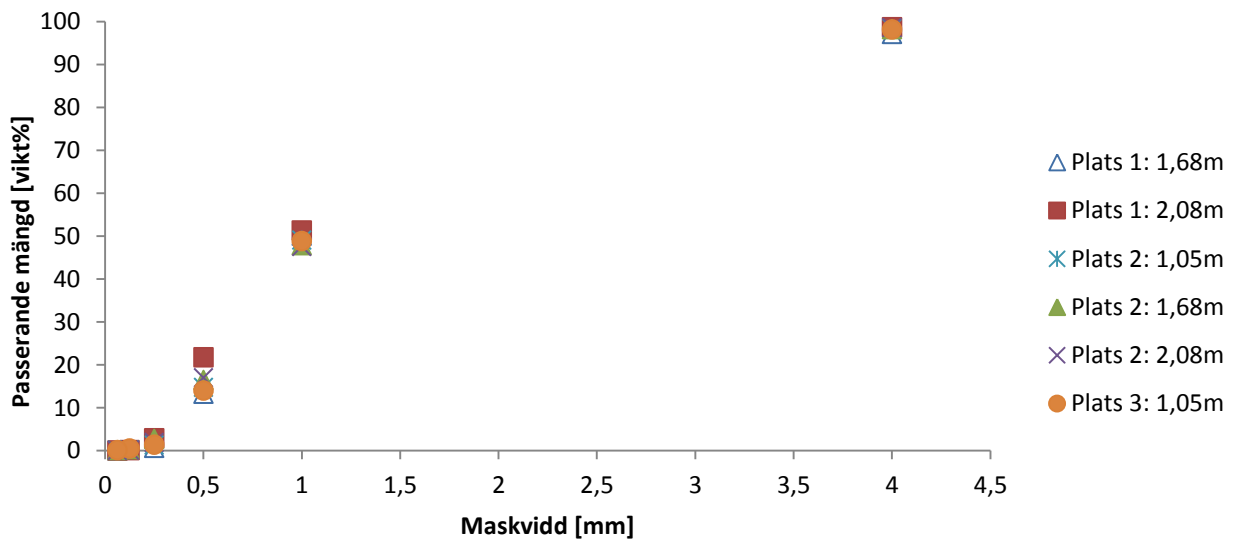
Då provgroparna grävdes i filtret observerades inga färgskiktningar och inte heller upplevdes sanden som mer packad vid något djup vid själva grävningen. I figur 60 visas en av provgroparna i profil, vilken dock på bilden tycks ha ett ljust lager mellan ca 35-30cm ovanför gruslagret. Detta avstånd ovanför gruslagret motsvarar ungefär 1,9-2m under filtrets ovankant. Filtret studerades ej innan återfyllningen av tvättad sand påbörjats och heller inte under återfyllnaden. Skillnader i bärighet och sandnivå mellan filtrets olika delar undersöktes ej.



Figur 60. Provgrop i filter 3 på plats 1. (Foto: M. Mellander)

7.6.1.2 Siktning

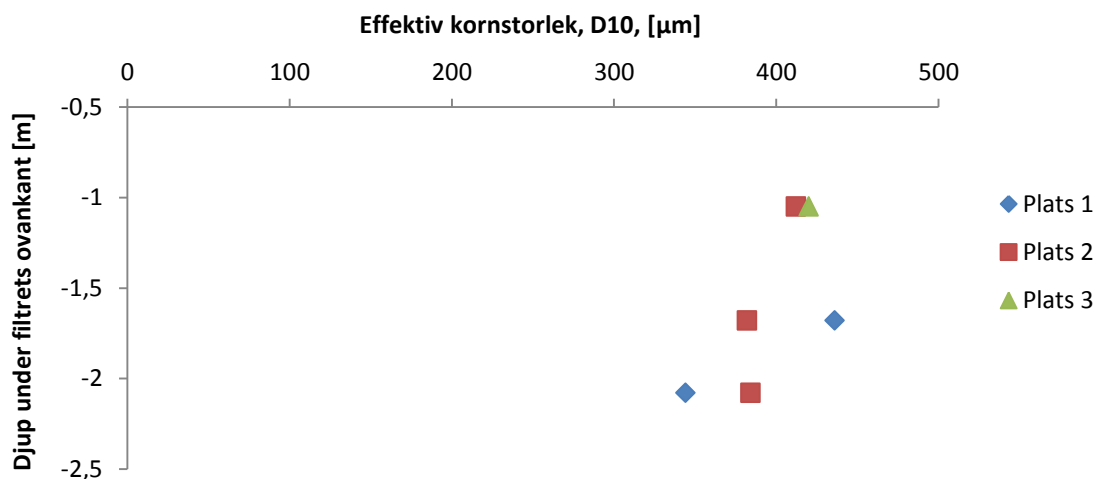
Resultatet av siktningen redovisas som siktkurva i figur 61. Effektiv kornstorlek redovisas i tabell 12 och figur 62.



Figur 61. Filter 3: Siktcurvor för de genomsnittliga resultaten vid varje provnivå. Figurförklaringen till höger i figuren anger djupet under filtrets ovankant.

Tabell 12. Filtersandens effektiv kornstorlek, D_{10} , för olika nivåer i filtret.

Provplats	Djup under filtrets ovankant [m]	D_{10} [μm]
1	1,68	440
1	2,08	340
2	1,05	410
2	1,68	380
2	2,08	380
3	1,05	420

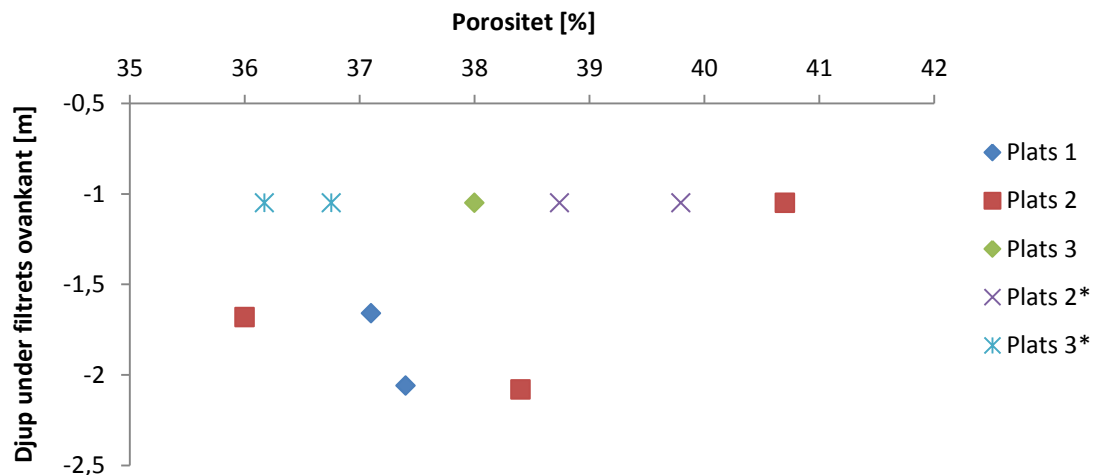


Figur 62. Effektiv kornstorlek, D_{10} , i filter 3.

7.6.1.3 Packning och porositet

I filter 3 togs prover vid platser som bedömdes vara olika hårt trafikerade. Plats 2 låg jämte den sandramp som byggts och denna plats trafikerades endast av den mindre hjullastaren.

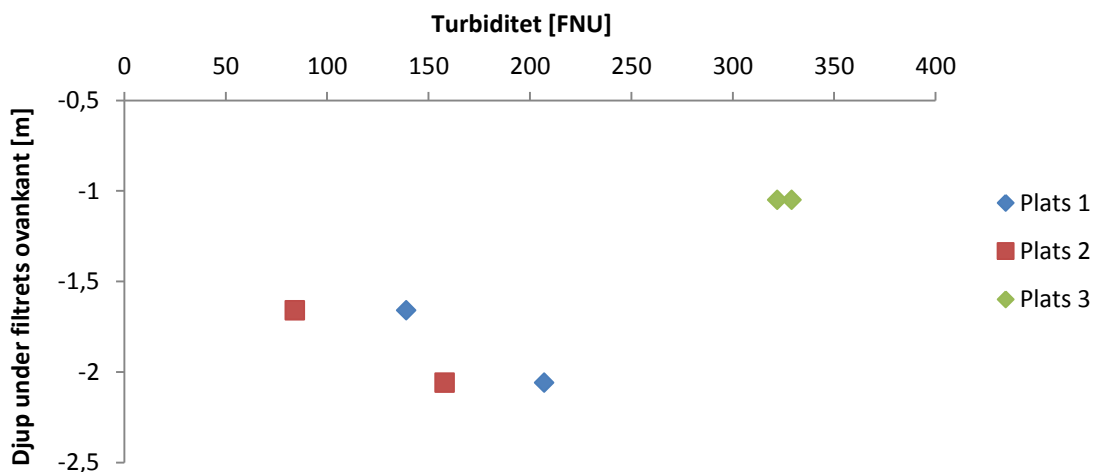
Plats 3 låg precis nedanför sandrampen, vilket innebar att både traktorn med släp och den större hjullastaren körde över denna plats vid varje nytt lass sand som levererades till filtret. I figur 63 presenteras resultaten av porositetsanalysen. Utifrån samtliga prover tagna vid platserna 2 och 3 beräknades att porositeten i genomsnitt var 2,7 procentenheter lägre vid den hårdare trafikerade plats 2. Felmarginalen vid dessa beräkningar är inte bestämd, men kan schablonmässigt sägas ligga på 10%.



Figur 63. Porositet för prover tagna i filter 3. Proverna markerade med * har inte genomgått analys av hydraulisk konduktivitet.

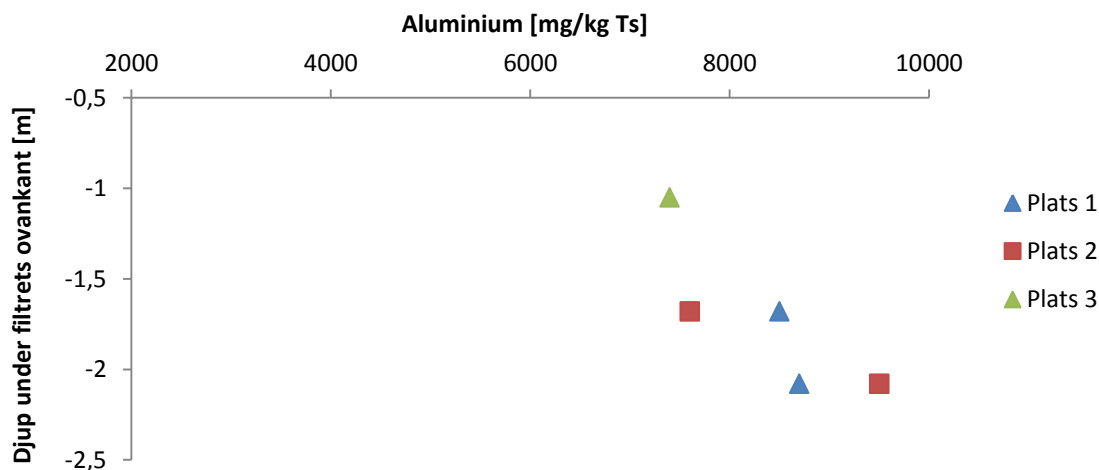
Jämförs porositeten med resultaten från mätningen av mättad hydraulisk konduktivitet har de båda kurvorna olika utseende. Den lägsta hydrauliska konduktiviteten uppmättes i de undre proverna, medan porositeten var lägst i de mellersta.

7.6.1.4 Turbiditetsanalyser av lakvatten



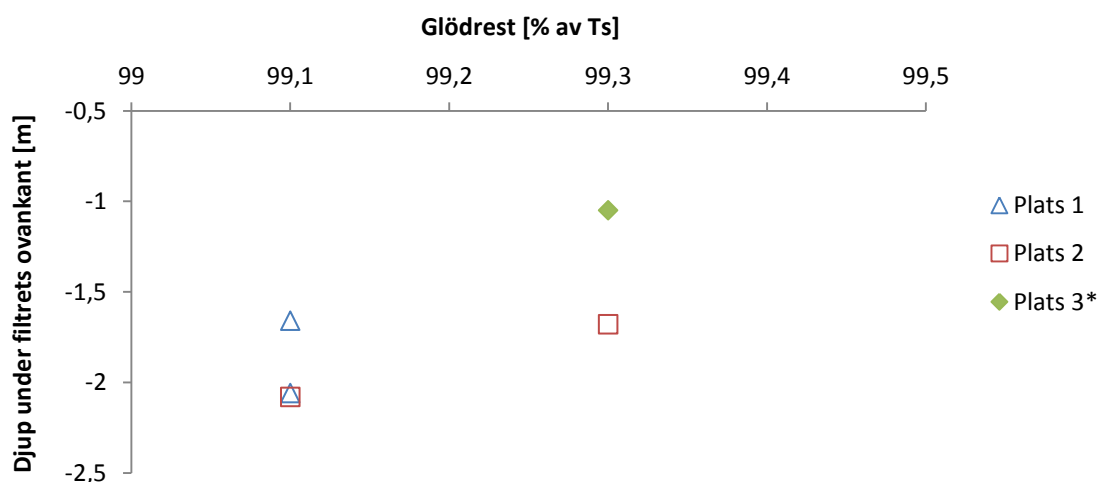
Figur 64. Provresultat för filter 3.

7.6.1.5 Aluminium



Figur 65. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 3.

7.6.1.6 Glödrest



Figur 66. Glödrest för olika nivåer i filter 3.

7.6.1.7 Kommentarer till resultaten

I likhet med filter 14 kunde ett ljust färgband ses i filter 3, se figur 60. Ingen skillnad i hårdhet kunde dock observeras, till skillnad från i filter 14. I övrigt är det intressant att notera att lakvattnet från den nytvättade sanden på plats 3 hade högst turbiditet. Sanden tvättas dock direkt efter avskrapningen och får sedan ligga på en lagringsplats fram till dess att den används för återfyllnad. Pollen och andra mindre partiklar skulle i viss utsträckning ha kunnat samlas på högen.

7.6.2 FILTER 4

7.6.2.1 Iakttagelser vid provtagning

Inga skiktningar påträffades under utgrävningen av provgroparna, vilket kan ses på figur 67, där sandprofilen från en av provgroparna kan ses. Gällande sandnivån i filtret gjordes bedömningen att sandnivån var lägre vid filtrets kanter. Längs filtrets kanter, men främst vid dess hörn, observerades även bitvis stående vatten på sandytan. Vid det stående vatten som påträffades precis invid filtrets inlopp grävdes en grop för att undersöka eventuella avvikelser, se figur 68. Inga skiktningar eller övriga avvikelser kunde observeras. Värt att notera är dock att det stående vattnet inte påverkades av gropens grävande och att övriga delar av filterbädden var fullständigt dränerade. Gällande bärighet observerades inga skillnader mellan filtrets olika delar. Vidare observerades inte filtret under återfyllnaden.

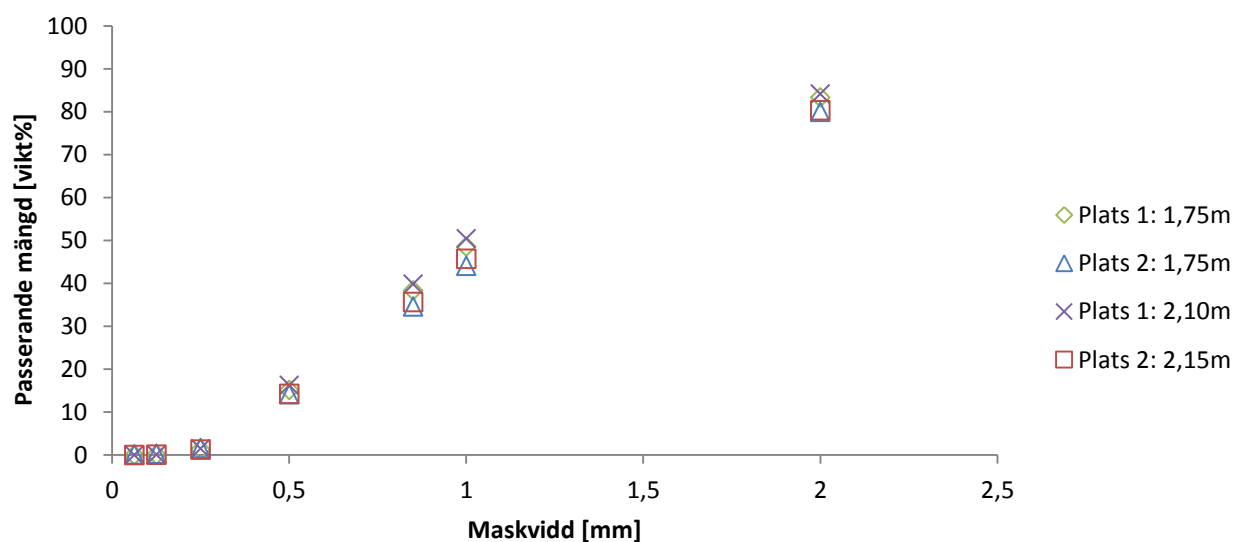


Figur 67. Provgrop i filter 4 på plats 2. (Foto: M. Mellander)



Figur 68. Gropen som grävdes invid det stående vattnet vid inloppet till filter 4. Observera att inga prover togs i denna grop. (Foto: M. Mellander)

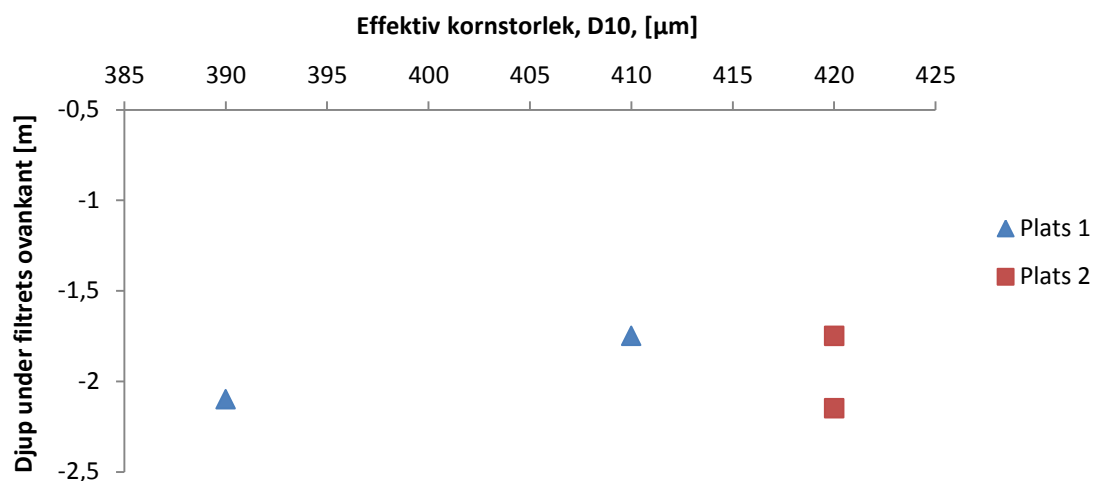
7.6.2.2 Siktning



Figur 69. Siktkurvor för samtliga lösa sandprover tagna i filter 4. Figurförklaringen till höger i figuren anger provplats och djupet under filtrets ovkant.

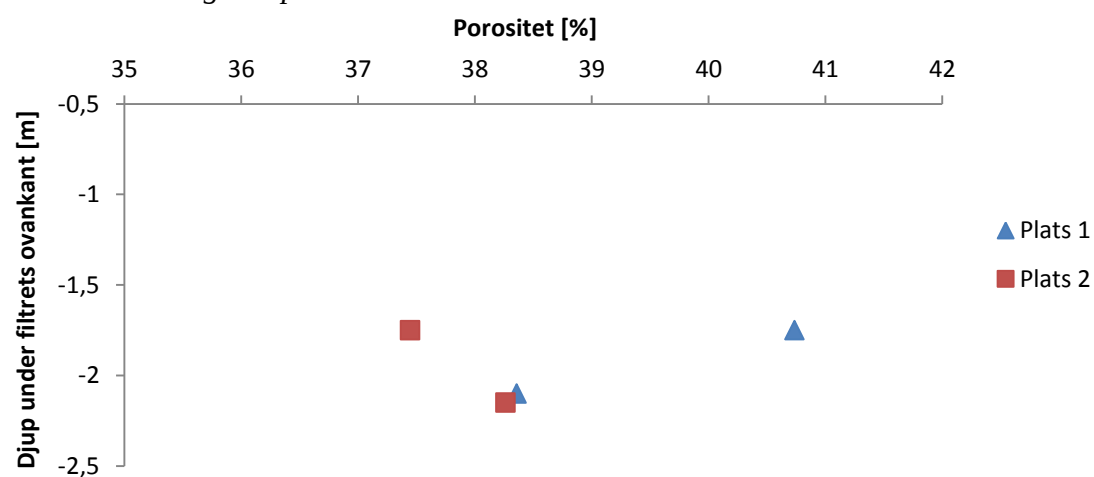
Tabell 13. Filtersandens effektiv kornstorlek, D_{10} , för olika platser och nivåer i filtret.

Provplats	Djup under filtrets ovankant [m]	D_{10} [μm]
2	1,75	420
1	1,75	410
1	2,1	390
2	2,15	420



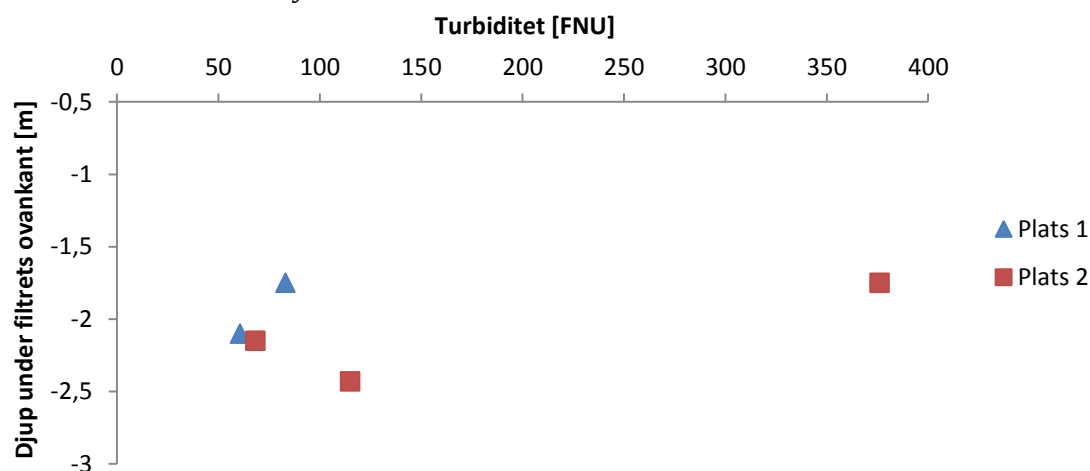
Figur 70. Effektiv kornstorleksfördelning, D_{10} , för sandproven tagna i filter 4.

7.6.2.3 Packning och porositet



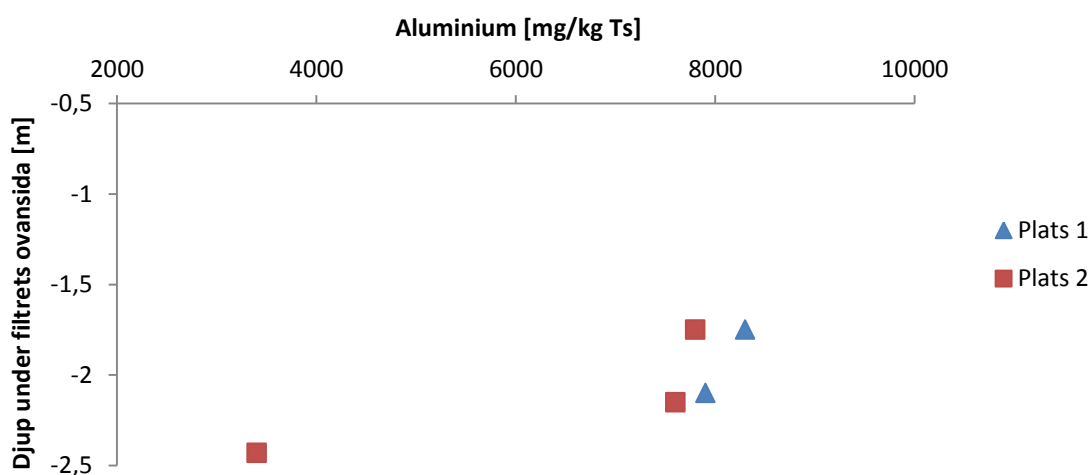
Figur 71. Porositet för prover tagna i filter 4. Figurförklaringen till höger i figuren anger provplats.

7.6.2.4 Turbiditetsanalyser av lakvatten



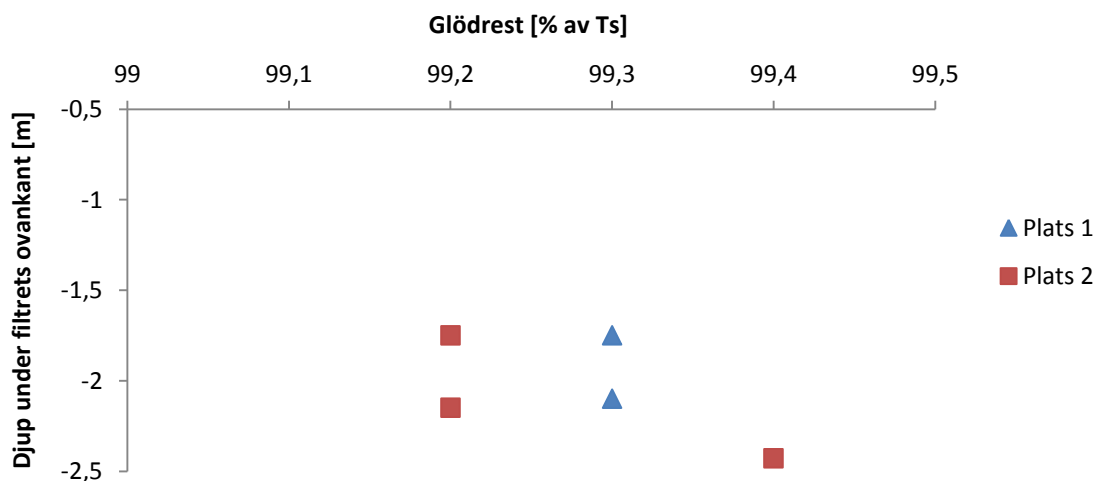
Figur 72. Provresultat för filter 4.

7.6.2.5 Aluminium



Figur 73. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 4.

7.6.2.6 Glödrest



Figur 74. Glödrest för olika nivåer i filter 4.

7.6.2.7 Kommentarer till resultaten

I filtret påträffades ingen färgskiftning i sandprofilen, vilket var väntat utifrån att samtlig sand tvättats relativt nyligen. Siktningskurvan tyder på att det inte finns någon skillnad i kornstorlek. Likt i filter 3 erhöles den högsta turbiditeten nära filtrets yta. I detta filter analyserades även aluminiumhalt och glödrest för det gruslager som finns under sandlagret, se de understa datapunkterna i figur 73 och 74. Resultaten tyder på att detta lager har lägre halt organiskt material och aluminium än sandbädden.

7.6.3 FILTER 14

7.6.3.1 Iakttagelser vid provtagning

Då provgropen på plats 1 grävdes kunde tydliga lager observeras, se figur 75. I figuren ses längst ned ovan på det gruslager filtersanden vilar på. Cirka 35cm ovanför gruslagret ses ett tydligt ljusbrunt lager, med en ungefärlig mäktighet på 5cm. Direkt ovanför det ljusbruna lagret, ca 40cm ovanför gruslagret, ses ett mer gråaktigt lager. Det gråaktiga lagrets mäktighet uppskattades till dryga 10cm, varefter färgen gradvis övergick till den bruna färg som kunde observeras både under och över skikten. Vid grävandet och även provtagningen upplevdes det gråa lagret som väldigt hårt packat.



Figur 75. Provgrop i filter 14, plats 1 där tydliga skiktningar kunde urskiljas. (Foto: M. Mellander)

Nivåskillnader

Vid provtagningen i filter 14 var det tydligt att sanddjupet varierade kraftigt i olika delar av filtret. Filtersandens höjd över det gruslager filtersanden vilar på var ca 30cm lägre vid den provgrop som grävdes nära ett hörn (plats 2) än i den provgrop som grävdes närmare mitten av filterbädden (plats 1).

Nivåskillnaderna i filtret kunde även tydligt observeras då filtret återfylldes med vatten underifrån, efter rensningen. Vid återfyllningen bildades en torr ö i mitten av filtret, medan vattnet stod relativt högt över andra delar av sandbädden, se figur 76.

Bärighet

Vid två av filtrets hörn, vid inloppet och vid platsen för mätningar med grundvattenrör, upplevdes att bärigheten var sämre. På dessa platser gav sanden vika vid beträdande och skorna sjönk ned något i sandbädden. Provgropen som grävdes här gick heller inte att gräva med helt vertikala sidor. Provgropen som grävdes närmre filtrets mitt kunde däremot utan problem grävas med vertikala sidor.



Figur 76. Filter 14 under återfyllnad, där en "torr ö" ses i filtrets mitt. (Foto: M. Mellander)

Sandrörelse

Vid fyllningen underifrån observerades invid tre av filtrets fyra hörn en sandrörelse i filtret, vilket närmast kan beskrivas som att sanden "kokade". Det tydligaste exemplet ses på figur 77, men mindre rörelser ses även på figur 78, markerade "A". På båda figurerna ses även att sanden har en annan struktur vid hörnen. Vidare observerades även en annan typ av sandrörelse, där finare partiklar sprutades upp ur filterbotten vid ett ställe, se figur 78, markerat "B". Detta fenomen inträffade dock ganska nära platsen där en av provgroparna grävts tidigare. Samtlig rörelse i filterbädden tycktes vara begränsad till filtrets hörn och kanter. Vidare bildades på vattenytan ett lager sand som flöt omkring, se figur 79.



Figur 77. Exempel den på kokande sandrörelse som observerades, där en tydlig bubblande rörelse är markerad med röd ring. (Foto: M. Mellander)

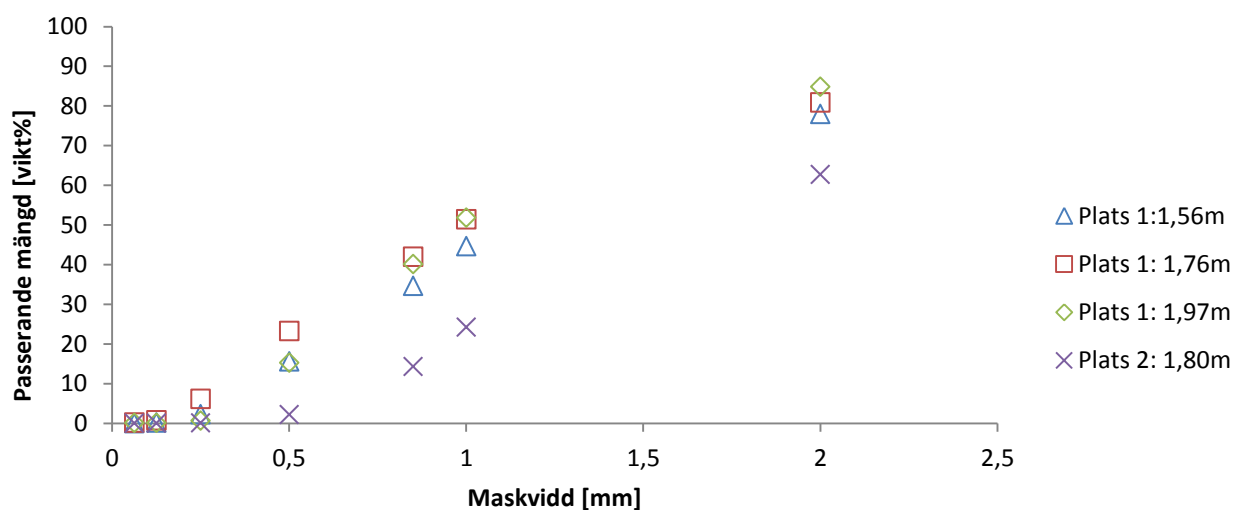


Figur 78. I cirkel A ses kokande sandrörelse och i cirkel B ses fina sandpartiklar sprutas upp ur filterbädden. (Foto: M. Mellander)



Figur 79. Sand på vattenytan vid fyllning av filter 14. (Foto: M. Mellander)

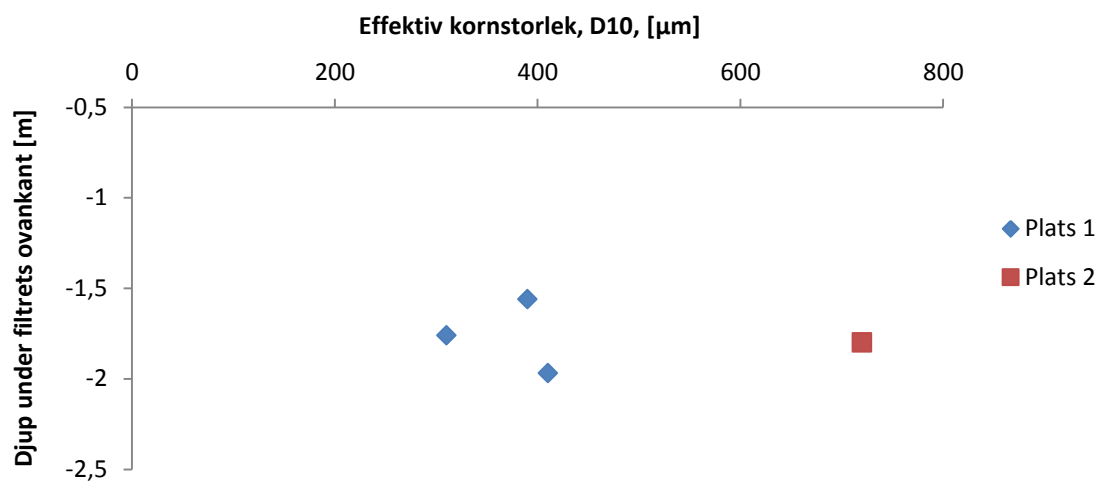
7.6.3.2 Siktning



Figur 80. Siktkurvor för samtliga lösa sandprover tagna i filter 14. Figurförklaringen till höger i figuren anger provplats och djupet under filtrets ovankant.

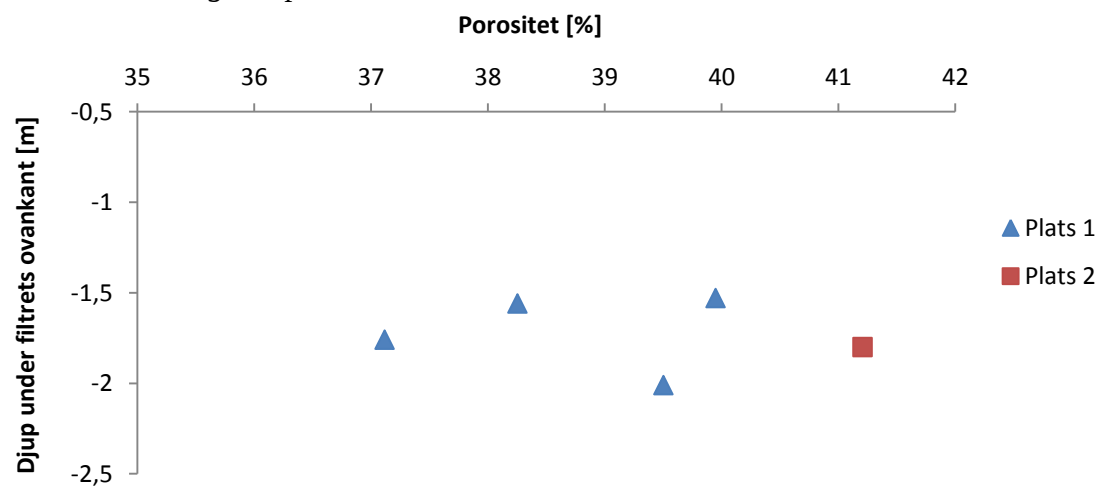
Tabell 14. Filtersandens effektiv kornstorlek, D_{10} , för olika platser och nivåer i filtret.

Provplats	Djup under filtrets ovkant [m]	D_{10} [μm]
1	1,56	390
1	1,76	310
1	1,97	410
2	1,8	720



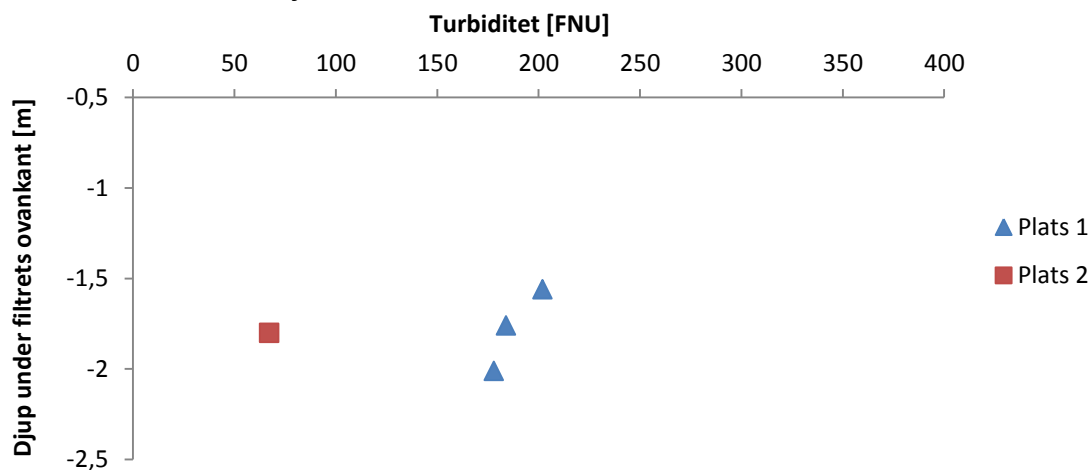
Figur 81. Effektiv kornstorleksfördelning, D_{10} , för sandproven tagna i filter 14.

7.6.3.3 Packning och porositet



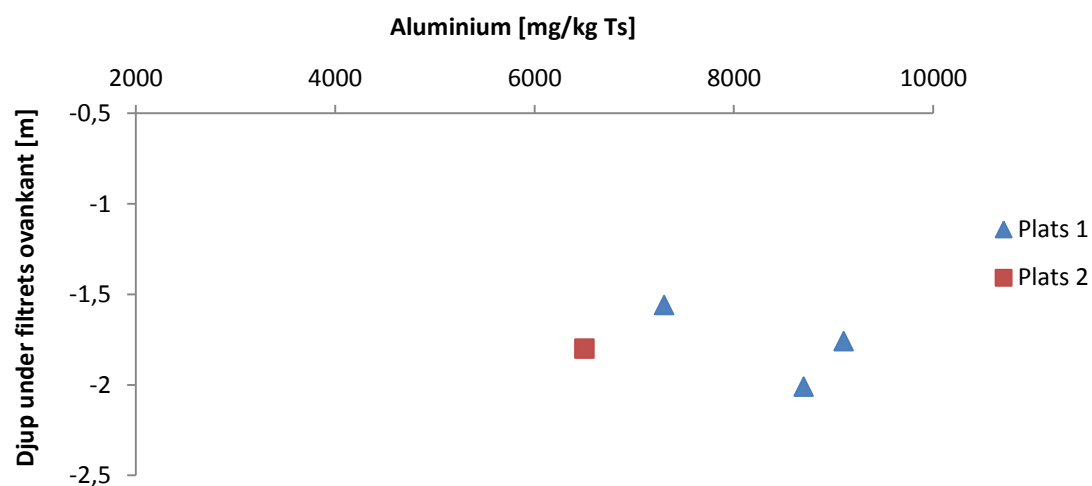
Figur 82. Porositet för prover tagna i filter 14. Figurförklaringen till höger i figuren anger provplats.

7.6.3.4 Turbiditetsanalyser av lakvatten



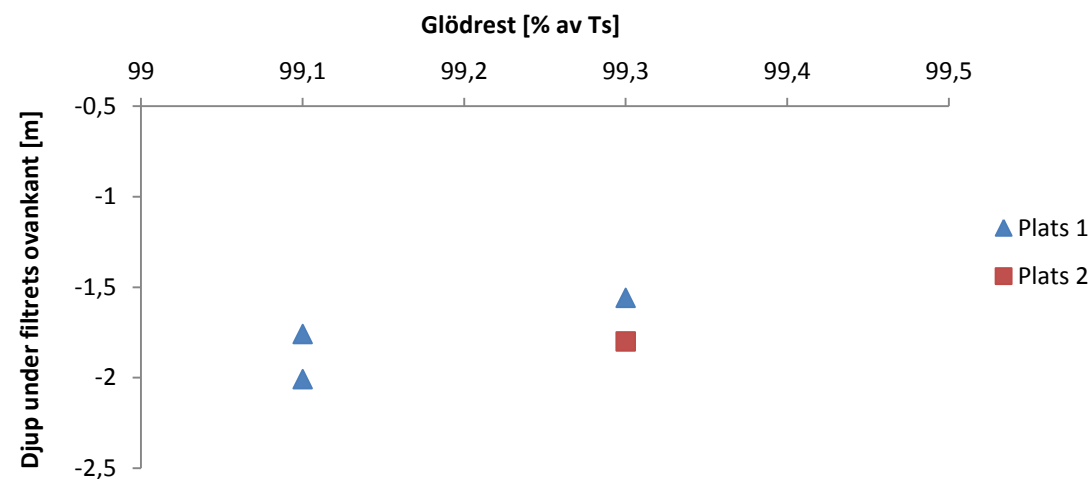
Figur 83. Provresultat för filter 14.

7.6.3.5 Aluminium



Figur 84. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 14.

7.6.3.6 Glödrest



Figur 85. Glödrest för olika nivåer i filter 14.

7.6.3.7 Kommentarer till resultaten

Siktningsskurvan och den effektiva kornstorleken tyder på att det finns en skillnad i kornstorlek i filtrets olika delar. Filtrets hörn hade större effektiv kornstorlek och i siktningsskurvan sågs här en frånvaro av finkorniga partiklar. Samtidigt visade undersökningen att det gråa lagret hade en större mängd finkorniga sandpartiklar. En möjlig förklaring till detta skulle kunna vara den sandrörelse som observerades. Ytterligare faktorer som skulle kunna kopplas till detta är den låga turbiditeten och den höga porositeten i filtrets hörn.

7.6.4 FILTER 15

Sandanalyser och mätningar med tryckfallsrör planerades och genomfördes i filter 3,4 och 14. Mätningarna gick relativt snabbt och det bestämdes att tryckfallsmätningar även skulle genomföras i filter 10 och 15. Filtren hade redan blivit rensade och det var därmed för sent att ta sandprover och analysera. När det blev dags att rensa filter 15 nästa gång var projektet inne i sin slutfas och det fanns inte tid för ytterligare sandanalyser. I filter 15 utfördes därför främst en okulär besiktning av filterbädden. Här utfördes även en mikroskopering av filtersand från olika nivåer i filterbädden, för att undersöka om några skillnader kunde ses.

7.6.4.1 Iakttagelser

Initialt grävdes en provgröp vid filtrets mitt, se figur 86. Här påträffades samma gråa lager som i filter 14, vars underdel var beläget ca 57-70 cm över filtrets gruslager. I figuren ses även en tegelsten från den uppsamlingsrännan som löper i mitten på filtrets botten.



Figur 86. Provgrop vid mitten av filtret. (Foto: M. Mellander)

För att undersöka det grå lagrets utbredning grävdes ett antal ytterligare gropar i filterbädden på olika platser. Lagret tycktes vara som tjockast i mitten av filtret för att vara tunnare närmre kanterna. I filtrets hörn kunde inget lager konstateras.

7.6.4.2 Mikroskopering

Prover togs på olika ställen i det grå lagret samt i ovan och underliggande sand. Vid jämförelse i mikroskop kunde inga uppenbara skillnader i sandkornens form eller storlek konstateras. Inte heller kunde någon uppenbar förorening ses. Någon form av mask konstaterades dock i ett av proven.

7.6.4.3 Kommentarer till resultaten

Det gråa lager som observerades i filtret var mycket likt det som observerades i filter 14. Ett stort antal gropar grävdes i detta filter och utifrån dessa kunde det konstateras att lagret inte var homogent över hela filterbädden.

7.7 Statistisk analys av resultaten

7.7.1 MÄTTAD HYDRAULISK KONDUKTIVITET

För att undersöka vilka faktorer som påverkade den hydrauliska konduktiviteten genomfördes linjär regressionsanalys samt flernivåanalys, för att undersöka vilka faktorer som påverkade den mättade hydrauliska konduktiviteten. Beroende variabel var alltså den mättade hydrauliska konduktiviteten. Oberoende variabler var effektiv kornstorlek (Eff), aluminiumhalt (Al), glödrest (Glr), porositet (Por) och turbiditet hos provens lakvatten (Turb). Analyserna utgår från resultaten i samtliga filter. Totala antalet observationer i analyserna var därmed 13 st. I flernivåanalysen användes dessutom data över vilket filter respektive prov var taget i. Resultaten presenteras i tabell 15 och 16. Genom denna analys undersöktes om ett linjärt samband fanns. För att undersöka om något av sambanden istället var av exponentiell karaktär logariterades värdena för den mättade hydrauliska konduktiviteten med basen e. Därefter upprepades den linjära regressionen och flernivåanalysen. Signifikansnivån för dessa analyser var lägre än de som erhöles då analyserna genomförts med de icke-logariterade värdena. Resultaten från dessa analyser redovisas ej i denna rapport, men tyder på att sambandet är av linjär art.

7.7.1.1 Linjär regression

Observationer: 13st

R^2 : 0.8650

R^2 -justerad: 0.7686

Tabell 15. Resultat av den linjära analysen. Variabelnamnen är förkortade, se kap 7.6.4.

Variabel:	Koefficient:	Standardfel:	t	$P > t $	95%-konfidensintervall	
AL	-.0182524	.0766302	-0.24	0.819	-.1994539	.1629491
Glr	449.0312	514.1842	0.87	0.411	-766.8212	1664.884
Turb	-.1229691	.2538678	-0.48	0.643	-.723271	.4773327
Eff	1.205224	.5230842	2.30	0.055	-.0316736	2.442121
Por	-3.464226	24.55985	-0.14	0.892	-61.53904	54.61058

7.7.1.2 Flernivåanalys

Observationer: 13st

Grupper: 3st

Tabell 16. Resultat av flernivåanalysen. Variabelnamnen är förkortade, se kap 7.6.4.

Variabel:	Koefficient:	Standardfel:	z	P> z	95%-konfidensintervall	
AL	.0342606	.0304613	1.12	0.261	-.0254424	.0939636
Glr	544.5775	196.7738	2.77	0.006	158.9079	930.2471
Turb	-.0574275	.0890331	-0.65	0.519	-.2319293	.1170742
Eff	1.758276	.2104959	8.35	0.000	1.345711	2.17084
Por	-34.2045	11.0735	-3.09	0.002	-55.90815	-12.50085

Summan av variansen som fanns i datasetet var 3722,67. Av denna låg 742,1517 på filtren. Variansen filtren ger upphov till är därmed 16,6%. Vid tolkningen av resultaten är det viktigt att komma ihåg att analyserna är utförda på få observationspunkter. Utifrån att flernivåmodellen visade att 16,6% av den totala variansen låg på filtren gör dock att det med säkerhet kan sägas att det är viktigt att ta med de olika filtren i beräkningen när beräkningar och statistiska analyser utförs. Varje enskild mätpunkt kan alltså inte ses som en enskild observation i en anonym punktsvärm.

När i flernivåanalysen hänsyn hade tagits till variansen härrörande från filtren, visade resultaten att glödrest, effektiv kornstorlek och porositet hade samband med den mättade hydrauliska konduktiviteten med en sannolikhet på över 90%. Utifrån det låga antalet observationspunkter kan inget med säkerhet sägas om de enskilda parametrarnas betydelse för den hydrauliska konduktiviteten. Däremot kan undersökningen med viss säkerhet säga något om sambandens styrka i förhållande till varandra. Det vill säga hur betydande de olika parametrarna är för den mättade hydrauliska konduktiviteten i förhållande till varandra. Att inget signifikant samband gavs för aluminiumhalten beror sannolikt på den mätmetod som användes, då resultaten i stor utsträckning påverkades av aluminium i filtersanden. I K. Anderssons studie 2006, av igensättning av långsamfilter i Östby vattenverk, gjordes bedömningen att det var just aluminium i form av restflockar som orsakade de problem som upplevdes där. Således är det troligt att aluminiumhalten har betydelse för den mättade hydrauliska konduktiviteten.

7.7.2 ACKUMULATION I FILTRETS UNDERDEL

För att undersöka om kornstorlek (Eff), aluminiumhalt (Al), glödrest (Glr), porositet (Por) och turbiditet hos provens lakvatten (Turb) ökade eller minskade med djupet utfördes linjär regressionsanalys och flernivåanalys. För att få en modell som är jämförbar med resultaten i kapitel 7.8.1 användes exkluderades här den mättade hydrauliska konduktiviteten. Resultaten presenteras i tabell 17 och 18.

För att få en bild av hur halterna varierade i de olika delarna av filtren sammanställdes medelvärden för olika delar, se tabell 19. Då det även var intressant att se hur värdena för det lager som påträffades i filter 14 skiljde sig från dessa värden inkluderades även dessa mätvärden i tabell 19.

7.7.2.1 Linjär regression

Observationer: 13st

R^2 : 0.5656

R^2 -justerad: 0.2554

Tabell 17. Resultat av den linjära analysen. Variabelnamnen är förkortade, se kap 7.6.4.

Variabel:	Koefficient:	Standardfel:	t	P> t	95%-konfidensintervall	
AL	.00013	.0002519	0.52	0.622	-.0004656	.0007256
Glr	2.439282	1.69015	1.44	0.192	-1.557288	6.435853
Turb	.0018343	.0008345	2.20	0.064	-.0001389	.0038075
Eff	.0011834	.0017194	0.69	0.513	-.0028824	.0052491
Por	-.0633858	.0807295	-0.79	0.458	-.2542808	.1275091

7.7.2.2 Flernivåanalys

Observationer: 13st

Grupper: 3st

Tabell 18. Resultat av flernivåanalysen. Variabelnamnen är förkortade, se kap 7.6.4.

Variabel:	Koefficient:	Standardfel:	z	P> z	95%-konfidensintervall	
AL	.0001112	.0001818	0.61	0.541	-.0002451	.0004674
Glr	2.474329	1.207457	2.05	0.040	.1077566	4.840902
Turb	.0017996	.0005811	3.10	0.002	.0006607	.0029384
Eff	.0009074	.0012458	0.73	0.466	-.0015344	.0033491
Por	-.0500237	.0607755	-0.82	0.410	-.1691415	.0690941

Tabell 19. Medelvärden för mätvärden i olika delar av filtren samt värden från det gråa lagret i filter 14.

	hyd.kond. [cm/h]	Aluminium [mg/kg Ts]	Glödrest [% av Ts]	Turbiditet [FNU]	Effektiv kornstorlek "D10" [um]	Porositet [%]
Hela filtret	304	8069	99,2	164	418	38,5
Övre lagret	314	7817	99,3	201	410	38,3
Undre lagret	294	8286	99,2	132	425	38,6
Grå lager, Filter 14	134	9100	99,1	184	310	37,1

Utifrån resultaten ses att endast lakvattnets turbiditet visar ett signifikant samband med djupet. Körningar gjordes även där mättad hydraulisk konduktivitet inkluderades i modellerna. Dessa visade inget signifikant samband mellan mättad hydraulisk konduktivitet och djup.

8 Diskussion

I följande kapitel diskuteras först på vilket sätt långsamfiltrens kapacitet minskat och i vilken utsträckning detta skett. Därefter utvärderas de uppställda hypoteserna utifrån resultaten. Kapitlet avslutas med förslag på åtgärder samt förslag till vidare studier.

8.1 Kapacitetsminskningens form och utsträckning

På grund av en lägre efterfrågan producerade Lovö vattenverk betydligt mindre vatten under 2008-2014 än under 1967-1973. Sett över hela perioderna var det totala antalet rensningar och frysningar lägre under 2008-2014, vilket gett en längre medeldrifttid. Dock ses en tydlig linjärt avtagande trend gällande drifttid under perioden 2008-2014, se figur 29.

Trots att vattenproduktionen minskats och därmed även filtreringshastigheten minskat jämfört med 1967-1973 har ändå det genomsnittliga tryckfallet ökat. Tryckfallet var under perioden 2008-2014 knappa 20cm högre än under 1967-1973 och steg med ca 10cm vattenpelare (36%) under perioden. Tryckfallsdata för perioden 1967-1973 fanns bara för filter 4 och 14. Under denna period tvättades dock all filtersand vid djuprensning, vilket gör det rimligt att anta att variationerna i filterprestanda var små. Att tryckfallet skiljde sig mycket lite mellan filter 4 och 14 under 1967-1973 stärker detta antagande. Således kan ett genomsnitt av tryckfallet för filter 4 och 14 antas ligga mycket nära tryckfallet för samtliga filter under perioden. Att tryckfallet verkligen har ökat med knappa 20cm i genomsnitt för filter 1-16 bedöms därmed som mycket troligt.

Då dygnsmedelvärden för tryckfallet studerades under perioden 2008-2014 sågs i flera figurer en trend där motståndet efter rensning ökade, se figur 33-36. Störst ökning skedde i filter 14, men ökningen kunde även ses i filter 3 samt i genomsnittet för samtliga filter. Tryckfallet efter rensning i filter 4 hölls på en relativt konstant nivå under perioden. Den ökande trend som kunde ses i årsmedelvärdet för tryckfallet tycktes istället bero på högre tryckfall innan rensning hos filter 4. Även för genomsnittet av filter 1-16 tycktes tryckfallet innan rensning ha en ökande trend under perioden. Jämförelsen mellan beräknat tryckfall utifrån en fast genomsnittlig pordiameter och det uppmätta tryckfallet under 2008-2014 visade vilken påverkan temperatur, flödes hastighet och bildande av filterhud har på tryckfallet. I jämförelsen sågs att dessa faktorer inte kunde förklara de trender som kunnat observeras, med stigande tryckfall före och efter rensning. Värt att notera här var även att tryckfallet efter rensning i filter 4 inte hade samma minskande trend som det beräknade tryckfallet.

Eftersom beräkningarna påverkas starkt av uppbyggnaden av filterhuden är det endast direkt efter rensning som något kan sägas om sandbäddens genomsnittliga porstorlek. Då den beräknade genomsnittliga pordiametern i filterbädden studerades kunde trender med minskande pordiameter efter rensning ses hos samtliga undersökta filter samt hos genomsnittet för filter 1-16, se figurerna 41-44. Under 2008-2014 minskade pordiametern efter rensning med ca 5µm för genomsnittet av samtliga filter, vilket var en minskning med ca 12,5%. Utifrån ekvation 10 skulle detta ge en tryckfallsökning på 30,6%, vilket motsvarar den uppmätta tryckfallsökningen under perioden relativt väl.

8.1.1 SAMMANFATTNING

Den kapacitetsminskning som kunde konstateras utifrån denna undersökning består av att det genomsnittliga tryckfallet i filter 1-16 ökat. Utifrån de filter som undersökts kan det konstateras att ökningens storlek varierar mellan filtren.

8.2 Långsamfiltrens belastning

8.2.1 TURBIDITET

Undersökningen visade att turbiditeten under 2008-2014 var i genomsnitt 40% lägre än under 1967-1973. Här finns dock stor osäkerhet på grund av den osäkra konverteringen till FNU och det låga antalet datapunkter som användes för att framställa medelvärdet för perioden 1967-1973. Då minskningen uppskattades till hela 40% är det trots osäkerheten troligt att en viss minskning verkligen har skett.

8.2.2 ALUMINIUM

Undersökningen visade att aluminiumhalten i snabbfiltratet var 0,004mg/l lägre under 2008-2014 än under 1967-1973, vilket var en minskning med knappa 12%. Även här finns en viss osäkerhet utifrån det låga antal datapunkter som användes för att framställa medelvärdet för perioden 1967-1973. Osäkerheten bedöms dock inte vara större än att det utifrån detta kan antas att ingen ökning skett som skulle kunnat ha betydelse för långsamfiltrens funktion.

8.2.3 PH OCH TEMPERATUR

Undersökningen visade att pH i genomsnitt var 0,1 högre under 2008-2014 jämfört med 1967-1973. Vattentemperaturen kartlades inte för perioden 1967-1973 men bör ha legat nära den medeltemperatur på 7°C som uppmättes under 2008-2014. Vid denna temperatur skulle den uppmätta förändringen i pH innebära en större löslighet för aluminium under perioden 2008-2014, vilket skulle minska den mängd aluminium som skulle kunna fastna i långsamfiltren.

8.2.4 FILTRERINGSFASTIGHET

Undersökningen av filtreringshastighet visade att denna i genomsnitt var 50mm/h lägre under 2008-2014. Filtreringshastigheten för perioden 1967-1973 baserades på verkets totala årliga producerade vattenvolym och inte på årlig producerad volym långsamfiltrat. Därmed underskattades filtreringshastigheten under denna period, då det långsamfiltrat som efter rensning avleddes tillbaka till Mälaren inte räknades med. Minskningen under 2008-2014 jämfört med perioden 1967-1973 är därmed större än 50mm/h.

8.2.5 BELASTNING UNDER 1973-2008

Efter 1973 minskade dricksvattenproduktionen på Lovö vattenverk, och filtreringshastigheten har därför varit låg under 1973-2008 jämfört med under 1967-1973. Vattenkvaliteten i snabbfiltratet undersöktes inte under 1973-2008 och det kan därför inte uteslutas att kvaliteten varit sämre under denna period. Utifrån hur noga processerna övervakas är det dock mycket sannolikt att snabbfiltratet under perioden 1973-2008 inte varit drastiskt sämre än under någon av de undersökta perioderna.

8.2.6 SAMMANFATTNING

Under 2008-2014 var långsamfiltrens belastning, med avseende på filtreringshastighet och mängd utfälld aluminium, lägre än under 1967-1973. Vidare är det rimligt att anta att belastningen inte heller var avsevärt högre under 1973-2008.

8.3 Utvärdering av hypoteser kring orsaker till kapacitetsminskningen

8.3.1 HÖGRE BELASTNING AV FILTREN

Utredningen av långsamfiltrens belastning visade att belastningen av långsamfiltren under 2008-2014 minskat jämfört med 1967-1973. Det har sannolikt ej heller varit avsevärt högre under 1973-2008. Bedömningen är alltså att belastningen inte ökat, varför detta kan uteslutas som orsak till den minskade kapaciteten.

8.3.2 ACKUMULERING AV MATERIAL I FILTRETS UNDER DEL

8.3.2.1 Generell ackumulering i filtrens undre del

Den statistiska analysen av resultaten visade inga signifikanta linjära samband mellan djupet och parametrarna kornstorlek, aluminiumhalt, glödrest, porositet och turbiditet hos provens lakvatten. Jämförs medelvärden för den del av filtersanden som inte rensats på 16 år och det ovanliggande sandlagret ses heller inget som tyder på en ackumulation. Således tyder resultaten på att ingen generell ackumulering skedde i den understa delen av filtret i sin helhet. Resultaten tyder istället på att en eventuell ackumulering skulle vara koncentrerad till ett grått lager, vilket endast utgjorde en mindre del av den filtersand som inte rensats på minst 16 år.

8.3.2.2 Ackumulering i grått lager i filtrens undre del

I tryckfallskurvorna i filter 15 och 14 ses tydliga språng, se figur 53 och 55, vilket enligt teorin kring tryckytan i filterbädden tyder på ett lager med lägre hydraulisk konduktivitet. I båda filtren kunde ett grått sandlager observeras vid det djup där tryckfallet ägt rum. Vid provtagning och analys av ett sandprov från det gråaktiga lagret i filter 14 kunde bekräftas att den hydrauliska konduktiviteten i lagret var lägre än i ovan- och underliggande sand. I filter 14 och 15 kan det därmed konstateras att kapacitetsminskningen förmodligen beror på detta lager.

Utöver språng i tryckfallskurvan och mätningen av hydraulisk konduktivitet är sannolikt även det ökande tryckfallet efter rensning som kunde ses i filter 14, se figur 35, ett resultat av det grå lagret. Detta eftersom en större del av tryckfallet sker nere i sandbädden och därmed inte åtgärdas genom den vanliga rensningen. Att det genomsnittliga tryckfallet efter rensning i filter 1-16 ökade under 2008-2014 skulle därmed kunna innebära att det sker en lagerbildning i samtliga filter. Eftersom förutsättningarna endast skiljer sig marginellt i filtren vore det konstigt om lager endast bildades i filter 14 och 15. Små skillnader mellan filtren skulle kunna vara orsaken till att lagerbildningen gått olika fort i de olika filtren. Sannolikt skulle ett mindre utvecklat lager vara svårare att se, vilket skulle kunna förklara att inget tydligt lager kunde observeras i filter 3.

8.3.2.3 Orsaken till den försämrade mättade hydrauliska konduktiviteten i det grå lagret

Flernivåanalysen visade att det i långsamfiltersanden fanns ett signifikant samband mellan den hydrauliska konduktiviteten och kornstorlek, glödrest samt porositet. Respektive faktors inverkan på den hydrauliska konduktiviteten beräknades för att avgöra vad som i högst utsträckning bidrog till den minskade hydrauliska konduktiviteten.

Två olika beräkningar genomfördes, där den ena utgick från koefficienterna som erhöles vid flernivåanalysen, se tabell 16, och den andra utgick från Kozeny-Carmen ekvationen, se ekvation 12. Till grund för beräkningarna användes värden för det grå lagret samt för hela filtret hämtade från tabell 19. Skillnaden i glödrest, effektiv kornstorlek och porositet mellan det grå lagret och genomsnittet för hela filter 14 redovisas i tabell 20. Varje faktors inverkan på den mätade hydrauliska konduktiviteten presenteras i tabell 21.

Tabell 20. Skillnaden mellan glödrest, effektiv kornstorlek och porositet mellan det grå lagret och samtlig sand i filter 14.

	Glödrest [% av Ts]	Effektiv kornstorlek "D10" [μm]	Porositet [% _{vol}]
Differens	-0,1	-108	-1,4

Tabell 21. Beräknad effekt på den mätade hydrauliska konduktiviteten (K_s) utifrån de avvikelser som kunde konstateras i det grå lagret jämfört med övrig sand.

	Glödrest	Effektiv kornstorlek	porositet
Beräknad inverkan på K_s , Flernivåanalys [cm/h]	-54,5	-189,9	-47,9
Beräknad inverkan på K_s , Kozeny-Carmen [cm/h]	-	-43,2	-3,2

Resultaten av båda beräkningen tyder på att det var lagrets lägre effektiva kornstorlek som var den faktor som hade störst negativ inverkan på filtrets mätade hydrauliska konduktivitet.

Gällande beräkningen utifrån flernivåanalysen är det viktigt att komma ihåg är att ett lågt antal observationer användes vid den statistiska analysen. Vidare baserades avvikelserna i det grå lagret enbart på ett enda prov. Osäkerheten är därmed för stor för att kunna säga något om varje faktors exakta inverkan på den hydrauliska konduktiviteten. Resultaten kan dock användas för att se hur starkt de olika faktorerna inverkar i förhållande till varandra.

I Kozeny-Carmen ekvationen, se ekvation 12, användes effektiv kornstorlek istället för genomsnittlig kornstorlek. Då den effektiva kornstorleken är mindre än den genomsnittliga kornstorleken påverkas storleken på den förutspådda minskningen i hydraulisk konduktivitet. Om den genomsnittliga kornstorleken kan antas minska proportionellt mot minskningen av effektiv kornstorlek ger resultatet dock rätt proportioner mellan respektive faktors påverkan. Utifrån siktkurvorna för sanden i filter 14 tycks detta vara ett rimligt antagande då samtliga kurvor har samma utseende men olika placering i y-led. Utifrån detta antagande bör alltså även dessa resultat kunna användas för att tolka de olika faktorernas relativa påverkan.

Via mikroskoperingen gjordes vidare bedömningen att inte heller sandpartiklarnas form skiljde sig markant mellan det grå lagret och den övriga sanden, vilket annars hade kunnat påverka den mätade hydrauliska konduktiviteten, se ekvation 11.

Att inget signifikant samband erhöles mellan den mätade hydrauliska konduktiviteten och aluminiumhalten skulle kunna bero på metoden som användes för analys av aluminiumhalten i sanden. Metoden påverkades starkt av variationer i sandmineralets aluminiumhalt eftersom starka syror användes, vilka löste upp mineralet.

Mineralet i sig innehöll aluminium som en byggsten. Med tanke på detta kan inte aluminium uteslutas som påverkande faktor gällande vad som orsakar den försämrade mättade hydrauliska konduktiviteten i det grå lagret.

8.3.2.4 *Vad som kan ha orsakat den låga porositeten*

Siktcurvorna från de olika från djupen i filter 14 hade till synes samma utseende, se figur 80. Detta tyder på en likvärdig relativ storleksfördelning i det grå lagret och den övriga sanden. Hade sandkornen varit perfekta sfärer hade detta inneburit att porositeten inte påverkades av minskningen i effektiv kornstorlek, utan enbart hade inneburit en lägre genomsnittlig porstorlek. I praktiken är dock inte sandkornen perfekt sfäriska, vilket gör att det inte kan uteslutas att porositeten i det grå lagret minskat till följd av den minskade effektiva kornstorleken. Ackumulering av organiskt material skulle innebära en minskning av porvolymen och därmed porositeten. Även ackumulering av aluminiumflock och andra oorganiska föroreningar skulle påverka porositeten på detta sätt. Aluminiumhydroxid är en gelartad substans, vilket ger den en låg densitet. Det är inte heller orimligt att anta att även de organiska föroreningarna har en låg densitet relativt sanden. Den metod som användes för bestämning av porositeten utgick från att allt material i sandproverna hade en densitet på $2,65\text{gcm}^{-3}$. Metoden skulle därmed underskatta påverkan av föroreningar med lägre densitet trots att de i praktiken skulle kunna ha en icke försumbar påverkan på porositeten.

Utifrån ovanstående resonemang skulle det faktum att mätningen visade att det grå lagret hade en lägre porositet än övrig sand, innebära att lagret hade packats. För att packning skall kunna ske krävs att sandbädden belastas med tryck, vilket endast sker då maskiner framförs på filterbädden vid rensning.

8.3.2.5 *Vad som orsakade ackumuleringen av fina sandpartiklar och organiskt material*

Då filter 14 studerades under återfyllnaden kunde sandrörelse observeras i filtrets hörn, se figur 77 och 78. Sandrörelsen tycktes ge upphov till att finkornigt material suspenderades från sandbädden och spreds till övriga delar av filtret. Analys av sand från filtrets hörn tydde på en allmän frånvaro av finkornigt material: låg turbiditet hos lakvattnet, stor effektiv kornstorlek, hög glödrest och låg aluminiumhalt. Detta tyder på att det material som ackumulerats i det gråa lagret kommer härifrån.

Att sandrörelsen uppstår i filtrets hörn beror sannolikt till stor del på att filterbädden är tunnare där, till följd av att mer sand skrapas av här vid filterrensning. I filter 14 uppskattades att sandnivån var hela 30cm tunnare i hörnen än i filtrets mitt. En hypotes varför detta leder till den observerade sandrörelsen är att detta tunna sandlager inte väger tillräckligt mycket för att kunna stå emot kraften från den uppåtriktade vattenströmningen vid vattenåterfyllnaden efter rensning. Den låga sandnivån tillsammans med hörnens höga hydrauliska konduktivitet skulle även kunna ge upphov till ett större vattenflöde i filtrets hörn. Beteendet kan liknas vid ett antal parallellkopplade resistorer, där strömmen blir störst genom resistorn med lägst resistens.

Att sandens hydrauliska konduktivitet i filtrets hörn var större än i dess mitt beror sannolikt på den uppåtriktade sandrörelsen. Sandrörelsen måste alltså ha kunnat uppstå redan innan sandens mättade hydrauliska konduktivitet var förhöjd. Förhöjningen skulle dock sannolikt kunna förstärka effekten och ge en snabbare utvidgning av det område i vilket sandrörelsen sker. Det hela skulle därmed sannolikt ha börjat som en liten sandrörelse, som växt sig större allt eftersom den hydrauliska konduktiviteten höjdes och ökade flödet ytterligare.

Vidare kan det spekuleras i att flödesmotståndet lokalt skulle kunna bli väldigt lågt när väl sandrörelse uppstått. Detta eftersom samtlig sand i dessa områden suspenderades i någon bemärkelse och flödet därigenom sannolikt inte har samma egenskaper som flödet genom ett poröst medium.

8.3.2.6 Sammanfattning

Ingen generell ackumulering sker i filtrens undre del. Ackumulering av organiskt material och finkornig sand kunde dock i flera filter konstateras i ett grått sandlager, beläget i överdelen av det lager som inte rensats på minst 16 år. Även porositeten i det grå lagret var lägre än i filterbäddens övriga delar, något som skulle kunna bero på packning eller ansamlingen av den finkorniga sanden. Ett stort tryckfall uppmättes i det grå lagret och vid analys visades att det hade en låg mättad hydraulisk konduktivitet. Ackumulationen av finkornig sand visades vara den främsta orsaken till lagrets låga hydrauliska konduktivitet. Ackumulationen av finkornigt sandmaterial bedömdes bero på den sandrörelse som uppstår i filtrets kanter vid återfyllnad efter rensning. Sandrörelsen i sin tur bedöms uppstå till följd av att sandnivån är betydligt lägre i filtrets kanter.

8.3.3 KOMPaktering vid rensning

I filter 3 sågs att porositeten skiljde sig 2,7 procentenheter mellan den hårt trafikerade platsen och den mindre hårt trafikerade platsen. Detta visar att sanden packas av maskinerna som används vid rensning. Just nedanför sandrampen blir belastningen extra hög, då detta är den punkt i filtret som trafikerats mest. Vidare är det enbart vid djuprensning som denna höga belastning sker. Vid ytrensningar används inte samma tunga maskiner. Packningseffekten av den mindre hjullastaren, samt packningseffekten i de delar av filtret som de tyngre maskinerna inte kör över lika frekvent, kan därmed inte bedömas utifrån detta resultat. Vidare är det oklart hur djupgående packningseffekten är, eftersom packningseffekten främst undersöktes direkt i sandbäddens yta. Utifrån teorin kring packning kan dock effekten antas minska med djupet.

8.3.3.1 Packningens effekt på filtrens prestanda

Gällande packningens påverkan på långsamfiltrens effekt visade mätningarna med nivåör efter djuprensning i filter 3 och 4 att tryckfallet i de översta 5 cm av filtret var mycket nära noll. Eftersom packningseffekten är som störst vid sandytan borde detta innebära att den packning som sker vid djuprensning får mycket liten effekt på tryckfallet i filtret. Dock genomfördes denna mätning nära filtrens hörn, vilka är relativt milt trafikerade. Hade tryckfallet mätts i filtrets mitt skulle resultaten ha kunnat bli annorlunda. Då tryckfallet efter rensning i filter 4 jämfördes mellan år 1973 och år 2014, sågs en tryckfallsökning på 3,4cm vattenpelare. Denna ökning skulle kunna bero på en ökad packning till följd av att rensningsmetoderna skiljt sig mellan de jämförda tillfällena. Just filter 4 är idealt att använda för denna jämförelse, eftersom all sand i filtret nyligen rensats samt att inget grått lager kunnat påträffas i filtret.

Tryckfallet efter rensning påverkas dock även av vattnets temperatur, sandlagrets tjocklek och filtreringshastigheten, vilka sannolikt skiljde sig mellan de tillfällen som jämfördes. Antogs en fast genomsnittlig pordiameter på 70µm beräknades dessa faktorer under 2008-2014 ge upphov till en tryckfallsvariation på 17,7cm vattenpelare. Den tryckfallsökning på 3,4cm vattenpelare som sågs i jämförelsen skulle därmed helt kunna bero på den naturliga tryckfallsvariationen i filtret.

Rensningarna sker ungefär vid samma tid på året, vilket gör att temperaturen kan antas ha varit relativt likvärdig mellan 1973 och 2014. Vidare kan det i figur 28 och 29 ses att medelfiltreringshastigheten var 58mm/h högre under 1973 än under 2014, vilket motsvarar en ökning på 30,5%. Utifrån ekvation 10 ses att tryckfallet är direkt proportionellt mot filtreringshastigheten. Detta innebär att tryckfallet i filter 4 under 1973 borde vara 30,5% högre än under 2014. Dock körs filtren idag med en lägre filtreringshastighet direkt efter rensningen, vilket även kan ha gjorts tidigare. Filter 4 djuprensades under våren 2015 vilket innebär att sandnivån i filtret var vid sin lägstanivå under 2014. Således kan inte sandbädden varit tunnare under 1973 än under 2014. Sammantaget tyder detta på att tryckfallet inte borde ha varit lägre efter rensning 1973, om ingen packning förekom.

8.3.3.2 Packning av filtrets undre del

Den statistiska analysen gav inget signifikant samband mellan porositet och djup. Utifrån figurerna där porositeten presenteras kan inte heller någon entydig trend ses som skulle tyda på att packningen var högre i filtrets undre del, se figur 63, 71 och 82. I filter 14 var porositeten i filtrets undre del i genomsnitt till och med högre än i filtrets övre del. Provet taget i det grå lagret hade dock en porositet som var 1,4 procentenheter lägre än genomsnittet för hela filterbädden. Det grå lagret låg i övre delen av det lager som inte rensats på minst 16 år. En liten packningseffekt vid varje djuprensning skulle därmed över tiden ha kunnat orsaka den minskade porositeten som sågs i det grå lagret. Att inte hela lagret i sin helhet packats skulle kunna bero på en djupmässigt avtagande packningseffekt. Det skulle även kunnat bero på vattenmättnad under en viss nivå, vilket skulle minskat packningseffekten ytterligare i den vattenmättade zonen. Viktigt att komma ihåg här är dock att endast ett mycket begränsat antal observationer gjordes, vilket gör att ytterligare undersökningar av främst det gråa lagret bör göras för att kunna säga något med säkerhet.

8.3.3.3 Sammanfattning

Undersökningen visade att sandbädden kan packas av de maskiner som används vid djuprensningen. Dock tyder resultaten på att denna packning har en begränsad effekt på det tryckfall som uppstår i filtren. Utifrån resultaten kan inte med säkerhet sägas att nutida rensningsförfarande skulle ge upphov till större packning än tidigare rensningsförfarande.

8.4 Åtgärdsförslag

Utöver filter 14 och 15, där grålager med låg hydraulisk konduktivitet påträffats, kan lager finnas även i andra filter. Undersökningen visade att det var lätt att identifiera det problematiska lagret utifrån dess gråa färg som skiljde sig från den övriga filtersandens mer brunaktiga färg. Därav föreslås att det vid kommande djuprensningar grävs provgropar i filtren, för att undersöka förekomsten av lager i övriga filters underdel. Primärt bör en provgrop grävas i filtrets mitt där lagret troligen är tydligast. Eftersom lagrets utbredning i filtret sannolikt kan variera kan det vara en god ide att gräva ytterligare gropar i andra delar av filtret, om inget lager påträffas i den första gropen. De filter där lager påträffats bör vid djuprensning rensas så djupt att dessa lager avlägsnas. De filter som undersökts i denna studie bedöms behöva rensas ned tills att kvarvarande sandytas läge är två meter under filtrets ovkant.

Mekanismerna bakom lagrens bildning är inte kända, men en möjlig hypotes är att det är det finkorniga material som lyfts från filtrens hörn, vid återfyllnad då sandnivån i filtren är låg, som orsakar lagerbildningen.

De sandrörelser som kunnat observeras i hörnen i filter 14 kan vara ett resultat av att sandnivån är extra låg i filtrets hörn. Sannolikt kan därmed denna typ av sandrörelse undvikas genom att tillse att sandnivån blir för låg i filtrens hörn.

8.5 Förslag till vidare studier

Mycket av resonemangen ovan bygger på analysresultaten av sandprovet i det grå lagret i filter 14. Fler prover skulle behöva tas och analyseras för att få ett tillfredsställande statistiskt underlag och kunna dra säkra slutsatser.

Det kunde även vara intressant att undersöka packningen vid filterrensningen mer ingående i fråga om utbredning över filterytan och dess djupmässiga avtagande.

9 Slutsats

Den minskning av långsamfiltrens uthålliga och maximala kapacitet som kunde konstateras i denna undersökning består av att det genomsnittliga tryckfallet i filter 1-16 ökat. Detta bedöms bero på bildningen av ett grått lager, med låg mättad hydraulisk konduktivitet, i den del av långsamfiltren som inte rensas vid djuprensning.

Resultaten tyder på att detta lager har en lägre effektiv kornstorlek, glödrest och porositet än sanden i övriga delar av filterbädden. Ackumuleringen av finkornig sand visades vara den faktor som hade störst negativ inverkan på lagrets mättade hydrauliska konduktivitet. Ackumulationen av finkornig sand bedömdes bero på den sandrörelse som uppstår i filtrets kanter vid återfyllnad efter rensning. Sandrörelsen i sin tur bedöms uppstå till följd av att sandnivån är betydligt lägre i filtrets kanter.

Undersökningen visade att sandbädden kan packas av de maskiner som används vid djuprensningen. Dock tyder resultaten på att denna packning har en begränsad effekt på det tryckfall som uppstår i filtren. Utifrån resultaten kan inte med säkerhet sägas att nutida rensningsförfarande skulle ge upphov till större packning än tidigare rensningsförfarande.

Filterbelastningen, i form av filtreringshastighet och vattenkvalitet hos snabbfiltratet, var under 2008-2014 lägre än under 1967-1973. Vidare är det rimligt att anta att belastningen inte heller var avsevärt högre under 1973-2008.

10 Referenser

TRYCKTA REFERENSER

Abrahamsson J. L., 2006, Övertäckning av långsamfilter – En fullskalestudie utförd vid Norsborgs vattenverk, Projektrapport R-nr-2006

Agrenius G., 1967, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1967*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1967.

Agrenius G., 1968, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1968*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1968.

Agrenius G., 1969, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1969*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1969.

Allaby M., 2013, *A Dictionary of Geology and Earth Sciences (4 ed.)*, Print ISBN-13: 9780199653065.

Andersson, K . 2006. *Igensättning av långsamfilter i Östby vattenverk i Kramfors – studie av påverkande faktorer*. Examensarbete. Uppsala universitet.

Axelsson K., 2005, *Introduktion till GEOTEKNIKEN jämte byggnadsgeologin, jordmaterialläran och jordmekaniken*, Geotryckeriet Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala Universitet, Villavägen 16, 75236 Uppsala.

Bear J., 1972, *Dynamics of fluids in porous media*, Dover Publications, inc. New York.

Blom L., 1973, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1973*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1973.

Blom L., 1972, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1972*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1972.

Blom L., 1971, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1971*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1971.

Blom L., 1970, *Gas- och Vattenverkets förvaltning 1970*, Avgiven redogörelse för förvaltningen av gas- och vattenverkets förvaltning under år 1970.

Blomberg J., 2000, *Övertäckning av långsamfilter- en förstudie*, Utredning utförd åt Stockholm Vatten VA AB.

Bodlund I., Eriksson U., Westergren B., Debebe M., Ansker J., Karlsson E., 2014, *Produktionsbehov av dricksvatten 2040 samt åtgärder för att tillgodose detta: Del 1 – Produktionsbehov 2040*, utredning utförd åt Stockholm Vatten VA AB.

Bodlund I., Eriksson U., Westergren B., Debebe M., Ansker J., Karlsson E., 2014, *Produktionsbehov av dricksvatten 2040 samt åtgärder för att tillgodose detta: Del 2 – Vattenverken Åtgärder för att tillgodose produktionsbehovet 2040*, utredning utförd åt Stockholm Vatten VA AB.

Clayton T. Crowe, Donald F. Elger, Barbara C. Williams, John A. Roberson , 2010, *Engineering Fluid Mechanics*, , John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

Crittenden J. C, Trussell R. R., Hand D. W., Howe K. J., Tchobanglous G., 2005, *Water treatment Principles and design* (Second edition), John Wiley & Sons Inc., Hoboken New jersey.

Fetter C. W., 2001, *Applied hydrogeology*, fourth Edition, Prentice-Hall inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. ISBN 0-13-088239-9.

Gezea Ö., 1998, *Vízisztítás – Üzemeltetés*. OVF. Egri Nyomda Budapest.

Gleeson C., Gray N., 1997, *The coliform index and waterborne disease. Problems of microbial drinking water assessment*, E & FN SPON. London

McFeters G. A., 1990, *Drinking water microbiology*.

Harald G., Rohde A., 1994, *Vattnets väg från regn till bäck*, 3:e upplagan, Hallgren & Fallgren Studieförlag AB.

Hazen A. , 1911, *Discussion: Dams on sand foundations*, Transactions, American Society of civil engineers 73:199.

Jabur H. S., Mårtensson J., 2003, *Rensningsmetoder för långsamfilter*, VA-forsk rapport nr 39, Svenskt vatten AB.

Johansson B., 2010, *Dricksvattenteknik 3 Ytvatten*, Publikation U8, Svenskt Vatten AB.

Lisell E. O, *Kvartssand*, Särtryck ur Gjuteriet 621.742.4:546.284-31

Messing I., 2012, *Markfysikens grunder*, Institutionen för mark och miljö.

Oomen J. H. C. M., Van Dijk J. C., 1978, *Slow sand filtration for community water supply in developing countries: A design and construction manual*, WHO international reference centre for community water supply.

Talme O., Almén K., 1995, *Kompendium i jordartsanalys – laboratorieanvisningar*, Kvartärgeologiska Institutionen, Stockholm Universitet.

Ågren A. H., 1958, *En bok om sand*, Westbergs boktryckeri AB, Stockholm.

PERSONLIGA REFERENSER

Börje Larsson, Personkontakt, Stockholm Vatten VA AB.

Kerstin Berglund, Personkontakt, Agr. docent. Forskare/Researcher vid SLU.

Lars Lindqvist, Personkontakt, Stockholm Vatten VA AB.

Olle Svedberg, Personkontakt, Stockholm Vatten VA AB.

Roger Herbert, Personkontakt, Universitetslektor, Uppsala Universitet

WEBBASERADE REFERENSER

Stockholm Vatten, 2015, Lovö vattenverk : vi producerar världens viktigaste livsmedel – ett rent och gott kranvatten,
http://www.stockholmvatten.se/globalassets/pdf1/dricksvatten/vattenverk/lovo/lovo_webb.pdf.
(2015-08-20)

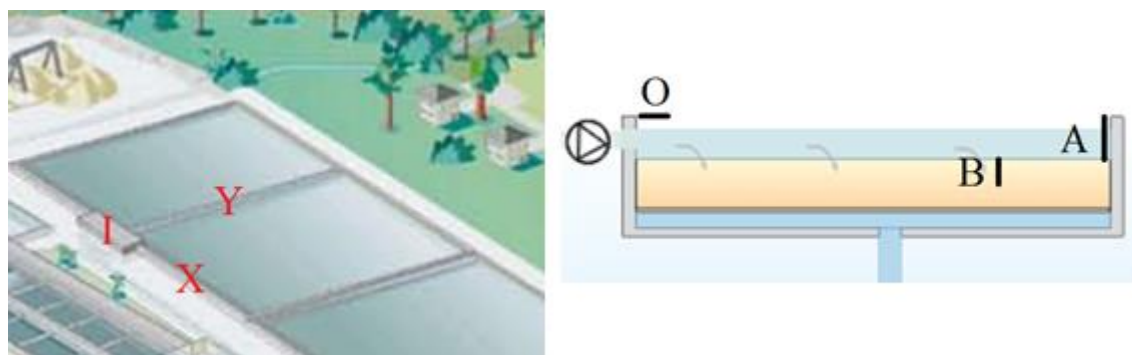
Bilagor

Bilaga 1. Koordinatsystem och provtagningsplatsernas koordinater

KOORDINATSYSTEM

Koordinatsystemet består av fyra koordinater: X, Y, A, B. X- och y-koordinaten beskriver platsens läge i förhållande till filtrets inlopp, markerat "I" i figur 87. Inloppet motsvarar origo i xy-planet och positiv x- och y-riktning är alltså bort från inloppet. Den översta delen på filtrens kanter är cirka 0,5m breda. Mätningarna av x- och y-koordinat skedde från den del av kanten som vätte in mot filterbädden, alltså innerkanten.

A- och b-koordinaten anger tillsammans hur djupt ned under filtrets ovankant som provet togs. Att höjdangivelsen delats upp i två koordinater beror på att sandhöjden i filtren varierar över tiden och mellan filtren, se figur 18. A- koordinaten är avståndet från filtrets ovankant till sandbäddens ovankant. B-koordinaten är avståndet från filterbäddens ovankant till det djup där provet togs.



Figur 87. Koordinater för positionsangivelse vid provtagning i sandfilter. Till vänster: X och Y anger provgropens läge på sandytan. Till höger: A och B anger provtagningspunktens djup i sandbädden och O anger filtrets ovankant.

PROVPLATSERNAS KOORDINATER

Nedan anges provgroparnas xy-koordinater i respektive filter. Ofta togs prover på flera olika djup på samma platser, vilket i bilaga 2 och 3 redovisas med ab-koordinater för respektive prov.

FILTER 3

Provplats nr.	koordinat	
1	x30,5	y8,2
2	x8,1	y8,8
3	x19,3	y16,3

FILTER 4

Provplats nr.	koordinat	
1	x1,5	y58
2	x8,5	y8,5

FILTER 14

Provplats nr.	koordinat	
1	x27,5	y51,5
2	x1	y59

Bilaga 2. Sammanfattning av samtlig provtagning

Denna bilaga syftar till att ge en överblick över provtagningen och vilka analyser som utförts på de olika proven. Nedan redovisas en sammanställning av samtliga prover som tagits under projektet i de olika filtren, samt vilka analyser de olika proven genomgått. Proverna redovisas utifrån koordinater enligt tidigare beskrivet koordinatsystem, se bilaga 1. De upphöjda siffrorna i tabellerna anger vilka analyser som genomförts på respektive prov enligt nedanstående lista:

- 1 – Hydraulisk konduktivitet
- 2 – Aluminiumhalt, torrsustans, glödnest
- 3 – Turbiditet av lakvatten
- 4 – Kornstorleksfördelning
- 5 – Torr skrymdensitet, porositet

Filter 3

Provtagningen skedde under en djuprensning av filtret, där nytvättad sand alltså tillfördes filtret efter det att filterhuden avlägsnats. Följande prover togs efter filterhuden avlägsnats, men innan det att filtret återfyllts med sand, se tabell 22.

Tabell 22. Provtagning i filter 3 innan återfyllnad med tvättad sand.

Cylinderprov [cylindernr.]	Lösa sandprov [antal]	Provplats	Djupkoordinat [m]		Provtagnings -datum
1680 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0	a1,66	24/3-15
1675 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0,4	a1,66	24/3-15
1661 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	2	b0	a1,68	24/3-15
1666 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	2	b0,4	a1,68	24/3-15

Sedan filtret återfyllts med sand togs ytterligare prover i den nypålagda tvättade sanden, se tabell 23. Plats 2 bedömdes inte ha utsatts för så hård trafikerings. Plats 3 var belägen i slutet av sandrampen som användes för transporten ned i filtret. Detta område bedömdes vara det hårdast trafikerade området i filtret.

Tabell 23. Provtagning i filter 3 efter återfyllnad med tvättad sand.

Cylinderprov [cylindernr.]	Lösa sandprov [antal]	Provplats	Djupkoordinat [m]		Provtagnings-datum
1671 ^{1,5}	0	2	b0	a1,05	26/3-15
1664	0	2*	b0	a1,05	26/3-15
1677 ^{4,5}	0	2*	b0	a1,05	26/3-15
1673 ^{4,5}	0	2*	b0	a1,05	26/3-15
1668 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	3	b0	a1,05	26/3-15
1678	0	3*	b0	a1,05	26/3-15
1662 ^{4,5}	0	3*	b0	a1,05	26/3-15
1672 ^{4,5}	0	3*	b0	a1,05	26/3-15

* exakt provplats valdes slumpmässigt ca 0-1m från angiven position.

Filter 4

Vid provtagningstillfället genomfördes en djuprensning, och proverna togs efter rensningen men innan filtret återfylldes med sand. Här togs två prover i det gruslager vilket filtersanden vilar på (x8,5:y8,5:b0,68).

Cylinderprov [cylindernr.]	Lösa sandprov [antal]	Provplats	Djupkoordinat [m]		Provtagnings- datum
1668 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0	a1,75	5/5-15
1676 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0,35	a1,75	5/5-15
1674 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	2	b0	a1,75	5/5-15
1662 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	2	b0,4	a1,75	5/5-15
	2 ^{2,3}	2	b0,68	a1,75	5/5-15

Filter 14

Vid provtagningstillfället genomfördes en vanlig rensning av filtret, dvs ingen djuprensning. Prover togs både före och efter det att rensningen genomförts. Här togs prover i det gråaktiga lager som påträffades (x-8,5:y-8,5:b0,2)

Cylinderprov [cylindernr.]	Lösa sandprov [antal]	Provplats	Djupkoordinat [m]		Provtagnings- datum
1679 ¹	0	1	b0	a1,53	28/4-15
1663 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0	a1,56	28/4-15
1665 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0,2	a1,56	28/4-15
1667 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	1	b0,45	a1,56	28/4-15
1669 ^{1,5}	4 ^{2,3,4}	2	0	a1,8	28/4-15

Bilaga 3. Rådata: Långsamfiltrens belastning och prestanda

Tabell 24. Totala antalet rensningar för varje filter under perioden 2008-2014.

Filternr:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Totalt antal åtgärder:	15	14	15	15	15	14	17	15	17	14	15	15	17	19	23	18

1967-1973

Tabell 25. Data över vattenproduktion, tryckfall, filtreringshastighet och drifttid på Lovö vattenverk mellan åren 1967-1973. Notera att tryckfall ges som årsmedelvärde där värden ges för filter 4 och 14. Vidare är vattenproduktionen är den totala volymen producerat vatten under året.

År	Vattenpro d. [milj. m ³]	Tryckfall L [cm vattenpelare]		Filtreringshastigh et [mm/h]			Drifttid mellan rensningarna [dygn]			Rensningar [st]	
		F. 4	F. 14	min.	med	max	min.	med.	max.	Djuprensn.	Ytrensn
1973	69,2	22	26	33	248	400	106	165	212	2	32
1972	70	25	27	33	273	383	14	152	204	3	34
1971	71,1	27	28	33	266	367	10	131	206	2	41
1970	70,6	21	38	17	258	417	32	149	209	2	39
1969	65	30	26	50	227	417	30	147	592	3	36
1968	58,2	22	24	58	200	417	20	152	197	3	37
1967	57,2	19	21	17	189	350	57	157	219	3	33

2008-2014

Tabell 26. Data över vattenproduktion, filtreringshastighet och drifttid på Lovö vattenverk mellan åren 2008-2014.

År	Total vattenproduktion [miljoner m ³]	Filtreringshastighet [mm/h]			Drifttid mellan rensningarna [dygn]			Rensningar [st]		
		min.	med.	max.	min.	med.	max.	Djupr.	Ytr.	Frys.
2014	57,4	181	190	216	31	141	217	1	40	0
2013	58,6	175	192	202	55	156	209	2	36	2
2012	57,7	176	190	200	66	162	371	2	35	0
2011	57,1	176	188	195	40	163	239	2	35	2
2010	58,4	183	193	203	14	173	236	1	33	2
2009	55,3	177	182	187	63	177	246	1	32	2
2008	53,4	168	176	185	147	185	226	3	29	0

Bilaga 4. Rådata: Vattenkvalitet hos vattnet som tillförts långsamfiltren

2008- 2014

Tabell 27. Vattenkvalitet hos det vatten som tillfördes långsamfiltren mellan åren 2008-2014.

År	pH	Turbiditet [FNU]	Aluminium [mg/l]
2014	7,8	0,07	0,031
2013	7,8	0,07	0,033
2012	7,8	0,08	0,030
2011	7,8	0,11	0,041
2010	7,8	0,09	0,036
2009	7,8	0,10	0,040
2008	7,7	0,09	0,040

1967-1973

Tabell 28. Vattenkvalitet hos det vatten som tillfördes långsamfiltren mellan åren 1967-1973.

År	pH	Turbiditet [FNU]	Aluminium [mg/l]
1973	7,9	0,10	0,021
1972	7,9	0,12	0,030
1971	8,0	0,14	0,036
1970	8,0	0,16	0,034
1969	7,9	0,16	0,046
1968	8,0	0,14	0,040
1967	7,9	0,15	0,033

Bilaga 5. Rådata: Mätningar med grundvattenrör

Grundvattenrörens djup i sandbädden beräknades utifrån mätningar gjorda vid isättandet av rören. Med ”djup i sandbädden” menas avståndet från filterbäddens ovkant till grundvattenrörets undre kant. Med vattennivå i röret menas avståndet från rörets ovkant till vattenytan i röret. Med vattenytan utanför röret menas avståndet från rörets ovkant till vattenytan utanför röret (dvs vattenytan i filtret).

FILTER 10

Tabell 29. Tryckfall vid olika djup i sandbädden innan filterrensning, 13 dagar efter det att rören satts på plats i filtret.

Rörnummer:	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6
Djup i sandbädden [cm]	5	5,5	10	10	15	76	106	40
Vattennivå utanför röret [cm]	56	52,2	55	53,5	54	16,5	15,5	56
Vattennivå i röret [cm]	97	92	99,5	95,5	100	82	88,5	112
Tryckfall [cm vattenpelare]	41	39,8	44,5	42	46	65,5	73	56

Tabell 30. Tryckfall vid olika djup i sandbädden 16 dagar efter filterrensning.

Rörnummer:	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6
Djup i sandbädden [cm]	5	5,5	10	10	15	76	106	40
Vattenhöjd utanför röret [cm]	56	52,2	55	53,5	54	16,5	15,5	56
Vattenhöjd i röret [cm]	97	92	99,5	95,5	100	82	88,5	112
Tryckfall [cm vattenpelare]	41	39,8	44,5	42	46	65,5	73	56

FILTER 14

Tabell 31. Tryckfall vid olika djup i sandbädden innan rensning, 13 dagar efter det att rören satts på plats i filtret.

Rörnummer:	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6
Djup i sandbädden [cm]	5,3	5	10	10	15	49	75	40
Vattenhöjd utanför röret [cm]	30	35	31	32	31	21	24	31
Vattenhöjd i röret [cm]	55	34	75,5	78,5	73	96	104,5	114,4
Tryckfall [cm vattenpelare]	25	-1	44,5	46,5	42	75	80,5	83,4

Tabell 32. Tryckfall vid olika djup i sandbädden 6 dagar efter rensning.

Rörnummer:	1.1	1.2	2.1	2.2	3	4	5	6
Djup i sandbädden [cm]	5	5	10	10	15	40	54,5	30
Vattenhöjd utanför röret [cm]	35,5	32,5	35	34	35,5	32,5	48,5	44
Vattenhöjd i röret [cm]	35,5	34,5	41	37,5	40,5	82	101	59
Tryckfall [cm vattenpelare]	0	2	6	3,5	5	49,5	52,5	15

Bilaga 6. Rådata: Siktning

Nedan följer resultaten för siktningen av sandproverna i de olika filtren. I tabellerna redovisas passerande mängd i viktprocent, pass.%, samt provets totala vikt innan sällning som ”vikt”. Passerande mängd är alltså den mängd av provet vars kornstorlek understeg maskvidden.

FILTER 3

Tabell 33. Resultat för siktning av sandprover tagna i filter 3.

		Maskvidd		4	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
		[mm]:								
Prov	Prov-plats	Djup-koordinat [m]		Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Vikt [g]
Löst	1	b0	a1,66	97,06	50,09	13,24	0,63	0,18	0,06	621
Löst	1	b0,4	a1,66	98,68	51,30	21,79	2,86	0,11	0,02	669
Löst	2	b0	a1,68	98,21	47,87	16,44	2,75	0,32	0,10	679
Löst	2	b0,4	a1,68	98,57	47,56	16,99	1,94	0,15	0,06	646
1677	2*	b0	a1,05	98,31	48,64	14,40	1,18	0,14	0,06	650
1673	2*	b0	a1,05	98,37	49,43	15,15	1,46	0,28	0,13	661
1662	3*	b0	a1,05	98,09	49,11	14,34	1,08	0,17	0,07	689
1672	3*	b0	a1,05	98,10	48,82	14,09	1,11	0,22	0,10	682
löst	3	b0	a1,05	98,11	48,82	14,02	1,42	0,47	0,16	635

* exakt provplats valdes slumpmässigt ca 0-1m från angiven position.

Tabell 34. Beräknade genomsnitt för varje nivå i filter 3 som provtogs.

Maskvidd [mm]:		4	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Djupkoordinat [m]		Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%
b0,4	a1,67	98,62	49,43	19,39	2,40	0,13	0,04
b0	a1,67	97,63	48,98	14,84	1,69	0,25	0,08
b0	a1,05	98,20	48,97	14,40	1,25	0,26	0,10

FILTER 4

Tabell 35. Resultat för siktning av sandprover tagna i filter 4. Endast lösa sandprov användes.

Maskvidd [mm]:		2	1	0,85	0,5	0,25	0,125	0,063		
Provplats	Djupkoordinat [m]	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Vikt[g]
2	0	1,75	79,92	44,03	34,59	14,18	1,66	0,27	0,11	610,78
2	0,4	1,75	80,32	45,73	35,66	14,20	1,26	0,05	0,02	659,66
1	0	1,75	83,27	48,56	38,31	15,16	1,28	0,05	0,01	637,58
1	0,35	1,75	84,09	50,41	39,79	16,27	1,47	0,05	0,01	615,92

FILTER 14

Tabell 36. Resultat för siktning av sandprover tagna i filter 14. Endast lösa sandprov användes.

Maskvidd [mm]:		2	1	0,85	0,5	0,25	0,125	0,063		
Provplats	Djupkoordinat [m]	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Pass.%	Vikt[g]
1	y-8,5 b0	a1,56	77,98	44,67	34,61	15,60	2,30	0,15	0,04	
1	y-8,5 b20	a1,56	80,88	51,40	41,96	23,28	6,16	0,77	0,13	
1	y-8,5 b45	a1,56	84,82	51,79	40,10	15,30	0,64	0,10	0,04	
2	y-1 b0	a1,80	62,73	24,26	14,30	2,15	0,08	0,03	0,01	

Bilaga 7. Rådata: Torr skrymdensitet och porositet

FILTER 3

Tabell 37. Torr skrymdensitet och porositet för cylinderprover tagna i filter 3.

Cylinder nr.	Provplats	Djupkoordinat [m]		Torr skrymdensitet [kgm ⁻³]	Porositet [% _{vol}]
1677	2*	b0	a1,05	1595	39,8
1673	2*	b0	a1,05	1623	38,7
1662	3*	b0	a1,05	1691	36,2
1672	3*	b0	a1,05	1676	36,8

Tabell 38. Torr skrymdensitet och porositet för prover tagna i filter 3, vilka genomgått analys av hydraulisk konduktivitet.

Cylinder nr.	Provplats	Djupkoordinat [m]		Torr skrymdensitet [kgm^{-3}]	Porositet [% _{vol}]
1680	1	b0	a1,66	1666	37,1
1675	1	b0,4	a1,66	1658	37,4
1661	2	b0	a1,68	1695	36,0
1666	2	b0,4	a1,68	1632	38,4
1668	3	b0	a1,05	1644	38,0
1671	2	b0	a1,05	1572	40,7

FILTER 4

Tabell 39. Torr skrymdensitet och porositet för cylinderprover tagna i filter 4.

Cylinder nr.	Provplats	Djupkoordinat [m]		Torr skrymdensitet [kgm^{-3}]	Porositet [% _{vol}]
1674	2	b0	a1,75	1658	37,4
1662	2	b0,4	a1,75	1636	38,3
1668	1	b0	a1,75	1571	40,7
1676	1	b0,35	a1,75	1633	38,4

FILTER 14

Tabell 40. Torr skrymdensitet och porositet för cylinderprover tagna i filter 14.

Cylinder nr.	Provplats	Djupkoordinat [m]		Torr skrymdensitet [kgm^{-3}]	Porositet [% _{vol}]
1679	2	b0	a1,53	1591	39,9
1663	2	b0	a1,56	1636	38,3
1665	2	b0,2	a1,56	1666	37,1
1667	2	b0,45	a1,56	1603	39,5
1669	1	0	a1,8	1558	41,2

Bilaga 8. Rådata: Turbiditetsanalyser av lakvatten

FILTER 3

Tabell 41. Provresultat för filter 3.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]	Sandvikt [g]	Turbiditet _{max} [FNU]	Turbiditet ₃₀ [FNU]
1	b0	a1,66	10,01	144
1	b0,4	a1,66	10,00	220
2	b0	a1,68	9,99	92
2	b0,4	a1,68	9,99	159
3	b0	a1,05	10,01	329

FILTER 4

Tabell 42. Provresultat för filter 4.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]	Sandvikt [g]	Turbiditet _{max} [FNU]	Turbiditet ₃₀ [FNU]
1	0	1,75	9,99	83,9
1	0,35	1,75	9,99	78
2	0	1,75	10	388
2	0,4	1,75	10	71,4
2	0,68	1,75	10,05	119

FILTER 14

Tabell 43. Provresultat för filter 14.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]	Sandvikt [g]	Turbiditet _{max} [FNU]	Turbiditet ₃₀ [FNU]
1	b0,2	a1,56	10,01	192
1	b0,45	a1,56	10	183
1	b0	a1,56	10	204
2	b0	a1,8	10,01	68,1

Bilaga 9. Rådata: Hydraulisk konduktivitet

FILTER 3

Tabell 44. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 3.

Cylinderprov [cylindernr.]	Provplats [m]	Djupkoordinat [m]	Hydarulisk konduktivitet [cm/h]
1661	2	b0	a1,68
1666	2	b0,4	a1,68
1680	1	b0	a1,66
1675	1	b0,4	a1,66
1668	3*	b0	a1,05
1671	2	b0	a1,05

FILTER 4

Tabell 45. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 4.

Cylinderprov [cylindernr.]	Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Hydarulisk konduktivitet [cm/h]
1668	1	b0	a1,75	344
1676	1	b0,35	a1,75	411,7
1674	2	b0	a1,75	382,3
1662	2	b0,4	a1,75	376,4

FILTER 14

Tabell 46. Hydraulisk konduktivitet för olika nivåer i filter 14.

Cylinderprov [cylindernr.]	Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Hydarulisk konduktivitet [cm/h]
1679	1	b0	a1,53	281
1663	1	b0	a1,56	280
1665	1	b0,2	a1,56	134
1667	1	b0,45	a1,56	156
1669	2	0	a1,8	721

Bilaga 10. Rådata: Aluminium**FILTER 3**

Tabell 47. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 3.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Aluminium [mg/kg Ts]
2	b0	a1,68	7600
2	b0,4	a1,68	9500
1	b0	a1,66	8500
1	b0,4	a1,66	8700
3*	b0	a1,05	7400

FILTER 4

Tabell 48. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 4.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Aluminium [mg/kg Ts]
1	b0	a1,75	8300
1	b0,35	a1,75	7900
2	b0	a1,75	7800
2	b0,4	a1,75	7600
2	b0,68	a1,75	3400

FILTER 14

Tabell 49. Aluminiumhalt för olika nivåer i filter 14.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Aluminium [mg/kg Ts]
1	b0	a1,56	7300
1	b0,2	a1,56	9100
1	b0,45	a1,56	8700
2	b0	a1,8	6500

Bilaga 11. Rådata: Glödrest

Glödrest har valts att visas i tabellform, se tabell 50-52. Observera att prov markerat med * i filter 3 bestod av nypålagd sand, vilken alltså var tvättad.

FILTER 3

Tabell 50. Glödrest för olika nivåer i filter 3.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Glödrest [%av Ts]
2	b0	a1,68	99,3
3*	b0	a1,05	99,3
1	b0	a1,66	99,1
2	b0,4	a1,68	99,1
1	b0,4	a1,66	99,1

FILTER 4

Tabell 51. Glödrest för olika nivåer i filter 4.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Glödrest [%av Ts]
1	b0	a1,75	99,3
1	b0,35	a1,75	99,3
2	b0	a1,75	99,2
2	b0,4	a1,75	99,2
2	b0,68	a1,75	99,4

FILTER 14

Tabell 52. Glödrest för olika nivåer i filter 14.

Provplats [m]	Djupkoordinat [m]		Glödrest [%av Ts]
2	b0	a1,8	99,3
1	b0	a1,56	99,3
1	b0,2	a1,56	99,1
1	b0,45	a1,56	99,1