



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 18 030

Examensarbete 30 hp
Augusti 2018

Dosering av fällningsmedel i avloppsreningsverk

Utformning och design av en tryckluftsinjicerande
doserramp

Jens Forslund

REFERAT

Dosering av fällningsmedel i avloppsreningsverk – utformning och design av en tryckluftsinjicerande doserramp

Jens Forslund

En central del i reningsverkens behandling av avloppsvatten är att dosera fällningskemikalier i syfte att reducera halten fosfor samt organiskt material. Under fällningsprocessen är det viktigt att det sker en snabb och fullständig inblandning av fällningsmedlet i avloppsvattnet för att uppnå goda reningsresultat. På Henriksdals reningsverk i Stockholm undersöks möjligheten att tillämpa en doseringsanordning som med hjälp av tryckluft doserar fällningskemikalien genom ett perforerat rör från kanalens botten för att på detta vis åstadkomma en effektiv inblandning. Anordningen, en doserramp, är tänkt att utnyttjas som extra fällningssteg under högflödesrening, vilket förekommer när det inkommande flödet överskrider reningsverkets hydrauliska kapacitet och uppstår vanligtvis vid kraftiga skyfall eller snösmältningsperioder. Under dessa perioder bräddas avloppsvattnet förbi den biologiska behandlingen, antingen till sandfiltreringen eller direkt till recipienten vilket resulterar i utsläpp av avloppsvatten med förhöjda föroreningshalter.

Projektet utgick efter befintlig design och modell för dosering av fällningsmedel med tryckluft. Genom pilotförsök har sedermera en egenutvecklad doserramp utformats, utvärderats och optimerats i ändamål att kunna implementeras i verksamheten på Henriksdals reningsverk. Pilotförsöken kompletterades med teoretiska beräkningar av de resulterande tryckförlusterna genom rörsystemet via Darcy-Weisbachs ekvation. Tester utfördes på en doserramp i fullstor skala med två olika rördimensioner, DN50 (innerdiameter 50 mm) respektive DN25 (innerdiameter 25 mm) med en horisontell rörlängd på 4 m. Som vätskemedium användes vatten från reningsverket. Resultaten från experimenten med båda rördimensionerna visade att bäst prestanda uppnåddes när en korrigerad hålbild med avtagande centrumavstånd mellan luftningshålerna implementerades i kombination med att luftningshålerna vinklades vertikalt nedåt. Vid experiment med den större rördimensionen DN50 uppmättes bäst prestanda när den horisontella rördelen fylldes med fyllkroppar vilka fyllde funktionen att finfördela luft- och vätskeblandningen och samtidigt bibehålla en hög turbulens längs det horisontella röret. Den resulterande tryckförlusten genom doserrampen beräknades till 4–8 bar beroende på vätskekälla och ingående lufttryck.

Nyckelord: Avloppsvattenrening, reningsverk, kemisk fällning, fällningskemikalie, tryckluft, doserramp, perforeringar, hålbild, fyllkroppar, tryckförlust, Darcy-Weisbach, optimering, Henriksdal.

ABSTRACT

Chemical precipitation process in wastewater treatment – configuration and design of a chemical dosing unit using compressed air

Jens Forslund

One of the key processes in the plants' treatment of wastewater is adding a chemical precipitant into the wastewater to enhance the reduction of phosphorous and organic matter. It is essential that the reagent is fully mixed with the wastewater at an early stage of the process in order to ensure a sufficient floc formation which, in turn, is crucial for reducing the levels of phosphorous and organic matter during the chemical precipitation process. At Henriksdals treatment plant in Stockholm, the use of a new static mixer for utilization of compressed air to add the precipitant through a perforated pipe into wastewater is currently being examined. By using compressed air, a certain level of turbulence is generated ensuring that the precipitant is properly mixed with the wastewater. The device, a dosing unit, was mainly intended to be used during peak flow conditions in the plant which normally occur during heavy rainfalls or periods with intensive snow melting. During peak flow conditions, the treatment plant usually diverts a part of the wastewater past the biological treatment, either discharging the wastewater directly to the recipient or to the final filtration step, resulting in effluent water with elevated levels of pollutants.

This project was based on existing design and concepts for chemical precipitants dosing using compressed air, and the main purpose with this project has been to through pilot trials design, evaluate and optimize a self-developed dosage unit which could be implemented at Henriksdals treatment plant. In addition to the pilot trials, theoretical calculations of the head loss through the unit was made using the Darcy-Weisbach equation. The pilot trials were made on a full-scale unit constructed at Henriksdal in Stockholm and the unit was constructed with two pipe dimensions, DN50 (inner diameter 50 mm) and DN25 (inner diameter 25 mm), with a horizontal pipe length of 4 m. The liquid medium used during the experiments has consisted of water. The results of the experiments with both pipe dimensions entail that the best performance was achieved when a hole pattern with decreasing center spacing between the aeration holes were implemented in combination with the aeration holes being tilted vertically downwards. Experiments with the larger pipe dimension DN50 evidenced that the best performance was achieved when fillers were added through the whole horizontal pipe. The purpose of the fillers was to vaporize the mixture of the fluid and the air and to maintain a high turbulence along the horizontal pipe. The head loss through the dosing unit was calculated to 4–8 bar depending on the liquid source and the inlet air pressure.

Keywords: Wastewater treatment, wastewater treatment plant, chemical precipitation, compressed air, dosage unit, perforations, hole pattern, carriers, headloss, Darcy-Weisbach, optimization, Henriksdal.

FÖRORD

Följande examensarbete avslutar mina studier på civilingenjörsprogrammet i Miljö- och Vattenteknik på Uppsala Universitet. Min handledare har varit Johan Lindmark på Ramböll VA-process och min ämnesgranskare har varit Andrzej Kupsc, forskare på institutionen för fysik och astronomi på Uppsala universitet. Min examinator har varit Björn Claremar, vikarierande universitetslektor vid institutionen för geovetenskap.

Jag vill först och främst tacka min handledare, Johan Lindmark på Ramböll VA-process som försett mig med all tillgänglig information kring arbetet och kommit med värdefulla idéer och synpunkter längs arbetets gång. Min ämnesgranskare Andrzej Kupsc som väglett mig kring projektets teoretiska delar och granskat mitt arbete. Elin Larsson som varit projektets uppdragsgivare och min huvudsakliga kontaktperson på Stockholm Vatten och Avfall har hjälpt mig med mina experiment på Henriksdals reningsverk. Jag vill även rikta ett tack till Thed Lilja på Veolia som instruerat mig om doserrampens konstruktion och tålmodigt hjälpt mig med justeringar och modifikationer kring denna. Tobias Salmonsson på Stockholm Vatten och Avfall som hjälpt mig navigera genom Henriksdals reningsverk och försett mig med verktyg, material och arbetskraft när det behövts. Till Lena Jonsson på Stockholm Vatten och Avfall som kommit med tips, råd och information kring kemikalieanvändningen på Henriksdal. Till alla kollegor på Ramböll VA-process i Uppsala som välkomnat mig på kontoret och bidragit till en allmänt god stämning under arbetsdagarna. Sist men inte minst till min familj, mina kurskamrater och min sambo som ständigt stöttat mig genom arbetets med- och motgångar.

Tillstånd har tillgivits av Stockholm Vatten och VEAS vid användning av figurerna i rapporten.

Jens Forslund

Uppsala, augusti 2018

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Övergödning och algblooming är ett stort problem i Östersjön vilket orsakas av höga tillskott av växtnäringssämnen kväve och fosfor. De största utsläppskällorna härrör från jordbruks- och skogsindustrin samt från avloppsvattnet som släpps ut i vattendragen. Det ställs i dagsläget krav på de svenska reningsverken att reducera halten fosfor, organiskt material och i vissa fall även kväve från avloppsvattnet innan det tillåts att släppas ut till recipienten. Konventionella reningsverk behandlar vanligtvis avloppsvattnet i tre steg: mekaniskt, biologiskt samt kemiskt. Ett problem som kan uppstå på reningsverken är att det inkommande vattenflödet är för högt vilket inträffar vid kraftiga skyfall eller intensiva snösmältperioder. Reningsverken klarar under dessa perioder inte av att ta emot och effektivt rena allt vatten, utan tvingas avleda avloppsvattnet förbi vissa behandlingssteg direkt ut till recipienten för att undvika skador på utrustningen (så kallad bräddning). Under bräddningstillfällen släpper reningsverken ut i princip obehandlat avloppsvatten till recipienten vilket tillför stora mängder näringsämnen i vattendragen som i sin tur bidrar till övergödning. Uppstår för många bräddningstillfällen på reningsverken riskerar de dessutom att misslyckas med att uppnå uppställda bräddvillkor vilket kan leda till straffrättsligt ansvar.

Genom att införa ytterligare en kemisk behandling under tillfällen med höga inkommande vattenflöden eftersträvar Henriksdals reningsverk i Stockholm att reducera de totala utsläppen av näringsämnen. På så sätt minimeras belastningen av föroreningar till recipienten. Detta projekt har utrett möjligheten att implementera en sådan lösning i form av att tillsätta kemikalier med hjälp av tryckluft genom en så kallad doserramp. Doserrampen består av ett vertikalt och ett horisontellt rör utformade som ett liggande L. Längs det horisontella röret borrades luftningshål där kemikalien och tryckluften kunde flöda ut. Fördelen med att använda tryckluft var även att uppnå en viss omrörande effekt i avloppsvattnet vilket på ett effektivt sätt skulle kunna blanda in kemikalien i avloppsvattnet vilket utgör en viktig del av den kemiska behandlingen.

I projektet utreddes hur doserrampen skulle utformas för att uppnå bästa resultat vilket utfördes genom pilotförsök med en fullskalig modell på Henriksdals reningsverk. Under experimenten testades bland annat olika rördimensioner (50 respektive 25 mm i innerdiameter), utformningen på hålbilden längs det horisontella röret samt hur luftningshålen borde riktas för att erhålla en jämn flödesfördelning. Resultaten visade att bäst prestanda uppnåddes när en hålbild med avtagande avstånd implementerades i kombination med att luftningshålen riktades nedåt. Vid den större rördimensionen uppnåddes bättre prestanda när den horisontella rördelen fylldes med fyllkroppar längs det horisontella röret vilka skapade en ökad turbulens i röret. Projektet bidrog med kunskap kring hur en doseringsteknik med tryckluft skulle kunna implementeras på reningsverksanläggningar samtidigt som det belyste potentiella problem med anordningen. Projektet utgjorde en del av projektet *Stockholms framtida avloppsrening* (SFA).

ORDLISTA

<i>Anoxisk</i>	Miljö utan tillgång på löst syre
<i>BOD</i>	Biokemisk syreförbrukning. Mått på syreförbrukande organiskt material
<i>Bräddning</i>	Tillfälligt utsläpp av obehandlat avloppsvatten
<i>Bärarmaterial</i>	Kroppar av plast med stor ytarea som mikroorganismer växer på. Används i reningstekniken <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i>
<i>Centrumavstånd</i>	Avståndet från centrum till centrum mellan två komponenter
<i>Fyllkroppar</i>	Kroppar av plast eller keramik som utnyttjas vid värme- eller massöverföringsprocesser
<i>Fällningskemikalie</i>	Kemisk förening med positivt laddade joner som används vid kemisk behandling av avloppsvatten
<i>Högflödesrening</i>	Behandling av avloppsvatten som reningsverken inte har kapacitet att hantera
<i>PAX XL-1</i>	Fällningskemikalie bestående av polyaluminiumklorid
<i>PIX-111</i>	Fällningskemikalie bestående av järnklorid
<i>Recipient</i>	Mottagande vattendrag som utgående avlopps-/dagvatten leds till
<i>SFA</i>	”Stockholms framtida avloppsrening”. Ett projekt som innefattar utvecklingen av Henriksdals reningsverk
<i>Spillvatten</i>	Förorenat vatten från bad, disk, tvätt och toaletter
<i>Tot-N</i>	Totalkväve. Mått på totala mängden kväve
<i>Tot-P</i>	Totalfosfor. Mått på totala mängden fosfor
<i>Tryckförlust</i>	Energiförluster i rörsystem

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INTRODUKTION	1
1.1	HENRIKSDALS RENINGSVERK	2
1.2	TIDIGARE STUDIER.....	3
1.3	SYFTE OCH MÅL.....	5
1.4	FRÅGESTÄLLNINGAR	6
2	TEORI	6
2.1	AVLOPPSVATTEN OCH INLÄCKAGE	6
2.1.1	Högflödesrening	7
2.2	RENINGSPROCESS.....	8
2.2.1	Mekanisk rening	8
2.2.2	Biologisk rening	8
2.2.3	Kemisk rening	9
2.3	FÄLLNINGSFÖRFARANDE.....	9
2.3.1	Direktfällning	10
2.3.2	Förfällning	10
2.3.3	Simultanfällning	10
2.3.4	Efterfällning.....	11
2.4	FÄLLNING OCH FLOCKNING	11
2.4.1	Inblandningstekniker	13
2.5	FÄLLNINGSKEMIKALIER	13
2.6	TRYCKFÖRLUSTER.....	14
2.6.1	Volym- och massflöden.....	16
2.6.2	Tryckluftssystem	17
2.6.3	Energibalans	18
2.6.4	Fyllkroppar	19
3	MATERIAL OCH METOD	20
3.1	BESKRIVNING AV FULLSKALIG PROTOTYP	21
3.2	MÄTNING AV TRYCKLUFTSFLÖDE	24
3.3	BESKRIVNING AV UTFÖRDA EXPERIMENT	25
3.3.1	Mätning av plymhöjd	27
3.3.2	Brytpunktsmätning	28
3.3.3	Inverkan av en korrigerad hålbild.....	29
3.3.4	Mätning av flödesfördelning	30
3.3.5	Inverkan av mottryck i testbassäng	31
3.4	BERÄKNING AV TRYCKFALL GENOM DOSERRAMPEN	33
4	RESULTAT	38
4.1	EXPERIMENT MED RÖRDIMENSION DN50.....	38
4.2	EXPERIMENT MED RÖRDIMENSION DN25	40
4.3	EXPERIMENT I TESTBASSÄNG.....	41
4.4	MÄTNING AV UTGÅENDE FLÖDESMÄNGDER.....	42
4.5	TEORETISK BERÄKNING AV TRYCKFALL.....	43
5	DISKUSSION	44
5.1	UTFÖRDA EXPERIMENT PÅ DOSERRAMPEN	44
5.2	FYLLKROPPARNAS FUNKTION.....	46

5.3	FLÖDESFÖRDELNING.....	46
5.4	PROBLEMATIK OCH ÅTGÄRDER.....	47
5.5	TRYCKFÖRLUSTER OCH KÄNSLIGHETSANALYS	47
5.6	ALTERNATIVA LÖSNINGSFÖRSLAG	48
5.7	FÖRSLAG PÅ FORTSATTA STUDIER	49
6	SLUTSATSER	49
7	REFERENSER	52
	APPENDIX A - DOSERINGSMÄNGDER HENRIKSDAL.....	55
	APPENDIX B - DOSERRAMPENS PLACERING PÅ HENRIKSDAL.....	56
	APPENDIX C - PRODUKTBLAD PIX-111.....	57
	APPENDIX D - PRODUKTBLAD K5.....	58
	APPENDIX E - PRODUKTBLAD HIFLOW 25–7	60
	APPENDIX F - MÄTNING AV VATTENNIVÅ I CENTRALTUNNEL 1.....	61

1 INTRODUKTION

Behandling av avloppsvatten är lagstadgat i Sverige där det i Miljöbalken (1998:808) 9 kap 7 § 1 st stadgas bland annat att; ”*Avloppsvatten skall avledas och renas eller tas om hand på något annat sätt så att olägenhet för människors hälsa eller miljön inte uppkommer...*”. På samtliga reningsverksanläggningar i Sverige ställs i dagsläget krav på utgående halter av biokemisk syreförbrukning (BOD) och totalfosfor (Tot-P). Utsläppskrav för totalkväve (Tot-N) gäller för de reningsverk vars recipient når ut till kustområden som bedömts vara känsliga mot kväveutsläpp. I Sverige sträcker sig detta kustområde från Strömstad vid norska gränsen till Norrtälje i Stockholms län (Naturvårdsverket, 2014).

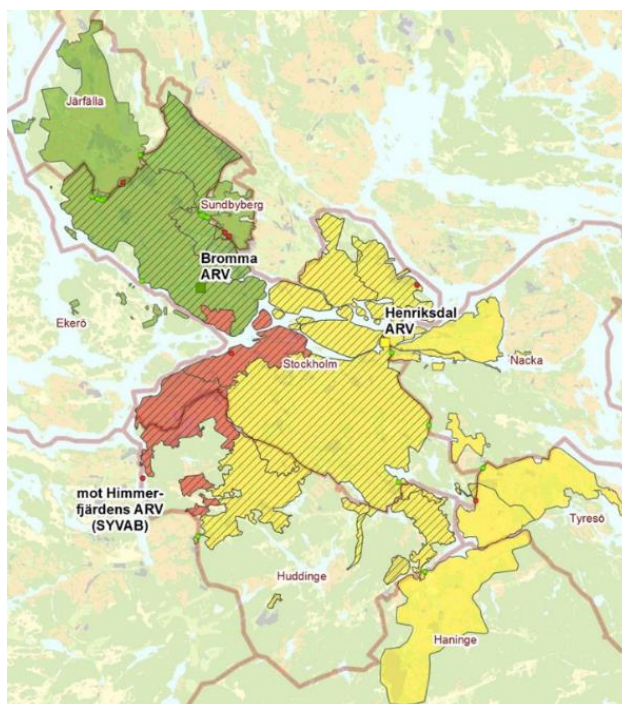
Behandling av avloppsvatten i kommunala reningsverk genomgår vanligtvis tre reningssteg: ett mekaniskt, ett biologiskt samt ett kemiskt för att reducera föroreningshalterna till önskade nivåer innan det släpps ut till recipienten. En central del i reningsprocessen är att under det kemiska reningssteget dosera fällningsmedel i form av järn- eller aluminiumbaserade salter med främsta syfte att reducera fosforhalten i avloppsvattnet men även till viss del organiska föroreningar. Processen fäller ut såväl organiskt som icke-organiskt bundet fosfor till svårlösliga metallfosfater som tillsammans med övrigt suspenderat material bildar flockar. Flockarna avskiljs sedan från avloppsvattnet genom sedimentering, filtrering eller flotation. Fällningsprocessen reducerar halten fosfor mellan 80 och 95 % beroende på kemikalieval, tillvägagångssätt för avskiljning samt avloppsvattnets egenskaper. Händelseförloppet för utfällningsreaktionerna går snabbt vilket gör det viktigt att det sker en snabb och effektiv inblandning av fällningskemikalien för att uppnå önskad sammansättning på flockarna. Detta genomförs vanligtvis genom att tillsätta fällningsmedlet vid en zon där avloppsvattenflödet är turbulent. Turbulenta flöden uppstår antingen självmant i kanaler vid snäva krökningar och avsmalningar eller bildas genom självinducerad turbulens vilket vanligtvis uppnås genom mekaniska hjälpmedel i form av paddlar eller propellrar (Svenskt Vatten, 2013).

På reningsverket i Henriksdal i Stockholm undersöks möjligheten att tillämpa en alternativ doseringsmetod som med hjälp av tryckluft doserar fällningskemikalien från kanalens botten för att på så vis åstadkomma en effektiv och fullständig inblandning av

kemikalien i avloppsvattnet. Doserrampen var tänkt att användas under så kallad högflödesrening vilket sker vid större inkommande flöden till reningsverket som orsakas av intensiva skyfall eller snösmältningsperioder (SMHI, 2018).

1.1 HENRIKSDALS RENINGSVERK

Insprängt i Henriksdalsberget, beläget mellan Nacka och Stockholms kommun ligger Henriksdals reningsverk. Reningsverket är Sveriges största och behandlade tillsammans med Bromma reningsverk år 2017 totalt 154 miljoner m³ avloppsvatten. Henriksdals upptagningsområde omfattas av Stockholms innerstad samt de södra förortsområdena (se figur 1). År 2017 uppgick antalet anslutna personer till Henriksdals reningsverk till cirka 850 000 personer (Stockholm Vatten och Avfall, 2017).

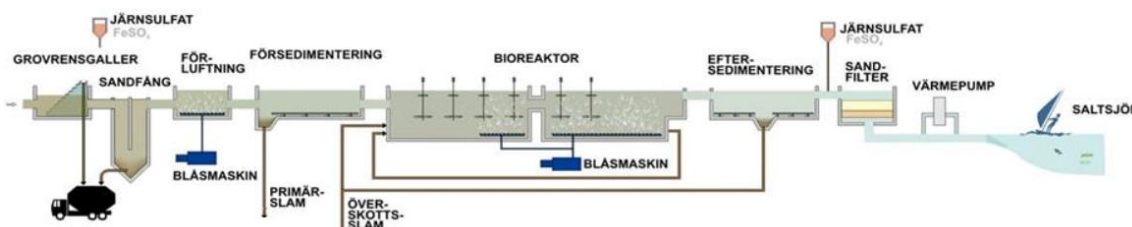


Figur 1 Henriksdals reningsverks upptagningsområde inom det gulmarkerade området. (Stockholm Vatten och Avfall, 2017)

Under 2013 fattades beslutet att lägga ned Bromma reningsverk med cirka 370 000 anslutna personer och istället avleda avloppsvatten till Henriksdal vilket har medfört omfattande ombyggnationer av verket. Henriksdals reningsverk ska dimensioneras utifrån en kapacitet på 1 620 000 personekvivalenter vilket anses täcka omdirigeringen från Bromma och även tillgodose Stockholms framtida befolkningstillväxt till år 2040. För att uppnå detta skall reningsverket bland annat utrustas med en membranbioreaktor

(MBR) vilken ersätter eftersedimenteringsbassängerna och har en rad påvisade fördelar gentemot konventionell aktivslamprocess som minskat ytbehov samt ökad reningsgrad av läkemedelsrester och mikroplaster (Baresel m.fl., 2017). Driftsättningen av det nya Henriksdalsverket väntas ske under våren 2024 (Stockholm Vatten och Avfall, 2018).

Utformningen av Henriksdals olika behandlingssteg kan liknas vid ett konventionellt reningsverk med ett mekaniskt, ett biologiskt samt ett kemiskt reningssteg (se figur 2). I dagsläget doseras fällningskemikalien järnsulfatheptahydrat ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) vid grovrengallret och blandas in i avloppsvattenflödet vid det luftade sandfånget samt i kanalanslutningen vid sandfiltreringen (Jonsson, 2018a). Dosering av fällningskemikalien sker flödesproportionellt mot inkommande avloppsvattenmängd. Under perioden 2015 till maj 2018 var medelvärdet cirka 14 g Fe/m^3 avloppsvatten (se Appendix A).

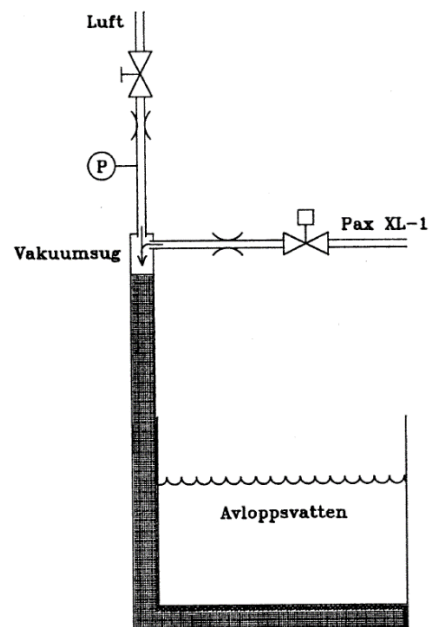


Figur 2 Schematisk figur över Henriksdals processschema. Den mekaniska behandlingen utgörs av grovrengaller, sandfång samt försedimentering. Biologisk behandling sker i bioreaktorn och den kemiska behandlingen i anslutning till sandfånget och sandfiltren. (Stockholm Vatten och Avfall, 2017)

1.2 TIDIGARE STUDIER

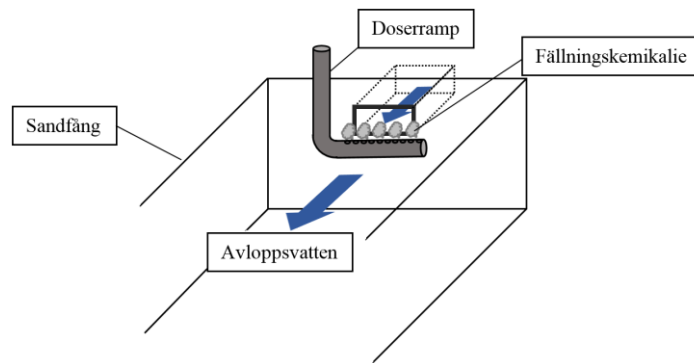
På VEAS avloppsreningsverk utanför Oslo har metoden att dosera fällningskemikalier med hjälp av tryckluft tillämpats vilket har utgjort grunden för detta arbete, bland annat har mycket inspiration hämtats från anordningens designparametrar. VEAS reningsverk har över 600 000 anslutna personer och år 2016 behandlades över 97 miljoner m^3 avloppsvatten vilket gör det till Norges största avloppsreningsverk (VEAS, 2016). I samband med att nya behandlingssteg i form av förfällning och biologisk behandling i biofilmreaktorer driftsattes år 1994 så bytte reningsverket ut den dåvarande koagulanten, en järnkloridbaserad fällningskemikalie, mot en ny högbasisk polyaluminiumklorid benämnd PAX XL-1. Den nya koagulanten lämpade sig dock inte

väl för den doseringsteknik som använts sedan tidigare vilket medförde att en ny metod utvecklades. Lösningen blev en doseringsanordning som använde tryckluft som inblandningsmedium. Anordningen, en doserramp, konstruerades med en vertikal inblandningsenhet som anslöts till ett perforerat horisontellt rör genom en 90° rörböj och byggdes helt i PVC för att stå emot fällningsmedlets korroderande effekt (se figur 3) (Ryrfors & Eriksen, 1995).



Figur 3 Ritning över doserrampen som används på VEAS reningsverk. Tryckluftsanslutningen monterades vertikalt ovanifrån (luft) och kemikalieanslutningen vinkelrätt från sidan (PAX XL-1). (Ryrfors & Eriksen, 1995)

Doserrampens vertikala del var 2,6 m och den horisontella 0,85 m med rördiametern 90 mm. Den horisontella rördelen perforerades med 80 stycken luftningshål med diametern 3,5 mm (Nannestad, 2018). Tryckluftsanslutningen monterades vertikalt ovanifrån och kemikalieanslutningen vinkelrätt från sidan. Tryckluften doserades genom en ejektor vilket genererade ett vakuum som sög in fällningsmedlet i doserrampen. Inuti doserrampens horisontella rördel placerades fyllkroppar. Syftet med fyllkropparna var att homogenisera blandningen av fällningskemikalien och tryckluften för en effektiv och jämn dosering i avloppsvattnet. Doserrampen placerades så att den perforerade rördelen låg alldeles intill inloppskanalen till sandfånget med luftningshålen riktade vertikalt mot vattenytan. Detta ansågs dels minimera risken för att doserrampen skulle täckas med trasor och dels effektivisera inblandningen (se figur 4) (ibid.).



Figur 4 Skiss över doserrampens placering intill inloppet till sandfånget på VEAS reningsverk i Norge. (Nannestad, 2018)

Doserrampen har sedan 1994 varit i fullskaledrift men inga undersökningar har gjorts gällande dess optimala inställningar såsom den perforerade rördelens hålstorlek, avståndet mellan hålen eller val av fyllkroppar. Under hösten 2017 tömdes sandfånget på avloppsvatten i samband med ombyggnationer av verket varvid inspektion av doserrampen utfördes. Det upptäcktes att stora delar av den perforerade rördelen var täckt med trasor vilket resulterat i försämrade doseringseffekt. Erfarenheter från driften av doserrampen visade att luftens ingående tryck bör bibehållas inom tryckintervallet 1–3 bar (Nannestad, 2018).

1.3 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet var att undersöka möjligheten att implementera en ny fällningsteknik med tryckluft som inblandningsmedium på Henriksdals avloppsreningsverk. En välfungerande lösning skulle resultera i en snabb och effektiv inblandning av fällningsmedlet i avloppsvattnet vilket skulle öka verkets reningsgrad vid högflödesrening.

Målet med projektet var att utgå från befintlig design och koncept för spridning av fällningsmedel med användning av tryckluft och genom pilotförsök med en egenutvecklad doserramp ta fram ett lösningsförslag som redogör för doserrampens optimala designparametrar. Målet inkluderade även att belysa de problem som kan uppstå vid användning av olika fällningsmedel. Den optimerade doserrampen skall därefter användas som ett extra fällningssteg vid högflödesrening i syfte att reducera

fosfor- och partikelhalterna i avloppsvatten som annars bräddas orenat till recipienten. Anordningen utgör en del av projektet *Stockholms framtida avloppsrening (SFA)*.

1.4 FRÅGESTÄLLNINGAR

Projektet utgick ifrån följande frågeställningar:

- Vilka metoder används på reningsverk för att blanda in fällningsmedel i avloppsvattnet?
- Vilket ingående lufttryck krävs för att dosera fällningsmedel med befintlig design på doserrampen samt resulterar i bäst omblandning av avloppsvattnet?
- Hur skall doserrampens designparametrar med anseende på hålbild och rördimension utformas för optimal prestanda?
- Vilka fyllkroppar är lämpligast att använda för att åstadkomma optimal spridning av fällningskemikalien i doserrampen samt vilken inverkan får dessa med avseende på tryckfall?
- Vilken inverkan på doserrampens funktion får ett applicerat mottryck på luftningshålen?

2 TEORI

2.1 AVLOPPSVATTEN OCH INLÄCKAGE

Det inkommande avloppsvattnet till reningsverken består inte enbart av spillvatten från hushåll och industrier, utan även till viss del av tillskottsvatten som läcker in i ledningsnätet vilket resulterar i ökade inkommande flöden. Tillskottsvatten består av dagvatten och dräneringsvatten vars föroreningar mestadels omfattas av tungmetaller som koppar, zink och bly samt mindre halter av organiska ämnen som olja. Faktorer som avrinningsyta, nederbördsintensitet samt tidpunkt på året inverkar på tillskottsvattnets föroreningsgrad (Naturvårdsverket, 2004). Inläckaget sker på grund av håligheter i spillvattenledningar där markstrukturen samt ledningarnas varaktighet i marken inverkar på inläckagets omfattning. Naturvårdsverket (2013) påvisar att

inläckage även sker i helt nya spillvattenledningar i storleksordningen 0,15–0,5 l/s/ha. Eftersom reningsverken är utformade att behandla spillvattnet från organiskt material, fosfor och kväve resulterar en utspädning genom tillskottsvatten i såväl en minskad föroreningsgrad i avloppsvattnet som en minskad retentionstid i verket på grund av ett ökat inkommande flöde vilket i sin tur hämmar reningsgraden.

2.1.1 Höglödesrening

När det inkommande flödet till avloppsreningsverk överskrider verkets hydrauliska kapacitet, vilket uppstår vid kraftiga skyfall eller snösmältningsperioder, så bräddas avloppsvattnet förbi det biologiska behandlingssteget antingen till ett avslutande filtreringssteg eller direkt till recipienten. Avloppsvattnet genomgår därmed endast en förbehandling under det mekaniska reningssteget och i vissa fall även ett filtreringssteg vilket medför kraftigt förhöjda föroreningshalter i utgående avloppsvatten.

Reningsverken påtvingas att brädda avloppsvatten för att avlasta magasinering och ledningsnät vilket annars kan orsaka översvämningar i hushåll och brunnar (Länsstyrelsen Gävleborg, 2009).

För att reningsverken skall uppnå de krav som ställs på tillåtna föroreningshalter i utgående avloppsvatten krävs i vissa fall lösningar som även involverar behandling av bräddvattnet, så kallad höglödesrening (SMHI, 2018). På Henriksdals reningsverk implementeras lösningen av ett extra fällningssteg där doserrampen utgör själva doseringsanordningen. Doserrampen var tänkt att placeras längs kanalens botten mellan grovreningen och försedimenteringsbassängerna (se Appendix B) vid verkets norra inlopp vilket ansågs utgöra majoriteten av de vattenmassor som senare bräddas förbi de biologiska bassängerna vid höglödesrening. För att undvika att doserrampen snabbt täcks med trasor och dylikt som undgått avskiljning under grovreningen är det planerat att doserrampen placeras 1–2 decimeter ovan kanalens botten samt med en skyddande fästningsanordning kring rören (Jonsson, 2018b). Henriksdals reningsverk uppgav år 2017 att totalt cirka 266 000 m³ avloppsvatten bräddades till recipienten och att verket inte klarade av att uppfylla riktvärdet för bräddvillkoret vilket är 325 000 m³ över ett 10-årsmedel (Stockholm Vatten och Avfall, 2018).

2.2 RENINGSPROCESS

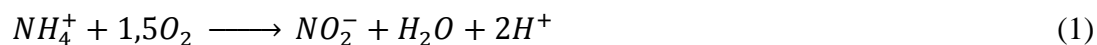
Följande avsnitt presenterar den generella reningsprocessen i kommunala reningsverk med mekanisk, biologisk samt kemisk behandling av avloppsvattnet.

2.2.1 Mekanisk rening

Den inledande behandlingen av avloppsvattnet sker via ett mekaniskt reningssteg där de grövsta föremålen som trasor och sandpartiklar i avloppsvattnet avlägsnas. Detta underlättar efterföljande reningssteg och förhindrar igensättning av pumpar och filter. Det mekaniska reningssteget utgörs vanligtvis av ett grovrensgaller, sandfång samt försedimenteringsbassänger där de olika stegen är utformade att avlägsna gradvis mindre partiklar. Det mekaniska reningssteget kan även kompletteras med ett fällningssteg, så kallad förfällning, för ytterligare reduktion av fosfor och suspenderat material (Svenskt Vatten, 2013).

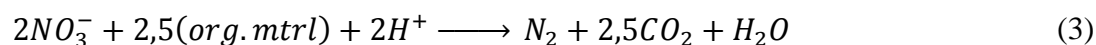
2.2.2 Biologisk rening

Efter att avloppsvattnet passerat det mekaniska reningssteget leds det till bioreaktorn för biologisk behandling i en så kallad aktivslamprocess. Där renas avloppsvattnet främst med avseende på organiskt material samt kväve via heterotrof respiration samt genom nitrifikation och denitrifikation. Mikroorganismerna, som till största del utgörs av bakterier, utviner energi genom att bryta ner det organiska material som återstår efter att avloppsvattnet genomgått den mekaniska behandlingen. Reduktion av kväve erhålls till viss del genom celluppbyggnad av mikroorganismerna, så kallad assimilation, där organiskt bundet kväve tas upp av heterotrofa organismer. Reduktion av kväve kan uppnå 10–30% enkom av assimilation (Svenskt Vatten, 2013). Det inkommande kvävet till reningsverken förekommer antingen oorganiskt bundet i form av ammoniumkväve (NH_4^+-N) eller organiskt bundet i form av urinämnen som urea (Naturvårdsverket, 2013). För att erhålla högre reduktionsnivåer av kväve genomgår en nitrifikation- samt denitrifikationsprocess. Nitrifikationsprocessen sker i två steg i syfte att omvandla ammoniumkvävet (NH_4^+-N) till slutprodukten nitrat (NO_3^-). I första steget oxideras NH_4^+-N till nitrit (NO_2^-) under aeroba förhållanden. Därefter oxideras NO_2^- till NO_3^- (se reaktionsformel 1 och 2).





För att denitrifikation skall ske krävs anoxiska (syrefria) förhållanden i bassängen. I brist på syre kommer denitrifierande bakterier istället att reducera kvävet i nitrat via nitrit till slutprodukten kvävgas (N_2). Denitrifierarna kräver dock energi i form av organiskt material vilket i vissa fall måste tillsättas externt såvida den inkommande BOD-halten till denitrifikationsbassängen är låg (Svenskt Vatten, 2013). Den kemiska reaktionen under denitrifikationen beskrivs i reaktionsformel 3.



Efter att avloppsvattnet passerat bioreaktorn leds det in i en eftersedimenteringsbassäng där det producerade slammet avskiljs genom sedimentering. För att förhindra att biomassan spolats ut med utgående vatten så recirkuleras stora delar av slammet tillbaka till bioreaktorn för att upprätthålla bakteriekulturen i bassängen. Endast mindre slamfraktioner, så kallat överskottsslam, pumpas ut ur systemet för slambehandling (Svenskt Vatten, 2013).

2.2.3 Kemisk rening

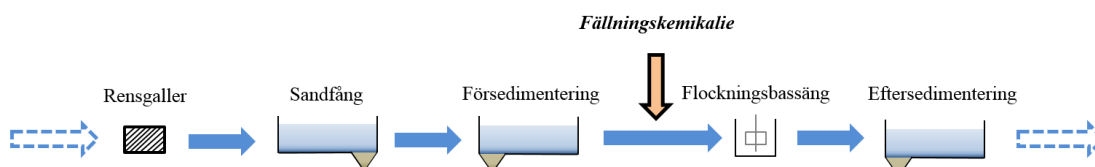
För att uppnå kraven som ställs på det utgående avloppsvatten avslutas behandlingen vanligtvis med ett kemiskt reningssteg i form av efterfällning samt ett ytterligare filtreringssteg. Återigen tillsätts fällningsmedel som binder upp återstående suspenderat material och fosfor varvid flockning sker. Flockarna avskiljs därefter vanligtvis genom sedimentering via ett sandfilter (Svenskt Vatten, 2013). En mer djupgående analys av det kemiska reningssteget presenteras i avsnitt 2.4.

2.3 FÄLLNINGSFÖRFARANDE

Hur och var fällningsmedlet doseras i ett reningsverk kan ha stor betydelse på faktorer som uppnådd reningsgrad, slamegenskaper och energiförbrukning. På avloppsreningsverk kan fällningsförfarandet huvudsakligen delas in i fyra olika kategorier; *direktfällning*, *förfällning*, *simultanfällning* och *efterfällning*. Om en kombination av de olika fällningsförfaranden tillämpats används benämningen *flerpunktsfällning* (Svenskt Vatten, 2013).

2.3.1 Direktfällning

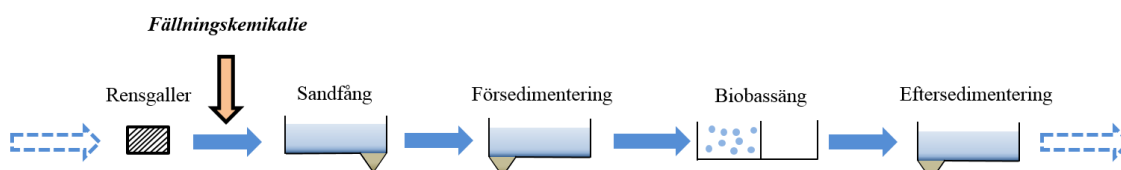
Direktfällning innebär en kemisk behandling som enda reningssteg efter den mekaniska behandlingen (se figur 5). Fällningsmedlet tillsätts efter den mekaniska behandlingen och följs upp med en eftersedimenteringsbassäng. Metoden är billig och energisnål men resulterar ofta i en försämrad reningsgrad gentemot övriga tillvägagångssätt (Hansen, 1997).



Figur 5 Schematisk figur över fällningsförfarandet direktfällning. Fällningsmedlet tillsätts mellan för- och eftersedimenteringen.

2.3.2 Förfällning

Begreppet förfällning förekommer i reningsverk med endast mekanisk samt biologisk behandling och innebär att fällningskemikalien tillsätts i en punkt mellan dessa behandlingssteg (se figur 6). I reningsverk med förfällning tillsätts vanligtvis kemikalien innan eller efter sandfånget. Avskiljningen av flockarna sker i försedimenteringsbassängen vilket underlättar behandlingen i det biologiska reningssteget (Svenskt Vatten, 2013).

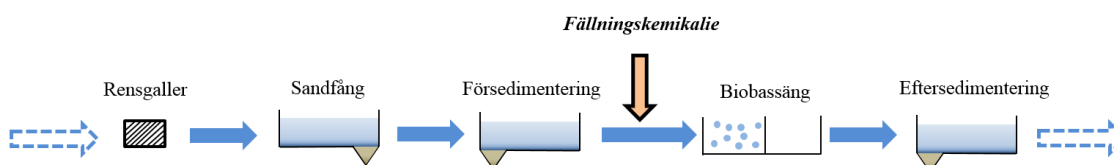


Figur 6 Schematisk figur över fällningsförfarandet förfällning. Fällningsmedlet tillsätts under den mekaniska behandlingen.

2.3.3 Simultanfällning

Simultanfällning innebär ett kombinerat behandlingssteg med både kemisk och biologisk behandling av avloppsvattnet. Fällningskemikalien tillsätts antingen före eller i luftningsbassängen där den biologiska behandlingen utförs (se figur 7). Processen bildar både kemiskt och biologiskt slam som avskiljs tillsammans. Metoden är lämplig för tvåvärda fällningsmedel som järn(II)sulfat eftersom kemikalien kräver tillgång på

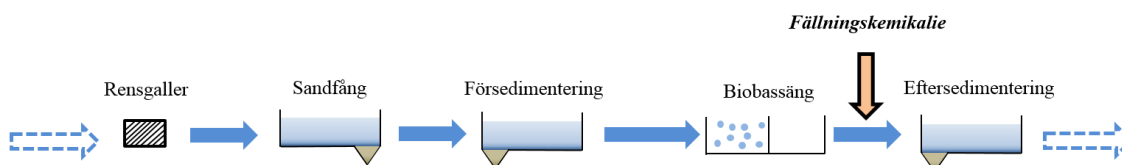
syre för att oxideras till trevärt järn men kräver mer energi i form av luftning (se avsnitt 2.5) (Svenskt Vatten, 2013).



Figur 7 Schematisk figur över förfarandet simultanfällning. Fällningsmedlet tillsätts mellan den mekaniska och biologiska behandlingen.

2.3.4 Efterfällning

Efterfällning innebär att fällningsmedlet tillsätts efter den biologiska behandlingen och tillämpas som sista reningssteg i anläggningen (se figur 8). Efterfällningen följs upp av en eftersedimenteringsbassäng där flockarna avskiljs. Metoden möjliggör användning av alla sorters fällningsmedel och resulterar oftast i högst reningsgrad vad gäller halten fosfor och BOD (Svenskt Vatten, 2013).

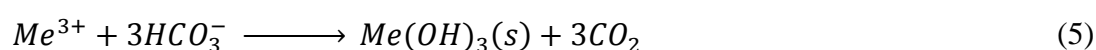
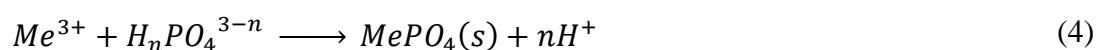


Figur 8 Schematisk figur över förfarandet efterfällning. Fällningsmedlet tillsätts efter den biologiska behandlingen.

2.4 FÄLLNING OCH FLOCKNING

En central del under behandlingen av avloppsvattnet i kommunala reningsverk är att dosera fällningsmedel (vanligtvis i form av järn- eller aluminiumbaserade salter) för att reducera fosforhalten i avloppsvattnet. Fosfor förekommer antingen organiskt eller oorganiskt bundet i avloppsvattnet i form av polyfosfat eller ortofosfat (H_3PO_4). Polyfosfat består av polymerer av ortofosforsyra vilka bryts ner till ortofosfat och utnyttjas av mikroorganismerna för cellupbyggnad i det biologiska reningssteget (Sathasivan, 2009). I ett reningsverk med förfällning och biologisk behandling är det av stor vikt att inte fälla ut all fosfor eftersom detta hämmar den biologiska aktiviteten och därmed reningsförmågan i det biologiska reningssteget (Svenskt Vatten, 2013).

Under fällningsprocessen vid tillsats av kemikalien i avloppsvattnet äger i huvudsak två processer rum, neutralisering av partikelladdningar samt hydroxidfällning (svepkoagulering) (ibid.). De kolloidala partiklarna som förekommer i avloppsvattnet har en negativ laddning vid neutralt pH (pH = 7) varvid tillsatsen av positivt laddade joner (Fe^{3+} eller Al^{3+}) resulterar i en neutralisering av laddningen. Metalljonerna (Me^{3+}) reagerar dels med ortofosfatjonerna och bildar svårösliga metallfosfater (se reaktionsformel 4) och dels med vätekarbonat och bildar hydroxider (se reaktionsformel 5).



Metallhydroxiderna bildar mikroflockar som fosfaterna och övrigt suspenderat material fäster på varvid flockarna aggregerar och växer i storlek (Pillai, 2004, Roy, 2013). Fällnings- och flockningsprocessen är beroende av pH-värdet i avloppsvattnet då flockarna löses upp vid antingen för höga eller för låga värden. På vissa reningsverk krävs en pH-justering genom tillsättning av alkali (kalk eller natriumhydroxid) före doseringssteget för optimal flockbildning. Flockarna avskiljs därefter genom exempelvis sedimentering, flotation eller filtrering. I fällningsprocessen reduceras halten fosfor mellan 80 och 95 % beroende på kemikalieval, tillvägagångssätt för avskiljning samt avloppsvattnets egenskaper (Svenskt Vatten, 2013).

Det är viktigt att det sker en god och snabb inblandning av fällningskemikalien för att uppnå önskad sammansättning på flockarna eftersom händelseförloppet för utfällningsreaktionerna går väldigt snabbt. Flockbildningen är dock en mer tidskrävande process som initialt kräver en viss grad av turbulens som sedan ska avta i takt med flockarnas tillväxt, i syfte att undvika att de bryts sönder av ett alltför turbulent flöde. Önskad sammansättning på flockarna beror på vilken teknik som används för att avskilja dem. Består det efterföljande avskiljningssteget av sedimentering så är stora och täta flockar med hög densitet önskvärda eftersom detta resulterar i en högre sedimentationshastighet samt förbättrar det producerade slammets egenskaper. Om flotation istället används som avskiljningsmetod är små och täta flockar önskvärda eftersom de lättare floterar på ytan och risken för att de bryts sönder av luftinblåsningen

är mindre. Används filtrering som avskiljningsmetod bör flockarna inte tillåtas växa till sig för mycket eftersom det skulle resultera i att filtret sätts igen (Svenskt Vatten, 2013).

2.4.1 Inblandningstekniker

Händelseförloppet för när fällningskemikalien tillsätts i avloppsvattnet och utfällningsreaktionerna äger rum sker under en kort tidsperiod, omkring en sekund, och beskrivs av Bratby (2006) som en av reningsverkens viktigaste processer. De tekniker som används för att blanda in kemikalien i avloppsvattnet kan generellt delas in i två typer, statiska eller mekaniska omrörare. Mekaniska omrörare är vanligast förekommande i avloppsreningsverk och är utformade som större propellrar eller paddlar som blandar in fällningsmedlet i avloppsvattnet genom rotation. De anses flexibla och klarar av varierande flödesmängder men förbrukar mycket energi och kräver kontinuerligt underhåll (Qasim & Zhu, 2018). Statiska omrörare utnyttjar vattnets rörelseenergi för att skapa turbulenta zoner där en effektiv inblandning av fällningskemikalien erhålls. Exempel på statiska omrörare kan vara snäva krökningar eller expansioner i ledningar och kanaler eller injektion av tryckluft, så kallade pneumatiska omrörare. Fördelen med statiska omrörare är att de anses pålitliga och inte kräver särskilt omfattande underhåll. Nackdelen är att de ger upphov till större tryckförluster och inte är lika flexibla som mekaniska omrörare vid varierande flödesmängder (ibid.).

2.5 FÄLLNINGSKEMIKALIER

De fällningsmedel som används på avloppsreningsverk utgörs till största del av antingen järn- eller aluminiumbaserade salter men det förekommer även fällningsmedel baserade på kalcium som släckt kalk, $Ca(OH)_2$. De olika fällningskemikalierna har varierande egenskaper som gör dem lämpliga för olika sorters avloppsvatten. Vilket fällningsmedel som lämpar sig bäst för respektive reningsverk beror bland annat på faktorer som avloppsvattnets kvalitet, dess pH-värde samt verkets fällningsförfarande. De järnbaserade fällningskemikalierna är antingen två- (Fe^{2+}) eller trevärdiga (Fe^{3+}) medan fällningsmedel baserade på aluminium är trevärdigt (Al^{3+}). Fällningsmedlens oxidationstal är betydelsefulla eftersom det avgör om en utfällning av både fosfater och hydroxider sker under inblandningen (Svenskt Vatten, 2013).

På de svenska reningsverken är järn(II)sulfat det fällningsmedel som används i störst utsträckning, mycket på grund av dess låga kostnad, och förekommer i form av heptahydrat ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$). Dosering av heptahydrat medför dock ingen omfattande reduktion av fosfor på grund av dess oxidationstal, utan en viss del behöver oxideras till trevärt järn för att hydroxidfällningar skall bildas (se reaktionsformel 5). Detta kan utföras genom att antingen höja avloppsvattnets $pH > 8,5$ via tillsats av alkali eller genom syresättning. Järn(III)klorid (benämns PIX) och järn(III)sulfat är vanligt förekommande trevärda järnsalter vilka båda bildar utfällningar av fosfat och hydroxider. Samma resonemang gäller även för de aluminiumbaserade fällningskemikalierna aluminiumsulfat, aluminiumklorid (benämns PAX) samt polyaluminiumklorid (benämns PAC) som samtliga är trevärda och bildar både utfällningar av fosfat och hydroxider. Gemensamt för fällningskemikalierna är att de konsumerar alkalinitet vid tillsats i avloppsvattnet och att pH-värdet sjunker (Svenskt Vatten, 2013).

På Henriksdal är det i dagsläget inte klarlagt vilken fällningskemikalie som skall användas vid högflödesrening utan tester av det bäst lämpade fällningsmedlet skall genomföras. Vid beräkning av tryckförluster genom doserrampen användes det trevärda järnsaltet PIX-111 som är en järnkloridlösning med densiteten 1420 kg/m^3 samt viskositeten 10 mPa s (se Appendix C). Kemikaliadoseringen vid inkommande höga flöden till Henriksdals reningsverk är omkring $0,6 \text{ l/s}$ (Jonsson, 2018a).

2.6 TRYCKFÖRLUSTER

För att kunna göra en uppskattning på vilka luftmängder som krävs vid drift av en tryckluftsinjicerande doserramp utfördes beräkningar på de tryckförluster som sker i systemet. Beräkning av tryckförlusten utfördes med Darcy-Weisbachs ekvation (ekvation 1).

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum (K_L) \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

där f är friktionskoefficienten, L rörlängden [m], D rörets inre diameter [m], v fluidens hastighet [m/s], K_L förlustkoefficienter från engångsförluster samt g tyngdaccelerationen [m/s^2].

Den första termen i Darcy-Weisbachs ekvation $\left(f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}\right)$ utgörs av energiförluster som uppkommer i form av friktion och den andra $\left(\sum(K_L) \frac{v^2}{2g}\right)$ av systemets engångsförluster som rörböjar, kopplingar och inlopp/utlopp. Friktionsförluster i rörsystem uppkommer från fluidens kontakt med rörets väggar och beräknas med den dimensionslösa friktionsfaktorn f . Friktionsfaktorn beror dels på vilket rörmaterial som används och dels på den flödande fluidens egenskaper som dess viskositet (trögflythet), densitet och flödes hastighet genom rörsystemet. Friktionsfaktorn erhålls vanligtvis genom att avläsa Moodys diagram där rörets ytråhet, diameter samt Reynolds tal måste bestämmas. Reynolds tal är ett dimensionslöst tal som anger om flödet är laminärt eller turbulent och kan beskrivas som kvoten mellan tröghetskrafter och viskösa krafter (se ekvation 2). Vid $Re < 2000$ räknas det som ett laminärt flöde och $Re > 4000$ som turbulent (Munson m.fl., 2009).

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

där ρ är fluidens densitet [kg/m^3], v fluidens hastighet [m/s], D rörets innerdiameter [m] och μ fluidens dynamiska viskositet [Pa s].

Friktionsfaktorn f kan beräknas numeriskt via ett antal beprövade metoder och i detta projekt användes *Haalands* ekvation som beräkningsmetod (ekvation 3). Haalands ekvation är en tillämpning av Coolebrook-Whites ekvation och anses av Genić m.fl. (2011) som en godtagbar beräkningsmetod vid bestämning av friktionsfaktorn.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (3)$$

där ε är rörets ytråhet [m], D rörets innerdiameter [m] och Re Reynolds tal.

Engångsförluster är energiförluster som uppkommer från motstånd som fluiden stöter på längs ledningssträckan som exempelvis rörböjar, ventiler och kopplingar. Varje engångsmotstånd ger upphov till specifika energiförluster som bestäms genom förlustkoefficienten K_L . Förlustkoefficienten är ett dimensionslöst tal som anger de energiförluster varje engångsmotstånd ger upphov till. Förlustkoefficienten för en öppen

kulventil ($K_L \approx 0,05$) är således mycket lägre jämfört med en kulventil med öppningsgraden 1/3 ($K_L \approx 210$) (Munson m.fl., 2009).

2.6.1 Volym- och massflöden

För att kunna genomföra beräkningar med Darcy-Weisbachs ekvation så behöver mediets hastighet i rörsystemets olika punkter bestämmas. Hastigheten kunde uppskattas teoretiskt med hjälp av tryckluftens respektive vätskans mass- och volymflöde i den vertikala rördelen. Beräkning av tryckluftens respektive vätskans volymflöde utfördes med hjälp av definitionen för volymetriskt flöde (ekvation 4). Volymflödet, \dot{V} , beskriver hur stor volym som passerar en gränsyta under en tidsperiod och anges i enheten [m^3/s] (se ekvation 4). Massflödet, \dot{m} , beskriver flödet av massa under en tidsperiod och anges i enheten [kg/s] (se ekvation 5).

$$Q = \dot{V} = vA \quad (4)$$

$$\dot{m} = \rho vA \quad (5)$$

där ρ är fluidens densitet [kg/m^3], v fluidens hastighet [m/s] samt A rörets tvärsnittsarea [m^2].

Från det att tryckluften och vätskan blandats samman behandlades respektive fluid som ett gemensamt homogent medium. Det homogena mediets egenskaper beräknas därefter med utgångspunkt från dess ingående mass- och volymflöde. Tryckluftens och vätskans gemensamma densitet, $\bar{\rho}$, beräknades genom att kvotera summan av dess mass- respektive volymflöde (se ekvation 6).

$$\bar{\rho} = \frac{\dot{m}_1 + \dot{m}_2}{\dot{V}_1 + \dot{V}_2} \quad (6)$$

där \dot{m}_1 och \dot{m}_2 är vätskans respektive tryckluftens massflöde [kg/s] och \dot{V}_1 och \dot{V}_2 dess volymflöde.

Den gemensamma viskositeten, $\bar{\mu}$, beräknades genom att väga respektive mediums viskositet mot dess massflöde och därefter dividera med dess totala massflöde (ekvation 7)

$$\bar{\mu} = \frac{\mu_1 \dot{m}_1 + \mu_2 \dot{m}_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (7)$$

där μ_1 respektive μ_2 är vätskans respektive tryckluftens viskositet.

2.6.2 Tryckluftssystem

Eftersom den kompressibla tryckluften används som inblandningsmedium i doserrampen så måste vissa antaganden utföras gällande de yttre omständigheterna för att beräkningarna skall kunna genomföras. Tryckluft kan i vissa hänseenden betraktas som en ideell gas och följer *Boyles lag* ($V_1 P_1 = V_2 P_2$) som beskriver relationen mellan tryck och volym hos en gas. Lagen visar att produkten mellan volymen och trycket hos en viss gas är konstant vid en konstant temperatur (Nasa, 2015). Tryckluftssystemet på Henriksdals reningsverk var trycksatt till 6 bar och matades från en kompressor av märket *AtlasCopco* med maximala kapaciteten 568 l/s (Jonsén, 2018). För att bestämma tryckluftens ingående massflöde krävs att densitet beräknas vilken varierar beroende på temperaturen och dess absoluta tryck (ekvation 8).

$$\rho_{luft} = \frac{P_{ABS}}{RT} \quad (8)$$

där P_{ABS} är det absoluta trycket [Pa], R luftens specifika gaskonstant ($R = 287,1$ J/kg/K) samt T temperaturen i Kelvin [K].

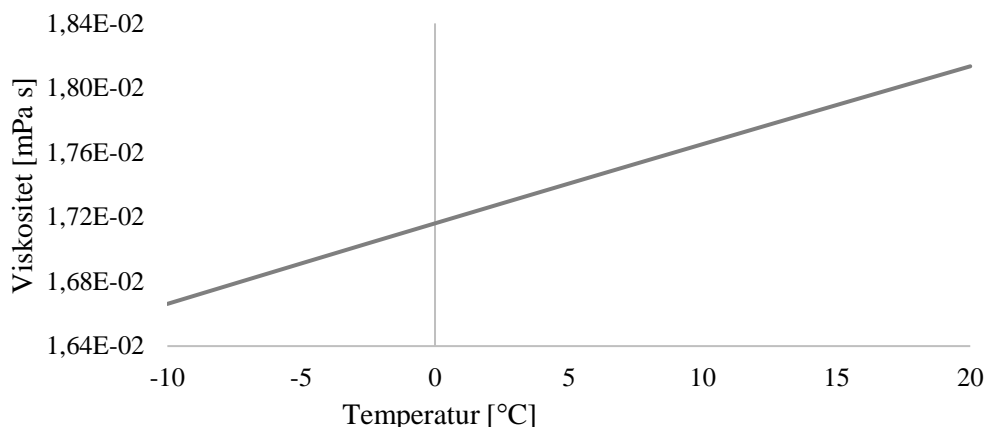
Det absoluta trycket P_{ABS} erhöles genom att summera atmosfärstrycket P_{atm} med det avlästa trycket på manometern, P_{gauge} (ekvation 9).

$$P_{ABS} = P_{atm} + P_{gauge} \quad (9)$$

Luftens viskositet varierar endast med temperaturen och kan numeriskt beräknas genom Dixons (2007) uttryck för luftens dynamiska viskositet (ekvation 10) där temperaturen T anges i Kelvin [K].

$$\mu_{luft} = (1,458 \times 10^{-6}) \frac{T^{1,5}}{T + 110,4} \quad (10)$$

I figur 9 visas en graf med beskrivning hur luftens viskositet varierar mellan temperaturintervallet -10 och 20 °C. Figuren visar att viskositeten ökar linjärt inom detta temperaturintervall.



Figur 9 Luftens viskositet vid varierande temperaturer.

I tabell 1 visas densiteten och det absoluta trycket hos luft mellan tryckintervallet 1 atm ($\approx 1,01$ bar) och 6 bar. Eftersom anläggningen är belägen i Henriksdalsberget är temperaturen i princip konstant året om varvid temperaturen 15 °C antogs. Tabellen visar att luftens densitet ökar med 600 % när trycket ökas från atmosfäriskt tryck (1 atm) till det maximalt erhållna trycket ur anslutningen på reningsverket (6 bar).

Tabell 1 Densiteten och det absoluta trycket hos luft när trycket varierar mellan atmosfäriskt tryck (1 atm) och 6 bar.

	Densitet [kg/m ³]	Absolut tryck [bar]
Tryckluft vid 1 atm	1,2	1
Tryckluft vid 2 bar	3,6	3
Tryckluft vid 3 bar	4,9	4
Tryckluft vid 4 bar	6,1	5
Tryckluft vid 5 bar	7,3	6
Tryckluft vid 6 bar	8,5	7

2.6.3 Energibalans

Ekvationen för energibalans i höjddled (z-led) är en modifikation av Bernoullis ekvation som relaterar fluidens tryck, hastighet och lägesenergi längs ett rörsystem. Ekvationen inkluderar till skillnad från Bernoullis ekvation även termer för tillförd energi av pumpar eller kompressorer ($h_{pump, u}$) och energiförluster genom turbiner ($h_{turbin, e}$) samt

strömningsförluster (h_L). Ekvationen kan appliceras mellan två bestämda punkter längs ett rörsystem varvid strömningshastigheten vid samtliga punkter kan erhållas (se ekvation 11) (Çengel & Cimbala, 2006).

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbine} + h_L \quad (11)$$

där P är det statiska trycket vid respektive mätpunkt [Pa], ρ fluidens densitet [kg/m^3], g tyngdaccelerationen [m/s^2], v fluidens hastighet [m/s], z höjdpotentialen [m], $h_{pump,u}$ tillförd energi [m], $h_{turbine}$ energiförlust från turbin [m] samt h_L strömningsförluster [m].

2.6.4 Fyllkroppar

Fyllkropparnas (benämns även som bärarmaterial) ursprungliga syfte är att utgöra en skyddad plats för mikroorganismers tillväxt, varvid en biofilm bildas på kroppens yta. De används vid reningstekniken *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR) och tillämpas i det biologiska reningssteget för att gynna nedbrytning av organiskt material.

Fyllkropparna blandas om i bassängen antingen mekaniskt via omrörare eller genom luftning för syresättning vilket resulterar i effektiv nedbrytning av det organiska materialet. Fyllkroppar består vanligtvis av plast för att kunna bibehållas i drift under långa tidsperioder och har även en stor specifik area [m^2/m^3] vilket gynnar bakteriernas möjlighet att växa till på (Veolia, 2014).

Fyllkropparna kan även utnyttjas vid värme- och massöverföringsprocesser som i exempelvis skrubberteknik där de utnyttjas i *bioscrubbers* i syfte att avlägsna luftburna föroreningar från en gas med liknande tillvägagångssätt som vid användning i MBBR. Omrörning sker även vid tillämpning i skrubberteknik i syfte att uppnå ett effektivt massutbyte mellan gasen och mikroberna på kroppens yta (Wang m.fl., 2014).

I detta projekt användes fyllkropparna i syfte att sammanblanda tryckluften och kemikalien i doserrampen och skapa en inducerad turbulens (Reynolds tal $> 4\ 000$). Genom att fylla hela det horisontella röret var förhoppningen att bibehålla en hög turbulens längs hela rördelen och att motverka en eventuell skiktning av de två fluiderna. I praktiken innebar det att det horisontella rörets effektiva area minskade.

3 MATERIAL OCH METOD

Följande avsnitt beskriver prototypen av doserrampen och dess komponenter i detalj samt hur de teoretiska beräkningarna av tryckfallet genom doserrampen genomfördes. Varierande experiment på doserrampen utfördes dels på land och dels i en testbassäng för att observera dess prestanda och kunna föreslå förbättringsförslag inför fullskaliga försök i kanalen. Samtliga experiment utfördes på Henriksdals reningsverk. Nedan följer en punktlista med en sammanfattning av samtliga utförda experiment samt det avsedda syftet med dessa.

- Plymhöjdmätningar för att få en uppskattning på luft- och vätskeblandningens hastighet längs den horisontella rördelen.
- Brytpunktsmätningar som visade hur långt luft- och vätskeblandningen färdades innan ett utflöde av endast vätska observerades.
- Vilken inverkan två olika sorters fyllkroppar hade på samtliga ovan nämnda experiment när de fylldes längs doserrampens horisontella rördel.
- Vilken inverkan en korrigerad hålbild med avtagande centrumavstånd (c/c-avstånd) hade på brytpunktens inträffande.
- Vilken inverkan ett applicerat mottryck på doserrampens luftningshål hade gällande brytpunktens inträffande.
- Vilka prestandaresultat som observerades när en mindre rördimension testades. Experiment utfördes med rördimensionen DN50 (innerdiameter 50 mm) samt DN25 (innerdiameter 25 mm).
- Flödesmätning av utgående vätskemängd genom luftningshålen som visade hur vätskan fördelades längs doserrampens horisontella del.
- Vilken inverkan som erhöles på mätresultaten när doserrampens luftningshål riktades uppåt respektive nedåt.

Experimenten som utfördes på doserrampens olika rördimensioner, DN50 respektive DN25, presenteras i tabell 2.

Tabell 2 En beskrivning av de experiment som utfördes på doserrampen med de två olika rördimensionerna DN50 respektive DN25.

Utförda experiment	Rördimension DN50	Rördimension DN25
Plymhöjdsättning	Ja	Delvis*
Brytpunktsättning	Ja	Ja
Tillsats av fyllkroppar	Ja	Ja
Korrigerad av hålbild	Ja	Ja (enbart)**
Applicerat mottryck i bassäng	Ja	Ja
Riktning luftningshål	Nej	Ja
Flödesmätning ur luftningshål	Nej	Ja

*Plymhöjdsättningar med rördimensionen DN25 utfördes endast utan tillsats av fyllkroppar. Vid tillsats av fyllkroppar i DN25 observerades kraftiga skakningar från röret vilka hade kunnat åsamka skador på doserrampen.

**Rördimensionen DN25 implementerades med en korrigerad hålbild från experimentens början vilket resulterade i att testerna endast utfördes med denna utformning på hålbilden.

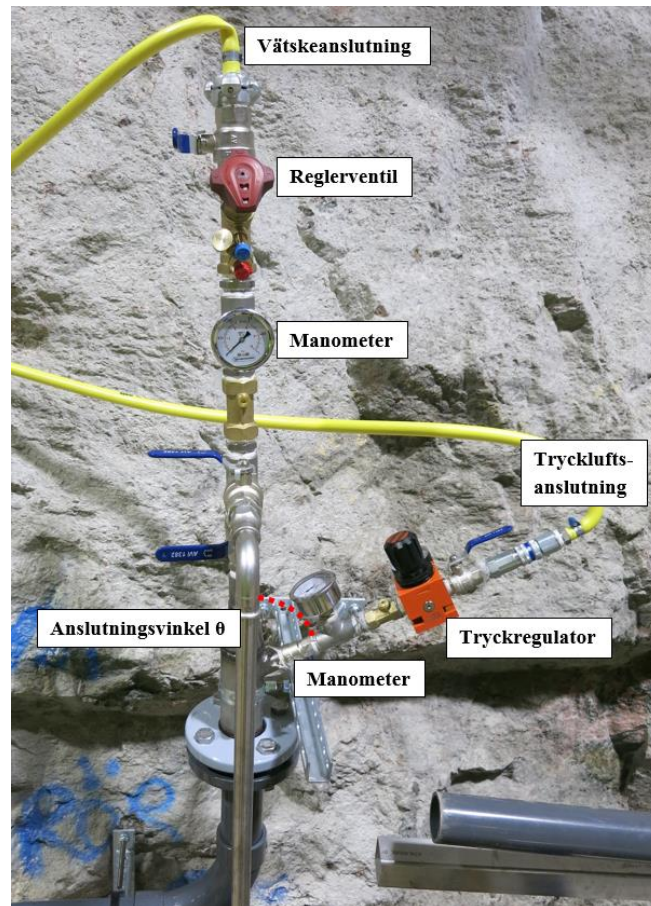
3.1 BESKRIVNING AV FULLSKALIG PROTOTYP

Stockholm Vatten konstruerade en fullskalig prototyp av doserrampen i mars 2018. Doserrampen placerades längs bergväggen mellan grovreningen och försedimenteringsbassängerna i väntan på att sänkas ned i den tilltänkta kanalen (se figur 10). Doserrampen var byggd i PVC och konstruerades med två olika rördimensioner, dels i dimensionen DN50 (innerdiameter 50 mm) och dels i DN25 (innerdiametern 25 mm).



Figur 10 Fullskalig prototyp av doserrampen med rördimensionen DN50.

Den vertikala rördelen anslöts till den horisontella genom en 90° rörböj och hade en sluten ändpunkt fastsvetsad vid rörets ände. Injektionsenheten var konstruerad så att vätskan anslöts vertikalt ovanifrån och tryckluften radiellt från sidan med anslutningsvinkeln θ (se figur 11). Vid båda anslutningspunkterna fanns tillkopplade manometrar som visade det ingående vätske- respektive lufttrycket samt två regulatorer som tillät justering av ingående vätskeflöde och lufttryck.



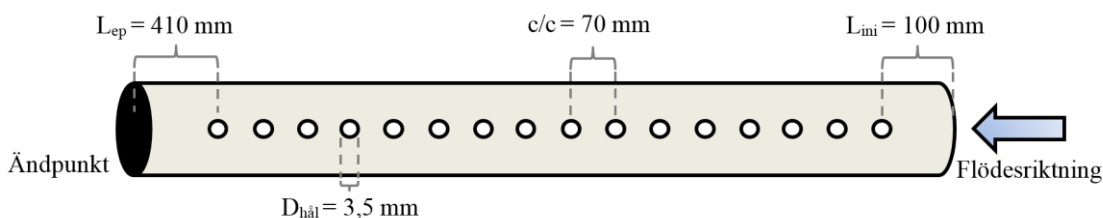
Figur 11 Inblandningssenheter till doserrampen med rördimensionen DN50. Vätskan tillfördes vertikalt ovanifrån och tryckluften radiellt från sidan. Övriga komponenter är utmärkta i figuren.

I tabell 3 ges en beskrivning av uppmätta rörlängder hos doserrampen i vertikal- respektive horisontalled samt tryckluftens anslutningsvinkel θ hos de två olika dimensionerna DN50 och DN25. Doserrampen med dimensionen DN25 var cirka 0,2 meter längre än DN50 och tryckluftens anslutningsvinkel var lägre vilket innebar en mer strömlinjeformad tryckluftsanslutning.

Tabell 3 Uppmätta rörlängder på doserrampen med de två olika dimensionerna DN50 respektive DN25. I tabellen visas även vid vilket höjdläge sammanblandningen av vätskan och tryckluften inträffade.

	DN50	DN25
Vertikal rörlängd	1,02 m	1,40 m
Höjdläge sammanblandning	0,30 m	0,50 m
Rörlängd 90° rörböj	0,27 m	0,08 m
Horisontell rörlängd	3,98 m	3,98 m
Anslutningsvinkel	65°	45°
Total rörlängd	5,27 m	5,46 m

Det horisontella röret var perforerat med 51 stycken luftningshål med håldiametern 3,5 mm arrangerade i en enkel rad. Centrumavståndet mellan luftningshålen var inledningsvis konstant och bestämda till 70 mm. Det initiala avståndet (L_{ini}) mellan rörböjen och det första luftningshålet var 100 mm och avståndet mellan det sista luftningshålet och ändpunkten (L_{ep}) var 410 mm (se figur 12).



Figur 12 Den perforerade rördelens initiala hålbild (hålbild 1) sett ovanifrån.

Doserrampens horisontella rördel fylldes med fyllkroppar i enlighet med utförandet på VEAS reningsverk i Norge. Två olika sorters fyllkroppar testades i experimenten. Den första var modell K5 och erhöles från Bromma reningsverk. Modell K5 var tunna och cirkulära med en diameter på 25 mm och höjden 4 mm (se figur 13). Fyllkroppens ytarea var $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (se Appendix D).



Figur 13 Fyllkropp av modell K5.

Den andra typen av fyllkropp som testades var av modellen Hiflow 25–7 och beställdes från *Hansa-Engineering*. Hiflow 25–7 var cylinderformad med diametern 25 mm och höjden 25 mm (se figur 14). Fyllkroppens ytarea var $214 \text{ m}^2/\text{m}^3$ vilket gjorde den mer genomsläpplig än modell K5 (se Appendix E).



Figur 14 Fyllkropp av modell Hiflow 25–7.

Doserrampen fylldes med fyllkroppar längs hela den horisontella rördelen inklusive halva rörböjen men inte något i vertikalled. Fyllkropparna tillsattes i röret utan någon bestämd positionering. Antalet fyllkroppar av modellen Hiflow som tillsattes varierade mellan 130–200 stycken beroende på vilken av de två rördimensionerna DN25 respektive DN50 som användes. Antalet fyllkroppar av modellen K5 som tillsattes i rördimensionen DN50 räknades inte men översteg 1000 stycken. Fyllnadsgraden illustreras i figur 15.



Figur 15 Illustration av fyllkropparnas fyllnadsgrad längs den perforerade rördelen som anges inom det röstreckade området.

3.2 MÄTNING AV TRYCKLUFTSFLÖDE

Eftersom tryckluftsflödet (l/s) ur anslutningspunkten på reningsverket var okänt så beräknades det genom att utföra flödesmätningar via ett 150 liters tryckkärl samt ett tidtagarur. Tryckluftsanslutningen inklusive regulatorn sammankopplades med kärlet (se figur 16) varvid mätningar utfördes vid samtliga ingående tryckinställningar $P_{min} = 2$

bar och $P_{max} = 6$ bar. Avläsningar utfördes på en tillkopplad manometer på tryckkärlet och tidpunkten noterades vid samtliga erhållna mottryck. Tryckluftsflödet bestämdes således genom att mäta tiden för att fylla kärlet till ett visst erhållet mottryck. Genom användning av Boyles lag kunde därefter luftflödet bestämmas dels vid de olika ingående tryckinställningarna samt dels upp till ett visst mottryck.



Figur 16 Mätning av tryckluftsflödet med hjälp av ett tryckkärl.

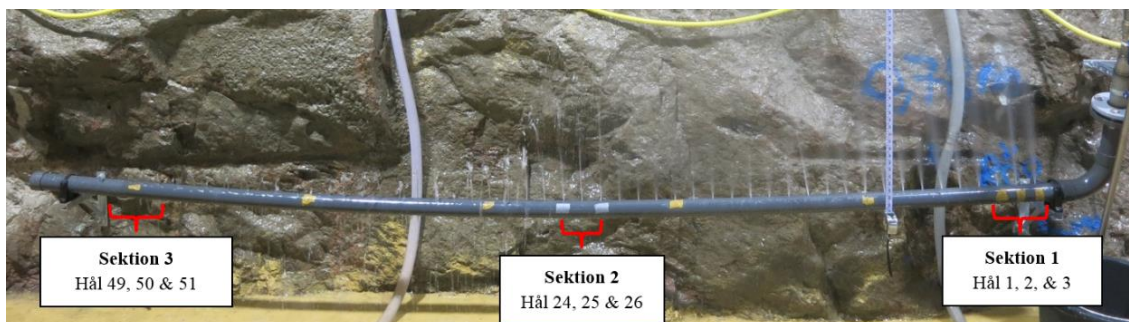
Erhållna data från mätningarna visade ett tryckluftsflöde på 5,3 l/s vid ingående lufttrycket 2 bar samt 14,7 bar vid ingående lufttrycket 6 bar.

3.3 BESKRIVNING AV UTFÖRDA EXPERIMENT

En serie experiment utfördes på prototypen av doserrampen för att utvärdera dess prestanda när faktorer som ingående lufttryck, hålbildens utformning, fyllkroppsmodell samt luftningshålens riktning ändrades. För att underlätta de teoretiska beräkningarna av det resulterande tryckfallet genom doserrampen utfördes även mätningar av plymhöjden ur luftningshålen varvid ekvationen för energibalans (ekvation 11) kunde appliceras för

att få en uppskattning av fluidernas (vätskan och tryckluften) gemensamma hastighet längs det perforerade röret.

Under experimenten användes brutet vatten från reningsverket som vätskekälla samt tryckluft från en anslutningspunkt som inblandningsmedium. Tryckluften var trycksatt till 6 bar från anslutningspunkten och det ingående lufttrycket i doserrampen reglerades mellan intervallet $P_{min} = 2$ bar samt $P_{max} = 6$ bar via tryckregulatorn. Mätningar av plymhöjder samt utgående vätskemängder ur luftningshålen utfördes på tre sektioner längs den perforerade rördelen varvid polynomanpassningar implementerades mellan mätpunkterna. Varje sektion bestod av tre intilliggande luftningshål. För att anpassningarna skulle överensstämma med de faktiska omständigheterna som observerades vid respektive mättillfälle jämfördes de med foton som togs vid de olika mätningarna. Sektion 1 bestod av de tre första luftningshålen, hål 1–3, sektion 2 av de tre mittersta luftningshålen, hål 24–26, samt sektion 3 av de tre luftningshålen närmast ändpunkten, hål 49–51 (se figur 17).

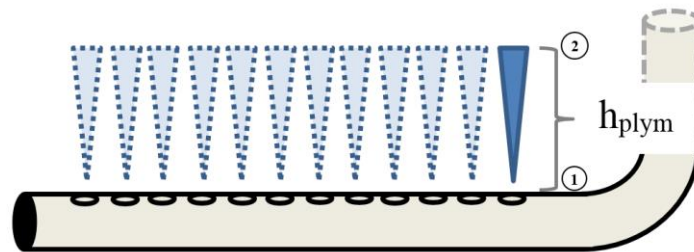


Figur 17 Illustration av luftningshålens tre sektioner vilka mätningar av plymhöjder och flödesfördelning utfördes vid.

Efter att hålbilden korrigerats (se avsnitt 3.3.3) och antalet luftningshål reducerats från 51 stycken till 26 så användes samma utförande vid indelning av de olika sektionerna. Sektion 1 bestod av de tre första luftningshålen, hål 1–3, sektion 2 av de tre mittersta luftningshålen, hål 9–11 samt sektion 3 av de tre luftningshålen närmast ändpunkten, hål 24–26.

3.3.1 Mätning av plymhöjd

Uppskattning av luft- och vätskeblandningens utgående hastighet ur luftningshålen utfördes genom mätning av vätskeplymens höjd (se figur 18). Vid experimenten justerades doserrampen så att luftningshålen riktades vertikalt uppåt. Vätskeflödet reglerades så att det överensstämde med kravet på kemikaliedoseringen vid högflödesrening ($Q_{vatten} = Q_{kem, hf} = 0,6 \text{ l/s}$). Det ingående lufttrycket varierades mellan intervallet 2–6 bar.



Figur 18 Illustration av plymhöjdsräkningar utförda på doserrampens olika sektioner.

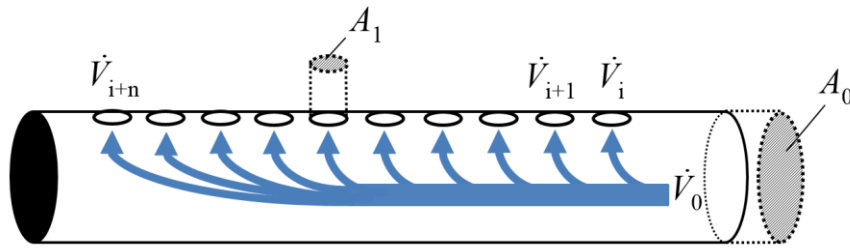
Genom att utföra plymhöjdsräkningar kunde ekvationen för energibalans tillämpas (se ekvation 11) för att uppskatta luft- och vätskeblandningens utgångshastighet. Ekvationen tillämpades när luft- och vätskeblandningen passerat genom luftningshålens mynning (punkt 1) tills dess att hastigheten är noll, det vill säga vid plymens topp (punkt 2). Luftmotståndet hade en viss inverkan på de uppmätta plymhöjderna eftersom periodvisa vinddrag från verkets ventilationssystem resulterade i pendlande rörelsemönster hos plymerna. Vid beräkning med ekvationen för energibalans försumrades dock luftmotståndet helt. Hastigheten v_1 genom luftningshålen kunde därmed erhållas genom antagandena att lufttrycket var konstant vid båda mätpunkter ($P_1 = P_2 = 1 \text{ atm}$), att inget arbete tillfördes eller gick förlorat ($h_{pump, u} = h_{turbin, e} = h_L = 0$) samt $z_1 = 0$ och $v_2 = 0$ vilket gav ekvation 12.

$$v_1 = \sqrt{2gz_2} \quad (12)$$

där z_2 är den uppmätta plymhöjden [m].

Genom att bestämma hastigheten ur luftningshålen uppskattades en hastighet i den horisontella rördelen genom att använda definitionen för volymetriskt flöde (se ekvation

4). Uppskattningen gjordes med antagandet att hela inkommande luft- och vätskeflödet till det horisontella röret flödar ut genom luftningshålen och att ansamlingen av vätska inte sker i doserrampen (se figur 19).



Figur 19 Hela volymflödet av luft- och vätskeblandningen längs den horisontella rördelen \dot{V}_0 med tvärsnittsarean A_0 antogs flöda ut genom luftningshålen med tvärsnittsarean A_1 .

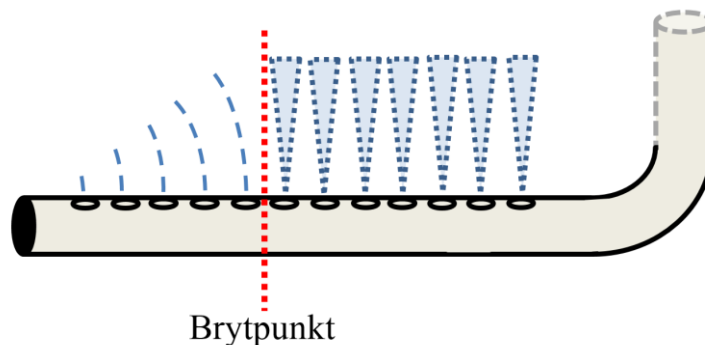
Antagandet $\dot{V}_0 = \sum \dot{V}_i$ resulterade i att flödes hastigheten v_0 genom den horisontella rördelen kunde beräknas enligt ekvation 13.

$$\dot{V}_0 = v_0 A_0 = \sum \dot{V}_i = v_1 A_1 n_{\text{hål}} \quad (13)$$

där \dot{V}_0 är volymflödet i det horisontella röret [m^3/s], v_0 hastigheten längs det horisontella röret [m/s], A_0 rörets tvärsnittsarean [m^2], v_1 hastigheten ur luftningshålen [m/s], A_1 tvärsnittsarean för ett luftningshål [m^2] samt $n_{\text{hål}}$ antal luftningshål.

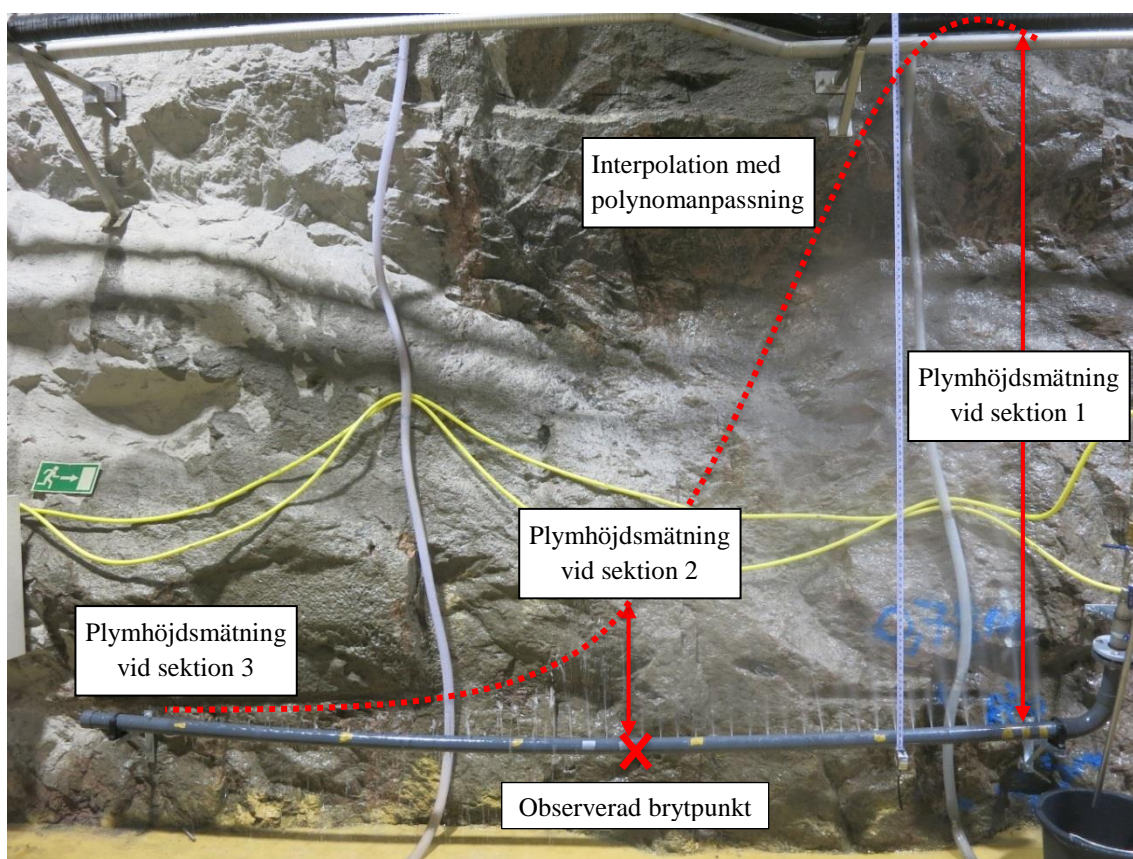
3.3.2 Brytpunktsmätning

Under testerna analyserades även sträckan som luft- och vätskeblandningen färdades innan övergången till ett utflöde av endast vätska. Punkten där detta inträffade benämns fortsättningsvis som *brytpunkten* (se figur 20).



Figur 20 Illustration av brytpunkten där utflödet av luft och vätska övergår till ett utflöde av endast vätska.

Under respektive experiment sammanställdes de uppmätta plymhöjderna tillsammans med den observerade brytpunkten under samtliga ingående lufttryck. Plymhöjdernas datapunkter interpolerades med en polynomanpassning som stämde överens med de observationer som togs vid respektive experiment. I figur 21 visas genomförandet från experimenten.

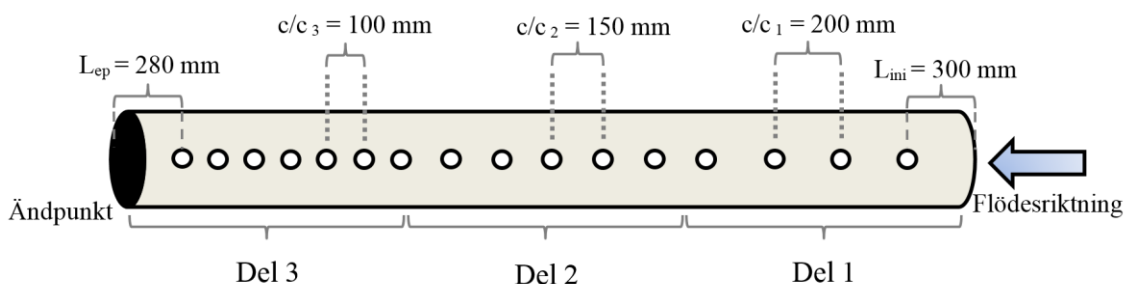


Figur 21 Genomförandet vid sammanställning av de uppmätta plymhöjderna samt de observerade brytpunkterna.

3.3.3 Inverkan av en korrigerad hålbild

Ytterligare en faktor som testades var huruvida c/c-avståndet mellan luftningshålen inverkade på brytpunktens inträffande under olika ingående lufttryck. Implementering av en korrigerad hålbild utfördes inledningsvis genom att täcka ett bestämt antal luftningshål vid olika delar av den perforerade rördelen. När ett resultat som förbättrade doserrampens prestanda uppnåddes implementerades den korrigerade hålbilden permanent inför konstruktionen av nästkommande doserramp med dimensionen DN25.

Den korrigerade hålbilden utformades i tre delar så att c/c-avståndet mellan luftningshålerna avtog närmare ändpunkten (se figur 22).



Figur 22 Den perforerade rördelens korrigerade hålbild (hålbild 2) med avtagande centrumavstånd sett ovanifrån.

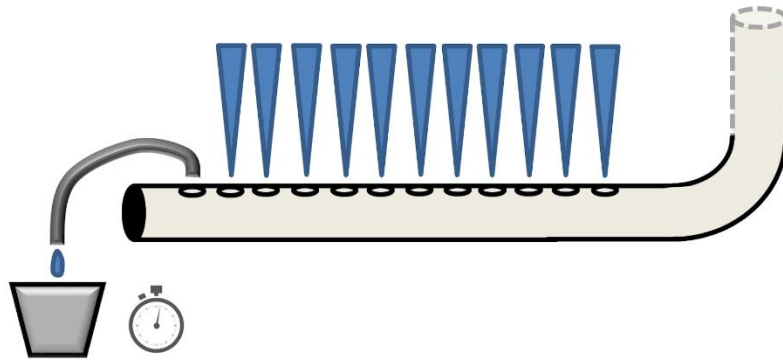
En sammanfattning av de två hålbilder som implementerades på doserrampen ses i tabell 4. Den korrigerade hålbilden hade hälften så många luftningshål som hålbild 1 med konstanta c/c-mått.

Tabell 4 En översikt av de två hålbilderna som implementerades längs den horisontella rördelen.

	Hålbild 1	Hålbild 2
Antal hål	51 st	26 st
Håldiameter	3,5 mm	3,5 mm
Längd till första hål	100 mm	300 mm
Centrumavstånd	Konstant (70 mm)	Avtagande (200 till 100 mm)

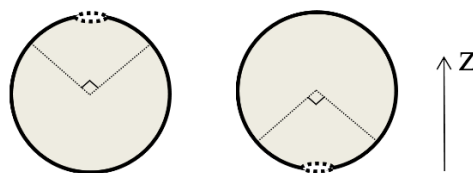
3.3.4 Mätning av flödesfördelning

För uppskattning av hur vätskan fördelade sig längs den perforerade rördelen så utfördes mätningar av det utgående vätskeflödet ur luftningshålerna i sektion 1–3 vid samtliga ingående tryckinställningar. Mätningarna utfördes genom att placera en gummislang ovanför luftningshålens mynning som skulle leda vätskan till ett mätglas under ett bestämt tidsintervall (se figur 23). Mätningarna upprepades ett flertal gånger för minskad mätosäkerhet.



Figur 23 Illustration av genomförda mätningar på utgående vätskeflöde ur luftningshålen.

Mätning av det utgående vätskeflödet jämfördes mellan de två fallen när luftningshålen dels riktades vertikalt mot vattenytan och dels vertikalt mot kanalens botten för att studera eventuella skillnader i flödesfördelning (se figur 24).



Figur 24 Tv: Luftningshålen med riktning vertikalt uppåt mot vattenytan. Th: Luftningshålen med riktning vertikalt nedåt mot kanalens botten. Z-axeln indikerar vattenytans riktning.

3.3.5 Inverkan av mottryck i testbassäng

Tester utfördes även i en testbassäng för att utvärdera doserrampens prestanda när ett mottryck applicerades på luftningshålen. Bassängens djup uppmättes till 0,4 m och fylldes med vatten från reningsverket (se figur 25).



Figur 25 Doserrampen med dimensionen DN50 placerad i testbassängen med djupet 0,4 m.

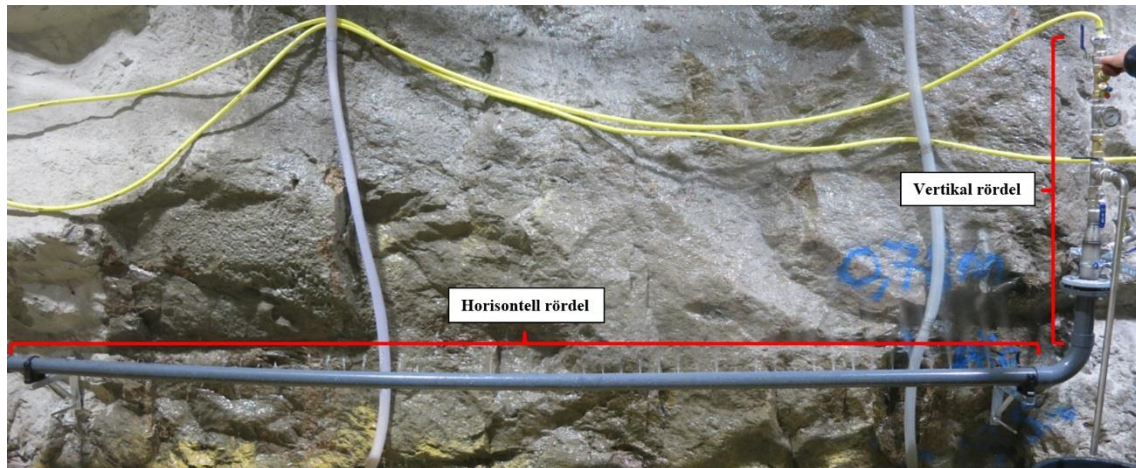
Efter att doserrampen placerats i bassängen och fyllts med vatten så mättes avståndet mellan luftningshålen och vattenytan för att fastställa det erhållna mottrycket mot luftningshålen vilket anges enheten *meter vattenpelare* (mVp). Med den mindre rördimensionen DN25 uppmättes sträckan till 35 cm (0,35 mVp) och med den större rördimensionen DN50 till 32 cm (0,32 mVp) (se tabell 5). Tabellen visar att mottrycket var högre på doserrampen med dimension DN25 jämfört med DN50 på grund av den varierande rördiametern. Som jämförelse inkluderas även mottrycket som förväntas erhållas vid placering av doserrampen i kanalen vid tillfällena av högflödesrening (se Appendix F).

Tabell 5 Resultande mottryck på doserrampens luftningshål för de två olika dimensionerna DN25 och DN50 i testbassängen samt det uppskattade mottrycket vid placering i den tilltänkta kanalen.

	Mottryck [mVp]	Mottryck [bar]
DN50 i testbassäng	0,32	0,031
DN25 i testbassäng	0,35	0,034
DN50/DN25 i kanal	1,00	0,098

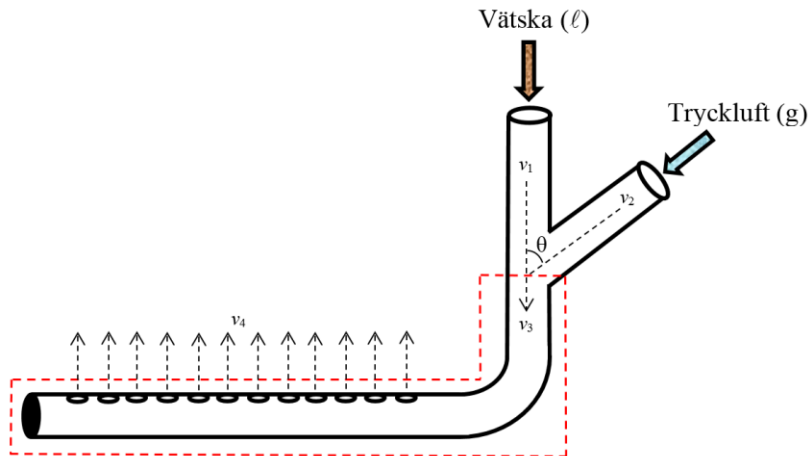
3.4 BERÄKNING AV TRYCKFALL GENOM DOSERRAMPEN

Beräkning av tryckförlusterna utfördes genom att dela upp doserrampen i två huvudsakliga sektioner, den vertikala samt den horisontella rördelen. Den vertikala rördelen inkluderade vätskans samt tryckluftens injektionspunkter ned genom rörböjen. Den horisontella rördelen innefattade området från rörböjen till ändpunkten (se figur 26).



Figur 26 Doserrampens två huvudsakliga sektioner vid beräkning av tryckfall, den vertikala samt den horisontella.

De teoretiska beräkningarna av höjdförlusten utgick från punkten där vätskan och tryckluften blandades samman tills dess att luft- och vätskeblandningen flödade ut genom luftningshålen längs den perforerade rördelen. I figur 27 visas de utvalda systemgränserna inom det röstreckade området för vilka de teoretiska beräkningarna utgick från.



Figur 27 Valda systemgränser vid beräkning av tryckfall ses inom det röstreckade området.

Från det att luft- och vätskeblandningen blandats samman behandlades respektive fluid som ett gemensamt, homogent medium. Den homogena fluidens egenskaper baserades på respektive mediums inkommande volym- och massflöde. Som vätskemedium användes vatten under experimenten samt tryckluft från en anslutningspunkt i verket som gasmedium. Beräkningar av tryckförlusterna genom doserrampen jämfördes sedan mellan de två vätskekällorna vatten och fällningskemikalien PIX-111. Plaströr kan i många anseenden antas vara en glatt yta ($\varepsilon = 0$) men i detta fall antogs ytråheten vara 1 mm ($\varepsilon = 0,001$) vilket motsvarade ett plaströr med beläggning på insidan (Munson m.fl., 2009).

Vattnets respektive fällningsmedlets egenskaper antogs vara konstanta och samtliga beräkningar utfördes vid en antagen temperatur på 15 °C. Tryckluftens egenskaper presenteras under intervallet $P_{min} = 2$ bar samt $P_{max} = 6$ bar vilka representerade de lägsta respektive högsta ingångstrycken under experimenten. Utifrån mätning av tryckluftsflödet (se avsnitt 3.2) samt kännedom om kravet på kemikalieflödet vid högflödesrening kunde respektive mediums ingångshastighet till doserrampen bestämmas. Detta gjordes utifrån definitionen för volymetriskt flöde (se ekvation 4). Allteftersom ingångshastigheten för respektive medium blev känt kunde mass- och volymflödet bestämmas med hjälp av ekvation 4 samt 5. Tabell 6 visar en sammanställning av respektive mediums viskositet och densitet, dess ingående flöde samt beräknade ingångshastighet och massflöde.

Tabell 6 En översikt av de olika fluidernas egenskaper vid temperaturen 15 °C samt beräknade värden för ingående flöde, hastighet samt massflöde. Tryckluftens egenskaper presenteras vid lufttrycket 2 respektive 6 bar.

	Tryckluft (vid 2 bar)	Tryckluft (vid 6 bar)	Vatten	PIX-111
Densitet [kg/m ³]	3,6	8,5	999	1420
Viskositet [mPa s]	0,02	0,02	1,1	10,0
Ingående flöde [l/s]	5,3	14,7	0,6	0,6
Massflöde [kg/s]	0,02	0,09	0,60	0,85
Ingående hastighet [m/s]	30,0	83,2	1,2	1,2

De gemensamma mass- respektive volymflödena beräknades genom att summera de båda mediernas ingående mass- och volymflöden genom $\dot{V}_{tot} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2$ samt $\dot{m}_{tot} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$. Vätskan och tryckluftens gemensamma densitet och viskositet beräknades genom att utgå från dess ingående mass- och volymflöde (se ekvation 6 respektive 7). En gemensam hastighet beräknades vid sammanblandningspunkten (se ekvation 4) och var konstant mellan de olika vätskorna eftersom dess ingående volymflöde var konstant.

Hastigheten hos respektive rördimension, DN50 och DN25, varierade dock på grund av rörens olika tvärsnittsareor. Reynolds tal och friktionsfaktorn f beräknades därefter för de två olika rördimensionerna DN25 samt DN50. En sammanställning av tryckluftens och de olika vätskornas gemensamma densitet, viskositet, mass- och volymflöde samt dess gemensamma hastighet i de båda rördimensionerna DN25 och DN50 presenteras i tabell 7. Enligt värdena i tabellen var densiteten och viskositeten som störst vid användning av PIX-111 som vätskekälla samt att hastigheten var högre i den mindre rördimension DN25. Den högre hastigheten som erhöles vid användning av den mindre rördimensionen DN25 resulterade således även i ett högre Reynolds tal.

Tabell 7 Sammanfattning av tryckluftens och vätskornas gemensamma egenskaper efter sammanblandningen i det vertikala röret. Den gemensamma hastigheten, Reynolds tal samt friktionsfaktorn presenteras för de två olika rördimensionerna DN25 respektive DN50.

	Tryckluft och vatten (vid P = 2 bar)	Tryckluft och vatten (vid P = 6 bar)	Tryckluft och PIX-111 (vid P = 2 bar)	Tryckluft och PIX-111 (vid P = 6 bar)
Densitet [kg/m ³]	105	63	148	86
Viskositet [mPa s]	1,1	1,0	9,8	9,1
Volymflöde [l/s]	5,9	11,0	5,9	11,0
Massflöde [kg/s]	0,62	0,69	0,87	0,94
Hastighet DN50 [m/s]	3,0	5,6	3,0	5,6
Reynolds tal DN50	14 000	18 000	2 300	2 600
Friktionsfaktor DN50	0,051	0,051	0,063	0,061
Hastighet DN25 [m/s]	12,0	22,4	12,0	22,4
Reynolds tal DN25	29 000	35 000	4 500	5 300
Friktionsfaktor DN25	0,066	0,066	0,071	0,070

Längs doserrampens horisontella rördel beräknades den gemensamma hastigheten genom ekvation 13 samt utifrån mätningar av plymhöjden (se avsnitt 3.3.1). Beräkning av Reynolds tal och friktionsfaktorn f längs det horisontella röret utfördes med samma tillvägagångssätt som hos det vertikala röret. I tabell 8 visas en sammanställning av de beräknade värdena för hastigheten, Reynolds tal samt friktionsfaktorn längs det horisontella röret. Tabellen visar en fortsatt högre hastighet i den mindre rördimensionen men ett lägre Reynolds tal vid det högre lufttrycket.

Tabell 8 Sammanställning av tryckluftens och vätskornas gemensamma hastighet längs den horisontella rördelen. Reynolds tal samt friktionsfaktorn presenteras för de två olika rördimensionerna DN25 respektive DN50.

	Tryckluft och vatten (vid P = 2 bar)	Tryckluft och vatten (vid P = 6 bar)	Tryckluft och PIX-111 (vid P = 2 bar)	Tryckluft och PIX-111 (vid P = 6 bar)
Hastighet DN50 [m/s]	1,4	1,7	1,4	1,7
Reynolds tal DN50	4 600	3 700	700	600
Friktionsfaktor DN50	0,062	0,064	0,089	0,098
Hastighet DN25 [m/s]	3,8	4,2	3,8	4,2
Reynolds tal DN25	9 100	6 600	1 500	1 000
Friktionsfaktor DN25	0,068	0,069	0,081	0,088

De engångsförluster som inkluderades vid beräkningarna utgjordes av rörböjen, fyllkropparna samt luftningshålen. Förlustkoefficienterna för dessa bestämdes utifrån tillgänglig litteratur vilka Munson m.fl. (2009) återgav för samtliga engångsförluster utom för fyllkropparna. Fyllkropparna betraktades istället som en plötslig kontraktion och antogs reducera den effektiva arean i rörledningen med 50 %. Tabell 9 visar samtliga engångsmotstånd som inkluderades samt deras respektive förlustkoefficient K_L .

Tabell 9 Sammanfattning av de engångsförluster som inkluderades vid beräkningarna samt deras respektive förlustkoefficient.

Engångsmotstånd	Förlustkoefficient, K_L
Rörböj 90° (DN50)	0,35
Rörböj 90° (DN25)	0,37
Fyllkroppar	0,25
Luftningshål	1,00

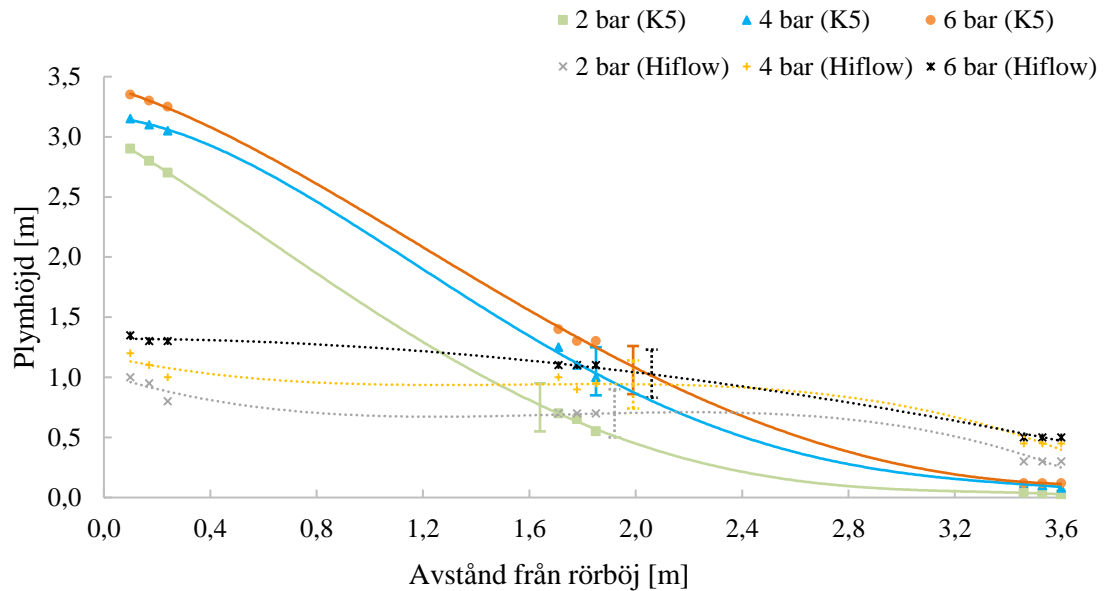
4 RESULTAT

I följande avsnitt presenteras resultaten från samtliga utförda experiment på doserrampen samt det beräknade tryckfall som doserrampens gällande design gav upphov till. Beräkning av tryckfallet genomfördes med två olika vätskekällor, vatten samt fällningskemikalien PIX-111.

4.1 EXPERIMENT MED RÖRDIMENSION DN50

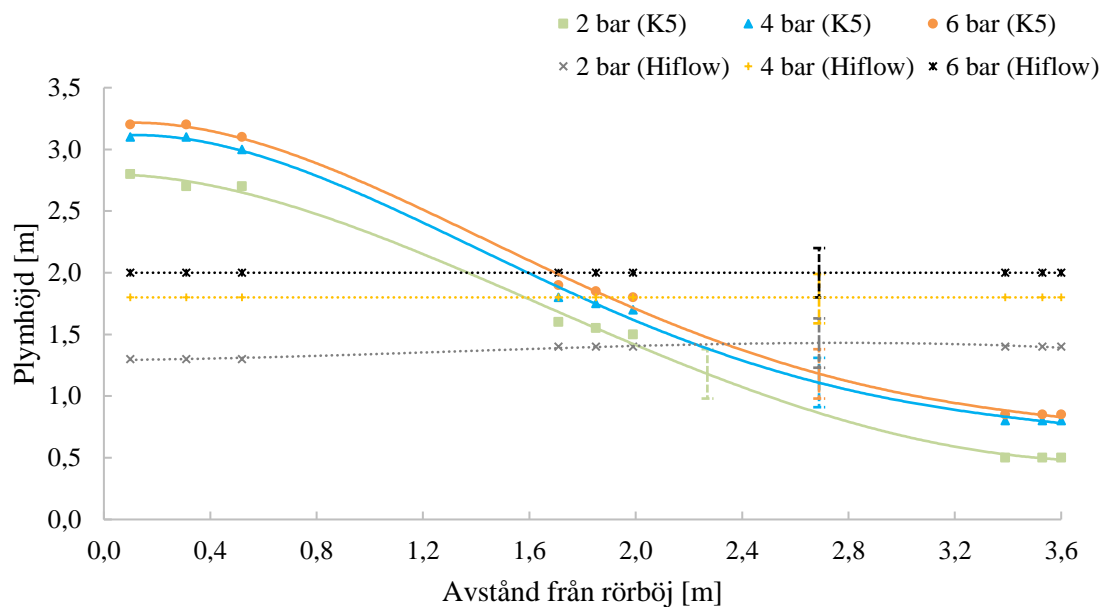
De första testerna utfördes på doserrampen med rördimensionen DN50 (inre diameter 50 mm) samt hålbild 1 (51 stycken luftningshål med konstant c/c-avstånd). Det ingående vätskeflödet till doserrampen justerades till kravet på kemikalieflödet vid högflödesrening, $Q = 0,6$ l/s. Det ingående lufttrycket varierades mellan intervallet $P_{min} = 2$ bar samt $P_{max} = 6$ bar. Under det första experimentet testades doserrampen utan fyllkroppar i det horisontella röret varvid inget utflöde av varken luft eller vätska observerades vid stora delar av doserrampens luftningshål. Endast ett utflöde av vätska urskildes ur luftningshålen närmast ändpunkten.

Doserrampen fylldes med de två olika fyllkropparna, modell K5 respektive Hiflow, och testades under samtliga ingående lufttryck. Uppmätta plymhöjder och observationer av brytpunktens inträffande sammanställdes för de ingående lufttrycken 2, 4 respektive 6 bar (se figur 28). Experimentet visade en exponentiellt avtagande fördelning av den utgående hastigheten ur luftningshålen vid användning av fyllkroppen K5 och brytpunkten observerades omkring halva rörlängden. Vid användning av fyllkroppen Hiflow sågs en linjärt avtagande fördelning av den utgående hastigheten och brytpunkten observerades vid halva rörlängden.



Figur 28 Sammanställning av uppmätta plymhöjder och brytpunkter (vertikalmarkering) vid lufttrycket 2, 4 respektive 6 bar med rördimension DN50 och hålbild 1. De heldragna linjerna representerar experimenten med fyllkroppen K5 och de streckade med fyllkroppen Hiflow.

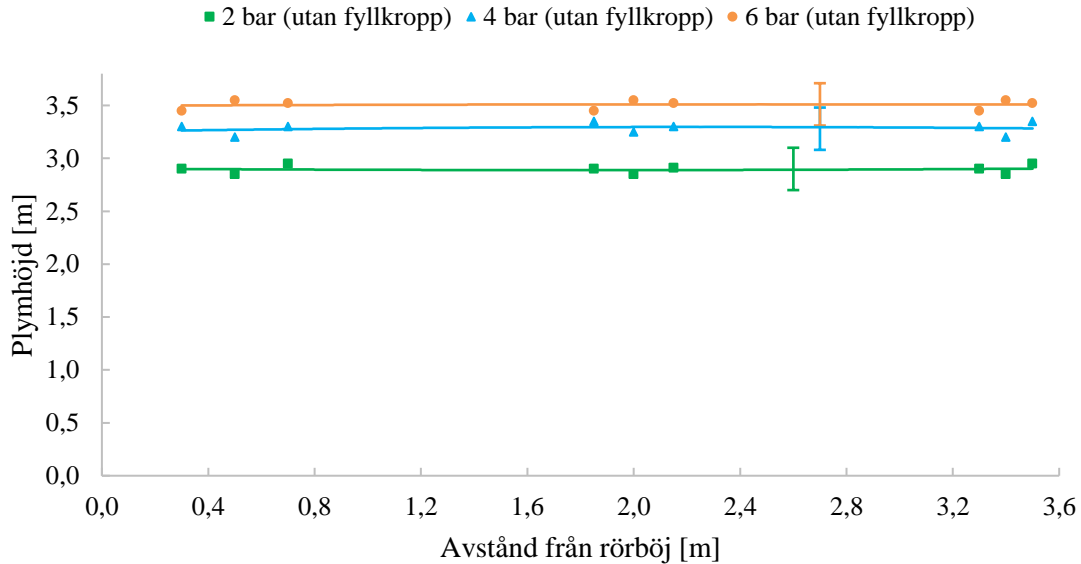
Under nästkommande test korrigerades hålbilden (hålbild 2) genom täckning så att c/c-avståndet avtog närmare ändpunkten (se avsnitt 3.3.3). Experiment utfördes vid samtliga ingående lufttryck med fyllkropparna K5 respektive Hiflow. Sammanställning av de uppmätta plymhöjderna samt den observerade brytpunkten ses i figur 29. Experimentet visade en fortsatt exponentiell avtagande fördelning av plymhöjderna vid användning av fyllkroppen K5. Brytpunktens inträffande observerades längre ut än vid användning av hålbild 1, omkring 2,3–2,7 m från rörböjen. Vid användning av fyllkroppen Hiflow urskildes en jämn fördelning av plymhöjderna och brytpunkten inträffande observerades omkring 2,7 m vid samtliga ingående lufttryck.



Figur 29 Sammanställning av uppmätta plymhöjder och brytpunkter (vertikalmarkering) vid lufttrycket 2, 4 respektive 6 bar med rördimension DN50 och korrigerad hålbild (hålbild 2). De heldragna linjerna representerar experimenten med fyllkroppen K5 och de streckade med fyllkroppen Hiflow.

4.2 EXPERIMENT MED RÖRDIMENSION DN25

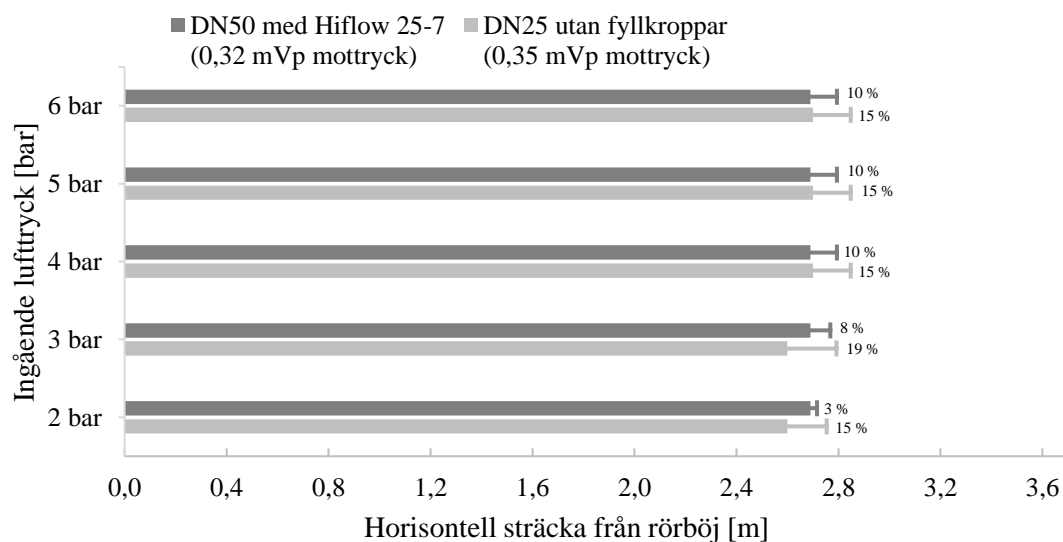
Experiment med rördimensionen DN25 utfördes endast med en korrigerad hålbild (hålbild 2) med respektive utan tillsats av fyllkroppen Hiflow. De första experimenten utan tillsats av fyllkroppar visade en jämn fördelning plymhöjderna vid samtliga ingående lufttryck. Även brytpunktens inträffande observerades vid samma punkt under samtliga ingående lufttryck, omkring 2,7 m från rörböjen (se figur 30). Experiment med rördimension DN25 och tillsats av fyllkroppen Hiflow visade en exponentiell avtagande fördelning av plymhöjderna likt testerna med rördimension DN50 och användning av fyllkroppen K5. Under testerna observerades kraftiga skakningar från doserrampens horisontella rördel varvid inga mätningar av plymhöjden utfördes.



Figur 30 Sammanställning av uppmätta plymhöjder och brytpunkter (vertikalmarkering) med rördimension DN25 och hålbild 2 vid lufttrycket 2, 4 respektive 6 bar.

4.3 EXPERIMENT I TESTBASSÄNG

Följande avsnitt presenterar resultaten från experimenten utförda med doserrampen placerad i testbassängen med djupet 0,4 m. Testerna i bassängen utfördes dels med rördimensionerna DN50 med fyllkroppen Hiflow samt dels med DN25 utan fyllkroppar. Båda rördimensioner testades med korrigerade centrumavstånd mellan luftningshålen (hålbild 2) samt vid samtliga ingående lufttryck. De erhållna brytpunkterna från experimenten i testbassängen jämfördes därefter med brytpunktsmätningarna utförda på land (se figur 31). Mätningarna i testbassängen visade entydiga resultat där brytpunkten observerades närmare rördelens ändpunkt vid samtliga ingående lufttryck. I figur 31 ses de uppmätta brytpunkterna på land i form av staplar samt vilken förbättring som erhöles vid mätningarna i testbassängen i form av förlängda avsmalnade staplar. Mätningarna visade en förbättring gällande den observerade brytpunkten från 3–19 %.



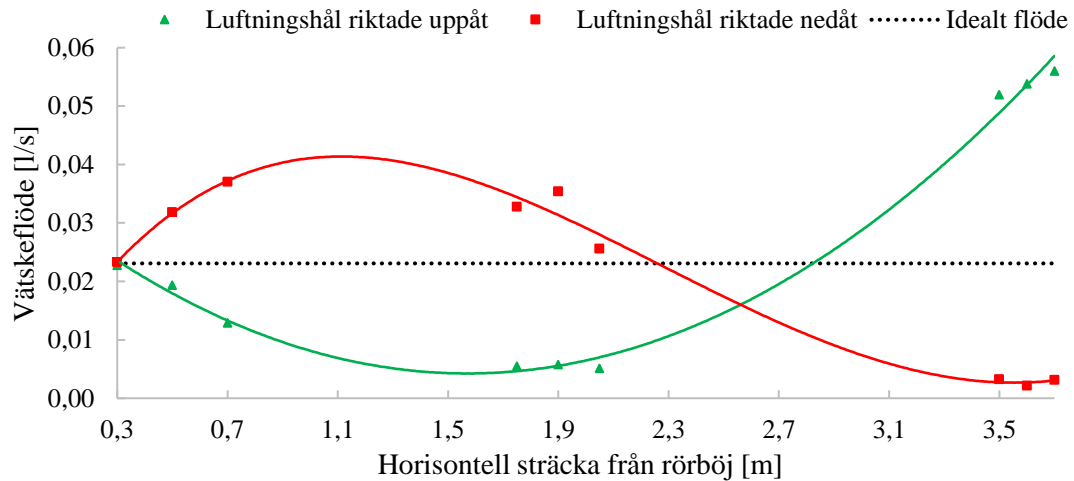
Figur 31 Sammanställning av de uppmätta brytpunkterna på land (staplar) respektive i bassängen (avsmalnade förlängda staplar). Skillnaden presenteras i form av procentenheter och anges i figuren.

4.4 MÄTNING AV UTGÅENDE FLÖDESMÄNGDER

Mätningar av utgående vätskemängd ur doserrampens luftningshål genomfördes vid sektionerna 1–3 och utfördes endast på doserrampen med rördimension DN25.

Mätningarna utfördes med luftningshålen dels riktade vertikalt uppåt mot vattenytan samt dels vertikalt nedåt mot kanalens botten och genomfördes vid de ingående lufttrycken 2, 4 respektive 6 bar. Resultatet presenteras i figur 32 och jämförs med ett referensvärde som anger det ideala flödet ur varje luftningshål. Referensvärdet erhöles genom att dividera det ingående vätskeflödet (0,6 l/s) med antalet luftningshål vid försöket.

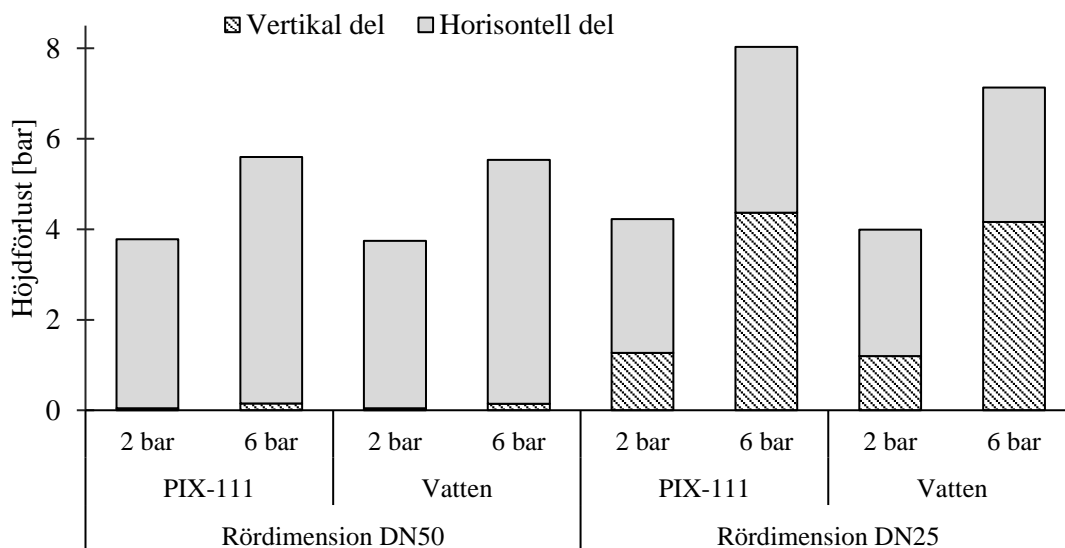
Resultat från mätningarna med luftningshålen riktade vertikalt uppåt visade ett avtagande vätskeflöde ur första halvan av doserrampens luftningshål som nådde ett minimum vid sektion 2 (cirka 2 meter från rörböjen). Vätskeflödet steg därefter närmare rörets ändpunkt och vid sektion 3 uppmättes flödesmängder som var cirka 230 % större än det ideala flödet. Flödesmätningarna med luftningshålen riktade vertikalt nedåt visade ett tilltagande vätskeflöde som nådde ett maximum mellan sektion 1 och 2 (cirka 1 m från rörböjen). Vätskeflödet avtog vid sektion 2 och nådde ett minimum vid sektion 3 närmast ändpunkten med ett vätskeflöde som motsvarade cirka 10 % av det ideala flödet.



Figur 32 Sammanställning av flödesmätningar ur luftningshålen vid sektion 1–3 med ingående lufttryck 2, 4 respektive 6 bar. Den streckade linjen representerar det ideala utgående flödet.

4.5 TEORETISK BERÄKNING AV TRYCKFALL

En sammanställning av de beräknade höjdförlusterna genom doserrampens vertikala respektive horisontella rördel (se figur 33) visade att den största tryckförlusten erhöles för rördimensionen DN25 med PIX-111 som vätskekälla (4,2 bar vid ingående lufttryck 2 bar samt 8,0 bar vid ingående lufttryck 6 bar). Minst tryckförlust erhöles vid den större rördimensionen DN50 med vatten som vätskekälla (3,8 bar vid ingående lufttryck 2 bar samt 5,5 bar vid ingående lufttryck 6 bar). Tryckförlusten var generellt högre längs doserrampens horisontella del jämfört med det vertikala förutom vid den mindre rördimensionen DN25 med PIX-111 som vätska.



Figur 33 Sammanställning av de beräknade höjdförlusterna genom doserrampen vid ingående lufttrycken 2 respektive 6 bar. Figuren presenterar resultatet mellan de två vätskorna vatten och PIX-111 samt mellan de två rördimensionerna.

5 DISKUSSION

5.1 UTFÖRDA EXPERIMENT PÅ DOSERRAMPEN

Syftet med de experiment som utfördes på doserrampen var att utvärdera dess prestanda på ett så genomgripande sätt som möjligt. Fördelen med att implementera en tryckluftsinjicerande doseranordning som lösningsmetod var att uppfylla två viktiga mekanismer i ett enda steg, nämligen att samtidigt som anordningen doserar fällningsmedel längs en hel kanalbredd (i detta fall 4 m) även skapa turbulens i den mottagande vattenmassan och på så sätt blanda in fällningsmedlet i avloppsvattnet direkt vid doseringstillfället. Från de inledande experimenten med doserrampen blev det tydligt att en rad justeringar var tvungna att implementeras för att doserrampen skulle åstadkomma dessa mekanismer. Eftersom tryckluften endast flödade ur den första hälften av luftningshålen med doserrampens initiala design så infördes justeringar i syfte att motverka tryckluftens hastiga utflöde ur doserrampens perforeringar. När luft- och vätskeblandningen passerat genom rörböjen, in i den horisontella rördelen har energiförluster uppkommit vilka reducerar blandningens hastighet till den grad att de två fluiderna skiktades. Den lättare av de två fluiderna, i detta fall tryckluften, lade sig på rörets ovansida och vätskan på undersidan. Detta medförde att majoriteten av tryckluften försvinner ut från de perforeringar som ligger närmast rörböjen och att

vätskan sedermera trycks bort mot rörets ändpunkt. Detta framgår i figur 32 (grön linje med luftningshålen riktade vertikalt uppåt mot vattenytan). Resultaten från experimenten i testbassängen visade att vid ett applicerat mottryck på luftningshålen förbättrades prestandan med avseende på brytpunktens inträffande. Med ett mottryck applicerat på luftningshålen förhindrades tryckluften att med samma lätthet flöda ur rörets perforeringar i jämförelse med utan ett mottryck. När doserrampen placerats i den tilltänkta kanalen med vattendjupet 1 m (vid högflödesrening) och det resulterade mottrycket således blir 1 mVp på luftningshålen föranleder detta till att brytpunkten förmodligen inträffar ännu längre ut.

Implementeringen av en korrigerad hålbild där hälften av luftningshålen togs bort gav positiv effekt. Den större rördimensionen DN50 fylldes med fyllkroppar i syfte att skapa en inducerad turbulens inuti röret varvid en dimridå av vätskan och luften skulle bildas vilket skulle resultera i en jämnare utgående flödesfördelning. Kombinationen av båda korrigeringar medförde en väsentlig förbättring jämfört med basfallet med konstant c/c-mått utan tillsats av fyllkroppar. Trots utförda justeringar med båda rördimensionerna DN50 och DN25 nådde luft- och vätskeblandningen inte ända ut till de sista luftningshålen även vid det högsta ingående lufttrycket (6 bar) vilket framgår i figur 28, figur 29 samt figur 30. Det konstaterades att det krävdes större luftmängder för att förskjuta brytpunkten längre ut mot ändpunkten med luftningshålen riktade vertikalt uppåt.

Med den mindre rördimensionen DN25 bibehölls den höga turbulensen längs det horisontella röret utan tillsats av fyllkroppar. Tvärtom resulterade tillsatsen av fyllkroppar i en försämrad prestanda och kraftiga krängningar i röret observerades. Efter att samtliga experiment genomförts med de två rördimensionerna DN25 och DN50 konstaterades det att den bästa prestandan observerades vid två fall med näst intill identiska resultat. Med den större rördimensionen DN50 erhöles den bästa prestandan vid en korrigerad hålbild samt vid tillsatsen av fyllkroppen Hiflow. Med luftningshålen riktade vertikalt uppåt observerades brytpunkten cirka 2,7 m från rörböjen. Med rördimensionen DN25 erhöles bäst prestanda med korrigerad hålbild samt utan tillsats av fyllkroppar. Brytpunkten observerades vid samma luftningshål, cirka 2,7 m från rörböjen när luftningshålen riktades vertikalt uppåt.

5.2 FYLLKROPPARNAS FUNKTION

Användandet av fyllkroppar med lägre ytarea (Hiflow) i doserrampens horisontella rördel påvisade en positiv inverkan på spridningseffekten när de placerades i rördimension DN50 jämfört med fyllkroppar med stor ytarea (K5). Fyllkropparna fylldes längs rörets horisontella del utan en fixerad placering vilket möjliggjorde att de kunde röra sig inuti röret vid tillförsel av luft och vätska. Under vissa experiment med fyllkroppen Hiflow observerades ett pulserande utflöde av luft- och vätskeblandningen ur vissa luftningshål vilket kan härledas till detta. Erfarenheter från experimenten visade att fyllkroppar med stor ytarea, som modell K5 hade, gav upphov till stora tryckförluster vilket resulterade i exponentiellt avtagande utgångshastigheter vid samtliga ingående lufttryck.

Under de teoretiska beräkningarna av tryckförlusterna genom doserrampen var det en utmaning att uppskatta vilka tryckförluster de egentligen gav upphov till. Fyllkropparna utgör sannolikt en stor del av tryckförlusterna som beräknades. Som rekommendation till framtida experiment med liknande utförande bör valet av fyllkroppar noggrant tas i beaktande. Till detta projekt hade fyllkroppar med sfärisk utformning och mindre ytarea varit att föredra för att minimera tryckförlusten längs röret.

5.3 FLÖESFÖRDELNING

Under mätningarna av vätskeflödet ur doserrampens luftningshål konstaterades att ingen av de utförda experimentuppställningarna resulterade i ett helt jämnt utflöde av vätska (se figur 32). När luftningshålen riktades vertikalt uppåt erhöles ett vätskeflöde som initialt avtog och nådde en minpunkt omkring halva rörlängden. Därefter uppmättes ett ökat vätskeflöde ur doserrampens sista luftningshål som var mer än två gånger större än det ideala flödet. Majoriteten av vätskan doserades således genom luftningshålen närmast ändpunkten vilket inte anses som positivt. Riktades luftningshålen istället vertikalt nedåt erhöles en motsatt effekt. Det uppmätta vätskeflödet var som störst från doserrampens första luftningshål vilket sedan avtog närmare ändpunkten. Med luftningshålen riktade nedåt erhöles även en förbättring gällande brytpunktens inträffande. De skiktade fluiderna blir i detta fall till en fördel eftersom tryckluften inte förmår flöda ut ur doserrampen med samma lätthet. Ytterligare en fördel med att rikta

luftningshålen nedåt är att doserrampen inte fylls med avloppsvatten medan den står i vila.

En osäkerhet som inte undersökts i detta projekt är huruvida fällningsmedlet interagerar med luftbubblorna vid doseringstillfället. I och med fällningsmedlets höga densitet gentemot vattnets finns risken att fällningsmedlet sjunker vid doseringstillfället och endast kanalens nedre vattenmassor kommer i kontakt med kemikalien. Ett högt ingående lufttryck som genererar hög turbulens i den mottagande vattenmassan är därför att föredra framför ett lägre.

5.4 PROBLEMATIK OCH ÅTGÄRDER

De mest uppenbara problem som kan uppstå med en doseringsteknik med perforerade rör vilket även belystes av VEAS reningsverk i Norge är igensättning av luftningshål samt ansamling av trasor och dylikt på rördelarna. I detta projekt användes likt lösningen på VEAS en håldiameter på 3,5 mm hos perforeringarna. En liten hålstorlek valdes i syfte att förhindra stora förluster av tryckluft längs den horisontella rördelens perforeringar. Doserrampens rörlängd var 4 m och var i jämförelse med VEAS horisontella rörlängd (0,85 m) väsentligt längre. Ingen direkt lösning för igensättningsproblematik har utretts utan bästa rekommendation vore en visuell inspektion och underhåll på årsbasis för att säkerhetsställa doserrampens funktionalitet. Underhåll av doserrampen bör utgöras av spolning med vatten för att avlägsna eventuella avlagringar eller beläggningar som fastnat längs röret eller kring luftningshålen. När doserrampen sänktes ned i kanalens botten kopplades den fast i en fästningsanordning med en skyddande metallskena riktad mot avloppsvattnets flödesriktning som gav ett visst skydd mot lösa föremål i avloppsvattnet. Luftningshålen riktades snett nedåt längs med vattenflödet för att förhindra att den fylls med avloppsvatten.

5.5 TRYCKFÖRLUSTER OCH KÄNSLIGHETSANALYS

Den beräknade tryckförlusten genom doserrampen bör endast ses som en fingervisning över vilka tryckförluster ett liknande system kan ge upphov till. Eftersom Darcy-Weisbachs ekvation användes som huvudsaklig beräkningsmetod krävdes en del antaganden där empiriska mätningar inte gick att utföra. Beräkningens största osäkerhet

ligger i vilket tryckluftsflöde som erhöles ur anslutningspunkten från reningsverket vilket stod till grund för hela modellen. Mätningen av tryckluftsflödet som genomfördes via ett tryckkärl gav en viss uppskattning om vilket intervall det handlade om men exakta värden kunde inte erhållas. Fluidens hastighet är modellens känsligaste parameter och en ökning av tryckluftens hastighet med 10 % resulterade i en ökning av den resulterande tryckförlusten med 60 %. Vid beräkningarna antogs fällningsmedlets hastighet vara densamma som för vatten vilket troligtvis inte stämmer i praktiken. Fällningsmedlet var mer än tio gånger mer visköst (trögflytande) än vatten vilket säkerligen resulterar i en lägre hastighet genom rören. Flödesmätningar av en mer viskös vätska hade därför varit att föredra.

De beräknade tryckförlusterna (se figur 33) visade värden som i flera fall översteg det ingående lufttrycket ($h_L > P_{in}$). Om detta vore fallet borde inget utflöde av luft- och vätskeblandningen observerats ur de sista luftningshålen vilket det gjordes under samtliga mätningar. Beräkningar av tryckförlusterna utfördes för hela den horisontella rördelen (se figur 27) och ingen hänsyn togs till någon eventuell brytpunkt (där utflödet av luft och vätska övergick till ett utflöde av endast vätska). Baserat på de antaganden som togs rörande fluidens gemensamma egenskaper så gäller beräkningarna endast fram till den punkt där brytpunkten uppstår, varefter endast vätska flödar genom doserrampen. När luftningshålen riktades nedåt uppstod ingen brytpunkt samtidigt som ett utflöde av både luft och vätska observerades ur samtliga luftningshål. De antaganden som togs vid modelleringen av tryckförlusterna kunde således konstateras vara alltför förenklande vilket resulterade i förhöjda tryckförluster. Ytterligare mätutrustning för tryckluftens ingående flöde samt fler tryckgivare som visar tryckfördelningen längs rörssystemet hade ökat precisionen i beräkningarna.

5.6 ALTERNATIVA LÖSNINGSFÖRSLAG

En ojämn fördelning av vätskeflödet ur doserrampens luftningshål innebär att ena sidan av kanalen doseras med en större kemikaliedos än vad den andra gör (se figur 32). En alternativ tillämpning av doserrampen skulle kunna vara att endast dosera fällningsmedlet utan hjälp från tryckluften. För att erhålla en tillräcklig turbulens (inblandningseffekt) i avloppsvattnet skulle en luftningsbassäng med lågtryckssystem

kunna implementeras intill doserrampen vilket skulle reducera den krävda mängden tryckluft och därmed reducera energikonsumtionen.

5.7 FÖRSLAG PÅ FORTSATT STUDIER

Intressanta experiment att utföra på doserrampen skulle kunna vara att montera flertalet tryckgivare längs den horisontella rördelen för att med större säkerhet kontrollera tryckfallet genom anordningen. En bättre uppskattning av tryckfallet skulle därmed kunna erhållas vilket i sin tur skulle möjliggöra en bättre kalibrering av kravet på tryckluftsflödet (l/s). Experiment med andra vätskekällor än vatten skulle kunna utföras i mindre skala för att studera spridningen av en mer viskös vätska tillsammans med tryckluft i ett perforerat rör. Experiment med färgämne skulle även vara av intresse för att studera spridningseffekten i den mottagande vattenmassan. Experiment med transparenta rör skulle möjliggöra studier av storleken på luftbubblorna som erhålls vid olika ingående lufttryck. Ytterligare en faktor som skulle kunna testas vore att på liknande sätt som lösningen på VEAS i Norge injicera fällningsmedlet med ejektor. Detta skulle eventuellt finfördela fällningskemikalien ytterligare vilket skulle kunna resultera i att luft- och vätskeblandningen transporteras längre ut längs den horisontella rördelen. På så sätt kan därmed en jämnare flödesfördelning uppstå från luftningshålen. Tester som kan utföras för ytterligare kunskap om doserrampens prestanda skulle kunna involvera mätningar av järn- eller aluminiumhalten vid olika punkter i kanalen nedströms doserrampens placering alternativt vid verkets utlopp. Detta skulle kunna ge en indikation för mängden fällningsmedlet som faktiskt fälls ut samt mängden som transporteras med det utgående flödet från reningsverket.

6 SLUTSATSER

De slutsatser som drogs från detta projekt baseras till stor del på de experiment som genomfördes på doserrampen samt de observationer som gjordes tillsammans med stöd från litteraturen. Projektets första frågeställning var;

- *Vilka metoder används på reningsverk för att blanda in fällningsmedel i avloppsvattnet?*

De olika inblandningsteknikerna utreddes under litteraturstudien och presenteras i avsnitt 2.4.1. Vanligtvis används mekaniska omrörare som inblandningsteknik där en roterande paddel eller propeller blandar in fällningsmedlet i avloppsvattnet.

Projektets andra frågeställning var;

- *Vilket ingående lufttryck krävs för att dosera fällningsmedel med befintlig design på doserrampen samt resulterar i bäst omblandning av avloppsvattnet?*

Ett rekommenderat ingående lufttryck på 4–6 bar rekommenderas främst på grund av doserrampens långa horisontella rörlängd (4 m) vilket gav upphov till stora tryckförluster. Ett högre ingående lufttryck till doserrampen resulterade i högre utgående hastigheter ur luftningshålen, vilket medförde kraftigare turbulens i den mottagande vattenmassan. För effektivare och snabbare inblandning av fällningskemikalien i avloppsvattnet rekommenderas därför att det ingående lufttrycket behålls inom det högre intervallet.

Projektets tredje frågeställning var;

- *Hur skall doserrampens designparametrar med anseende på hålbild och rördimension utformas för optimal prestanda?*

Gemensamt för de båda rördimensionerna var att ett korrigerat centrumavstånd med avtagande avstånd mellan luftningshålen föredrogs framför ett konstant c/c-mått. Luftningshålen borde för båda rördimensionerna riktas nedåt dels för att förhindra inströmmade avloppsvatten medan doserrampen står inaktiv samt dels på grund av den förbättring som kunde urskiljas gällande flödesfördelningen samt brytpunktens inträffande. Vid användning av rördimensionen DN50 erhöles bättre prestanda när denna fylldes med fyllkroppar. Rördimensionen DN25 uppvisade bättre prestanda utan tillsats av fyllkroppar.

Projektets fjärde frågeställning var;

- *Vilka fyllkroppar är lämpligast att använda för att åstadkomma optimal spridning av fällningskemikalien i doserrampen samt vilken inverkan får dessa med avseende på tryckfall?*

Vid implementering av en tryckluftsinjicerande doserramp med rördimension DN50 erhölls bättre resultat gällande brytpunktens inträffande samt fördelning av luft- och vätskeblandningens utgående hastighet när den horisontella rördelen tillsattes med fyllkroppar. Den mer genomsläppliga fyllkroppsmodellen Hiflow med ytarean 214 m²/m³ rekommenderas framför fyllkroppen av modell K5 med ytarean 800 m²/m³ på grund av fördelningen som observerades av luft- och vätskeblandningens utgående hastighet ur luftningshålen. Doserrampen med rördimensionen DN50 var robust och uppvisade inga rörelser även vid det högsta ingående lufttrycket (6 bar). En tryckluftsinjicerande doserramp med rördimension DN50 kan därmed monteras i en kanal med strömmande avloppsvatten utan någon fästningsanordning.

Vid användning av rördimensionen DN25 erhölls bättre prestandafunktioner utan tillsatser av några fyllkroppar med avseende på brytpunktens inträffande samt fördelningen av luft- och vätskeblandningens utgående hastighet. Rördimensionen DN25 var inte lika robust som DN50 och uppvisade krängande rörelsemönster vid högre ingående lufttryck (vid 4–6 bar). Vid tillämpning i en kanal med strömmande avloppsvatten så rekommenderas att doserrampen monteras i en fästningsanordning med flertalet fästpunkter längs den horisontella rördelen för att motverka dessa rörelser.

Projektets femte frågeställning var;

- *Vilken inverkan på doserrampens funktion får ett applicerat mottryck på luftningshålen?*

Samtliga experiment utförda i testbassängen med luftningshålen riktade vertikalt uppåt visade en förbättring gällande brytpunktens inträffande (se figur 31). Ett applicerat mottryck på luftningshålen resulterade i att tryckluften inte flödade ur luftningshålen med samma lätthet jämfört med när inget mottryck applicerades.

För att säkerhetsställa doserrampens prestanda bör årliga inspektioner utföras för att kontrollera den horisontella rördelens funktionalitet. Igensättning av luftningshål är en trolig följd vid användning av mindre luftningshål vilka kan behöva utvidgas för det fall detta blir ett återkommande problem.

7 REFERENSER

- Baresel, C., Magnér, J., Magnusson, K. & Olshammar, M. (2017). *Tekniska lösningar för avancerad rening av avloppsvatten*. Stockholm: IVL Svenska Miljöinstitutet AB (Rapportnummer C235). Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Regeringsuppdrag/Redovisade-2017/Avancerad-rening-av-avloppsvatten/> [2018–04].
- Bratby, J. (2006). *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*. 2. Uppl. Seattle: IWA Publishing. ISBN 978-1-84339-106-7, ss. 219. [2018-02].
- Çengel, Y.A. & Cimbala, J.M. (2006). *Fluid mechanics: Fundamentals and applications*. New York: McGraw-Hill, cop. 2006. ISBN 0-07-111566-8, ss. 143–150. [2018-03].
- Dixon, J.C. (2007) *The Shock Absorber Handbook*. 2. Uppl. Chichester: John Wiley. ISBN 978-0-470-51643, ss. 377. [2018-03].
- Genić, S., Arandjelović, I., Kolendić, P., Jarić, M., Budimir, N. & Genić, V. (2011). *A review of Explicit Approximations of Colebrook's Equation*. Belgrad. Vol. 39, no 2. [2018–03].
- Hansen, B. (1997). *Grundkurs i Kemisk fällning 3*. Vattenspegeln nr. 3/1997. [2018–02].
- Länsstyrelsen Gävleborg (2009). *Bräddning av avloppsvatten i Sverige och Gävleborgs län*. Gävle. (Rapport 2009:1) Tillgänglig: http://www.lansstyrelsen.se/Gavleborg/Sv/publikationer/2009/Pages/2009_1.aspx [2018–04].
- Munson, B.R., Young, D.F., Okiishi, T.H. & Huebsch, W.W. (2009). *Fundamentals of fluid mechanics*. 6. Uppl. Hoboken, N.J: Wiley, cop. ISBN 978-0-470-26284-9, ss. 110, 396–400, 412, 415–422. [2018–05].
- Nasa (2015). *Boyle's Law*. Tillgänglig: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boyle.html> [2018–04].
- Naturvårdsverket (2014). *Rening av avloppsvatten i Sverige 2014*. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/978-91-620-8703-6> [2018–02].
- Naturvårdsverket (2013). *Formulering av villkor och krav för utsläpp från avloppsreningsverk – vägledning*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Stod-i->

[miljoarbetet/Vagledningar/Avlopp/Vagledning-om-villkor-och-krav-for-avloppsreningsverk/](#) [2018–03].

Naturvårdsverket (2004). *Föroreningar i dagvatten*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Miljoarbete-i-Sverige/Regeringsuppdrag/Redovisade-2017/Analysera-kunskapslaget-for-dagvattenproblematiken/> [2018–04].

Pillai, J. (2004). *Flocculants and Coagulants: The Keys to Water and Waste Management in Aggregate Production*. Nalco Company. Naperville. R-680. [2018–05].

Qasim, S.R. & Zhu, G. (2018). *Wastewater treatment and reuse, theory and design examples – volume 1*. Boca Raton: CRC Press. ISBN 978-0-203-73298-4. Ch. 9.5.5-Rapid Mixing. [2018-05].

Roy, D. (2013). *Effektivare fällning vintertid vid vattenverk med höga humushalter i råvattnet*. Norconsult. C29-127. Tillgänglig: <http://www.svensktvatten.se/rapporter/svu-rapporter/dricksvattenrapporter/> [2018–03].

Ryrfors, P & Eriksen, J.E. (1995). *Koagulantblandning med två typer av statiska mixrar*. (Vann 3-95). Tillgänglig: <https://vannforeningen.no/dokumentarkiv/koagulantblandning-med-tva-typer-av-statiska-mixrar/> [2018-01].

Sathasivan, A. (2009). *Biological phosphorus removal processes for wastewater treatment*. Perth: Curtin University of Technology. [2018–05].

SMHI (2018). *Högflödesrening på Västra strandens reningsverk, Halmstad, fördjupning*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/klimat/klimatanpassa-samhallet/exempel-pa-klimatanpassning/hogflodesrening-pa-vastra-strandens-reningsverk-halmstad-fordjupning-1.115907> [2018–04].

Stockholm Vatten och Avfall (2018). *Om Stockholms framtida avloppsrening*. Tillgänglig: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/framtidensavloppsrening/om-projektet/#!/stockholms-framtida-avloppsrening> [2018–02].

Stockholm Vatten och Avfall (2017). *Miljörapport 2017 - Avloppsverksamheten Stockholm Vatten och Avfall*. Tillgänglig: <http://www.stockholmvattenochavfall.se/kundservice/informationsmaterial/vatten-och-avlopp/vatten-och-avlopp/rapporter/> [2018–03].

Svenskt Vatten (2013). *Avloppsteknik 2 – Reningsprocessen*. 3. Uppl. Stockholm: Svenskt vatten. Publikation U, ISSN 1654–5117. [2018–02].

VEAS (2016). *Om VEAS*. Tillgänglig: <https://www.veas.nu/om-veas> [2018–02].

Veolia. (2014). *Biological Treatment of Wastewater*. [Broschyr]. Moon Township: Veolia Water Technologies. Tillgänglig: <http://www.veoliawatertech.com/news-resources/brochures/?cats=202&page=1> [2018–04].

Wang, L.K., Hung, Y.T., Lo, H.H. & Yapijakis, C. (2004). *Handbook of Industrial and Hazardous Wastes Treatment*. 2. Uppl. New York: Marcel Dekker, ss. 607. [2018–04].

Personlig kommunikation

Jonsén, Johnny. (2018). Underhållsingenjör Stockholm Vatten och Avfall. E-mail. 21 mars <johnny.jonsen@svoa.se>

Jonsson, Lena. (2018a). Utvecklingsingenjör Stockholm Vatten och Avfall. E-mail 1 maj. <lena.jonsson@svoa.se>

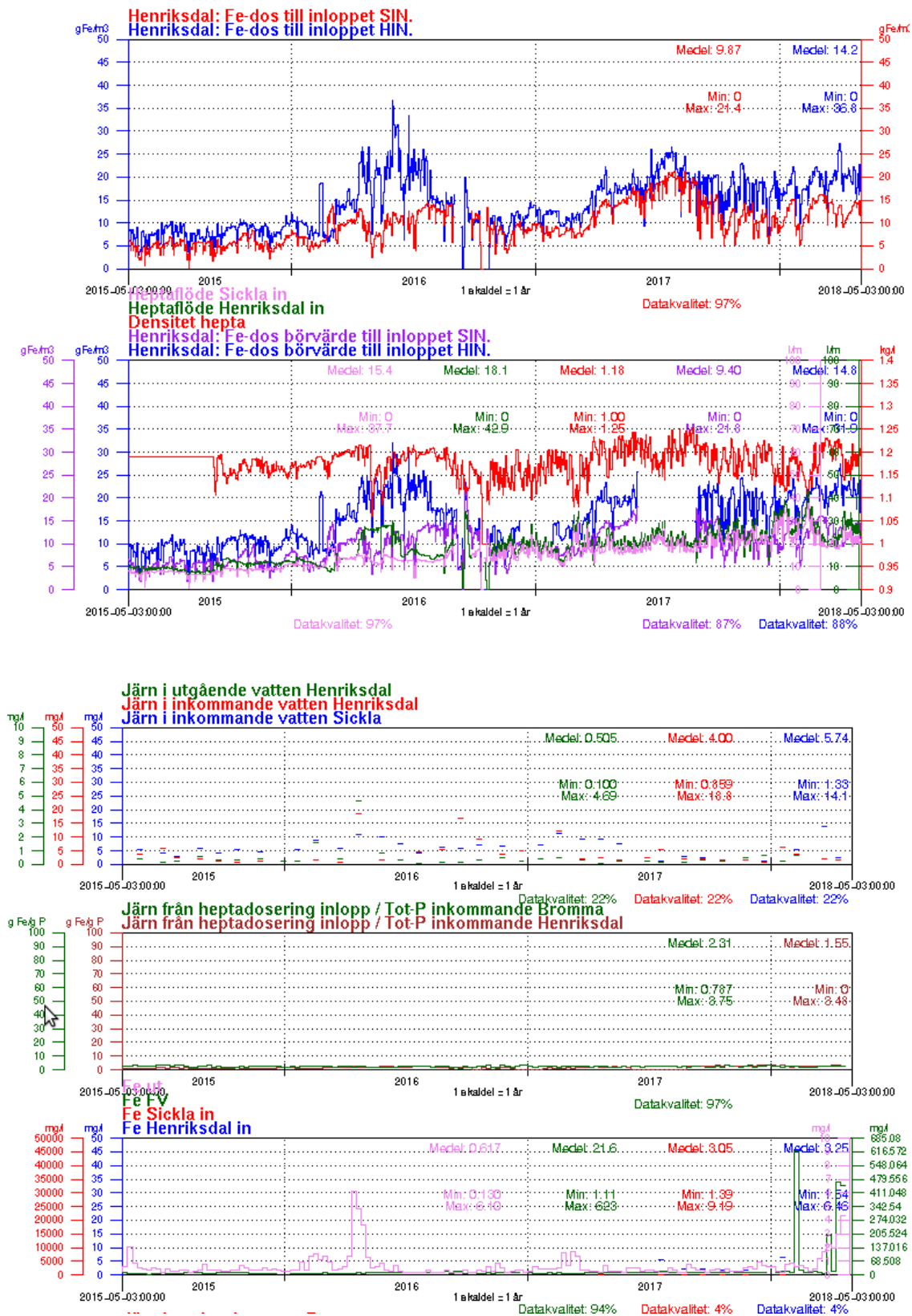
Jonsson, Lena. (2018b). Utvecklingsingenjör Stockholm Vatten och Avfall. E-mail 3 maj. <lena.jonsson@svoa.se>

Jonsson, Lena. (2018c). Utvecklingsingenjör Stockholm Vatten och Avfall. E-mail 14 maj. <lena.jonsson@svoa.se>

Jonsson, Lena. (2018d). Utvecklingsingenjör Stockholm Vatten och Avfall. E-mail 28 maj. <lena.jonsson@svoa.se>

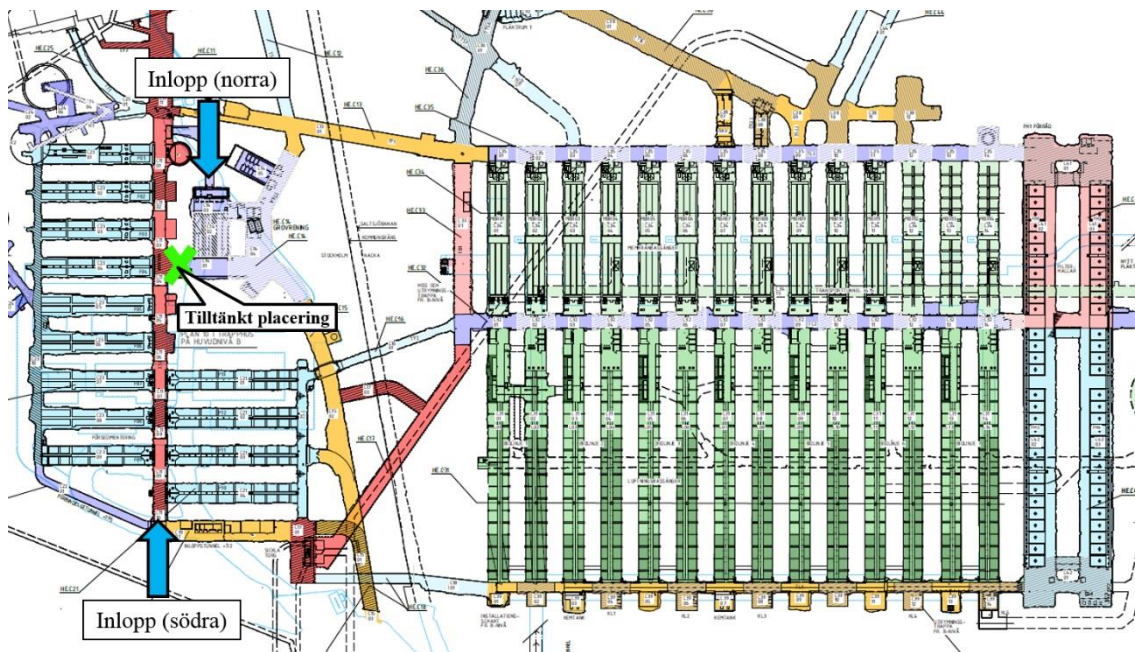
Nannestad, Åsne. (2018). Processingenjör VEAS. E-mail 24 januari. <asna@veas.nu>

APPENDIX A - DOSERINGSMÄNGDER HENRIKSDAL



Figur A1 Mätning av doseringsmängder och järnhalter vid de verkets södra respektive norra inlopp samt vid verkets utlopp. (Jonsson, 2018b)

APPENDIX B - DOSERRAMPENS PLACERING PÅ HENRIKSDAL



Figur B1 Ritning över Henrikdals reningsverk. Pilarna indikerar verkets norra respektive södra inloppspunkter och krysset doserrampens tilltänkta placering. (Jonsson, 2018c)

APPENDIX C - PRODUKTBLAD PIX-111

Kemira

Where water
meets chemistry™

Produktdatablad
2017-01-01

KEMIRA PIX-111

Järnklorid Lösning

KEMIRA PIX-111, järnklorid, är ett flytande fällningsmedel för vattenrening och innehåller aktiva 3-värda järnföreningar. KEMIRA PIX-111 lämpar sig för avloppsvattenrening, yt- och grundvattenrening samt slamkonditionering i de flesta reningsprocesser. KEMIRA PIX-111 är också utmärkt för svavelvätebekämpning.

Produktspecifikation

Form	Mörk brun vätska
Jäm (Fe total)	13,8 ± 0,4 %
Jäm (Fe ²⁺)	<0,3 %
FeCl ₃	39 - 41 %
Fri syra (HCl)	<1,5 %
Densitet (20°C)	1,42 ± 0,03 g/cm ³

Typanalys

Aktiv substans	~2,5 mol/kg
Klorid (Cl ⁻)	26 ± 2 %
Sulfat (SO ₄ ²⁻)	<0,5 %
Vattenlösligt	<0,02 %
Viskositet (20°C)	10 ± 5 mPas
pH (20°C)	<1
Start av kristallisering	-20°C

Kvalitet

KEMIRA PIX-111 är en koagulant som uppfyller kraven enligt den Europeiska standarden "Processkemikalier för beredning av dricksvatten" EN 888:2004 typ 2.

Dosering

Dosering sker med pumpar, rörledningar och ventiler i korrosionsskyddat utförande. KEMIRA PIX-111 doseras lämpligast utan utspädning direkt från lagertank.

Förvaring

Lagringstankar och rörledningar ska vara utförda i korrosionsskyddat material som glasfiberarmerad polyester, polyeten eller polypropylen. KEMIRA PIX-111 är starkt korrosiv och kontakt med utrustning av metall ska undvikas. KEMIRA PIX-111 har en rekommenderad lagringstid på 12 månader. Som med alla kemikalier rekommenderas en årlig rengöring av lagringstanken. Den första leveransen av en kemikalie ska ske i ren tank för att säkra optimalt resultat och lagringsförhållande.

Vid lagring utomhus bör tank och rörledningar vara isolerade och försedda med värmekabel.

Säkerhet

Hantering av kemikalier kräver försiktighet. Den som ansvarar för användning och hantering av KEMIRA PIX-111 måste beakta säkerhetsinstruktionerna i vårt Säkerhetsdatablad.

Leverans

Vägtransport: UN 2582,
JÄRNTRIKLORIDLÖSNING, 8, PG III, (E)

Se vårt Säkerhetsdatablad för andra transportmedel.

Kemira ger denna information som en service till sina kunder och syftet är enbart att informationen skall vara en guide i kundens utvärdering av produkten. Ni måste testa våra produkter för att utvärdera om de är passande i den applikation som ni har tänkt använda produkten i. Detta gäller också ur en hälso-, säkerhets- och miljösynpunkt. Ni måste också instruera alla anställda, återförsäljare, kontraktanställda, kunder eller tredje part som kan bli exponerade av produkten, om alla relaterade säkerhetsinstruktioner. All information och teknisk service är given utan garanti och kan komma att ändras utan varsel. Ni har ett totalt ansvar för, att all information och säkerhetsåtgärder vid gäller produkten följs, dessutom för alla lagar, regler, föreskrifter och myndighetsföreläggningar som är tillämpliga vid gäller bearbetning, transport, leverans, lastning, lossning, lagring, hantering, försäljning och användandet av varje produkt. Ingenting i detta dokument skall tolkas som en rekommendation att använda någon produkt om det är i konflikt med något patent som täcker någon produkt eller dess användning.

Kemira Kemi AB
Industrigatan 70
Box 902
SE-25109 Helsingborg
Sverige

Tel +46 42 171000
www.kemira.se

Anox™ K5
Product specification



Use

Carrier media for biofilm in biological wastewater treatment. For use in MBBR reactors, with tank and reactor equipment designed for carrier media.

Production

Extrusion. The carriers are produced in several extrusion machines. A combination of phenolic antioxidant and phosphite is added to the material to improve stabilization for the extruding process.

Form and size

Disk shaped carrier with a nominal diameter of 25 mm and a thickness between 3 to 4.5 mm.

Minor differences in the measures can be seen between individual pieces but this does not influence performance. All carriers purchased are subject to Veolia Water Technologies AB (AnoxKaldnes) Sales Terms & Conditions, a copy of which is available upon request.

Protected surface area for biofilm growth

Approximately 800 m²/m³ ± 1 %

Number per m³

Approximately 331,000 (when cut 3.75mm).

Composition

High-density polyethylene. Virgin HDPE is used for production.

Density

Adjustable. For most applications the carrier exists in density 0.95. The density tolerance is ± 0.02 kg/dm³.

Weight per m³

118 kg at a density of 0.95 kg/dm³.

Displacement

12.3 %

Handling

The carriers are packed and shipped in bags containing 1 m³ to 2.4 m³ carrier volume. When the carriers are emptied into the reactor, the reactor must already be filled with water and the aeration or mixing system must be running in order to avoid any impact damage to the carriers. Impact damages can be caused by a free fall of several meters and collisions with hard surfaces or other carriers. When filling, the suspended bags are usually simply cut open from the bottom with a knife.

The carriers should be stored in the bags and the bags must not be stacked on one and another as the underlying carriers may be damaged by the extra weight. If the bags are stored, it is important that they are protected against sun light (UV light) and high temperatures.

If the carriers have to be moved from one reactor to another, centrifugal pumps or pneumatic conveyors are not suitable and will cause carrier breakage. The carriers can be safely moved using an air lift pump or a belt conveyor.

Extra caution should be taken when using this media in a reactor equipped with mixer(s). Please contact AnoxKaldnes for recommendations regarding approved mixer types and maximal acceptable tip speed. The non-respect of these recommendations can lead to media deformation and breakage.

Service Life

The service life with normal use in a steel tank is more than 20 years and more than 15 years in a concrete tank with smooth walls. A rough concrete tank will wear the carriers and shorten the life expectancy. In concrete tanks, the rate of wear will depend on the aeration intensity and the roughness of the concrete. It is important that there are no sharp edges on the grid or other equipment in the reactor in order to avoid impact damage that can reduce service life.

January 2018

APPENDIX E - PRODUKTBLAD HIFLOW 25-7

Hiflow[®]-Rings 25-7 Plastic

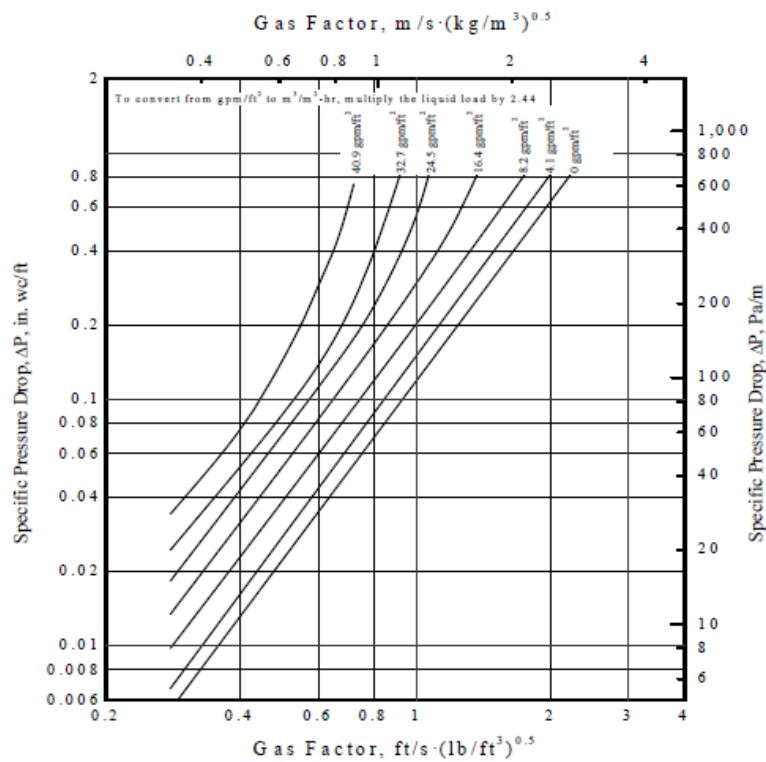


Physical data

Nominal size	1 in	25 mm
Weight	5.3 lb/ft ³	85 kg/m ³
Surface area	65.2 ft ² /ft ³	214 m ² /m ³
Void fraction	91 %	
Material	PP	
Available material	PP, PPH, PE, PVC, C-PVC, PVDF, PFA, ECTFE and others on request	



Pressure drop (Air/water 68 °F, 14.5 PSI)



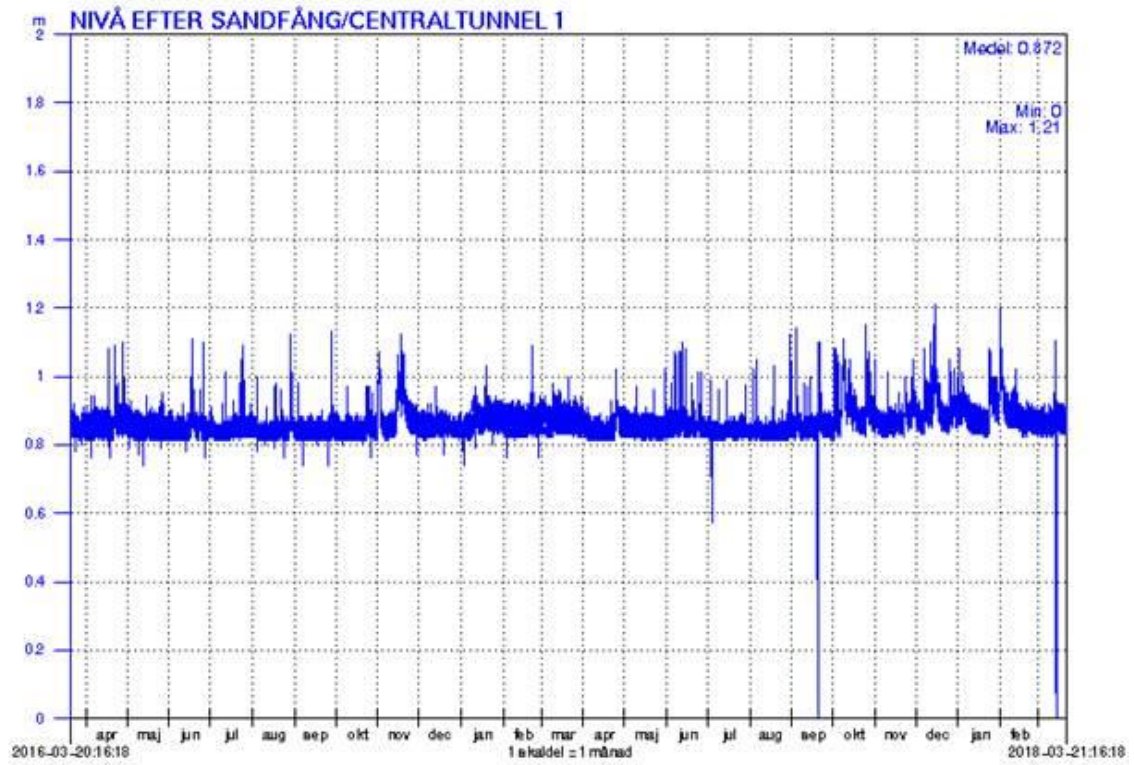
PE112 25.06.07

The values indicated above apply for a ratio of diameter of vessel to tower packings of D/d = 20. All information presented herein is believed to be accurate and reliable but does not constitute a warranty or performance guarantee on part of RVT Process Equipment GmbH.

RVT – Member of Kober Group

www.rvtpe.de

APPENDIX F - MÄTNING AV VATTENNIVÅ I CENTRALTUNNEL 1



Figur F1 Mätning av vattennivå i centraltunnel 1 vilket är vid doserrampens tilltänkta placering. (Jonsson, 2018d)