



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2017 30 stp  
Fakultet for realfag og teknologi

# Helhetlig optimalisering av avløpsledningsnett ved bruk av hydraulisk modellering

Holistic optimization of wastewater networks by  
hydraulic modelling

Erlend Skullestad Hølland  
Vann- og miljøteknikk



# Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på mitt studie innen vann- og miljøteknikk på Fakultet for realfag og teknologi (IMT) ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er utarbeidet våren 2017 og utgjør 30 studiepoeng. Jeg håper at denne oppgaven vil være et bidrag til Regnbygge 3M-prosjektet, og særlig være til nytte for Drammen kommune. Arbeidet med oppgaven har vært svært lærerikt, og jeg har fått god erfaring med modellering av avløpsnett. Det dukket opp utfordringer hele veien underveis, og det ble gått flere runder for å løse disse. Oppgaven har gitt meg større innsikt i hvordan et avløpsnettverk henger sammen, og hva slags effekt de forskjellige komponentene i nettverket har.

Jeg vil gjerne takke min faglige veileder Harsha Ratnaweera, ved IMT på NMBU, for å ha gitt meg denne oppgaven, pushet meg det lille ekstra for å finne nødvendige løsninger, og for ellers å ha latt meg jobbe selvstendig med oppgaven. Jeg vil også takke Geir Lindholm i Rosim AS for veiledning og mange gode ideer som er blitt brukt i oppgaven. Jeg vil takke alle andre ansatte hos Rosim AS, som har tatt meg i mot og fått meg til å føle meg velkommen, i tillegg til å ha utført store deler av simuleringene. Spesielt vil jeg takke Iva Pervan som lærte meg Rosie-programvaren, og som engasjerte seg i oppgaven min og alltid var tilgjengelig for spørsmål. Takk til Vibeke Olsbu i Drammen kommune for svar rundt ledningsnettet i kommunen. Også takk til Dag Lauvås og Helle Egeberg Vári i Drammen kommune, og Arnljot Mølmen i Rambøll for deres bidrag. Duo Zhang ved NMBU fortjener også en stor takk for gode tekniske innspill, konstruktive tilbakemeldinger og for å bruke forslagene og resultatene fra denne oppgaven videre i sin forskning. Takk også til Lena M. Tallaksen ved Institutt for Geofag ved Universitetet i Oslo, som i sin tid lærte meg det jeg kan om å skrive oppgave under min bachelorgrad der. Stor takk til Rosim AS for fri tilgang til eget kontor, egen PC og deres programvare. Takk til DHI for studentlisens til deres programvare.

Til slutt vil jeg takke kona mi Trine, og barna mine Signe og Edgar, for støtten og at de alltid er tilstede for meg. Dere hjelper meg til å få tankene over på noe annet og setter ting i perspektiv når jeg trenger det.

Erlend Skullestad Hølland

Oslo, mai 2017

# Sammendrag

Denne oppgaven har tatt for seg avløpsledningsnett i Drammen kommune, i Buskerud fylke, og har sett på tiltak for å redusere mengden avløpsvann som går i overløp, og dermed urensset ut i resipienten. Dette ble gjort ved å modellere ledningsnett og de foreslåtte tiltakene, og utføre simuleringer basert på meteorologiske måledata. Det ble tatt utgangspunkt i en modell utarbeidet av Rosim AS, der både Muusøya og Solumstrand rensedistrikt er med. Programvaren ROSIE og ArcGIS ble benyttet for bearbeidelse av modellen, og MOUSE ble brukt for å gjøre simuleringer.

Opgaven presenterer forslag til tiltak på ledningsnett, og sammenlikner simuleringer av disse justerte modellene med den opprinnelige modellen. Det ble utarbeidet modeller som utnytter kapasiteten i eksisterende ledningsnett, ved å justere videreført volumstrøm fra en rekke overløp på Strømsø, i kombinasjon med styring av pumpene som fører avløpsvann fra Bragernes til Strømsø. Denne styringen sørget for at betydelige overløpsmengder først oppstod når ledningsnett på nedre deler av Strømsø og Bragernes var fullt utnyttet begge steder. Disse modellene ble simulert av undertegnede for oktober 2014, som var den måneden med mest overløp i 2014. Videre presenterer oppgaven forslag til nye konstruksjoner på ledningsnett der det i hovedtrekk er snakk om et fordrøyningsmagasin ved Landfalloverløpet i Muusøya rensedistrikt, og en pumpeledning mellom Bragernes i Solumstrand rensedistrikt og Muusøya som kan fordele vann mellom rensedistriktene. Det ble simulert med fordrøyningsmagasin i tre forskjellige størrelser, både som tiltak alene, og i kombinasjon med pumpeledningen. Det ble også utarbeidet en modell med denne nye pumpeledningen, uten fordrøyningsmagasin. Disse simuleringene ble utført for hele 2014.

Målsetningen for oppgaven var at tiltakene skulle vise en reduksjon i totalt overløpsvolum i hele kommunen. Resultatrapporter for overløpsvolum for hver modell blir presentert, og disse viser at alle modellene gir en viss reduksjon i overløpsvolum. Som ventet gir det største fordrøyningsbassenget (20000 m<sup>3</sup>) størst effekt, med en reduksjon på over 15 % av overløpsutslippet for hele kommunen, for hele 2014 når det benyttes i kombinasjon med pumpeledningen. Resultatene for tiltakene på eksisterende ledningsnett viser at disse gir en reduksjon på 3,6 %, noe som er sammenliknbart med resultatene for oktober for et fordrøyningsbasseng på 5000 m<sup>3</sup> ved Landfalloverløpet, i kombinasjon med ny pumpeledning. Resultatene fra denne oppgaven blir senere brukt videre for å utvikle en metode for å forutsi fremtidig volumstrøm og vannivå ved bruk av deep learning.



# Abstract

This thesis has looked at the sewer network of the municipality of Drammen in Norway, and has investigated measures to reduce the amount of wastewater going into overflows, and into the recipient without treatment. This has been done by modelling the sewer network and the proposed measures, and performing simulations based on meteorological measurement data. The base model was a model developed by Rosim AS, which includes both Muusøya and Solumstrand wastewater districts. The software ROSIE and ArcGIS were used for making changes on the model, and MOUSE was used for simulations.

The thesis delivers proposals for actions to be taken on the sewer system, and compares simulations of these adjusted models to the original model. Models exploiting the capacity of the existing network were developed, by adjusting the continuation flow-rate from a number of weirs in Strømsø, in combination with active control of the pumps that lead water from Bragernes to Strømsø. With these control measures weir overflow of significant amounts only occur when the sewer network capacity is filled in the lower parts of Strømsø and Bragernes at the same time. These models were simulated for October 2014, which was the month with the most overflow in 2014. Further, the thesis provides suggestions to new constructions in the network. In short this consists of an attenuation tank by the "Landfall weir" in Muusøya wastewater district and/or a pumping line that distributes water between Bragernes in Solumstrand wastewater district and Muusøya. The attenuation tank was simulated with three different sizes, with and without the mentioned pumping line. Also, there was a model with the pumping line without an attenuation tank. These models were simulated for all of 2014.

This thesis aims to show that the presented measures will give a reduction in the total overflow volume for the whole municipality. Result reports for overflow volume are presented, and these show that all the models give a certain reduction in overflow volume. As expected, the largest attenuation tank (20000 m<sup>3</sup>) in combination with the pumping line gave the best effect, with a reduction of more than 15 % of the weir overflow volume for the whole municipality, for the whole year. The results for the models using the existing sewer network show that these gave a reduction of 3,6 %, which is comparable to the results of October 2014 for an attenuation tank of 5000 m<sup>3</sup> in combination with the new pumping line. The results from this thesis will be used later to develop a method to predict future flow and water level by the use of deep learning.

# Innholdsfortegnelse

Forord .....	I
Sammendrag .....	II
Abstract.....	III
Innholdsfortegnelse .....	IV
Figurliste .....	VI
Tabelliste .....	VIII
Formeloversikt.....	IX
1 Innledning.....	1
1.1 Forutsetninger.....	2
1.2 Regnbyge 3M.....	3
1.3 Avgrensinger .....	4
1.4 Problemstilling .....	4
1.5 Mål med arbeidet.....	4
2 Teori.....	5
2.1 Klima.....	5
2.1.1 Klima i verden.....	5
2.1.2 Klima i Norge .....	7
2.1.3 Nedbør.....	7
2.1.4 Klimaendringer .....	8
2.1.5 Klima i fremtiden.....	9
2.2 Hydrologi .....	9
2.2.1 Urbanhydrologi.....	11
2.2.2 Overvannshåndtering .....	12
2.3 Avløp.....	14
2.3.1 Avløpsvann .....	15
2.3.2 Avløpsrensaneanlegget .....	15
2.3.3 Avløpsnett .....	16
2.3.4 Ledningsanlegget.....	18
2.3.4 Overløp .....	18
2.3.5 Fordrøyning.....	20
2.3.6 Pumper .....	21
2.3.7 Variasjoner i avløpsvann gjennom døgnet og året.....	23
2.4 Drammen Kommune .....	24
2.4.1 Utslippskrav .....	24
2.4.2 Resipienten.....	25
2.4.3 Nedbør i Drammen .....	26
2.4.4 Muusøya rensaneanlegg og rensedistrikt.....	26
2.4.5 Solumstrand rensaneanlegg og rensedistrikt .....	27
2.5 Modellering .....	29
2.5.1 ArcMAP.....	29
2.5.2 ROSIE .....	29
2.5.3 Mouse.....	31
2.5.4 Simulering.....	32
2.5.5 Deep learning .....	33
2.6 Tidligere arbeid .....	34
3 Metode .....	37

3.1 Fremgangsmåte .....	37
3.1.1 Forberedelser.....	37
3.1.2 Utnyttelse av eksisterende ledningsnett .....	38
3.1.3 Diverse konsepter med nye konstruksjoner .....	40
3.2 Modeller som utnytter eksisterende ledningsnett.....	41
3.2.1 Case A – Statusmodell 1 .....	41
3.2.2 Case B – Regulering på Strømsø .....	42
3.2.3 Case C – Regulering av Søren Lemmich-pumpene og Strømsø.....	43
3.3 Modeller med nye konstruksjoner på ledningsnettet.....	45
3.3.1 Case D – Statusmodell 2 .....	45
3.3.2 Case E – 1000 m <sup>3</sup> uten pumpeledning .....	46
3.3.3 Case F – 5000 m <sup>3</sup> uten pumpeledning .....	47
3.3.4 Case G – 20000 m <sup>3</sup> uten pumpeledning.....	48
3.3.5 Case H – Pumping mellom Bragernes og Muusøya .....	48
3.3.6 Case I – 1000 m <sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya.....	50
3.3.7 Case J – 5000 m <sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya .....	50
3.3.8 Case K – 20000 m <sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya .....	50
3.4 Simulering .....	51
3.5 Vurdering av resultater .....	53
4 Resultater .....	54
4.1 Resultater for modeller som utnytter eksisterende ledningsnett .....	54
4.2 Resultater for modeller med nye konstruksjoner .....	57
4.2.1 Status1 vs Status2 .....	59
4.2.2 Effekten av fordrøyningsmagasin .....	60
4.2.3 Effekten av pumping mellom Muusøya og Bragernes .....	61
4.3 Sammenlikning av resultater i 4.1 og 4.2.....	63
4.4 Påvirkninger på renseanleggene.....	64
4.4.1 Påvirkningen modeller med eksisterende ledningsnett har på renseanleggene .....	64
4.4.2 Påvirkningen modeller med nye konstruksjoner har på renseanleggene .....	65
5 Diskusjon .....	66
5.1 Modeller som utnytter eksisterende ledningsnett.....	66
5.2 Modeller med nye konstruksjoner på ledningsnettet.....	68
5.2.1 Status1 vs Status2 .....	69
5.2.2 Effekten av fordrøyningsmagasin .....	69
5.2.3 Effekten av pumping mellom Muusøya og Bragernes .....	70
5.3 Sammenlikning av modeller med og uten nye konstruksjoner .....	70
5.4 Påvirkninger på renseanleggene.....	71
5.4.1 Påvirkningen modeller med eksisterende ledningsnett har på renseanleggene .....	71
5.4.2 Påvirkningen modeller med nye konstruksjoner har på renseanleggene .....	71
5.5 Forslag til tiltak .....	72
6 Konklusjon.....	73
7 Videre arbeid .....	74
8 Litteraturliste .....	76
9 Vedlegg.....	79
9.1 Vedlegg A .....	79
9.3 Vedlegg B – Prinsippkisser .....	83
9.3 Vedlegg C – Figurer.....	87

# Figurliste

<i>Figur 1-1: Forklaring av hovedmålene for Regnbygge-3M (Regnbygge 3M 2017).</i>	3
<i>Figur 2-1: Prinsippskisse av drivhuseffekten (Mamen &amp; Benestad 2016).</i>	6
<i>Figur 2-2: Graf av avvik fra global gjennomsnittstemperatur fra 1880 til 2016 (Miljødirektoratet 2016b).</i>	9
<i>Figur 2-3: Vannets kretsløp (Cramer &amp; Gaut 2016).</i>	10
<i>Figur 2-4: Urbanisering og effekt på avrenningens mengde og intensitet (SINTEF 2012).</i>	12
<i>Figur 2-5: Prinsippskisse av treleddsstrategien (Lindholm mfl. 2008).</i>	13
<i>Figur 2-6: Eksempel på en enkel framstilling av et kommunalt avløpsnett (Ødegaard 2014).</i>	17
<i>Figur 2-7: Prinsippskisse av utformingen og virkemåten til et ensidig høykantet sideoverløp (Ødegaard 2014).</i>	20
<i>Figur 2-8: Innløps- og utløpshydrografer for et fordrøyningsbasseng som jevner ut hele avrenningen fra en regnhendelse (Mosevoll 1975).</i>	21
<i>Figur 2-9: Prinsippskisse av ei pumpeump (Ødegaard 2014).</i>	22
<i>Figur 2-10: Eksempel på forbruksvariasjon gjennom et døgn (Ødegaard 2014).</i>	23
<i>Figur 2-11: Kart over Drammen kommune, hentet fra modell.</i>	25
<i>Figur 2-12: Kart over Muusøya rensedistrikt med avløpssoner (Olsbu 2017a).</i>	27
<i>Figur 2-13: Kart over Solumstrand rensedistrikt med avløpssoner (Olsbu 2017a).</i>	28
<i>Figur 2-14: Skjerm bilde av ArcMap-brukergrensesnittet, og tilleggsfunksjonene fra ROSIE.</i>	30
<i>Figur 2-15: Kalibrering for to målepunkter i modellområdet.</i>	35
<i>Figur 3-1: Modellen av ledningsnett for Muusøya og Solumstrand rensedistrikt.</i>	38
<i>Figur 3-2: Sammenlikning av justert kurve for regulering (til venstre) med opprinnelig kurve for regulering (til høyre), hentet fra regulering ved Gaasevadet på Strømsø.</i>	42
<i>Figur 3-3: Oversikt over utvalgte overløp med justerte reguleringer (lyseblå prikker).</i>	43
<i>Figur 3-4: Kurve for regulering av ledning som tilfører avløpsvann til Søren Lemmich-pumpene.</i>	44
<i>Figur 3-5: Plasseringen av aktuelle punkter for tiltak i Case C.</i>	44
<i>Figur 3-6: Ledningsstrekk mellom Landfalloverløpet og Muusøya renseanlegg, for modellen Status2. Blå ledning er aktuell ledning som utvides.</i>	45
<i>Figur 3-7: Graf av pumpekurven som ble brukt for pumpen som tilsvarte Muusøya renseanlegg.</i>	47
<i>Figur 3-8: Kart over modellen, som viser de to punktene de to aktuelle pumpene for Case F-I, i form av to blå stjerner.</i>	48

<i>Figur 3-9: Innstillinger for pumpene som pumper fra Muusøya til Bragernes (til venstre) og fra Bragernes til Muusøya (til høyre).</i> .....	49
<i>Figur 3-10: Innstillinger for runoff-simulering.</i> .....	52
<i>Figur 3-11: Innstillinger for Network-simulering.</i> .....	53
<i>Figur 4-1: Overløpsvolum for hvert overløp som har justert regulering, for tre modeller.</i> .....	55
<i>Figur 4-2: Overløpsvolum for de overløp som er påvirket av justerte reguleringer, for tre modeller.</i> .....	55
<i>Figur 4-3: Volumstrøm i overløp 57048 og nedstrøms ledning, og nivå i nedstrøms kum fra Status1.</i> .....	56
<i>Figur 4-4: Volumstrøm i overløp 57048 og nedstrøms ledning, og nivå i nedstrøms kum fra StromosMedBrag.</i> .....	56
<i>Figur 4-5: Diagram som viser reduksjon i total overløpsmengde i forhold til Status 2.</i> .....	58
<i>Figur 4-6: Scatterplot av sammenhengen mellom totalt overløp per måned, og reduksjon i forhold til Status2 for hver modell.</i> .....	58
<i>Figur 4-7: Graf for volumstrøm i Muusøya RA og i Landfalloverløpet, for Status1 (øverst) og Status2 (nederst).</i> .....	60
<i>Figur 4-8: Graf av nivå og volumstrøm for Landfalloverløpet, for fire modeller.</i> .....	61
<i>Figur 4-9: Graf av volumstrøm i Landfalloverløpet øverst, volumstrøm i Søren Lemmich-overløpet i midten, og volumstrøm i pumpene som pumper mellom Muusøya og Bragernes nederst.</i> .....	62
<i>Figur 4-10: Diagram som viser reduksjon i total overløpsmengde for alle modellene i forhold til opprinnelig modell, for oktober 2014.</i> .....	63
<i>Figur 4-11: Overløpsvolum ved Solumstrand RA for oktober måned.</i> .....	64
<i>Figur 4-12: Volumstrøm i Muusøya RA for 3 modeller.</i> .....	65
<i>Figur 5-1: Utsnitt av modellen som viser plasseringen av overløp 57048 i forhold til hovedledningen.</i> .....	67
<i>Figur 7-1: Sammenlikning av LSTM og opprinnelige verdier (Zhang 2017).</i> .....	75
<i>Figur B-1: Prinsippskisser av modellene Status1, Stromso og StromMedBrag.</i> .....	84
<i>Figur B-2: Prinsippskisser av modellene 1000m3NoPumping, 5000m3NoPumping og 20000m3NoPumping.</i> .....	84
<i>Figur B-3: Prinsippskisser av modellene 0m3WithPumping, 1000m3WithPumping og 5000m3WithPumping.</i> .....	85
<i>Figur B-4: Prinsippskisse av modellen 20000m3WithPumping.</i> .....	86
<i>Figur C-1: Volumstrøm for Muusøya RA (blått) og nivå i kum 67255 (rødt) for modellen 1000m3NoPumping.</i> .....	87

# Tabelliste

<i>Tabell 2-1: krav til utslipp til forskjellige typer resipienter,.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabell 3-1: Oversikt over simuleringer av modeller med eksisterende ledningsnett.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabell 3-2: Oversikt over simuleringer av modeller med konsepter for nye konstruksjoner.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabell 3-3: Inputverdier for pumpekurve for Muusøya renseanlegg.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabell 3-4: Oversikt over forskjellene mellom Case A og Case D-I,.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabell 4-1: oversikt over totalt overløpsvolum i oktober 2014 for modellene som utnytter eksisterende ledningsnett,.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabell 4-2: tabell over beregnet totalt overløpsvolum for 2014 for alle modellene med nye konstruksjoner, .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabell 4-3: Sammenlikning av utvalgte overløp for Status1 og Status2. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabell 4-4: Overløpsvolum i m<sup>3</sup> for utvalgte overløp for modeller med pumping mellom Muusøya og Bragernes, .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabell 4-5: antall timer over <math>Q_{dim}</math> og <math>Q_{maksdim}</math> for renseanleggene i løpet av oktober 2014, .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabell 4-6: antall timer over <math>Q_{dim}</math> og <math>Q_{maksdim}</math> for renseanleggene i løpet av 2014,.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabell A-1: Innstillinger for alle endrede reguleringer for Case B og C på Strømsø, .....</i>	<i>80</i>
<i>Tabell A-2: overløpsvolum for utvalgte overløp for Case A-C, .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabell A-3: overløpsvolum for hver modell, for hver måned gjennom året 2014,.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabell A-4: redusert overløpsvolum for hver modell, for hver måned gjennom 2014, i forhold til Status2,...</i>	<i>82</i>
<i>Tabell A-5: Beregning av reduksjon i total overløpsmengde for alle modellene i forhold til opprinnelig modell, for oktober 2014. ....</i>	<i>82</i>

# Formeloversikt

<i>Formel 2-1: Bevaringslikningen</i> .....	10
<i>Formel 2-2: Vannbalanselikningen</i> .....	11
<i>Formel 2-3: Kontinuitetslikningen</i> .....	18
<i>Formel 2-4: Momentlikningen</i> .....	18
<i>Formel 2-5: Input gate</i> .....	33
<i>Formel 2-6: Forget gate</i> .....	33
<i>Formel 2-7: Output gate</i> .....	33
<i>Formel 2-8: Cell state</i> .....	34
<i>Formel 2-9: Output vector</i> .....	34





# 1 Innledning

Klimaendringer, befolkningsvekst og urbanisering fører til at mer vann entrer avløpssystemet, noe som fører til overbelastning av ledningsnett og renseanlegget, slik at urensset vann må slippes ut i resipienten. Noe av grunnen til dette er at befolkningsvekst fører til økt spillvannsmengde, men mesteparten kommer av at mer vann entrer ledningsnett i forbindelse nedbørshendelser, som øker både i hyppighet, intensitet og varighet. Dette forsterkes av urbanisering, som bidrar til mer tette flater, slik at mer vann renner av på overflaten, ned i kummer og sluk og ned i avløpsnett, istedenfor å infiltreres ned i bakken. Når kapasiteten i ledningsnett og renseanlegg overgås, går det overskytende vannet i overløp. Ved å redusere mengden avløpsvann som går i overløp, vil man kunne bedre forholdene i resipienten. Siden overløp oppstår når volumstrømmen er på sitt største, kan mengden som går i overløp reduseres ved å redusere flomtoppene i volumstrømmen. Dette gjøres ved å holde igjen, også kalt fordrøye, vann under perioder med høy volumstrøm, for så å la det renne av senere. Man kan benytte seg av for eksempel fordrøyningsmagasin, eller aktiv styring av pumper og luker for å oppnå dette. En annen måte er å flytte vann fra deler av ledningsnett med maksimal utnyttelse av kapasiteten, til andre deler med ledig kapasitet. Korte, intense nedbørshendelser (særlig om sommeren) kan være svært lokale, noe som kan innebære at en nedbørshendelse forekommer kun på deler av nedbørsfeltet for et avløpsnettverk. I de områdene der nedbøren forekommer, vil avløpsrørens fulle kapasitet utnyttes, men områdene der det ikke er nedbør vil ha ledig kapasitet, som potensielt kan utnyttes.

For å kunne bruke slike styringsmekanismer, må man ha online-måling av nivåer og volumstrømmer på strategiske steder på ledningsnett, som forteller hvor det er ledig kapasitet. Før man setter til livs slike strategier, eller bygger fordrøyningsbasseng eller andre konstruksjoner, må man beregne effekten av de forskjellige tiltakene. Dette kan gjøres ved å lage en modell av ledningsnett, der man kan gjøre simuleringer over en viss periode, gjerne med så realistiske input-parametere som mulig. Med detaljerte data om nedbør, temperatur, fordampning, ledningsnettets utforming, og karakteristikk for nedbørsfelt og spillvannstilførsel, kan man få en realistisk tilnærming til hvordan ledningsnett håndterer avløpsmengder som kommer via spillvann og overvann. Videre kan man så gjøre endringer på modellen, og kjøre nye, tilsvarende simuleringer, og se på resultatene for å sammenlikne med den opprinnelige modellen. Slik kan man si noe om effekten man kan forvente av visse tiltak.

Som mange andre kommuner, har Drammen kommune utfordringer med at mye avløpsvann slippes urensset ut i resipienten gjennom overløp. De siste årenes klimaendringer har ført til økt nedbørmengde og intensitet, noe som har økt belastningen på ledningsnett, slik at dette ikke klarer å ta unna alt avløpsvannet. Befolkningsvekst og urbanisering fører til at enda mer overvann og avløpsvann entrer ledningsnett. Prognoser for fremtiden tilsier at dette vil fortsette å øke, slik at utfordringene rundt overløp vil bli enda større. Utslipp av urensset avløpsvann i overløp er en del av den forurensningen som vannforekomster blir utsatt for, og som påvirker vannkvaliteten og den biologiske aktiviteten i Drammenselva og Drammensfjorden.

For å redusere overløpsmengden kan man iverksette forskjellige tiltak som har som hensikt å holde igjen vannet, slik at flomtoppene som fører til overløp blir redusert. Den viktigste måten å gjøre dette på er å fordrøye vannet på overflaten før det entrer ledningsnett, i form av såkalte LOD-tiltak (Lokal overvannsdiskonering). Denne oppgaven studerer hva som kan gjøres for å fordrøye vannet etter at det har entret selve ledningsnett. I tillegg til løsninger som fordrøyningsmagasin, har ledningsnett et stort volum i seg selv, som med de rette virkemidlene kan brukes til å holde igjen vann i perioder der vann går i overløp. Den generelle oppfatningen er at oppstuvning i ledningsnett skal unngås, men denne oppgaven ser på oppstuvning som en form for fordrøyning, som en forlengelse av LOD-prinsippet. Rosim AS har assistert med simulering av de fleste modellene, siden det er svært tidkrevende og omfattende simuleringer som stiller store krav til maskinvare.

Denne oppgaven inneholder først en teoridel som tar for seg den informasjonen som er nødvendig for å svare på problemstillingen. Videre er det et metodekapittel som beskriver måten oppgaven er løst på og hvordan resultatene er fremstilt. Resultatene blir så vist i et eget kapittel. Et diskusjonskapittel følger så, som drøfter resultatene, sammenlikner de med hverandre, og kommer med anbefalinger. Til slutt blir det presentert en konklusjon, og tanker om videre arbeid. Denne oppgaven søker å komme med bidrag til forskningsprosjektet Regnbyge 3M, som er omtalt i delkapittel 1.2.

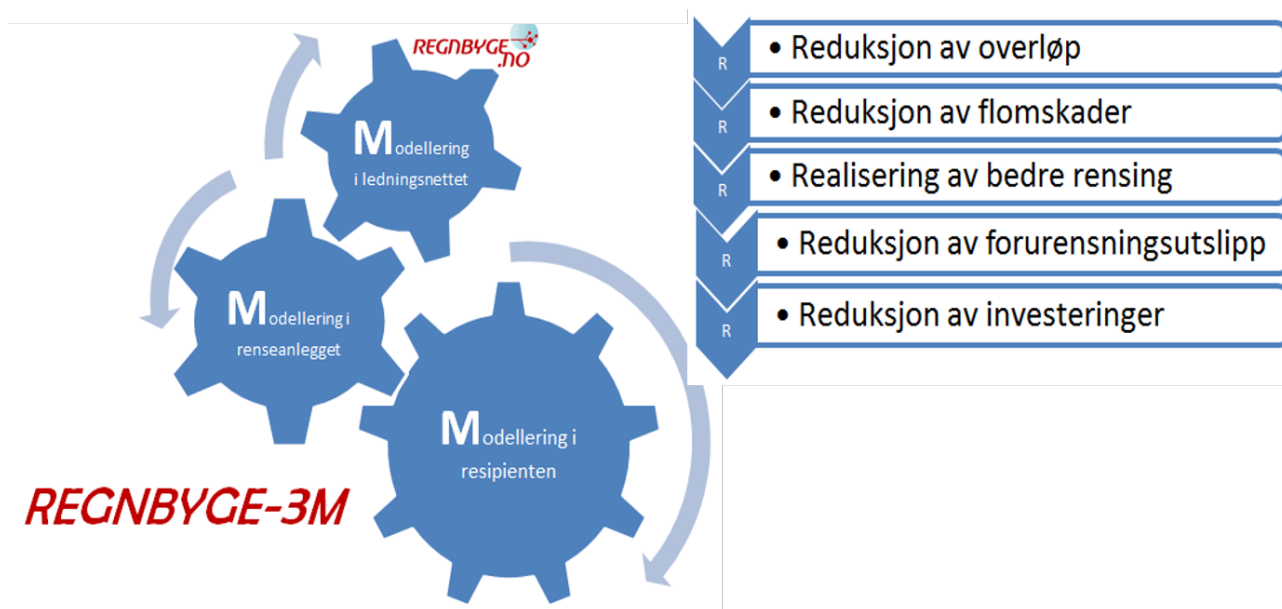
## 1.1 Forutsetninger

Denne oppgaven har som forutsetning at modellen for Drammen kommune, som er levert av Rosim AS, stemmer godt med virkeligheten, at programvaren som brukes gjør realistiske beregninger, og at filene med nedbør-, fordampning- og temperaturdata inneholder gode målinger. Det forutsettes

også at simuleringer som er blitt utført av Rosim AS er utført med avtalte innstillinger, i tråd med deres egne retningslinjer, og at resultatfilene er korrekt hentet ut. Det antas også at informasjon som er gitt muntlig og skriftlig av representanter for Drammen kommune er riktig.

## 1.2 Regnbyge 3M

Regnbyge 3M er et større forskningsprosjekt, som er et samarbeid mellom kommunale, private og forskningsvirksomheter innen vann- og avløpsbransjen. Hovedmålet for prosjektet er å redusere overløp, flomskader, forurensningsutslipp og ressursbehov for fremtidig kapasitetsøkning ved helhetlig overvåkning, modellering og aktiv styring av avløpsstrømmer for ledningsnett, renseanlegg og resipient. Dette skal gjøres ved å utvikle et innovativt konsept der online data fra nedbørsmålere i nettverk, modeller og sensorer på ledningsnett og renseanlegg kommuniserer seg i mellom. Figur 1-1 gir et visuelt inntrykk av hvordan de tre M-ene representerer modellering av henholdsvis ledningsnett, renseanlegg og resipient, samt hovedmålene for prosjektet. Prosjektet har følgende samarbeidspartnere: Drammen kommune, Trondheim kommune, VAV – Oslo kommune, NMBU, Høgskolen i Buskerud og Vestfold, Høgskolen i Østfold, NTNU, NIVA, Meteorologisk Institutt, Sintef Energi, Rosim AS og DOSCON (Regnbyge 3M 2017). Denne oppgaven vil bruke modellering av ledningsnett for å se på måter å aktivt styre ledningsnett, for å redusere overløp.



Figur 1-1: Forklaring av hovedmålene for Regnbyge-3M (Regnbyge 3M 2017).

### 1.3 Avgrensinger

Denne oppgaven ser på det kommunale avløpsledningsnett for Drammen kommune, som ligger i Buskerud fylke. Avløpsvannets og resipientens kvalitet er en viktig motivasjon for denne oppgaven, men det blir ikke sett på vannets kvalitet, og de forskjellige tiltakenes effekt på denne. Oppgaven ser ikke på den fysiske og geografiske utformingen av de foreslåtte tiltakene, men kun som modellbaserte konsepter, som kun har som mål å gi et inntrykk av effekten av tiltaket. Det blir ikke sett på det økonomiske aspektet i denne oppgaven.

### 1.4 Problemstilling

Problemstillingen for oppgaven kan deles opp i følgende deler:

- Hva slags tiltak kan gjøres på det eksisterende ledningsnett som vil redusere den totale overløpsmengden i Drammen kommune?
- Hva slags tiltak i form av nye konstruksjoner på ledningsnett kan iverksettes for å gi en tilfredsstillende reduksjon i den totale overløpsmengden i Drammen kommune?

### 1.5 Mål med arbeidet

Oppgaven ønsker å se på hvordan Drammen kommune kan redusere mengden avløpsvann som går i overløp, og dermed urensset ut i resipienten. Dette innebærer både tiltak som utnytter det eksisterende ledningsnett, og tiltak i form av nye konstruksjoner. Dette vil gjøres ved å beskrive i detalj forskjellige konsepter, for så å modellere disse med utgangspunkt i modellen for Drammen kommune. Siden det er snakk om konsepter, og ikke faktiske, reelle konstruksjoner, trenger ikke modellene å beskrive konseptenes faktiske utforming. Isteden blir konseptenes rolle beskrevet i modellen. Ut fra dette vil det bli utført simuleringer, som vil gi resultater for blant annet overløpsvolumer. Det vil også bli hentet ut tidsserier for nivåer og volumstrømmer, for å forklare endringer. Simuleringene vil bli gjort for hele 2014 for en del av modellene, mens to av modellene kun vil bli simulert for oktober. Disse resultatene vil sammenliknes for å se på effekten av resultatene. Ved hjelp av deep learning vil Duo Zhang ved NMBU bruke resultatene fra denne oppgaven til å vise en metode for å forutsi volumstrøm i nær fremtid, slik at dette kan brukes til aktiv styring, som vil bli foreslått i denne oppgaven. Oppgaven har som mål å komme med konkrete forslag til tiltak på ledningsnett i Drammen kommune, som har en generell karakter som gjør at det kan brukes som konsept også andre steder, gjerne gjennom Regnbygge 3M-prosjektet.

## 2 Teori

Dette kapittelet går gjennom teori som er brukt til å besvare problemstillingen, og som er brukt som motivasjon for oppgaven. Det blir også gitt informasjon om området for modellen, samt data og software som er brukt.

### 2.1 Klima

Ifølge Dannevig og Harstveit (2017) defineres klima som *"typisk værmønster på et sted, som for eksempel middel-, maksimums- og minimumsverdier og hyppighet"*. Klima beskriver det man kan forvente av vær på et sted eller i et område, både når det gjelder gjennomsnittsvær, variasjoner og ekstremvær, gjennom en systematisk, statistisk beskrivelse av værforholdene. I meteorologien opereres det med 30-års perioder som grunnlag for denne statistikken. Nå til dags er det måledata for perioden 1961 til 1990 som brukes. Middelverdiene og gjennomsnittsverdiene fra denne perioden kalles normaler. Dette er for at normaler fra forskjellige deler av verden skal kunne sammenlignes. Selv om selve været kan variere veldig, kan man se et hovedmønster som gjør at man kan lage en statistisk beskrivelse av klimaet. Statistikk over klimaet gjelder også variasjoner rundt normalene, noe som beskriver hvor mye været kan variere uten å være unormalt. I tillegg har man ekstreme verdier, som beskriver ytterpunktene av klimaet på et sted, og som gjelder både observerte og beregnede verdier (Meteorologisk Institutt 2017a).

#### 2.1.1 Klima i verden

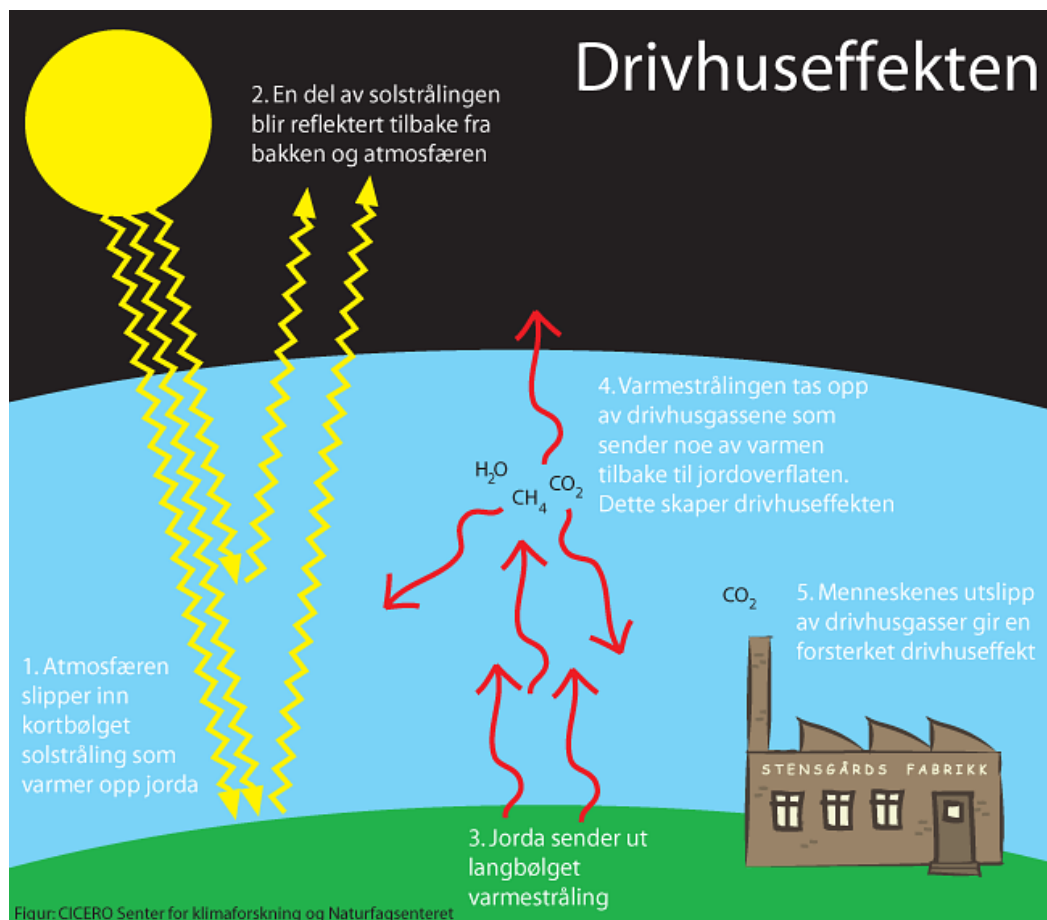
Det er en rekke faktorer som avgjør klimaet i verden, og disse fungerer sammen i et komplisert samspill. Solens stilling på himmelen er med å avgjøre hvor mye varme som tilføres jordoverflaten og atmosfæren. Breddegraden er derfor den viktigste faktoren for klimaet. Ut fra dette kan man dele opp klimaet på hver halvkule opp i tre hovedkategorier, der disse røft skilles av vendesirkelene og polarsirkelene (Dannevig & Harstveit 2017):

- det tropiske klimaet ("uten vinter")
- det tempererte klimaet
- det polare klimaet ("uten sommer")

Havet har også en vesentlig påvirkning på klimaet, ved at havet har større evne til å holde på varme enn land, slik at den daglige og den årlige temperaturvariasjonen blir langt mindre til havs enn over

land. Varme og kalde havstrømmer kan også ha innflytelse på temperatur og nedbør. Havet er hovedkilden for fuktighet, men fuktigheten oppholder seg i atmosfæren relativt kort, og derfor er kystområder preget av mer nedbør enn områder langt fra havet. Forskjellene i temperatur mellom polene og ekvator, og mellom hav og land danner sirkulasjonsmønstre som vestavindsbeltet, passatvinder og monsuner. Disse mønstrene påvirkes også av fjellkjeder og innlandsiser, og er med å definere klima for forskjellige områder (Dannevig & Harstveit 2017).

Drivhuseffekten er avgjørende for at klimaet på jorden er som det er. Uten drivhuseffekten ville verdenshavene vært dekket av is, og store områder ville være for kalde å bo på. På grunn av refleksjon fra snø og is, og absorbering fra skyer og gasser i atmosfæren, blir bare 50% av den korbølgede strålingen fra sola absorbert av jordoverflaten på land og i havet, slik at det varmer opp jordoverflaten. Jordoverflaten sender også energi ut, i form av langbølgede stråler. Disse strålene absorberes av klimagassene i atmosfæren, som igjen sender ut stråling i alle retninger, også tilbake til jorda. Dermed økes temperaturen på jordoverflaten ytterligere (Miljødirektoratet 2016a). Figur 2-1 viser hvordan drivhuseffekten virker i hovedtrekk. De viktigste drivhusgassene er vanndamp ( $H_2O$ ), karbondioksid ( $CO_2$ ), metan ( $CH_4$ ), lystgass ( $N_2O$ ) og ozon ( $O_3$ ) (Fuglestvedt mfl. 2017).



Figur 2-1: Prinsippskisse av drivhuseffekten (Mamen & Benestad 2016).

### 2.1.2 Klima i Norge

Norge er kjent for å være et land langt mot nord, med mye nedbør og relativt lave temperaturer. Norge ligger på samme breddegrader som Alaska, Grønland og Sibir, men har et mye mer levelig klima enn disse områdene. Dette kommer av at Norge ligger i vestavindsbeltet i Atlanterhavet, der Golfstrømmen forsyner kysten med en stor, varm og stabil havstrøm. Siden Norge er et langstrakt land, som strekker seg over 13 breddegrader, finnes det likevel store variasjoner i klimaet i Norge. Dette kommer av variasjoner i solinnstråling gjennom året, og fra nord til sør, samt et terreng som gir store lokale forskjeller. Årsnormalen for lufttemperatur varierer fra ned mot  $-5\text{ °C}$  i innlandet i nord, til opp mot  $9\text{ °C}$  på Sør- og Vestlandet. Havet gjør temperaturen mer jevn langs kysten, mens de høyeste og laveste temperaturene forekommer i innlandet. (Meteorologisk Institutt 2017b). På grunn av den skandinaviske fjellrekken er forskjellen i klima fra kysten til innlandet i øst forsterket (Dannevig & Harstveit 2017).

### 2.1.3 Nedbør

Nedbør er en viktig del av været, og derfor også klimaet, og innebærer vann i flytende eller fast form i atmosfæren, som når bakken. Dette kommer i form av regn, snø eller hagl, og dannes i vannrike skyer med stor vertikal utstrekning, med oppgående luftstrømmer. Luft som stiger utsettes for adiabatisk avkjøling, som kommer av ekspansjon på grunn av trykkfall med høyden (Dannevig 2009). I Norge kan den nedbøren som kommer grovt sett deles inn i tre hovedtyper (Meteorologisk Institutt 2017b):

- Frontnedbør: I skillet mellom kald polarluft fra nord og varmere, fuktig luft fra sør, også kalt polarfronten, utvikles det lavtrykk som danner frontnedbør. Dette skjer ved at den varme luften fra sør tvinges til værs og blir avkjølt, slik at den ikke kan holde på så mye fuktighet lenger. Mesteparten av nedbøren som kommer i Norge kommer av slik frontnedbør.
- Orografisk nedbør: Grunnen til at det er så mye nedbør langs kysten på Vestlandet er at luftmasser kommer innover kysten og tvinges til værs av fjellene, slik at luftmassene avkjøles og nedbør oppstår. Dette kalles orografisk nedbør.
- Bygenedbør: Opptrer for det meste når solskinn varmer opp bakken, slik at luften ved bakkenivå varmes opp og stiger til værs. Dermed avtar trykket, luftmassen avkjøles og nedbør oppstår. Dette skjer lokalt, slik at slike regnbyger kan forekomme over et mindre område, og ha kort varighet. Bygenedbør er mest vanlig i indre strøk og om sommeren. Fordi bygenedbør oppstår lokalt, kan man oppleve store forskjeller i nedbørsmengder innenfor et bestemt område.

Mengden årlig nedbør kan variere mye fra sted til sted. Vestlandet er kjent for mye nedbør, i form av frontnedbør og orografisk nedbør. På Østlandet er det mer vanlig med bygenedbør, siden terrenget beskytter mot de større værsystemene (Meteorologisk Institutt 2017b). Nedbør bestemmes ved hjelp av nedbørmålere som samler opp regn og snø og angis i millimeter vannsøyle, og nedbørsintensitet angis i millimeter per tidsenhet (Dannevig 2009).

#### 2.1.4 Klimaendringer

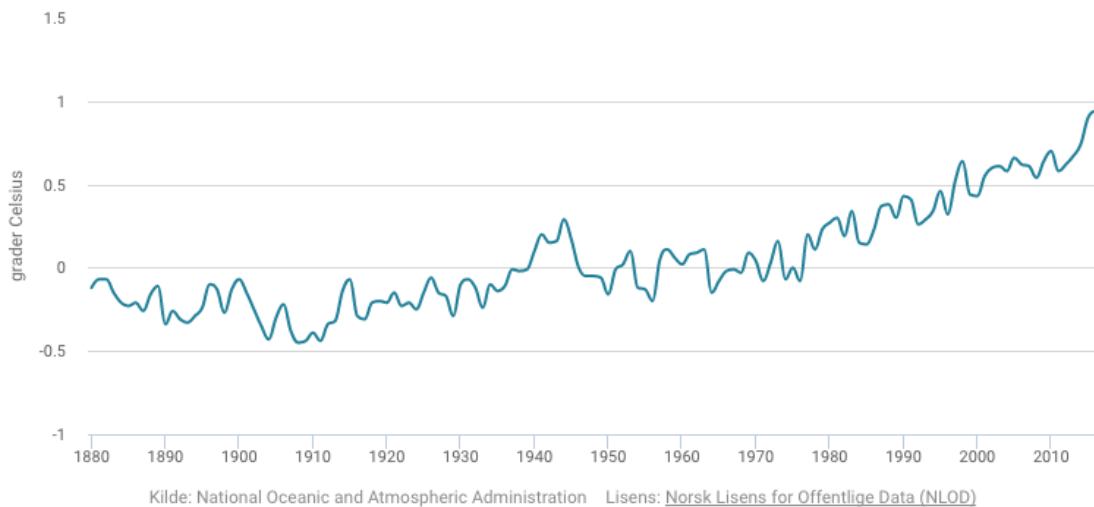
Klimaendringer kan være endring i middelveier av temperatur, nedbør eller vind, eller endringer i hvor ofte ekstremvær inntreffer. Dette er en helt vanlig prosess, og klimaet har endret seg i alle tider, på svært forskjellige tidsskalaer, både globalt, regionalt og lokalt. Årsaker til klimaendringer er delvis naturlige og delvis menneskeskapt. Dette kan være forandringer i innstrålingen av solenergi, mengden av drivhusgasser, partikler og støv i atmosfæren, endringer i havstrømmer, og atmosfærens og jordoverflatens refleksjonsevne. Alle disse endringene kan forekomme naturlig, men menneskelige aktivitet bidrar også til å øke temperaturen i atmosfæren, for eksempel ved at forbruk av fossile brensler øker konsentrasjonen av drivhusgasser i atmosfæren. Andre menneskelige påvirkninger kan være økning i mengden partikler (støv, sot og sulfatpartikler) i atmosfæren, som påvirker refleksjon av solstråler og dannelsen av skyer, eller endring av landareal, som påvirker CO<sub>2</sub>-utslipp til atmosfæren (Fuglestedt mfl. 2017).

Den globale middeltemperaturen har steget med omtrent 0,8 °C siden slutten av 1800-tallet, og mesteparten av dette har funnet sted etter 1950, noe som kan sees i figur 2-2 (Fuglestedt mfl. 2017). Den samme utviklingen ser man i Norge, der man de siste årene har hatt årlige gjennomsnittstemperaturer på opp mot 2,2 °C over normalen (Miljødirektoratet 2017). Dette har sannsynligvis skjedd på grunn av en økning av drivhusgasser i atmosfæren, på grunn av menneskelig aktivitet. Når temperaturen stiger, kan luften holde på mer vanndamp, slik at man får mer fordampning. Dette fører til et økt potensiale for nedbør. Observasjoner viser at hyppigheten av kraftig nedbør øker i takt med økt temperatur og økt innhold av vanndamp i atmosfæren (Fuglestedt mfl. 2017).



## Avvik fra global gjennomsnittstemperatur fra 1880 til 2016

Måles opp mot gjennomsnittet for perioden 1900-1999



Figur 2-2: Graf av avvik fra global gjennomsnittstemperatur fra 1880 til 2016 (Miljødirektoratet 2016b).

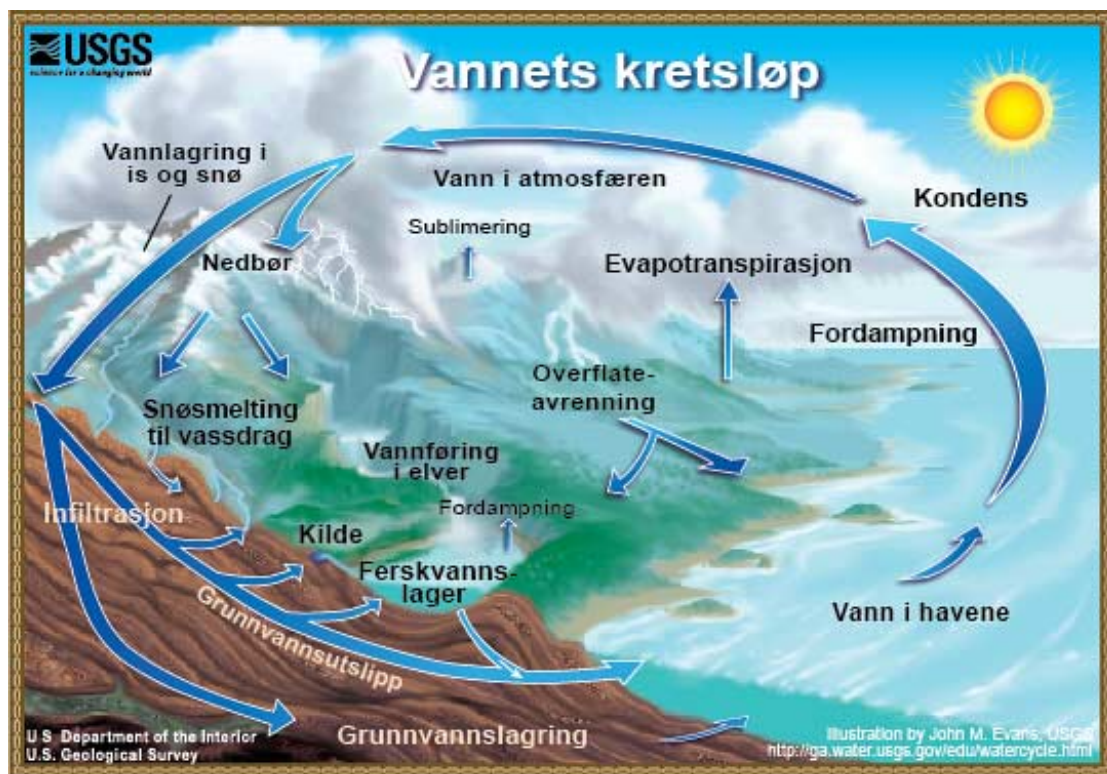
### 2.1.5 Klima i fremtiden

Man benytter gjerne klimamodeller for å forutse mulige klimaendringer i fremtiden. Disse klimamodellene beskriver de fysiske prosessene matematisk, og benytter kraftige datamaskiner til å beregne endringer i klimaet, på grunnlag av variasjonene i alle kjente faktorer som påvirker klimaet. Ved å gjøre antagelser om hvordan de menneskeskapte utslippene vil utvikle seg, kan man beregne hvordan menneskelig aktivitet vil påvirke klimaet fremover. Slik får man et såkalt klimascenario, som ikke er et "klimavarsel", men et eksempel for hvordan et framtidig klima kan se ut. Basert på nedskaleringer av globale modeller kan man komme med en beregning av hva man kan forvente seg av klima i Norge i fremtiden. Temperaturen kan forventes å øke med omtrent 4,5 °C i løpet av dette århundret, dersom klimagassutslippene fortsetter å øke slik de har gjort. Dette vil føre til at årlig nedbør i Norge vil øke om lag 20 % i samme tidsperiode, dobling av dager med kraftig nedbør, og 20 % økning i nedbørintensitet på disse dagene. Denne økningen i nedbørintensitet kan bli enda større for kortere varigheter, anslagsvis 40 % for 3-timers nedbør. Man kan forvente hyppigere tilfeller av ekstreme nedbørshendelser. Klarer man å redusere utslippene kraftig, kan økningen reduseres til 1,5 – 2,5 °C (Fuglestvedt mfl. 2017).

## 2.2 Hydrologi

Hydrologi er grovt sett definert som faget som beskriver og forutsier tilstedeværelsen, sirkulasjonen og distribusjonen av vann på og i jorda, og i atmosfæren. Det hydrologiske kretsløpet innebærer

variasjoner i tid og rom, av vannmengde på jorda, i havet og i atmosfæren. Det er vanlig innen hydrologien å fokusere på landfasen av dette kretsløpet, nemlig vannets bevegelse på og under jordens overflate, og fysiske, kjemiske og biologiske prosesser som påvirker dette (Dingman 2008). I figur 2-3 kan man se vannets kretsløp, fra havet, opp i atmosfæren ved fordampning, ned på jordens overflate som nedbør, og avrenning på overflaten og i grunnvann, tilbake til havet. En del av vannet akkumuleres over tid, i havet, skyer, som snø, i isbreer, innsjøer, eller i grunnvann (Cramer & Gaut 2016).



Figur 2-3: Vannets kretsløp (Cramer & Gaut 2016).

En sentral ligning i hydrologien er bevaringslikningen (Dingman 2008):

$$I - Q = \Delta S$$

Formel 2-1: Bevaringslikningen

der I er mengden vann som kommer inn i et gitt område over en gitt tidsperiode, Q er vannmengden som forsvinner ut av dette området over samme tidsperiode, og  $\Delta S$  er endringen i lagret vann i området i løpet av denne tidsperioden. Siden man som regel tar for seg nedbørsfelt, kan man si at I er nedbør. Q kan være evapotranspirasjon og avrenning i elver, på overflaten, i grunnvannet eller i

menneskeskapte strukturer. Denne likningen kan for et nedbørsfelt skrives om til vannbalanselikningen (Dingman 2008):

$$P + G_{in} - (Q + ET + G_{out}) = \Delta S$$

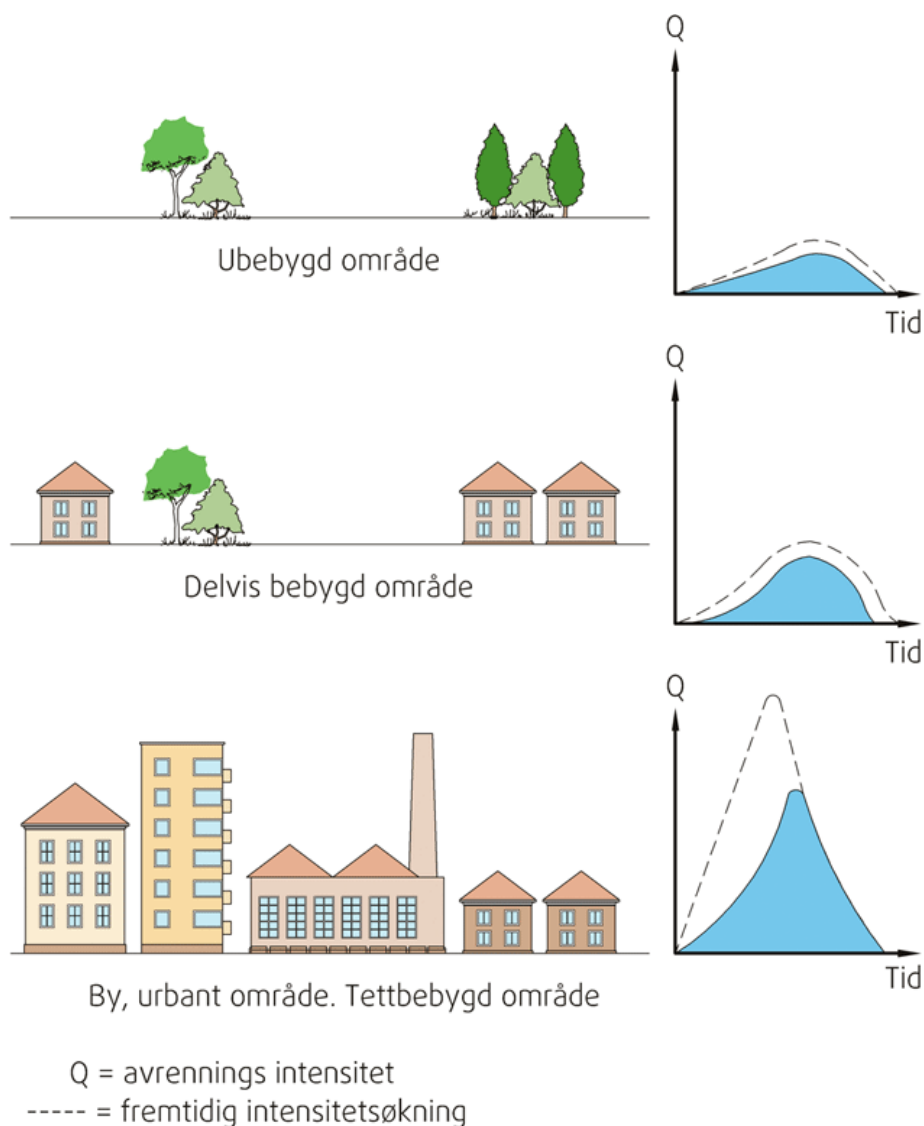
*Formel 2-2: Vannbalanselikningen*

Her er P nedbør (precipitation),  $G_{in}$  grunnvann som renner inn, Q avrenning på overflaten i elver og så videre, ET er evapotranspirasjon,  $G_{out}$  er grunnvann som renner ut, og  $\Delta S$  er endring i lagret vann.  $G_{in}$  er neglisjerbar, siden grunnvannet som regel følger topografien, som definerer nedbørsfeltet. Deler av nedbøren renner altså av på overflaten, noe fordampes og tas opp av vegetasjon, og resten infiltreres ned i bakken og ned i grunnvannet.

### 2.2.1 Urbanhydrologi

Urbanhydrologi er den delen av vannets kretsløp som foregår i urbane omgivelser. Urbanisering (utbygging) øker andelen tette flater i nedbørsfeltet, slik at mindre vann kan infiltrere ned i grunnen eller tas opp av vegetasjon. Dermed vil mer vann renne av på overflaten, og man får større utfordringer med å håndtere overvann under nedbørshendelser. Dette kan resultere i oversvømming av hus, veier og anlegg, setningsskader i hus og anlegg, uttørking av vegetasjon og erosjon. Urbanisering vil også føre til økt påkjenning på resipient, i form av økt volumbelastning og forurensning (NVE 2016).

Overvann er en betegnelse for vann som renner på overflaten som følge av nedbør og smelting (NOU 2015). Fortettingen av flater gjør at en større andel overvann renner av i bybildet og i rør under bakken. På harde flater i byområder og i rørsystemene, vil vannet renne av raskere enn i naturlige vegetasjonsområder. Dermed får man økte avrenningstopper, og flomtopper som oppstår og dør ut raskere ved en nedbørshendelse (Butler & Davies 2004), noe som kan sees i figur 2-4. Som et resultat av dette vil ledningsnettets kapasitet overskrides raskere ved korte og intensive nedbørsbyger. Klimaendringene, med mer nedbør, øker hyppigheten av slike hendelser. Dette fører også til at bakken oftere er mettet med vann, slik at en enda større andel av nedbøren renner av ved overflaten (Lindholm mfl. 2007). Dersom forebyggende tiltak ikke iverksettes, kan man forvente økt skadekostnad på infrastruktur, bebyggelse, helse og miljø fremover (NOU 2015).



Figur 2-4: Urbanisering og effekt på avrennings mengde og intensitet (SINTEF 2012).

## 2.2.2 Overvannshåndtering

På grunn av denne forventningen om økt skadeomfang på grunn av overvann, har overvannshåndtering fått større oppmerksomhet de siste årene. Håndtering av overvann handler om ”å lede bort overvann og drenere grunnen for å unngå fuktskader, oversvømmelser og erosjon, og bidra til innbyggernes komfort” (Lindholm mfl. 2008). Det finnes flere måter å gjøre dette på, tradisjonelt har overvannshåndtering gått ut på å lede overvannet raskest mulig bort i lukkede ledningssystemer. Meningen med dette var å gi gode urbane miljøer og sikkerhet mot oversvømmelser, men fører ofte til (Ødegaard 2014):

- Økt overvannsavrenning, både i mengde og intensitet
- Fare for erosjon på grunn av økt vannhastighet

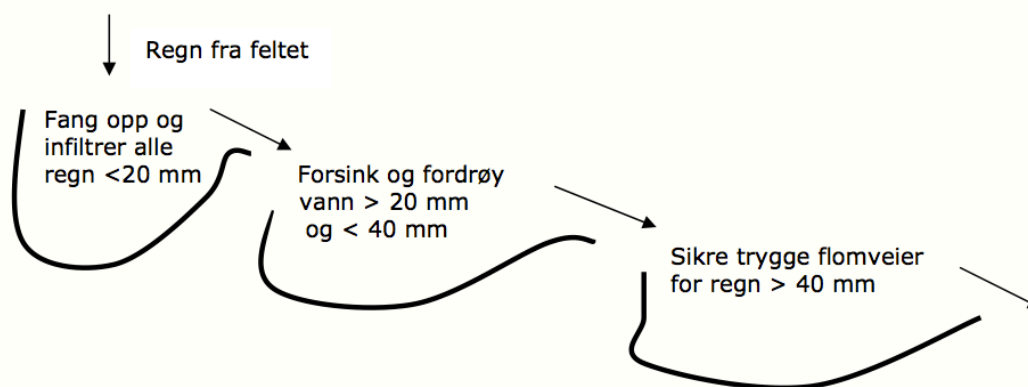
- Senkning av grunnvannstand og skader på vegetasjon og konstruksjoner
- Utslipp av forurensninger i overvannet
- Reduksjon av biologisk mangfold

Urbanisering vil føre til overbelastning av tradisjonelle overvannssystemer, og gir behov for en mer framtidsrettet og bærekraftig overvannshåndtering, ved å opprettholde den naturlige vannbalansen i området i størst mulig grad. Slike moderne tiltak kalles lokal overvannsdiskonering (LOD), og går ut på å la vannet finne naturlige veier som infiltrasjon, eller avrenning via åpne vannveier og dammer (Ødegaard 2014). En strategi som er utviklet av Lindholm med fler (2008) er en såkalt treleddsstrategi, som er illustrert i figur 2-5, og består av følgende tre ledd:

1. Infiltrer eller holde tilbake en mindre nedbørsmengde bestående av et visst antall millimeter.
2. Ved en større nedbørshendelse skal vannet forsinkes og fordrøyes i åpne anlegg.
3. Ved ekstreme nedbørsmengder må vannet kunne ledes videre i åpne flomveier som kan avlede disse sjeldne hendelsene på en trygg måte.

Tiltak som passer inn i en LOD-tankegang kan være for eksempel infiltrasjon ved hjelp av grønne arealer eller porøse dekker, naturlig fordrøyning i dammer og kulper, eller konstruerte fordrøyningsmagasiner. Potensielt trygge flomveier i form av eksisterende konstruksjoner (veier osv) må tilpasses og sikres, slik at minst mulig skade oppstår (Ødegaard 2014).

Overvann i urbane områder inneholder gjerne tungmetaller, organiske miljøgifter, polyaromatiske hydrokarboner (PAH) og polyklorerte bifenyler (PCB), som kommer fra atmosfærisk nedfall, avgasser fra kjøretøy og maskiner, fyring og forbrenning av organisk stoff, produktrester, og nedslitning og korrosjon av kjøretøy, bygninger og andre konstruksjoner. Det er typisk mest av dette i starten av et regnskyll, dette kalles gjerne "first flush" (Ødegaard 2014).



Figur 2-5: Prinsippskisse av treleddsstrategien (Lindholm mfl. 2008).

## 2.3 Avløp

Avløpsvann fra bolighus, institusjoner og bedrifter inneholder mye forskjellige stoffer som kan forurense de naturlige vannforekomstene både lokalt og i større skala. Det er derfor viktig å ha et sett med lover og forskrifter som sørger for tilstrekkelig rensing av avløpsvann før det slipper ut i resipienten. Disse finnes i både nasjonal og internasjonal sammenheng, og er noe alle eiere av avløpsrenseanlegg må forholde seg til (Ødegaard 2014). Forurensningsloven, og den tilhørende forurensningsforskriften, tar for seg alle anlegg som samler opp, transporterer og behandler sanitært og industrielt avløpsvann, og overvann (Lovdata 1981). Forurensningsforskriften stiller konkrete krav til innholdet i utslippsvannet, der de viktigste parameterne er BOF<sub>5</sub> (Biologisk Oksygenforbruk), KOF (Kjemisk Oksygenforbruk), SS (Suspendert Stoff), Tot-P (Total Fosfor) og Tot-N (Total Nitrogen). Det kreves også at landet deles inn i følsomme, mindre følsomme og normale områder, ut ifra hva slags resipient utslippet går til. Følsomme områder kan være eutrofe vannforekomster eller vannforekomster som risikerer å bli det, drikkevannskilder eller områder der det er nødvendig med ytterligere rensing for å tilfredsstille kravene. Mindre følsomme områder er kystområder der utslipp av avløpsvann ikke har påvirkning på miljøet. Normale områder er ferskvannforekomster ellers i Norge, som ikke er ansett som følsomme. Ut fra hvilken type resipient det er i de aktuelle områdene, har man da konkrete krav for utslipp av nevnte parametere for utslipp av kommunalt avløpsvann. Kravene for utslipp til ferskvann for mer enn 2000 personekvivalenter og utslipp til sjø for mer enn 10000 personekvivalenter kan sees i tabell 2-1 (Lovdata 2005).

Tabell 2-1: krav til utslipp til forskjellige typer resipienter,

	Følsomt område	Normalt område	Mindre følsomt område	
			Sjø	Elvemunning
BOF <sub>5</sub>	70 % eller <25 mg O <sub>2</sub> /L	70 % eller <25 mg O <sub>2</sub> /L	70 % eller <25 mg O <sub>2</sub> /L	70 % eller <25 mg O <sub>2</sub> /L
KOF	75 % eller <125 mg O <sub>2</sub> /L	75 % eller <125 mg O <sub>2</sub> /L	75 % eller <125 mg O <sub>2</sub> /L	75 % eller <125 mg O <sub>2</sub> /L
Tot-P	90%	90%		90%
Tot-N	70 % (dersom området har spesielt krav til dette)			

Som regel er det kommunen som har ansvar for håndtering av avløpsvann, og dette delkapittelet tar for seg hvordan dette gjøres, og hvilke hensyn som må tas.

### 2.3.1 Avløpsvann

Siden avløpsvann kommer fra en rekke forskjellige kilder, varierer mengde og sammensetning av avløpsvann i kommunale ledninger veldig. Fra sted til sted varierer det hvor mye vann som tilføres ledningsnettets fra de forskjellige kildene. Denne sammensetningen kan bestå av følgende vanntyper (Ødegaard 2014):

- Spillvann ( $Q_s$ ): sanitært avløpsvann fra husholdninger, institusjoner og arbeidsplasser. Alminnelig avløpsvann fra husholdninger (do, bad, matlaging, vask), og tilsvarende fra institusjoner, sykehus, skoler, industrier og så videre.
- Industriavløp ( $Q_{ind}$ ): Industrielt avløpsvann i forbindelse med industriprosesser.
- Overvann ( $Q_o$ ): Entrer ledningsnettets via sluk i gårdsplasser, gater og så videre. Transporteres i overvannsledning eller med spillvann i fellesledning.
- Fremmedvann ( $Q_i$ ): infiltrasjons- og innlekkingsvann fra nedbør og grunnvann via for eksempel feilkobling av sluk, taknedløp, eller sprekker i ledningen.
- Overløpsvann ( $Q_{ov}$ ): vann som går i overløp for å hindre oppstuvning og oversvømmelse eller overbelastning av renseanlegget. Dette vil forklares i eget avsnitt senere.

Mengde og sammensetning av avløpsvannet er altså avhengig av hvilke av disse vanntypene som dominerer, og hva slags tilstand ledningsnettets er i.

### 2.3.2 Avløpsrenseanlegget

Avløpsrenseanlegget har som rolle å forhindre forurensning av resipienten ved å ta i mot alt avløpsvann fra det kommunale ledningsnettets, og rense dette for å tilfredsstille de gjeldende krav, før det slippes ut. Avløpsrenseanlegg er prosessanlegg som består av biologiske, kjemiske og fysiske renseprosesser. Oppbygningen av disse prosessene avhenger av de gjeldende rensekrav for området, men består hovedsakelig av tanker, eller rensereaktorer, der stoffet i vannet omdannes til et slam, som må separeres fra vannet før det slippes ut. Dette slammet behandles videre og kan sees på som en ressurs, som inneholder næringsstoffer og energipotensiale som kan utnyttes. Det rensede avløpsvannet må så slippes ut i resipienten etter rensing på en forsvarlig måte, for å få en størst mulig fortykningseffekt, slik at vannkvaliteten på utslippsstedet nærmer seg vannkvaliteten ellers i resipienten raskest mulig (Ødegaard 2014). Når klimaforandringene fører til økt andel hydraulisk

maksimalbelastning av renseanlegget, vil dette føre til større utslipp. Økt totalt volum, på grunn av klimaforandringer og urbanisering, inn til renseanlegget gir også økt totalt utslipp, siden utslippet har en minimumskonsentrasjon man ikke kommer under (Lindholm mfl. 2007).

For å kunne ha en tilstrekkelig renseprosess, må man ha kjennskap til mengde og sammensetning i avløpsvannet, og hvordan dette varierer gjennom døgnet og gjennom året. Dette påvirker den hydrauliske belastningen og forurensningsbelastningen på renseanlegget, som er avgjørende for om renseanlegget klarer å fungere optimalt og innenfor rensekravene. Et renseanleggs utforming og størrelse er basert på dimensjonerende vannmengder og dimensjonerende stoffmengder (Ødegaard 2014). For hydraulisk dimensjonering opererer man med følgende definisjoner for dimensjonerende vannmengder (Ødegaard mfl. 2009):

- Dimensjonerende tilrenning ( $Q_{dim}$ ): Den maksimale timetilrenning som overskrides i 50% av årets døgn.
- Maksimal dimensjonerende tilrenning ( $Q_{maksdim}$ ): Den største timetilrenning anlegget skal kunne håndtere. Beregnes ut fra krav for hvor stor andel av total tilrenning anlegget skal klare å håndtere.

Disse definisjonene har benevnningen  $m^3/t$ , og bestemmes ut fra enten målinger eller overslagsberegninger.

Ved å utjevne variasjonene gjennom døgnet og belastningstopper under regnhendelser, vil man kunne redusere disse verdiene. Ved  $Q_{maksdim}$  skal renseanlegget ha en akseptabel funksjon, men man kan tillate seg relativt liten sikkerhetsmargin, siden belastning av denne størrelse vil opptre kun en liten del av driftstiden. Ved  $Q_{dim}$  skal renseanlegget ha en god funksjon, med en betydelig sikkerhetsmargin (Ødegaard mfl. 2009). Når disse verdiene er satt for et gitt renseanlegg, vil tiltak for utjevning av døgnvariasjoner og flomtopper sørge for god rensing en større andel av tiden.

### 2.3.3 Avløpsnett

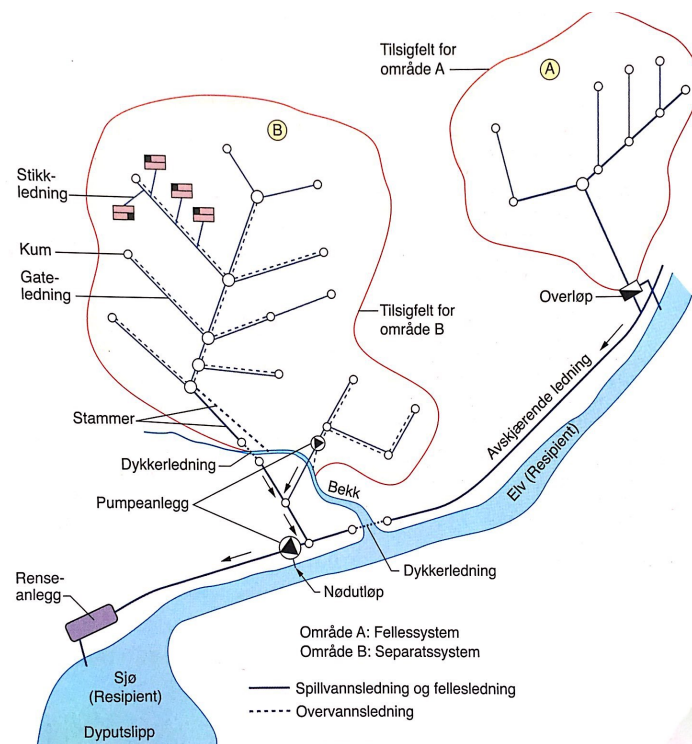
Avløpsnettets rolle er å samle opp avløpsvann fra tidligere nevnte kilder, og transportere dette via ledninger eller tunneler til renseanlegget før utslipp. I figur 2-6 kan man se en enkel skisse av et avløpsnett, med de viktigste elementene. Avløpsledningene skal være korrekt dimensjonert for å ha tilstrekkelig kapasitet, der det er tatt hensyn til variasjon i mengde og kvalitet på avløpsvannet. I dimensjoneringen må man ta med i betraktningen at infiltrasjonsvann og fremmedvann er en del av



avløpsvannet. Avløpsnettets består av ledningsanlegg, fordrøyningsanlegg, overløp og pumpesystemer, disse vil omhandles i de neste avsnittene (Ødegaard 2014).

Det finnes to ulike typer avløpssystem, separat- og fellesavløpssystem. Separatavløpssystem har separate ledninger for spillvann og overvann, mens fellesavløpssystem har et felles avløpssystem for både spillvann og overvann (Lindholm mfl. 2012). I et separatsystem vil spillvannet ledes til rensenanlegget, mens overvann, som ikke trenger rensing i samme grad, som regel blir sluppet ut direkte i resipient. Slik får man avløpsvann med høyere konsentrasjon av stoffer, som gjør det lettere for rensenanlegget å fjerne disse (Ødegaard 2014). Tradisjonelt sett har fellessystem blitt brukt, men nå til dags er retningslinjene at separatsystem skal velges (Lindholm mfl. 2012). Siden ledningsnettets gradvis fornyes over tid og det derfor er mye eldre avløpsledninger i nettet, er det vanlig med en kombinasjon av separatavløpssystem og fellesavløpssystem i kommunale ledningsnett (Ødegaard 2014).

Overvann bør i størst mulig grad håndteres på overflaten i form av LOD-tiltak før det entrer avløpsnettets, slik at overvannsledningen kan anvendes minst mulig, eller eventuelt sløyfes helt. Det overvannet som entrer systemet skal håndteres på en forsvarlig måte ved lokale fordrøyningsløsninger, infiltrasjonsløsninger eller ved hjelp av tradisjonelle overvannsledninger (Lindholm mfl. 2012).



Figur 2-6: Eksempel på en enkel framstilling av et kommunalt avløpsnett (Ødegaard 2014).

### 2.3.4 Ledningsanlegget

Ledningsanlegget består av ledninger og kummer, som danner en kontinuerlig forbindelse mellom bruker og renseanlegget, og videre ut i resipienten. Mesteparten av ledningene er selvfallsledninger med fritt vannspeil. I tillegg er det trykkledninger i form av dykkerledninger, avløpsumpeledninger og utslippsledninger. Selvfallsledninger kan også bli satt under trykk ved ekstrem belastning (Ødegaard 2014). Selvfall, med selvrensing, bør tilstrebes i størst mulig grad, og ledningsnettets bør ha minst mulig inn og utlekking (Lindholm mfl. 2012). Dykkerledninger utnytter høydeforskjellen mellom innløp og utløp, slik at vannet transporteres med selvfall i en ledning som går full, og derfor kan betraktes som en trykkledning. Slike ledninger brukes gjerne ved kryssing av dalsenkninger og elver. Pumpeledninger transporterer vann som pumpes fra et sted til et annet, der hvor selvfall ikke er mulig. Det er også mulig å bygge avløpstunneler i fjell, når man ønsker å transportere større mengder over lenger avstander. Når disse har tilstrekkelig fall, har man selvfall, og man slipper lange pumpeledninger med tilhørende friksjonstap (Ødegaard 2014).

For å beregne volumstrøm i rørsystemet, løser man gjerne Saint Venant-likninger, som gir grunnlag for å simulere rørstrømming, tilbakeslag i ledninger, oppstuvning i kummer, åpne kanaler, fordrøyningsbassenger, fritt vannspeil, tidevannspåvirkning og vann under trykk. Saint Venant-likningene er to likninger definert slik (DHI 2016a):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

*Formel 2-3: Kontinuitetslikningen.*

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \alpha \frac{Q^2}{A} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(I_0 - I_f)$$

*Formel 2-4: Momentlikningen*

Her er Q vannføring ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), A strømningsstverrsnitt ( $\text{m}^2$ ), y vanndybde (m), g gravitasjonskonstanten ( $\text{m}/\text{s}^2$ ), x vannføring (m), t tid (s),  $\alpha$  hastighetsdistribusjonskoeffisient,  $I_0$  bunnhelning og  $I_f$  friksjonshelning.

### 2.3.4 Overløp

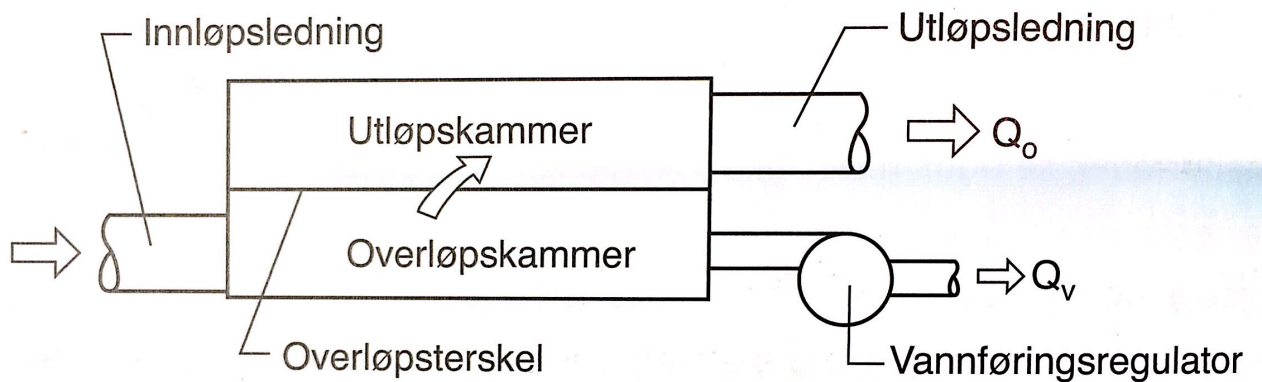
For å hindre oversvømmelser og overbelastning av nedstrøms ledningsnett og renseanlegget under regn og snøsmelting, må det installeres overløp på strategiske steder på ledningsnettets (Aaby &

Lindholm 2008). Dette er gjerne på steder der en ledning for et område slutter seg til en større ledning, i forbindelse med en pumpestasjon, eller ved innløpet til renseanlegget. Dette vannet kan inneholde mye forurensning og blir som regel ikke rensset før utslipp. Det er viktig at overløpsledningene som transporterer dette vannet er riktig dimensjonert, for å unngå urbane flommer. Overløp som er lagt ved innløpet til renseanlegg har gjerne som rolle å ta unna belastninger over renseanleggets  $Q_{maksdim}$ . Foran pumpestasjoner brukes overløp for å ta unna det vannet pumpene ikke klarer å ta unna, og som en nødløsning ved pumpestopp (Ødegaard 2014). Lindholm mfl. (2008) slår fast at overløp og utslipp av overløp ikke har vært prioritert i Norge.

Vann i fellessystem som går i overløp er avløpsvann fortynt med overvann (Ødegaard 2014). Råkloakk renner ubehandlet via overløpssystemet og ut i havneområder, strender og byvassdrag under hendelser med kraftig regn, og vil da inneholde forurensninger som kan være en vesentlig del av belastningen på resipienten (Lindholm mfl. 2007). Derfor bør overløp utformes og dimensjoneres riktig, for at minst mulig vann skal gå i overløp, og mest mulig videreføres til renseanlegget (Ødegaard 2014). Både økt regnvarighet og regnintensitet gir en progressiv økning i overløpsutslipp i fellessystemer, noe klimaforandringene vil føre til. Det er vist eksempler på at en økning i nedbør på 20 % kan gi en fordobling av overløpsmengde (Lindholm mfl. 2007).

Figur 2-7 viser utformingen av en type overløp der vannet kommer via innløpsledningen inn i et overløpskammer. Derfra ledes vannet videre mot renseanlegget via en vannføringsregulator som sørger for en maksimalt videreført volumstrøm. Når volumstrømmen ved innløpet overstiger dette, vil overløpskammeret fylles opp, og vann vil etterhvert renne over overløpskanten, og ned i utløpskammeret og videre til utløp. Vannføringsregulatoren har en avgjørende rolle, siden den bestemmer under hvilken volumstrøm man skal ha overløp. Det finnes forskjellige typer vannføringsregulatorer men de vanlige typene er strupet utløp, strupeledning, virvelkammer, pumpestasjoner og automatiske ventiler (Ødegaard 2014).

Som prinsipp kan man si at vann ikke skal gå i overløp så lenge det er ledig kapasitet i ledningsnettets eller i renseanlegget.



Figur 2-7: Prinsippskisse av utformingen og virkemåten til et ensidig høykantet sideoverløp (Ødegaard 2014).

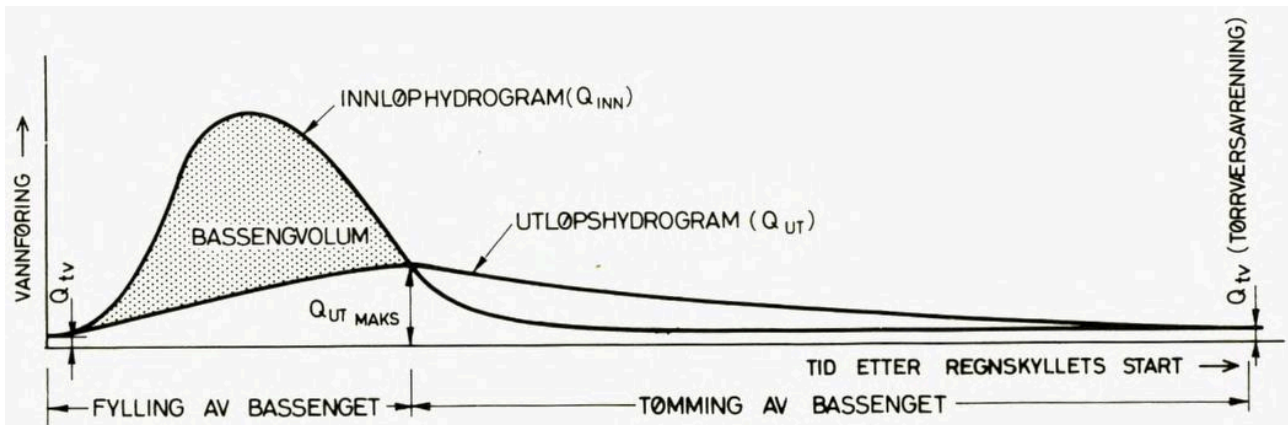
### 2.3.5 Fordrøyning

Fordrøyingsbassenger, eller fordrøyingsmagasin, kan brukes til fordrøyning, det vil si å holde igjen vann, for å utjevne varierende vannføringer i et avløpsnett. Denne variasjonen er spesielt stor i ledninger som fører overvann, og fordrøyingsbasseng brukes derfor vanligvis kun i fellessystem. De kan også benyttes like før renseanlegget i et spillvannssystem, eller i overvannsledning dersom rensing av overvann er nødvendig. Fordrøyingsbasseng gir følgende fordeler i et avløpsnett (Mosevoll 1975):

- Nedstrøms ledninger og pumpestasjoner kan dimensjoneres for lavere vannføring.
- Man kan unngå overbelastning på eksisterende ledninger nedstrøms.
- Mindre vann vil gå i overløp nedstrøms under regnhendelser.
- Man kan redusere det totale utslippet av forurensninger fra avløpssystemet.
- Man får jevnere vannføring i utslippsledningen, noe som gir bedre muligheter for stabil lagring i resipient.

Oppsummert kan man si at fordrøyingsbassenget har som oppgave å jevne ut vannføring, og redusere forurensning av resipienten. Bassengets evne til å utjevne vannføringen avhenger av tilrenningen, bassengets volum og vannføringen ut av bassenget (Mosevoll 1975). Fordrøyning kan også foregå i selve ledningsnett, i ledninger som har ledig kapasitet under flomtopper (Ødegaard 2014).

Figur 2-8 viser effekten et fungerende fordrøyningsbasseng har på variasjonen i vannføringen, der man ser forskjellen på vannføringen i innløpet og utløpet av bassenget under og etter en regnhendelse.



Figur 2-8: Innløps- og utløpshydrografer for et fordrøyningsbasseng som jevner ut hele avrenningen fra en regnhendelse (Mosevoll 1975).

Selve bassenget utstyres med et overløp, som tar unna de største flomtoppene som bassenget ikke kan håndtere. Fordrøyningsbasseng kan være med eller uten gjennomstrømning. Gjennomstrømning vil si at det er et overløp i selve bassenget, og ikke bare i innløpet. I et basseng med gjennomstrømning har vannet en viss oppholdstid i bassenget, slik at vannet som går i overløp har gjennomgått en viss rensing ved sedimentering. Bassenget skal dimensjoneres for å kunne ta unna for regnhendelser av en gitt hyppighet og varighet (Ødegaard 2014).

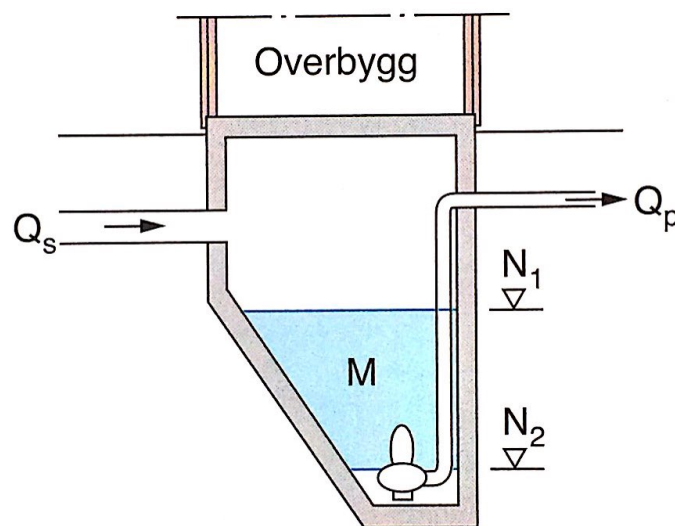
### 2.3.6 Pumper

Avløpspumper kan brukes overalt på avløpsnett for å transportere avløpsvann fra brukere, via transportsystemet og renseanlegget, og til utslipp. Det kan være aktuelt med ei pumpe i følgende situasjoner (Ødegaard 2014):

- Dersom flatt terreng eller lavtliggende bebyggelse gjør at selvfall ikke er mulig.
- Dersom avløpsfeltet ligger utenfor vannskillet til det tilhørende rensedistriktet.
- Dersom selvfall blir vanskelig og kostbart på grunn av terreng- og grunnforhold.
- Dersom private avløpsanlegg ligger lavere enn ledningssystemet i området, eller høyeste oppstuvningsnivå.
- Dersom bassenger, tanker, slamavskillere etc. ikke kan tømmes med selvfall.
- Dersom avløpsvannets hastighet må økes for å oppnå selvrensing.

Pumpestasjoner krever energi, jevnlig tilsyn og vedlikehold, og man prøver derfor å unngå eller minimalisere bruken av pumpestasjoner. En pumpestasjon består av en eller flere pumper, en pumpekum/pumpesump, et overbygg, innløp fra selvføllsledninger og utløp til pumpeledning. Pumpestasjonen og pumpeledningen skal betraktes som et helhetlig trykksystem, og behandles samlet (Ødegaard 2014). Et eksempel på utformingen av en pumpestasjon kan sees i figur 2-9.

Ei avløpspumpe vil ha en rimelig konstant volumstrøm, og denne volumstrømmen er dimensjonert for maksimal innkommende vannmengde. Pumpa vil styres av nivået i pumpesumpa. Når pumpa står stille, kan man se for seg at pumpesumpa fylles opp gradvis av innkommende avløpsvann. I det vannet nærmer seg det maksimale nivået i sumpa og når et forhåndsbestemt nivå  $N_1$ , vil pumpa starte. Dersom pumpa har en høyere volumstrøm enn den innkommende avløpsstrømmen, vil nivået i sumpen senke seg. Når nivået er ved  $N_2$ , som er en forhåndsbestemt høyde, vil pumpa stoppe. Slik får man en syklus med start og stopp av pumpa. Ved nivå  $N_1$  har man et volum  $M$ , som representerer det nødvendige magasinet for pumpesumpa. Dette magasinet fungerer som et fordrøyningsbasseng. Ei pumpesump kan gjerne bestå av flere pumper, som fungerer i parallell (Ødegaard 2014). Disse har gjerne forskjellig  $N_1$  og  $N_2$ , slik at de overlapper. Dermed kan den andre pumpa settes i gang, dersom den første pumpa ikke klarer å ta unna den innkommende volumstrømmen slik at nivået fortsetter å stige.



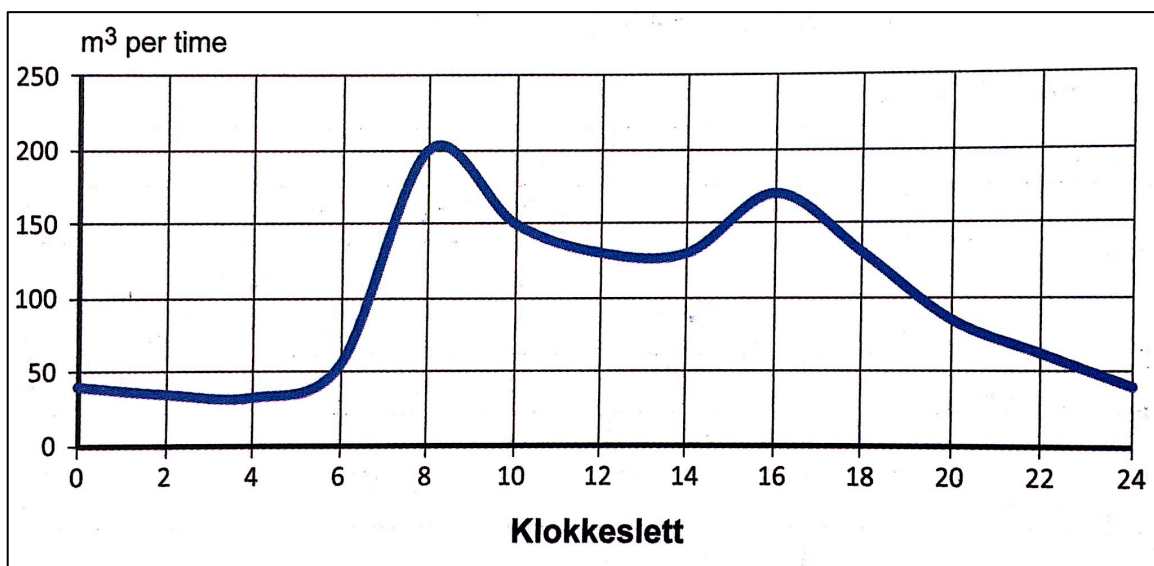
- $Q_s$  = spillvannstilrenning varierer
- $Q_p$  = pumpekapasitet konstant
- $M$  = nødvendig magasin for pumpesump
- $N_1$  = vannivå ved start av pumpa
- $N_2$  = vannivå ved stopp av pumpa

Figur 2-9: Prinsippkisse av ei pumpesump (Ødegaard 2014).

### 2.3.7 Variasjoner i avløpsvann gjennom døgnet og året

Vannforbruket, og dermed tilførsel av spillvann varierer fra døgn til døgn, og gjennom døgnet. Man må kjenne til maksimal og midlere spillvannsføring for å dimensjonere ledningsnett. Gjennom døgnet varierer spillvannsføringen i takt med menneskers døgnrutiner, og det er derfor lite avrenning om natten, og mest på morgenen og på ettermiddagen. Dermed har man en ganske fast døgnrytme for endringen i spillvannsføring. Figur 2-10 gir et eksempel på forbruksvariasjonene gjennom døgnet for husholdninger, noe som reflekter variasjoner i spillvann. Siden denne typen avløpsvann er uavhengig av værhendelser, kalles dette gjerne tørrværsavrenning (Ødegaard 2014).

Store deler av overvannet ledes inn i avløpsnett, for å unngå urbane flommer. Overvann er knyttet til nedbør og snøsmelting, og varierer derfor veldig fra døgn til døgn gjennom året, ved å følge samme syklus som snøsmelting og nedbørsvariasjoner. Dermed må man finne den nedbørintensiteten man ønsker å dimensjonere for, og gjøre beregninger av hvor mye overvann dette vil tilføre avløpsnett, og dimensjonere deretter (Ødegaard 2014).



Figur 2-10: Eksempel på forbruksvariasjon gjennom et døgn (Ødegaard 2014).

Industrielt avløpsvann varierer i takt med driften på den aktuelle industrien, som kan variere fra full 24 timers drift, til kun dagtid. Mengden fremmedvann som entrer avløpssystemet antas å være sterkt undervurdert, men kan antas å være relativt konstant, siden den avhenger av stabile forhold som ledningsnettets tilstand og grunnvannsnivå. Likevel kan man forvente en økning i innlekkingsvann under nedbørshendelser og i smeltesesongen (Ødegaard 2014).

De store volumstrømmene i ledningsnettene kan man forvente å få under nedbørshendelser, der overvann og innlekking kan sørge for at volumstrømmen mangedobles. Derfor er det interessant å se på nedbørshendelser når man skal undersøke kapasiteten i et ledningsnett.

## 2.4 Drammen Kommune

Drammen Kommune befinner seg i Buskerud fylke, og hadde 68 300 innbyggere i september (Drammen Kommune 2017). Figur 2-11 viser et kart av kommunen. 98 % av Drammens innbyggere er koblet opp til det kommunale ledningsnettene. Som en av ni kommuner i Drammensregionen, har Drammen kommune som mål å utvikle Norges ledende vannmiljøregion. Dette skal gjøres ved å se på vannforsyning og avløpshåndtering som en del av en helhetlig vannforvaltning. I denne planen er badevannskvalitet nevnt som en prioritet, i tillegg til å tilfredsstille kravene for utslipp i EUs vannressursdirektiv. Hovedutfordringene for avløpshåndteringen i regionen er stor andel lekkasjevann inn på ledningsnettene, overvann fra nedbør inn på fellesledninger, og oversvømmelser og vannskader ved ekstremnedbør (Godt Vann 2010). Avløpsnettene i Drammen består av to rensedistrikt med totalt 335 km med spillvannsledninger og 189 km med separate overvannsledninger (Vári 2017), som transporterer avløpsvannet til henholdsvis Muusøya RA og Solumstrand RA. Muusøya RA slipper det rensede avløpsvannet ut i Drammenselva, mens Solumstrand RA har utslippet sitt i Drammensfjorden. Dette delkapittelet går gjennom forholdene i Drammen Kommune, når det gjelder oppsamling, transport, rensing og utslipp av avløpsvann.

### 2.4.1 Utslippskrav

Drammen kommune har som krav å ikke slippe ut mer enn 5,5 tonn fosfor per år i resipienten, der det overordnede målet er å oppnå god og stabil badevannskvalitet. Dette er fordelt på 1,04 tonn i Drammenselva (fra Muusøya) og 4,45 tonn per år i Drammensfjorden (fra Solumstrand). Dette tilsvarer et krav om 95 % reduksjon av fosfor for Muusøya RA, og 90 % for Solumstrand. I tillegg har renseanleggene krav om å fjerne organisk stoff med minst 70 % BOF<sub>5</sub> (biologisk oksygenforbruk) og 75 % KOF<sub>5</sub> (kjemisk oksygenforbruk). Kommunen kan tillate seg et tap på 5 % av avløpsvannet i form av overløp og utlekking (Moum 2005). For kommunen sin del beregnes mengden fosfor som slippes ut ved å se på avløpsvolumet som slippes ut, og konsentrasjonen av fosfor i dette.





Figur 2-11: Kart over Drammen kommune, hentet fra modell.

## 2.4.2 Resipienten

Muusøya RA slipper ut renset avløpsvann i Drammenselva. Det er krav om at Drammenselva skal være egnet til friluftsbading, rekreasjon og fritidsfiske. Tidligere har elva vært mindre egnet for friluftsbading og rekreasjon på grunn av mindre god og dårlig vannkvalitet med hensyn på tarmbakterier (Moum 2005). Dette gjelder også i nyere rapporter (Tian 2016).

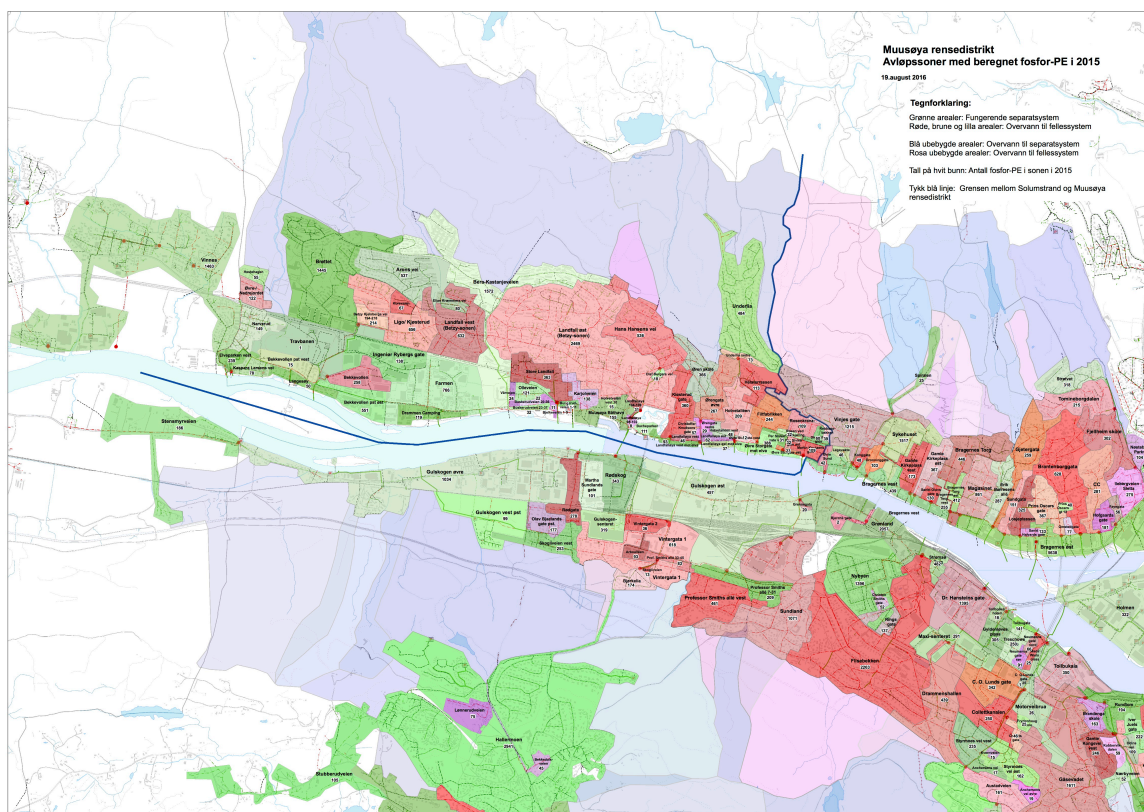
Solumstrand RA har sitt utslipp i Drammensfjorden (innenfor Svelvik). Her er det problemer knyttet til oksygenmangel i dyplagene, noe som er naturlig på grunn av en utpreget terskeeffekt, som gir begrenset utskiftning. Det har også vært dårlig vannkvalitet ved badeplasser i forhold til bakterier (Moum 2005).

### 2.4.3 Nedbør i Drammen

Meteorologisk Institutt har nedbørsdata for Drammen helt tilbake til år 1900. Statistikk for dette viser at 2014 hadde 16 % mer nedbør enn normalen (gjennomsnitt for 1961-1990), og er det året med 9. mest nedbør i måleperioden. Det er det mest nedbørrike året siden 2011. Dette er riktignok i tråd med klimaforandringer som bidrar til økt temperatur og nedbør. Verdt å merke seg er at oktober måned hadde 73 % mer regn enn normalt for denne måneden. Det kom også 89 % mer nedbør enn vanlig på vinteren, noe som vil ha gitt mye smelting på våren (Meteorologisk Institutt 2017c).

### 2.4.4 Muusøya renseanlegg og rensedistrikt

Muusøya rensedistrikt hadde omtrent 17 500 bosatte i 2015, hvorav drøyt 15 000 pe var tilknyttet ledningsnett (Tian 2016). Området er avgrenset i vest mot kommunegrensen mot Nedre Eiker, Drammenselva i sør, marka i nord og ved Øvre Sund i øst (Rosim AS 2011). Renseanlegget har en kapasitet på rensing av BOF<sub>5</sub> på 33 000 pe (Tian 2016).  $Q_{dim}$  er på 780 m<sup>3</sup>/time, og  $Q_{maksdim}$  er på 1200 m<sup>3</sup>/time (Olsbu 2017b). I 2015 var renseseffekten for fosfor 93 %, noe som er under kravet på 95 %, og renseanlegget holdt heller ikke kravet til totalutslipp av fosfor. Kravet for fjerning av KOF og BOF vil ikke tre i kraft før en vesentlig endring av anlegget. I løpet av 2015 ble 3 860 000 m<sup>3</sup> avløpsvann behandlet, og det ble registrert 167 185 m<sup>3</sup> i overløp (Tian 2016). Det ble beregnet et utslipp av fosfor gjennom overløp på 0,44 tonn (Olsbu 2017a), noe som bidrar til at Muusøya rensedistrikt overstiger kravene for utslipp av fosfor. Det er beregnet et teoretisk tap på ledningsnett i form av utlekking og overløp på 23 %, noe som er langt over kravet på 5 % (Tian 2016). Ledningsnett består av 31 % fellesledninger, 28 % spillvannsledninger, 37 % overvannsledninger, 2 % overløpsledninger, 1 % dren, og 2 % ikke kategorisert (pumpespillvann, tunnelspillvann, kanalovervann, overløpsovervann) (Vári 2017).



Figur 2-12: Kart over Muusøya rensedistrikt med avløpssoner (Olsbu 2017a).

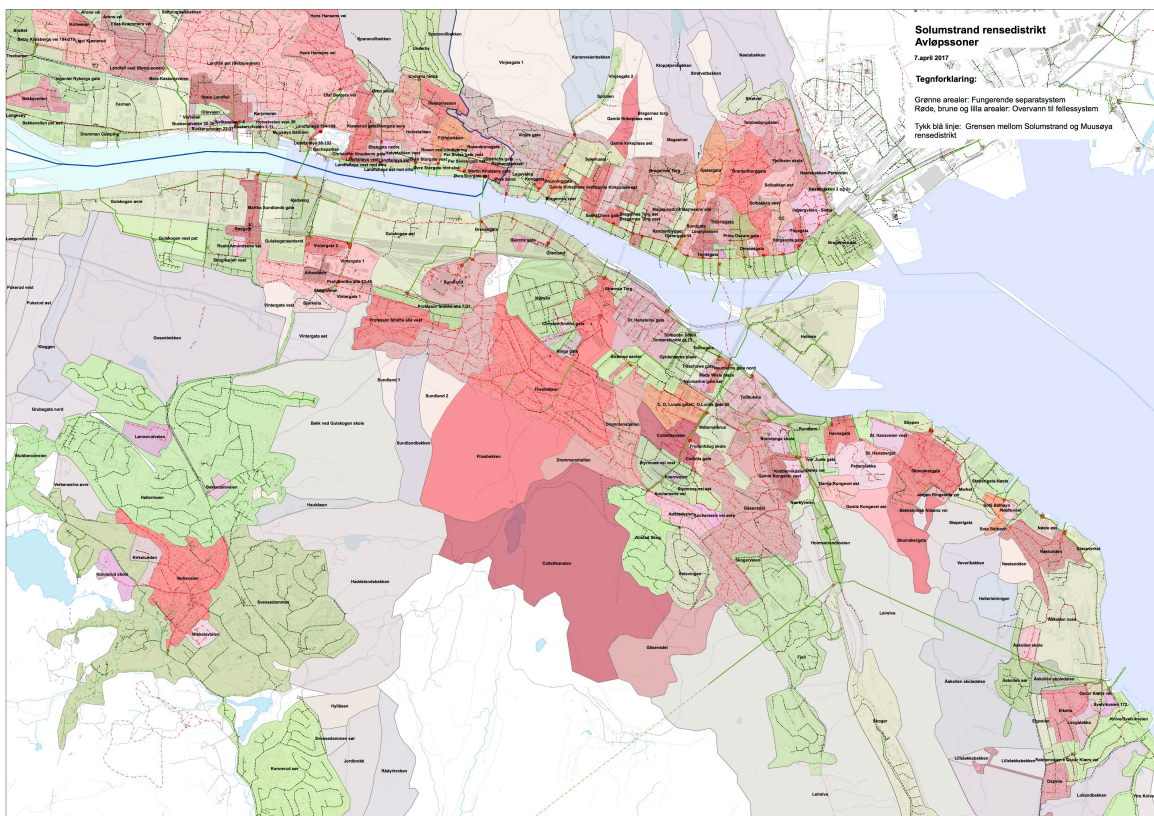
Det såkalte Landfalloverløpet, lokalisert like øst for Muusøya RA, sørger for omtrent halvparten av overløpsutslippet i rensedistriktet (Mølmen 2017a). Ledningene som leder til Landfalloverløpet består av 80 % fellesledning, 8 % spillvann, 10 % overvann, og resten andre typer ledninger (Vári 2017). Overløpet ved rensanlegget er målt til å slippe ut mindre enn 10 % av det totale overløpet i rensedistriktet over tid (Mølmen 2017a). Figur 2-12 viser et kart av Muusøya rensedistrikt, der dette befinner seg over og til venstre for den blå skillelinjene mellom de to rensedistriktene i kommunen. Rensanlegget befinner seg langs Drammenselva, ved Muusøya båthavn.

#### 2.4.5 Solumstrand rensanlegg og rensedistrikt

Solumstrand rensedistrikt tar for seg resten av Drammen kommune, og hadde drøyt 50 000 bosatte, og en total tilknytning inkludert industri beregnet til 66 857 pe i 2015 (Tian 2016). Ledningsnettets består av 26 % fellesledninger, 32 % spillvannsledninger, 35 % overvannsledninger, 1 % overløpsledninger, 1 % drensledninger, og 6 % ikke kategoriserte ledninger (Vári 2017). Rensanlegget, som har en beliggenhet langs Drammensfjorden, har en kapasitet på rensing av BOF<sub>5</sub> på 130 000 pe, og har en Q<sub>dim</sub> på 2000 m<sup>3</sup>/time og en Q<sub>maksdim</sub> på 4000 m<sup>3</sup>/time. Anlegget oppnådde meget gode resultater for fjerning av fosfor i 2015 og overholdt alle renskrav for fosfor,



KOF<sub>5</sub> og BOF<sub>5</sub>. Det ble sluppet ut 0,83 tonn fosfor fra renseanlegget i løpet av året. I løpet av 2015 ble 10 971 000 m<sup>3</sup> behandlet, og 157972 m<sup>3</sup> gikk i overløp ved renseanlegget. Ledningsnettverket inneholder 50 overløp, og de fleste av disse har timeteller. En teoretisk beregning tilsier et tap fra ledningsnettverket på mellom 15 og 33 %, noe som er et godt stykke over kravet på 5 %, men her er det stor usikkerhet (Tian 2016). I følge Rosims beregninger står overløpet ved renseanlegget kun for omtrent 1 % av den totale overløpsmengden i rensedistriktet, mens andre metoder viser opp mot 10 % (Mølmen 2017b). Det ble beregnet et utslipp av fosfor gjennom overløp på 0,51 tonn (Olsbu 2017a), slik at det totale utslippet av fosfor for hele Solumstrand rensedistrikt er godt innenfor kravene. I følge bilder i Rosims rapport for Solumstrand (2016), er de fleste overløpene utstyrt med virvelkammer som kontrollerer videreført vannmengde. Figur 2-13 viser et kart over rensedistriktet, der den blå linjen skiller Solumstrand fra Muusøya. Blant annet befinner Bragernes bydel seg på nordsiden av elva, Strømsø bydel på sørsiden, og renseanlegget helt ned til høyre i bildet. Avløpsvann fra Bragernes-siden av elva blir pumpet til andre siden av elva fra en pumpestasjon i Søren Lemmichs gate, derav refereres denne pumpestasjonen som ”Søren Lemmich”. På Strømsø samles mesteparten av avløpsvannet fra sørsiden av elva, med vannet fra Bragernes, og pumpes fra Rundtom og opp til Solumtunnelen, som er en tunnel med 2,5 meter diameter, som sender vannet videre til renseanlegget.



Figur 2-13: Kart over Solumstrand rensedistrikt med avløpssoner (Olsbu 2017a).

## 2.5 Modellering

Dette delkapittelet tar for seg programvaren og modellen som er brukt i oppgaven og forklarer også kort om hvilke metoder som vil bli benyttet i videre arbeid med resultatene fra denne oppgaven.

### 2.5.1 ArcMAP

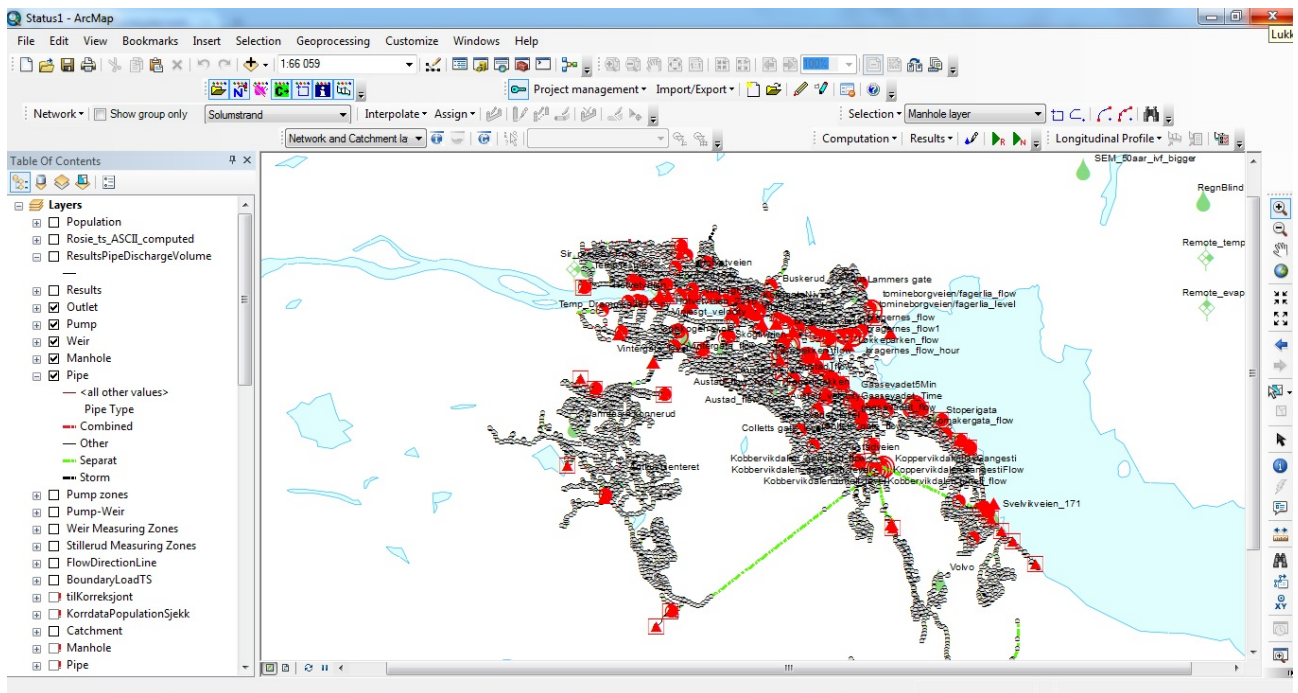
ArcGIS er et geografisk informasjonssystem (GIS) utviklet av Environmental Systems Research Institute (ESRI) for arbeid med kart og geografisk informasjon. Systemet består av integrerte applikasjoner som ArcMap, ArcCatalog og ArcToolbox (University of Maryland 2012). ArcMap er et verktøy som kan benyttes for å lage og visualisere ulike type geografiske data, som inkluderer kart og kartegenskaper. En av ArcMap sine mest verdifulle egenskaper er dens evne til å tilpasse spesifikke og ulike typer analyser med sitt brukervennlige grensesnitt (West Virginia Globe 2009).

### 2.5.2 ROSIE

ROSIE er produsert av Rosim AS og er en programpakke med tilleggsapplikasjoner til ArcGIS, for planlegging, dimensjonering og modellering av vanddistribusjon og avløpssystemer.

Programpakken består av ROSIE Mouse for avløpsvann og overvann og ROSIE Epanet for vannforsyning, og løser alle utfordringer fra modelloppbygning til presentasjon av avanserte resultater. Beregninger for avløpssystemer blir gjort med den hydrauliske simuleringsmotoren MOUSE fra DHI. I modelloppbygningen legges det inn data fra blant annet nedbørs- og vannmålere, overløpsloggere, ledningsdata fra Gemini, terrengmodeller, og hus-, vei-, og befolkningsdata. Beregninger og resultater blir presentert i et lett tilgjengelig brukergrensesnitt med blant annet funksjonaliteter som avanserte lengdeprofiler, totale volumer for avrenning i utløp, overløp, ledninger og pumper, og grafer for nivå i kummer og ledninger, og volumstrøm i ledninger, pumper og overløp (Rosim AS 2017a). Figur 2-14 viser et skjermbilde av brukergrensesnittet for ArcMap, med noen av tilleggsfunksjonene fra Rosie.

I modellen består selve avløpsledningsnett i hovedsak av kummer i form av noder, og ledninger i form av linker mellom disse. Disse inneholder målt eller beregnet informasjon som diameter, lengde, høyde, materiale og andre parametere, som de hydrauliske beregningene er avhengig av og som til enhver tid kan endres i modellen (Rosim AS 2017b).



Figur 2-14: Skjermbilde av ArcMap-brukergrensesnittet, og tilleggsfunksjonene fra ROSIE.

Ledningene kan ha en tilleggsfunksjon kalt ”regulation”, som kan etterligne for eksempel en vannføringsregulator eller en styrbar ventil. Hver regulering har en tilhørende  $Q_{\max}/H$  kurve, som viser sammenhengen mellom nivået i en hvilken som helst kum i modellen, og maksimal tillatt vannføring i den aktuelle ledningen (Rosim AS 2017b). Dersom innstillingene er lagt inn slik at  $Q_{\max}$  er den samme uansett  $H$ , vil reguleringen tilsvare en vannføringsregulator med en bestemt maksimal videreført vannmengde.  $Q_{\max}$  kan også endre seg med  $H$ , for å etterligne en luke som åpnes og lukkes i takt med nivået i en viss kum. Slik kan man for eksempel strupe igjen en ledning dersom nedstrøms ledning stuves opp over ønsket nivå.

På samme måte kan kummer ha blant annet følgende tilleggsfunksjoner (Rosim AS 2017b):

- Overløp: med innstillinger som høyde for overløpskant, bredde og vinkel, kan kummen ha et overløp, som sender vannet som når over overløpskanten videre til en gitt kum, eller ut av systemet. Oversikt over driftstid, totalt volum og antall ganger i drift kan sees for hvert enkelt overløp i resultatrapportene. Man kan også få ut tidsserie for volumstrøm i overløpet.
- Pumper: vanlige innstillinger som start og stopp-høyde, og pumpekurver brukes for å flytte vann fra den aktuelle kummen, og til en gitt kum i modellen, eller ut av systemet. Disse pumpene styres ut fra nivået i kummen den befinner seg i. En annen viktig innstilling er ”flow to” der man bestemmer hvilken node/kum vannet skal pumpes til. Dette innebærer at vannet pumpes dit uten å gå i en ledning i modellen. Vanligvis tegner man likevel opp en

ledning mellom de to punktene, og merker denne "other" slik at den ikke tas med i modellen, men er til hjelp rent visuelt. Rapporter for totalt volum, driftstid, tidsserie for pumpevolum, med mer kan hentes fra resultatfilen. En kum kan ha et ubegrenset antall pumper.

- Utløp: representerer utslipp til resipient.

Dette er funksjoner i MOUSE, som blir benyttet i ROSIE.

Vannet som skal passere gjennom modellen entrer systemet via såkalte "connection points" som hver og en er knyttet til en gitt kum. Disse punktene hører til et nedbørsfelt, som enten er for spillvann eller overvann. Nedbørsfelt for spillvann tar for seg spillvannet til alle husholdninger og andre kilder for dette innenfor området, og tilfører kummen ut fra bestemte parametere for døgnvariasjon, volum per døgn per pe og så videre. Nedbørsfelt for overvann tar for seg vann fra nedbør og smelting som renner av på overflaten og i grunnvannet, og som entrer ledningsnett, ut fra gitte parametere som andel tette flater, areal, andel som infiltreres og så videre, med utgangspunkt i måleserier for nedbør, temperatur og fordampning (Rosim AS 2017b).

### 2.5.3 Mouse

MOUSE (Model Urban Sewers) er en simuleringsmotor som modellerer avrenning og rørstrømning, og er utviklet av DHI (Danmarks Hydrologiske Institutt). For å få tilgang til MOUSE må man installere modelleringsprogrammet MIKE URBAN. MOUSE er spesielt tilpasset for modellering av overflateavrenning, åpen kanal strømning, rørstrømning, vannkvalitet og sedimentering for drenerings-, overvann-, og spillvannssystemer, og kombinerer kompleks hydrologi, hydraulikk, vannkvalitet og sedimenttransport grafisk i et brukervennlig grensesnitt (DHI 2000). Programmet består blant annet av følgende moduler:

- MOUSE Runoff: Overflateavrenning i urbane nedbørsfelt beregnes ut fra forskjellige metoder. I denne oppgaven er det brukt Model A, som er en tid/areal metode. Denne metoden er basert på at avrenningsmengden avhenger av initialtap, hydrologiske tap og størrelsen på avrenningsoverflater. Det benyttes en tid/areal kurve som forteller noe om formen på nedbørsfeltet (DHI 2016c).
- MOUSE HD (Pipe flow): Hydrodynamisk simulering av turbulent vannføring i rørsystemer. Beregningen blir gjort ved å løse Saint Venant-likninger for dynamisk strømning i rørsystemet. Denne modulen har funksjoner som for eksempel "regulation", som kan bidra til å styre volumstrømmene (DHI 2016a).

- MOUSE RDII: Avansert hydrologisk modell som tar for seg de sakte prosessene i landfasen av det hydrologiske kretsløpet, der nedbøren ledes gjennom fire typer magasinering: snø, overflate, umettet sone og grunnvann. Denne modulen tar for seg den trege responsen i systemet, som forsinket vannet fra en nedbørshendelse fra det faller ned til det når avløpsnettets (DHI 2016b).
- MOUSE RTC: Real-Time Control. Gjør det mulig å kontrollere enkelte komponenter i modellen, ved bruk av bestemte regler man selv definerer (DHI 2000). Kan brukes til styring av for eksempel pumper og ledninger ut fra gitte verdier.

## 2.5.4 Simulering

Simulering av modellens håndtering av avløpsvann foregår i to etapper:

- Runoff-simulering: For å simulere vann som renner inn i ledningsnettets fra overflaten og fra grunnvannet, må man først kjøre en såkalt runoff-simulering. Runoff-simuleringer bruker datafiler for nedbør, temperatur og fordampning som inputdata. Dette ble levert av Rosim AS, som også utførte selve simuleringen. Hver modell har et nettverk med delnedbørsfelt, med tilhørende ”connection points”, som er knyttet til kummer, og tilfører vann fra nedbørsfeltene til disse. Hvert delnedbørsfelt har en rekke karakteristikk for eksempel areal, konsentrasjonstid, reduksjonsfaktor med hensyn til infiltrasjon med mer, og andel vei og tak for å nevne noen. Ut fra dataserier for nedbør, temperatur og fordampning beregner så simulering hvor mye vann som til enhver tid tilføres hver kum via connection points. En runoff-simulering simulerer altså hvor mye vann som tilføres hvert punkt i ledningsnettets til enhver tid, og benytter modulene MOUSE Runoff og MOUSE RDII i kombinasjon.
- Network-simulering: Med tilførselen av vann i kummene fra runoff-simuleringen som inputdata, kjører man simuleringer av vannets bevegelser og mengder i selve ledningsnettets. Tørrværsavrenning beregnes også ut fra gitte settinger. I simuleringen løses Saint-Venant likninger for å gi dynamiske strømminger i rørsystemet. Fra selve modellen hentes ut parametere som for eksempel rørdiameter, helning, friksjon, og rørets utforming, og ut i fra selvvalgte settinger som for eksempel tidsskritt for simulering og lagring, kjøres simuleringen. Ut fra dette får man et stort datasett med en rekke dataserier, som for eksempel nivå, hastighet og volumstrøm i rør, nivå i kummer, volumstrøm i pumper og overløp, og totalt volum i overløp og pumper. Network-simulering benytter modulen MOUSE HD, gjerne i kombinasjon med MOUSE RTC.



Man må ha kjørt runoff-simulering for hele perioden det skal kjøres network-simulering. I tillegg bør man kjøre runoff-simuleringen en lengre periode før perioden for network-simuleringen, på grunn av langsomme prosesser gjør at visse parametre trenger tid på å være sammenliknbare med virkeligheten. Dette gjelder spesielt nivåer og volumstrømmer i grunnvannet, og metning i grunnen.

### 2.5.5 Deep learning

Hydraulisk modellering kan gi en svært detaljert etterlikning av virkeligheten, men på grunn av lang beregningstid er det vanskelig å benytte slik modellering for å predikere volumstrøm basert på nåværende situasjon. Fordi detaljerte nedbørsvarsler kun kan gis noen timer frem i tid, trenger man metoder som kan gjøre beregninger svært raskt, slik at man får tid til å iverksette tiltak. Ved bruk av dataanalysemetoder som machine learning og deep learning, kan man ved bruk av såkalte ”neural networks” predikere overløpshendelser med tilstrekkelig kort beregningstid, slik at man har tid til å iverksette nødvendige tiltak. ”Recurrent neural network” (RNN) er egnet for å bruke tidsserier for for eksempel vannnivådata til å predikere verdier frem i tid. Long Short Term Memory (LSTM) er en metode basert på RNN strukturen, og er en av de mest suksessrike deep learning-metodene (Zhang 2017).

LSTM består av et inputlag, et tilbakevendende skjult lag, og et outputlag. I motsetning til andre RNN-metoder, består LSTM av en minnecelle som bruker logistiske og lineære enheter med multiplikative interaksjoner. Informasjon går inn i, blir i, eller leses fra en celle dersom den tilhørende ”write”, ”keep” eller ”read” porten er på. Slik kan LSTM-logaritmen lære seg en tidsserie over lengre tidsrom og automatisk bestemme optimal tidsforsinkelse for prediksjon. Prinsippet bak minnecellen i LSTM kan matematisk presenteres slik (Zhang 2017):

$$i_t = \sigma_g(W_i * x_t + U_i * h_{t-1} + V_i \circ c_{t-1} + b_i)$$

*Formel 2-5: Input gate*

$$f_t = \sigma_g(W_f * x_t + U_f * h_{t-1} + V_f \circ c_{t-1} + b_f)$$

*Formel 2-6: Forget gate*

$$o_t = \sigma_g(W_o * x_t + U_o * h_{t-1} + V_o \circ c_{t-1} + b_o)$$

*Formel 2-7: Output gate*

$$c_t = f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c(W_c * x_t + U_c * h_{t-1} + b_c)$$

*Formel 2-8: Cell state*

$$h_t = o_t \circ \sigma_h(c_t)$$

*Formel 2-9: Output vector*

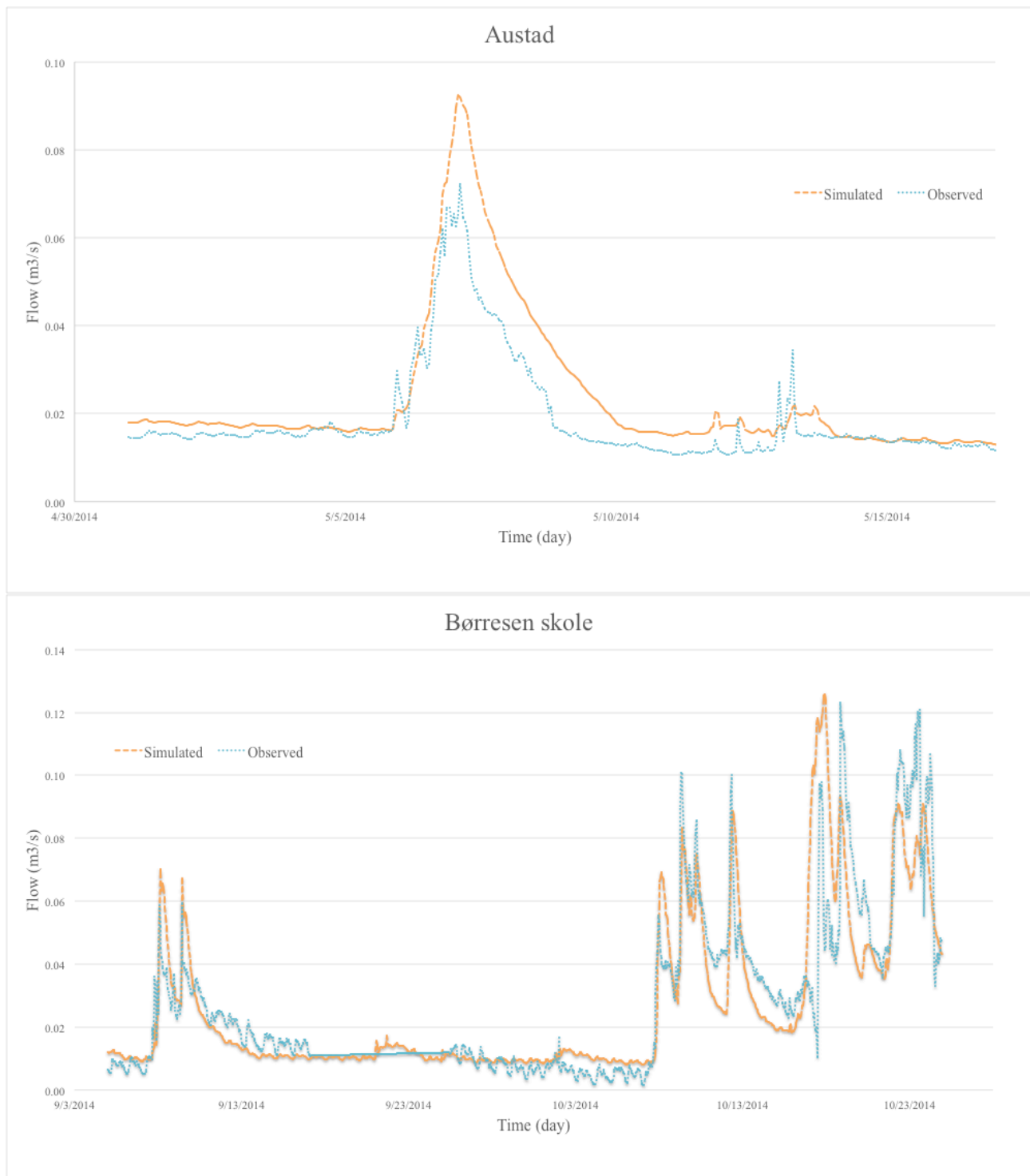
Der  $x_t$  er inputvektoren,  $W$ ,  $U$ ,  $V$  og  $b$  er parametere for vekting og skjevhet,  $\circ$  representerer skalarproduktet av to vektorer, og  $\sigma$  er logistisk sigmoid funksjonen.

Videre kan forskjellige modellers prestasjoner vurderes i forhold til resultater fra hydraulisk simulering eller faktiske målinger, ut fra for eksempel "root mean square error" (RMSE), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) og determinasjonskoeffisienten  $R^2$ . Slik kan man utarbeide en egnet modell for å forutse volumstrøm eller vannivå, som har kort nok beregningstid til at resultatene kan benyttes til å ta beslutninger for styring av avløpsnett, og også automatisere dette.

## 2.6 Tidligere arbeid

Som nevnt tidligere er denne oppgaven basert på modeller utarbeidet av Rosim AS, på oppdrag for Drammen Kommune. Modellene er godt kalibrert (Rosim AS 2011; Rosim AS 2016), slik at dette ikke har vært nødvendig for denne oppgaven. Som eksempel på denne kalibreringen, viser figur 2-15 sammenhengen mellom simulert og observert volumstrøm for to målepunkter i modellen.

Nicolas Martinez brukte modellen for Solumstrand i sin masteroppgave (2016) til å se på virkningen av klimaendringer på avløpsnett i Solumstrand rensedistrikt, og hvordan økte overløpsutslipp ved rensenanlegget kan reduseres ved å fordrøye avløpsvann i Solumtunnelen og Konnerudtunnelen. Det ble i denne oppgaven vist at dette hadde en god effekt på overløpsutslippene. Riktignok sørger dette overløpet kun for en liten andel av den totale overløpsmengden i avløpsnett, fordi mye vann går i overløp allerede før de når disse tunnelene. Dette gir behov for å se på hele avløpsnett som helhet. I tillegg demonstrerer Martinez en reduksjon av modellen, for å effektivisere beregningstiden. Det viste seg at denne reduksjonen ga avvik i resultatene i forhold til originalmodellen, noe som viser et behov for å gjøre beregninger for hele modellen sett under ett, uten forenklinger. Martinez sin oppgave er et bidrag til Regnbygge 3M-prosjektet.



Figur 2-15: Kalibrering for to målepunkter i modellområdet.

Selv om denne oppgaven ikke tar for seg LOD-tiltak, er dette en svært effektiv måte å redusere overløpsutslipp og volumstrøm i ledningsnett, ved å redusere mengden vann som entrer systemet, og fordrøye flomtoppene. Lindholm mfl. (2007) viser forskning fra en rekke land, som viser hvordan klimaendringer vil øke mengden overvann i fremtiden, og foreslår metoder for å redusere

mengden overvann som entrer avløpsnett. Her nevnes fordrøyningsbasseng, heving av overløpskanter og bevegelige overløpskanter som mulige tiltak på ledningsnett. Blant annet kom Madsen (2007) i sin masteroppgave frem til at å heve en rekke overløpsterskler ville føre til en reduksjon i overløpsutslipp på så mye som 41 %. Dette høye tallet skyldes i stor grad problematikk rundt innlekking av sjøvann via overløp på grunn av lav overløpsterskel, men en del av endringen skyldes at høyere overløpsterskel gir mer oppstuvning og fordrøyning i ledningsnett.

Grum mfl. (2011) kombinerer radarbasert varsel av volumstrøm med dynamisk risikoanalyse, for å redusere overløp ved bruk av real time control. Dette gjøres ved å dele ledningsnett opp i lagringsseksjoner, med koblinger mellom disse, der volumstrømmen i disse koblingene styres aktivt (i form av luker og pumper) ut fra hvor det er ledig kapasitet. Velez Quintero (2012) lanserer Model Based Design and Control (MoDeCo) metoden som kan optimalisere design og kontroll av urbane avløpssystemer. Her understreker han at et avløpssystem må sees som ett integrert system, og ikke som en kombinasjon av separate systemer, dersom man ønsker en kostnadseffektiv beskyttelse av resipienten. Wang mfl. (2015) viser hvordan fordeling av vann mellom to drikkevannsreservoarer kan sørge for at reservoarene kan fungere som reserver for hverandre. Det benyttes et sett med regler som ser på nivåene i de to reservoarene, som gjør at et reservoar med lavt nivå kan få tilført vann fra det andre reservoaret, dersom nivået der er tilstrekkelig. Dette kan overføres til fordeling av avløpsvann mellom rensedistrikt for å avlaste der kapasiteten er fullt utnyttet, ved å overføre vann til et område med ledig kapasitet.

# 3 Metode

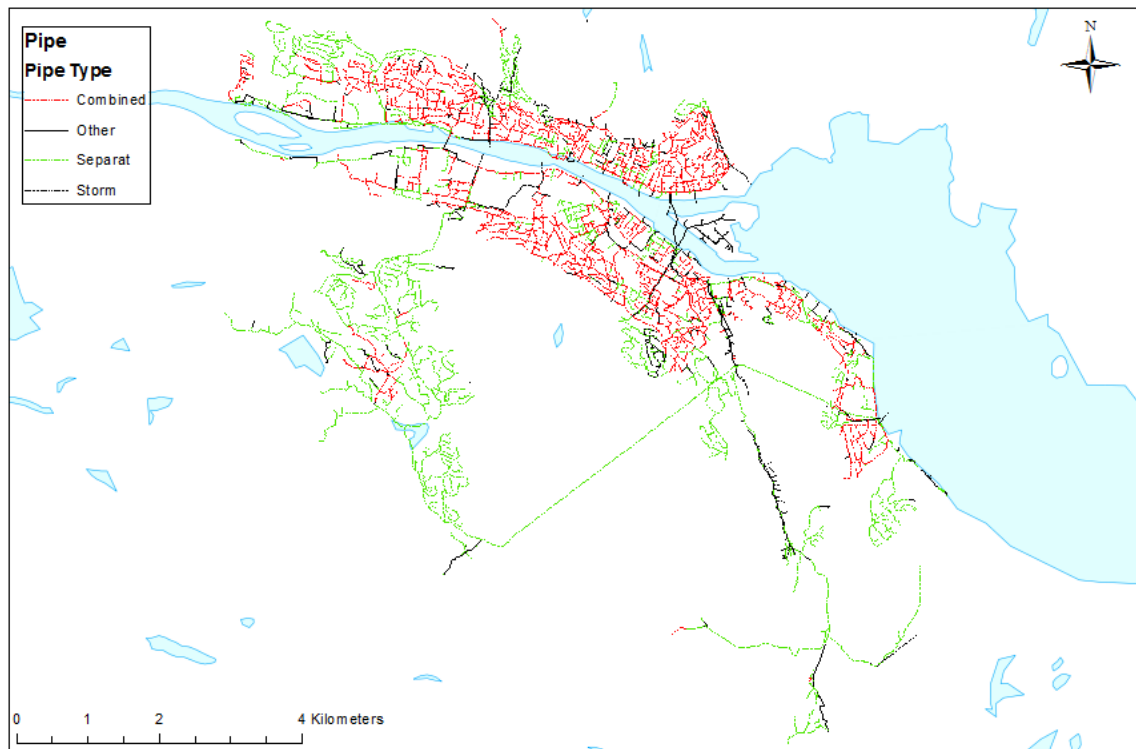
## 3.1 Fremgangsmåte

Eget arbeid med modellering og simulering ble utført på en HP EliteBook 2560p bærbar PC lånt av Rosim AS, med ArcMap (versjon 10.3.1), MOUSE og ROSIE (versjon 10.1.3) som programvare. For å kunne bruke Mouse, var det nødvendig å ha installert Mike Urban, og dette ble brukt med studentlisens tildelt av DHI. Det blir gitt mer informasjon om bruken av disse programmene i delkapittel 3.2. Videre bearbeiding er gjort i Excel, og endel figurer er utarbeidet i NivuSoft. Modellen det ble tatt utgangspunkt i er Rosim AS sin modell av Drammen kommunes ledningsnett for avløp, og sammensatt av to modeller, for Muusøya og Solumstrand rensedistrikt, se figur 3-1. I modellen er det 9113 ledninger, 9094 kummer, 129 overløp, 78 pumper og 39 utløp. 26 av ledningene har regulation som regulerer videreført volumstrøm, og disse er stort sett knyttet til overløp. Ledningsdata er hentet fra Gemini VA i Drammen kommune og konvertert til ArcGIS, og ROSIE er brukt videre til å bygge modellen. Gjennom flere målekampanjer har modellene for begge rensedistriktene blitt kalibrert og verifisert (Rosim AS 2011; Rosim AS 2016). I modellen er maks volumstrøm for Solumstrand rensaanlegg satt til  $0,861 \text{ m}^3/\text{t}$ , som tilsvarer  $3100 \text{ m}^3/\text{s}$ . Det er ikke avklart hvorfor denne verdien er satt lavere enn  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ , som er oppgitt  $Q_{\text{maksdim}}$  fra Drammen kommune. Rensaanlegget er representert ved en pumpe, med en pumpekurve der  $Q$  øker med nivået i kummen den er i, men som er maks  $0,861 \text{ m}^3/\text{s}$ . Muusøya rensaanlegg er representert ved et utløp, tilknyttet en ledning som har regulation med konstant  $Q_{\text{max}}$  på  $0,333 \text{ m}^3/\text{s}$ , som tilsvarer oppgitt  $Q_{\text{maksdim}}$  på  $1200 \text{ m}^3/\text{t}$ , som oppgitt fra Drammen kommune.

### 3.1.1 Forberedelser

Den innledende fasen av arbeidet med oppgaven innebar å gjøre seg kjent med modellen og programvaren. Det ble gjort simuleringer av enkelte regnhendelser, og videre gjort visse tiltak i modellen, hvorpå nye simuleringer kunne brukes til å sammenligne resultater for simuleringene, for å kunne si noe om effekten av tiltakene. I modellen er det uendelige muligheter for tiltak som vil bidra til å fordrøye avløpsvann i ledningsnett, og dermed minske overløpsmengden og utjevne volumstrømmen til rensaanleggene. Det ble eksperimentert med forskjellige varianter av regulering av ledninger, basert på nivåer i visse kummer. Tanken bak dette var å gradvis lukke en ventil i en ledning dersom nedstrøms kum begynner å stuves opp, for å begrense belastningen nedstrøms ved å fordrøye avløpsvann oppstrøms denne ventilen i stedet. Et annet mulig tiltak er en aktiv styring av

ventiler der man lukker visse ventiler dersom man ved et lokalt værvarsel kan forutse hvor og når det vil komme nedbør. Disse ideene ble forkastet, da det tilgjengelige volumet oppstrøms de aktuelle delene av ledningsnettets er for lite i forhold til det volumet som entrer systemet i forbindelse med en nedbørshendelse, samt de reelle kostnadene relatert til nødvendig måleutstyr og luker som kan styres.



Figur 3-1: Modellen av ledningsnettets for Muusøya og Solumstrand rensedistrikt.

### 3.1.2 Utnyttelse av eksisterende ledningsnett

De store volumene i ledningsnettets ligger nedstrøms mange av de kummene som har overløp. Mange overløp har vannføringsregulatorer som sørger for en maksimal vannføring som blir videreført. I flere tilfeller fører dette til at vann går i overløp på grunn av disse reguleringene, selv om det er ledig kapasitet i ledningen nedstrøms. I modellen representeres dette i form av en ”regulation”, som er en kurve som gir sammenhengen mellom høyde i overløpskummen ( $H$ ), og maksimal vannføring i ledning ( $Q_{\max}$ ). For å representere vannføringsregulatoren, var  $Q_{\max}$  satt til samme verdi uansett  $H$  i den opprinnelige modellen. Denne reguleringen ble endret på en rekke

steder i sentrale deler av Strømsø, med mål om å redusere overløpet i kummen oppstrøms for ledningen med regulering. En beskrivelse av denne modellen blir gjort i avsnitt 3.2.2.

Disse tiltakene ville føre til en økt belastning på hovedledningen på Strømsø siden. Denne hovedledningen fører vann fra store deler av Drammen, inkludert Strømsø, Bragernes og Konnerud, og til pumpestasjonen på Rundtom, som pumper vannet videre til Solumtunnelen. Ved denne pumpestasjonen er det et overløp, som ville oppleve at mer vann går i overløp, på grunn av den økte belastningen. Tanken var at den totale summen av overløpsmengde for alle overløpene likevel ville bli mindre, fordi overløp først oppstår når en større del av ledningsnett er fylt opp. For å prøve å gi et bidrag til å minke belastningen på denne hovedledningen, ble det lagt inn en styring av pumpestasjonen på Bragernes (Søren Lemmich), som pumper over til Strømsø siden av Drammenselva. Avsnitt 3.2.3 tar for seg innstillingene som ble gjort for denne modellen.

Disse modellene ble simulert av undertegnede, og på grunn av lang simuleringstid ble disse simulert kun for oktober 2014 (en simulering tok opp mot 20 timer), og sammenlignet med modellen ”Status1”, som var den opprinnelige modellen. Denne måneden ble valgt, fordi det var måneden med mest overløp for simuleringen av hele 2014 (se tabell A-1 i Vedlegg A). Tabell 3-1 viser en oppsummering av disse modellene. En prinsippsskisse for hver av modellene kan sees i Vedlegg B. Resultatene for disse ble sammenlignet for å vise effektene av regulering på Strømsø alene, og i sammenheng med styring av Søren Lemmich-pumpene. Siden Strømsø-modellen bestod av en rekke forskjellige tiltak, ble effekten av hvert enkelt tiltak vurdert ut fra endringen i det aktuelle overløpet, samt eventuelt nærliggende overløp.

*Tabell 3-1: Oversikt over simuleringer av modeller med eksisterende ledningsnett.*

<b>Case</b>	<b>Modellnavn</b>	<b>Beskrivelse</b>
Case A	Status1	Opprinnelig modell - sammenlikningsgrunnlag
Case B	Strømsø	Med reguleringer ved diverse overløp på Strømsø
Case C	StrømsøMedBrag	Med styring av Søren Lemmich-pumpene på Bragernes, i tillegg til reguleringer ved diverse overløp på Strømsø

Videre ble andre deler av ledningsnettets studert for å finne områder med tilgjengelig kapasitet under nedbørshendelser som forårsaker oppstuvning i store deler av nettet. For å kunne finne tilstrekkelig fordrøyningsvolum, må man se på de store ledningene i ledningsnettets. Disse befinner seg stort sett nede på flatene, og er for det meste fylt under nedbørshendelser. Det ble funnet et ledningsstrek med ledig kapasitet på nesten to kilometer oppstrøms det såkalte Landfalloverløpet, og oppover Betzy Kjeldsbergs vei, med ledningsdiametere på opp mot to meter. Dette strekket innebærer et rørvolum på over 3000 m<sup>3</sup>, som da eventuelt kan brukes til fordrøynings. Under møte med Drammen kommune kunne Arnljot Mølmen fra Rambøll fortelle om en tidligere utredning av dette strekket, med prosjektering av en rekke terskler, med sikte på å bruke ledningsstrekket til fordrøynings. Dette prosjektet ble aldri iverksatt. Fylling av disse ledningene ville føre til problemer med kjelleroversvømmelser i området (Mølmen 2017c), og forslaget for denne oppgaven ble derfor ikke jobbet vider med.

### 3.1.3 Diverse konsepter med nye konstruksjoner

På det samme møtet ble det drøftet et forslag om å modellere et tenkt fordrøyningsmagasin ved Landfalloverløpet, som er i Muusøya rensedistrikt, og en pumpeledning mellom dette magasinet og Bragernes, i Solumstrand rensedistrikt. Det ble besluttet at det skulle utføres en rekke simuleringer for hele Drammen kommune for hele 2014, der forskjellige tiltak ble utført for hver simulering. 2014 ble valgt, fordi Rosim har gjort flere beregninger, og har gode måledata og dermed god kalibrering for dette året. Formålet var delvis å se på virkningene av et fordrøyningsmagasin ved Landfalloverløpet, og å se på virkningene av en pumpeledning mellom de to rensedistriktene. En kombinasjon av disse ville være det ideelle, siden dette fordrøyningsmagasinet også ville fungere som fordrøynings for Bragernes, og at Bragernes ville sjeldnere få ekstra belastning fra Muusøya, siden dette først skjer når fordrøyningsmagasinet er fullt. Det ble utført ni simuleringer for hele Drammen, for hele 2014, og hver enkelt av disse vil gås gjennom i delkapittel 3.3. Det ble lagd en egen modell for hver case, der alle tok utgangspunkt i den opprinnelige modellen, med små justeringer, som justering av kumdiameter for å lage et fordrøyningsmagasin av et visst volum, og å legge til pumper. Tabell 3-2 viser en kortfattet oversikt over disse modellene. Modellene representerer kun prinsipielle konsepter, og ikke en reell situasjon. Selve utformingen av fordrøyningsmagasinet er likegyldig, da det er volumet som betyr noe. Det sylindereformede magasinet ble valgt for å gjøre modelleringen enkel, og for å lett se sammenhengen mellom nivåer og volum. En og samme runoff-simulering ble brukt som grunnlag for alle network-simuleringene. Selve simuleringene ble utført av Rosim AS, og vil gås gjennom i delkapittel 3.4.



Tabell 3-2: Oversikt over simuleringer av modeller med konsepter for nye konstruksjoner.

Case	Modellnavn	Beskrivelse
Case A	Status1	Opprinnelig modell - sammenlikningsgrunnlag
Case D	Status2	Opprinnelig modell, men med endring på 1 ledning
Case E	1000m3NoPumping	1000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin
Case F	5000m3NoPumping	5000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin
Case G	20000m3NoPumping	20000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin
Case H	0m3WithPumping	pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes
Case I	1000m3WithPumping	1000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin OG pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes
Case J	5000m3WithPumping	5000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin OG pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes
Case K	20000m3WithPumping	20000 m <sup>3</sup> Fordrøyingsmagasin OG pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes

## 3.2 Modeller som utnytter eksisterende ledningsnett

Denne delen går gjennom modellene som foreslår styring av eksisterende ledningsnett, ved å vise hvilke konkrete endringer som ble gjort for hver modell.

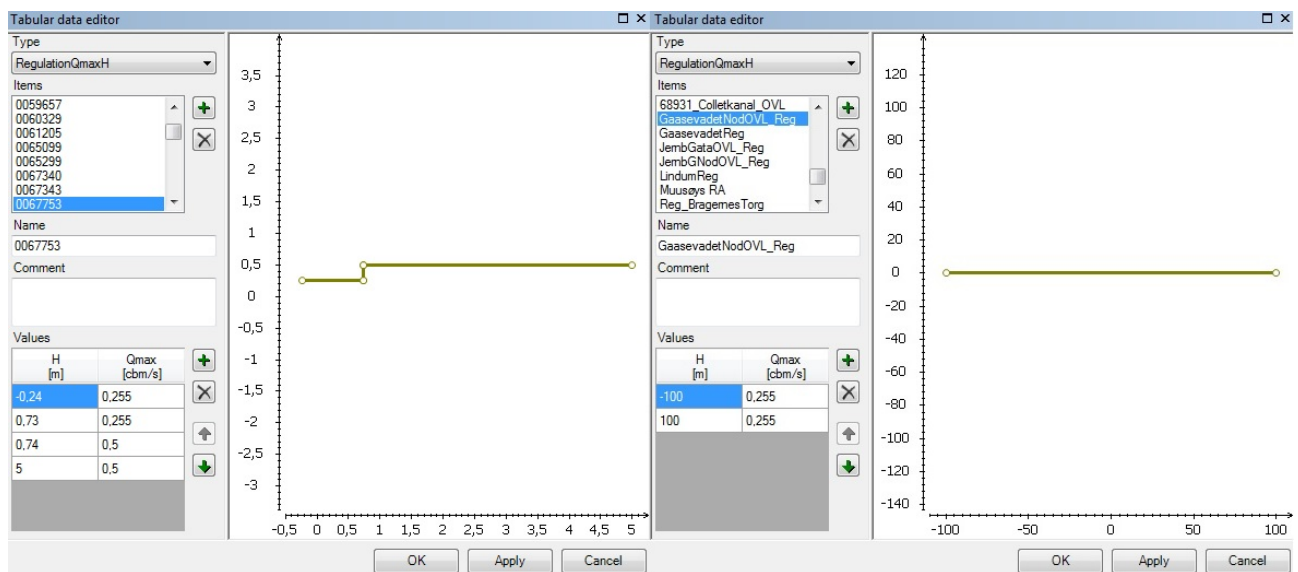
### 3.2.1 Case A – Statusmodell 1

Denne modellen, kalt ”Status1”, er ment å gi en mest mulig realistisk simulering av dagens situasjon. Det ble kun gjort noen små forandringer fra den opprinnelige modellen gitt av Rosim, for å gjøre modellen enda mer realistisk. Dette ble gjort etter drøfting med representanter fra Drammen kommune, og omfattet inkludering av to ledninger og en kum som tidligere var utelatt av modellen. Det bør bemerkes at under Rosims målekampanje av Muusøya rensedistrikt i 2008 ble det oppdaget oppstuvning på grunn av sedimentering i ledningsnett ved Muusøya RA (Rosim AS 2011). I den

etterfølgende modelleringen av ledningsnettet ble sannsynligvis derfor to ledninger like ved renseanlegget nedjustert fra 0,6 til 0,3 meter, for å oppnå en tilsvarende oppstuvningseffekt.

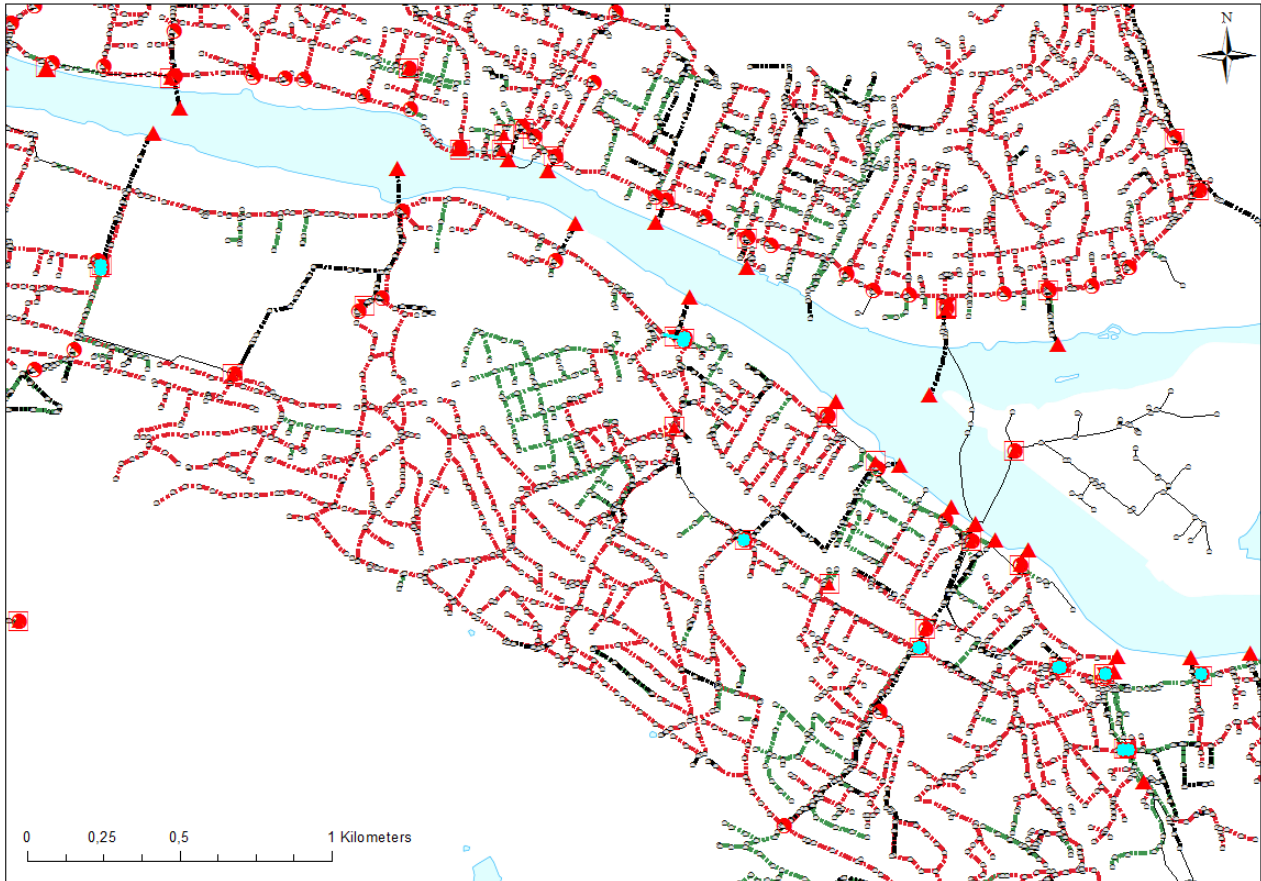
### 3.2.2 Case B – Regulering på Strømsø

Endringene av reguleringen på Strømsø ble gjort ved å endre innstillingene på reguleringskurvene for forskjellige steder, ved å øke  $Q_{\max}$  når kumnivået var nære overløpsnivået, eller høyere. Figur 3-2, hentet fra Gaasevadet på Strømsø, viser et eksempel med en sammenlikning av regulering slik den var opprinnelig (til venstre), og reguleringen med den nye justeringen (til høyre). Y-aksene er  $Q_{\max}$  i ledningen og x-aksene er H i kum det blir referert til. For hver av de to innstillingene, ser man ID for innstillingen oppe til venstre, tabell for punktene som definerer grafen nede til venstre, og selve grafen til høyre. På denne måten lot man reguleringen gjøre jobben sin og fordrøye vann under normale forhold. Når volumstrømmen ble så stor at man nesten får overløp, ville man føre vannet videre, for å forsøke å utnytte ledig kapasitet i andre deler av ledningsnettet. Selve modellen het ”Stromso”.



Figur 3-2: Sammenlikning av kurve for regulering.

De 13 utvalgte overløpene som har fått justert reguleringen av  $Q_{\max}$  videreført kan sees i figur 3-3 i form av blå prikker. I figuren kan det se ut som at det er færre overløp, men dette er fordi det flere steder er gjort justeringer på overløp som ligger svært nær hverandre. I vedlegg A blir det vist en tabell (A-2) over innstillingene for alle de justerte reguleringene, og en forklaring for denne.

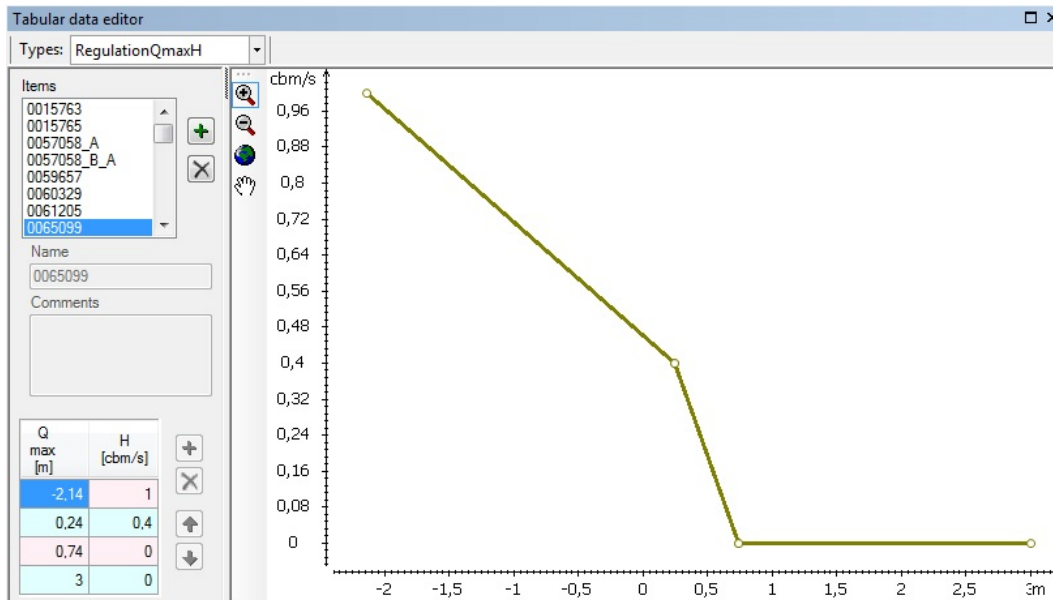


Figur 3-3: Oversikt over utvalgte overløp med justerte reguleringer (lyseblå prikker).

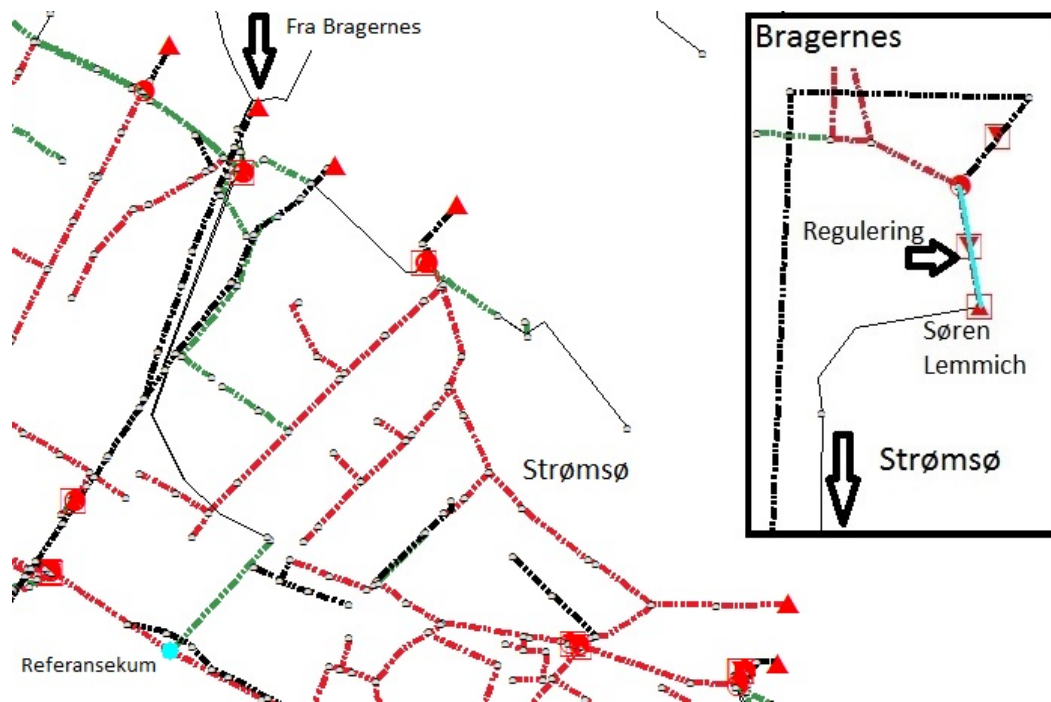
### 3.2.3 Case C – Regulering av Søren Lemmich-pumpene og Strømsø

Denne modellen, kalt "StromsoMedBrag", forsøkte å styre volumstrømmen fra Bragernes over til Strømsø ut i fra nivået i hovedledningen på Strømsø. I modellen kunne selve pumpene kun styres ut fra nivået i kummen de befant seg i. Derfor ble det lagt inn en regulering i ledningen som var knyttet til kummen med disse pumpene, som ble styrt ut fra nivået der dette vannet slippes inn på hovedledningen på Strømsø. Dersom det oppstod oppstuvning på Strømsø, og nivået nærmet seg overløpskanten for overløpene i nærheten (laveste er 0,79 m), ville denne ledningen på Bragernes gradvis (for å unngå error i simuleringen ved brå endringer) lukkes, og til slutt stenges helt. Dermed ville Strømsø-siden avlastes, mens ledningsvolumet på Bragernes fylles opp, helt til det gikk i overløp her, eller til nivået på Strømsø-siden senkes såpass at ledningen ble åpnet igjen. Ved lavere nivå på Strømsø-siden, ville ledningen være åpen. Innstillingene og kurven for denne reguleringen kan sees i figur 3-4. Y-aksene er  $Q_{maks}$  i ledningen og x-aksene er H i kum det blir referert til. Figur 3-5 viser de aktuelle punktene i modellen i lyseblått. For å vise effekten av

styringen av Søren Lemmich-pumpene på Bragernes alene, ble det altså gjort to simuleringer av reguleringen ved overløpene på Strømsø; med og uten styring av Bragernes-pumpene. I følge modellen, har den delen av ledningsnett på Bragernes som ligger under overløpskanten ved Søren Lemmich et volum på over 2200 m<sup>3</sup>.



Figur 3-4: Kurve for regulering av ledning som tilfører avløpsvann til Søren Lemmich-pumpene.



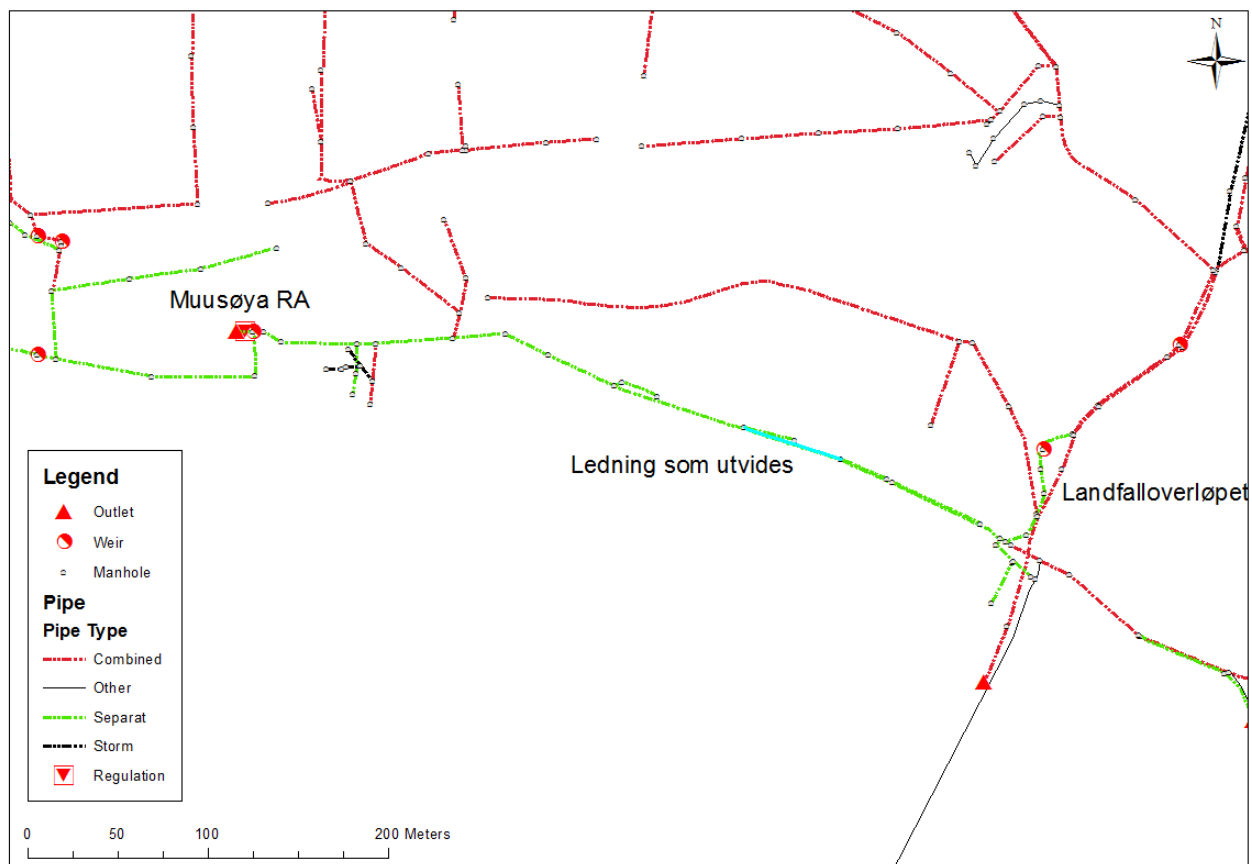
Figur 3-5: Plasseringen av aktuelle punkter for tiltak i Case C.

### 3.3 Modeller med nye konstruksjoner på ledningsnettet

Dette kapittelet går gjennom modellene som foretar endringer på utformingen av ledningsnettet, og som da innebærer nye konstruksjoner. Case A, som er modellen som er lagt til grunn for modellene i 3.2, er også lagt til grunn her.

#### 3.3.1 Case D – Statusmodell 2

Ledningsstrekket mellom Landfalloverløpet og Muusøya renseanlegg består av ledninger med diameter 0,6 meter, bortsett fra én ledning (pipe ID 14288 i modellen), som har diameter 0,3 meter. Aktuell ledning kan sees i figur 3-6. Denne ledningen forårsaker oppstuvning oppstrøms, og dermed overløp ved Landfalloverløpet, selv ved tider der renseanlegget ikke går med full kapasitet. Som nevnt i 3.2.1 er dette trolig på grunn av sedimentering i det aktuelle ledningsstrekket. Statusmodell 2 (kalt "Status2") modellerer at disse problemene er utbedret, og at hele ledningens tverrsnitt kan utnyttes. Ved å utvide denne til 0,6 meter og dermed øke den hydrauliske kapasiteten, vil man da kunne minke mengden vann som går i overløp, slik at dette isteden blir rensset ved renseanlegget.



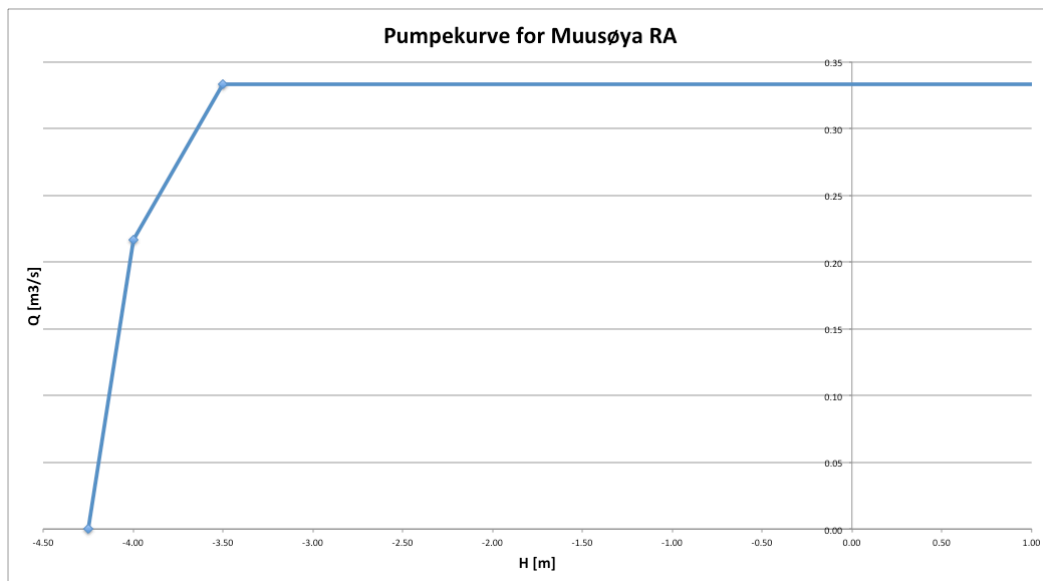
Figur 3-6: Ledningsstrek mellom Landfalloverløpet og Muusøya renseanlegg, for modellen Status2. Blå ledning er aktuell ledning som utvides.

### 3.3.2 Case E – 1000 m<sup>3</sup> uten pumpeledning

Denne modellen skulle simulere et fordrøyningsmagasin på 1000 m<sup>3</sup> ved Landfalloverløpet, og tok utgangspunkt i Case D. For å forenkle modelleringen, ble først ledningen, utløpet og overløpet tilknyttet Muusøya renseanlegg tatt ut av modellen. Dette ble gjort ved at kum for utløp (manhole ID Des\_7 i modellen) og ledning (pipe ID Des\_4 i modellen) som førte til dette utløpet ble satt til type "other", mens overløpet (i manhole ID Des\_6) ble slettet, slik at dette bare var en vanlig kum. Dermed ville vannet istedenfor å gå i dette utløpet heller stuves opp, før alt etter hvert ville gå i overløp i Landfalloverløpet, som da var det lavest liggende overløpet i området. Videre ble kumbunn for Landfalloverløpet (manhole ID 67255 i modellen) gjort om til -4,25 meter. Overløpskanten for dette overløpet var på 0,75 meter, slik at overløpskanten da var 5 meter over kumbunn. Selve denne kummen ville da i modellen ha en rolle som et sylinderformet fordrøyningsmagasin, ved at man utvidet diameteren for kummen. For at kummen skulle ha et volum på 1000 m<sup>3</sup>, ble diameteren da satt til 15,96 meter. I tillegg ble en ledning (pipe ID 51051) ved renseanlegget utvidet fra 0,3 til 0,6 meter i diameter, for å sørge for at denne ikke ville få en strupende effekt.

Renseanlegget ble så representert ved en pumpe (pump ID 67255\_p\_1) i kummen for Landfalloverløpet, som pumpet ut ifra høyden i kummen, med pumpekurven som er vist i figur 3-7. Tilsvarende tabell med verdier kan sees i tabell 3-3. Den høyeste verdien for H ble satt så høyt som 5 meter for å være helt sikker på å unngå error som ville stoppe simuleringen, noe som ville skje dersom høyden på kummen på et tidspunkt var utenfor operasjonsområdet til pumpa. Pumpa hadde en starthøyde på -4,2 meter, og en stopphøyde på 4,25 meter, noe som i praksis ville bety at pumpa ville gå så og si hele tiden. Merk at dette ikke var en reell pumpe, men en modellering av innløpet til renseanlegget. Renseanlegget har som nevnt tidligere optimal rensing opp til 780 m<sup>3</sup>/t (0,217 m<sup>3</sup>/s) og maksimal kapasitet på 1200 m<sup>3</sup>/t (0,333 m<sup>3</sup>/s). Det vil si at renseanlegget fungerte optimalt fram til kummen hadde fylt seg opp 25 cm, noe som tilsvarer 0,05 m<sup>3</sup> eller 5% av fordrøyningsvolumet. Videre ble volumstrømmen økt gradvis opp til maksimal kapasitet ved 75 cm over kumbunn (-3,5 meter absolutt høyde), som tilsvarer 0,15 m<sup>3</sup> eller 15 % av fordrøyningsvolumet. Så lenge nivået i kummen var over dette nivået ville renseanlegget gå ved maksimal kapasitet. Det innebærer at 85 %, eller 850 m<sup>3</sup> av magasinet ble brukt som fordrøyning, og det nederste 15 % ble brukt som utjevning av volumstrømmen i renseanlegget. Dette magasinet ville da kunne ta unna flomtopper av en viss størrelse, uten at man fikk overløp. Figur C-1 i Vedlegg C viser

sammenhengen mellom volumstrømmen for denne pumpa og nivået i kummen den befinner seg i, hentet fra simuleringen av denne modellen.



Figur 3-7: Graf av pumpekurven som ble brukt for pumpen som tilsvarte Muusøya renseanlegg.

Tabell 3-3: Inputverdier for pumpekurve for Muusøya renseanlegg,

H [m]	Q [m³/s]
-4,25	0,000
-4,00	0,217
-3,50	0,333
5,00	0,333

### 3.3.3 Case F – 5000 m<sup>3</sup> uten pumpeledning

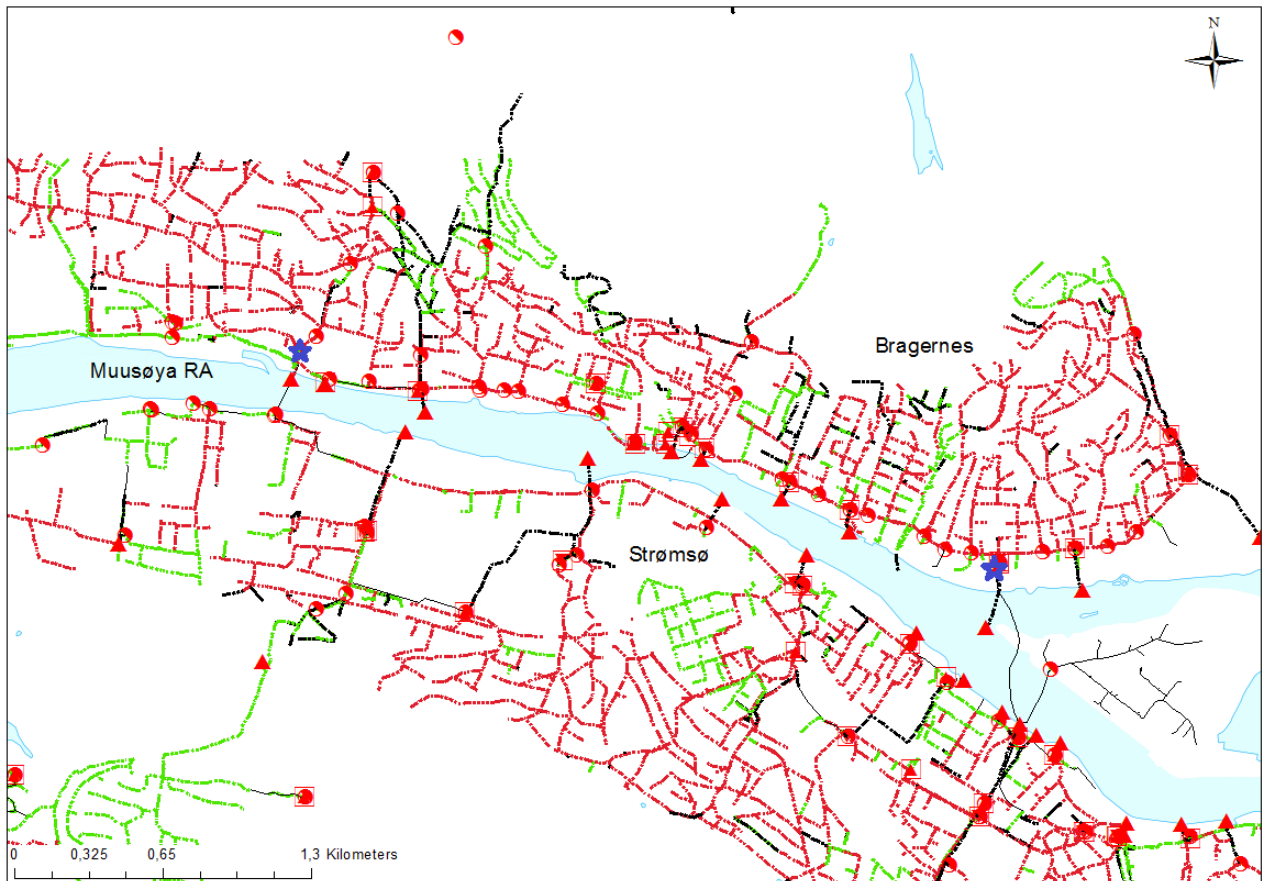
På samme måte som Case E, simulerte denne modellen et fordrøyningsmagasin, men med et volum på 5000 m<sup>3</sup>. Dette ble gjort ved ta utgangspunkt i Case E, men endre diameter i kummen til 35,69 meter, og kjøre samme simulering en gang til. Utover endring av diameter, ville alle andre innstillinger være de samme. Det vil si at 85 % av magasinet fortsatt ble brukt til fordrøying, men at dette nå tilsvarte et fordrøyningsvolum på 4250 m<sup>3</sup>.

### 3.3.4 Case G – 20000 m<sup>3</sup> uten pumpeledning

Denne modellen ble lagd på samme måte som Case F, ved å ta utgangspunkt i modellen for Case E, og kun endre diameter på kummen for fordrøyningsmagasinet til 71,37 m, som tilsvarer et volum på 20000 m<sup>3</sup>. Som i Case F var ble fortsatt 85 % av magasinet brukt som fordrøyningsvolum, noe som tilsvarer 17000 m<sup>3</sup>.

### 3.3.5 Case H – Pumping mellom Bragernes og Muusøya

I denne modellen ble det tatt utgangspunkt i Case D, og installert to pumper, én ved Landfalloverløpet, og én i samme kum (manhole ID 65080) som Søren Lemmich-pumpene som pumpet avløpsvann fra Bragernes og over til Strømsø på andre siden av elva. Posisjonene for disse kan sees i figur 3-8, i form av to stjerner.

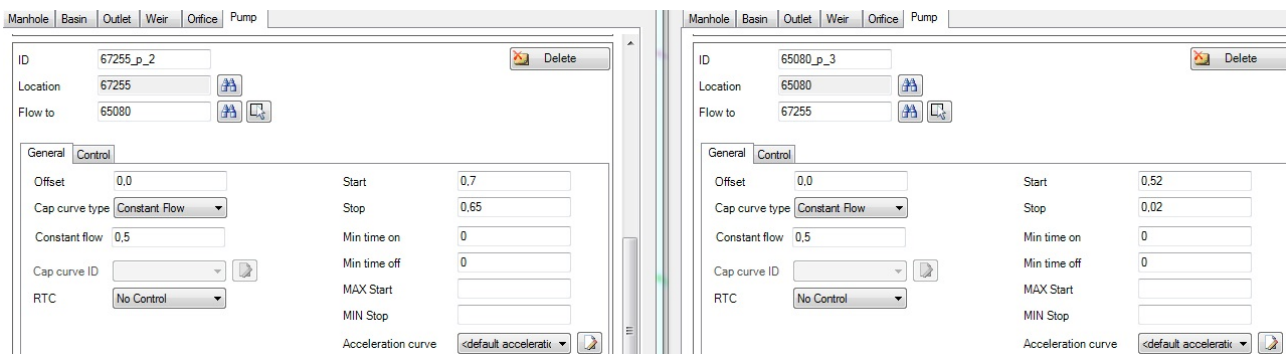


Figur 3-8: Kart over modellen, som viser de to punktene de to aktuelle pumpene for Case H-K.

Pumpa ved Landfalloverløpet (pump ID 67255\_p\_2) pumpet 0,5 m<sup>3</sup>/s til Bragernes, og startet idet nivået i kummen den befant seg var 5 cm under overløpskanten, og stoppet da den var 10 cm under.



Denne pumpen ville dermed kun pumpe vann til tider der det ellers ville gått i overløp i denne kummen. Pumpa på Bragernes (pump ID 65080\_p\_3) fungerte på samme måte, men motsatt vei. Den pumpet 0,5 m<sup>3</sup>/s fra Bragernes til Muusøya, og lå i samme kum som de andre pumpene som pumpet over til Strømsø. I denne kummen var det ikke et overløp, dette var i kummen ved siden av, ved en absolutt høyde på 0,87 meter. Den aktuelle pumpen startet 35 cm under denne overløpskanten, og stoppet 85 cm under. Denne pumpen ville altså kun starte like før det gikk i overløp i nabokummen på Bragernes. Innstillinger for de to pumpene kan sees i figur 3-9.



Figur 3-9: Innstillinger for pumpene som pumper fra Muusøya til Bragernes (til venstre) og fra Bragernes til Muusøya (til høyre).

Dersom det var ledig kapasitet enten på Muusøya eller på Bragernes, ville disse pumpene kunne sørge for at det ikke går i overløp i en situasjon der dette ellers ville skjedd. Dersom for eksempel pumpa på Muusøya-siden startet, ville dette føre til at vann begynner å stuves opp også på Bragernes-siden, helt til det nærmet seg overløp også der, samtidig som nivået i kummen med Landfalloverløpet ville hindres fra å nå nivået for overløpskanten. Da ville også pumpa på Bragernes-siden begynne og gå, og de to pumpene ville utlikne hverandre, og ingen virkelig omfordeling ville foregå. I en reell situasjon vil dette være håpløs sløsing av energi, men av modellhensyn er dette en fornuftig løsning og vil tilsvare at begge pumpene står stille. Når en slik situasjon oppstår, vil man kunne få overløp begge steder. Riktignok vil en slik løsning sørge for at overløp kun oppstår når kapasiteten er fullt utnyttet både på Muusøya og på Bragernes. Denne metoden var den beste tilgjengelige i den programvaren som ble brukt. Ideelt kunne man brukt regler for nivåer på de to magasinene, for å fastslå hvilken vei det skal pumpes, som vist av Wang mfl. (2015).

### 3.3.6 Case I – 1000 m<sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya

Denne modellen kombinerte Case E og Case H, der man fikk fordeling av vann mellom Bragernes og Muusøya, i kombinasjon med et fordrøyningsmagasin på 1000 m<sup>3</sup> ved Landfalloverløpet, som utvidet kapasiteten der. Dette ble gjort ved å ta utgangspunkt i Case H, og endre diameter på kummen som inneholdt Landfalloverløpet, pumpa som representerer Muusøya RA, og pumpa som pumper til Bragernes, til 15,96 meter. Med en slik modell ville det være større muligheter for å fordele vann til Muusøya og fordrøye det der, i perioder der hele kapasiteten på Bragernes var utnyttet. På den måten ville de to pumpene bedre kunne utnyttes, ved at det er kapasitet til å stuve opp vann begge steder.

### 3.3.7 Case J – 5000 m<sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya

Ved å ta utgangspunkt i Case I, og endre diameter i kummen ved Landfalloverløpet til 35,69 meter, fikk man en tilsvarende situasjon som i Case I, men med et fordrøyningsmagasin på 5000 m<sup>3</sup>.

### 3.3.8 Case K – 20000 m<sup>3</sup> med pumping mellom Bragernes og Muusøya

På samme måte som Case J, tok denne modellen utgangspunkt i Case I. Ved å endre diameter i kummen ved Landfalloverløpet til 71,37 meter, ble volumet for dette fordrøyningsmagasinet utvidet til 20000 m<sup>3</sup>.

En oversikt over forskjellene mellom de 9 forskjellige modellene er gitt i tabell 3-4. Denne tabellen nevner ikke enkelte endringer som er gjort fra Case A og D, på de resterende modellene. Case B og C inneholder andre konsepter enn disse casene, og vil sammenlignes med Case A separat. Tanken er da til slutt å sammenligne tiltak som ikke gjør endringer på selve ledningsnettet, med tiltak som legger til nye konstruksjoner på ledningsnettet.

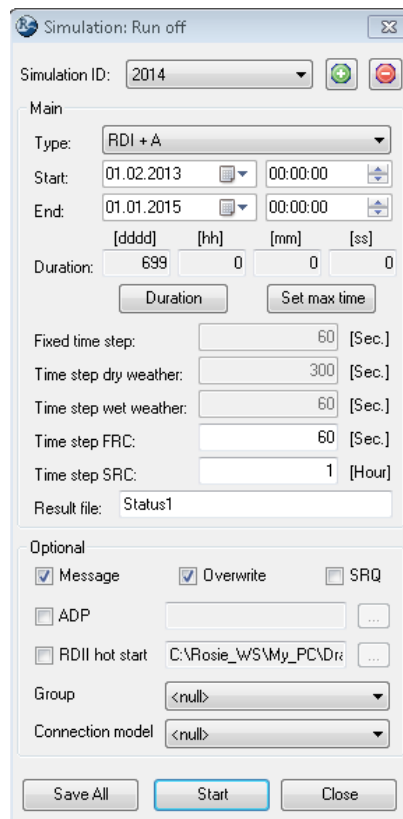
Tabell 3-4: Oversikt over forskjellene mellom Case A og Case D-K,

	Case A	Case D	Case E	Case F	Case G	Case H	Case I	Case J	Case K
<b>Diameter Manhole 67255</b>	1,3	1,3	15,96	35,69	71,37	1,3	15,96	35,69	71,37
<b>Volum Manhole 67255</b>	x	x	1000	5002	20003	x	1000	5002	20003
<b>Pumpe 67255_p_1</b>	nei	nei	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
<b>Pumpe 67255_p_2</b>	nei	nei	nei	nei	nei	ja	ja	ja	ja
<b>Pumpe 65080_p_3</b>	nei	nei	nei	nei	nei	ja	ja	ja	ja
<b>Diameter Pipe 14288</b>	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

### 3.4 Simulering

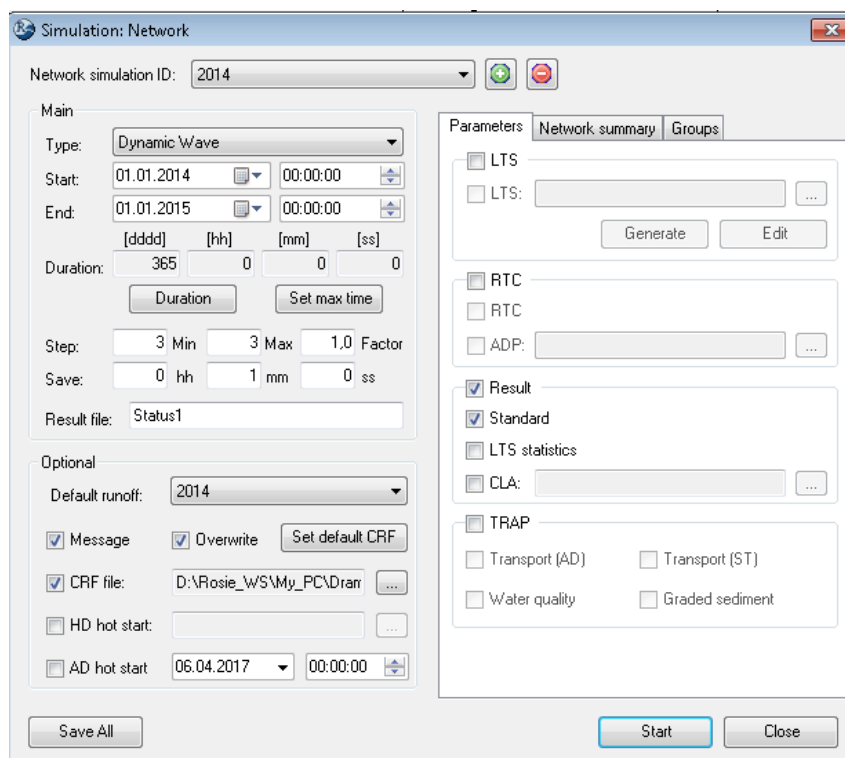
For å få gode resultater for effektene av tiltakene i Case D-K, ble det kjørt identiske nettverkssimuleringer for Case A og Case D-K for hele Drammen, for hele 2014. Dette ble utført av Rosim AS. På grunn av nevnte utfordringer med simuleringstid, ble Case B og C simulert av undertegnede for kun oktober 2014, som var den måneden med mest overløp i simuleringen av Case A. Case A ble også kjørt en gang kun for oktober 2014, for å få et best mulig sammenligningsgrunnlag. Case D vil bli sammenlignet med Case A, for å vise effekten av endringen i diameter på den ene ledningen mellom Landfalloverløpet og Muusøya RA. Videre vil simuleringene av de resterende modellene sammenliknes med Case D, for å se effekten av tiltakene med magasiner og fordelingspumper alene, siden de resterende modellene også inneholder denne utvidede ledningen som utgjorde Case D.

Siden alle modellene hadde identiske nedbørsfelt for overvann og spillvann, og dermed hadde lik tilførsel av dette, ble samme runoff-simulering benyttet for simuleringen av alle modellene. Innstillingene for denne simuleringen kan sees i figur 3-10. Her kan man se at runoff-simuleringen startet 11 måneder før network-simuleringen var tenkt, for å sørge for at de hydrologiske parameterne var mest mulig realistiske ved starten av network-simuleringen. De andre innstillingene er standard for Rosims simuleringer.



Figur 3-10: Innstillinger for runoff-simulering.

Nettverkssimuleringen ble så utført for hele 2014 med samme innstillinger for alle modellene, unntatt Case B og C. Simuleringene av Case B og C hadde samme innstillinger, bortsett fra ”Start” og ”End”. Siden disse skulle kjøres for oktober 2014, var start-dato 30/9/14 og slutt-dato 1/11/2014. Simuleringen startet ett døgn før månedsskiftet, slik at ledningsnettets ville ha stabilisert seg i det oktober startet. Rosim erfarer at det som regel tar 4 timer for en simulering å oppnå riktige verdier for nivåer og volumstrøm, så et døgn ble valgt for å være på den sikre siden. Innstillingene for en nettverksimulering kan sees i figur 3-11. Her kan man se at simuleringer ble gjort med et fast tidskritt på 3 sekunder, og alle verdier ble lagret med ett minutt mellomrom.



Figur 3-11: Innstillinger for Network-simulering.

### 3.5 Vurdering av resultater

I oppgaven er det ikke tatt hensyn til om noen overløp er viktigere å redusere enn andre. Derfor er det den totale overløpsmengden i alle overløpene i ledningsnettets det blir sett på. Selv om endringer i modellene i utgangspunktet var ment å ha effekt kun noen få steder, kan endringene gi ringvirkninger andre steder. Ved å se på summen av alle overløpene, er man sikker på å få med alle endringene. Videre blir det sett nærmere på resultater for spesifikke overløp, og grupper av overløp, for å se nærmere på effekten av tiltakene. Resultatene blir først presentert i to deler, der resultatene for modellene som utnytter eksisterende ledningsnett og resultatene for modellene med nye konstruksjoner gjennomgås hver for seg. Videre vil disse resultatene sammenliknes opp mot hverandre. Det vil også bli vist hvordan endringene i modellene påvirker renseanleggene, ved å vise hvor mange timer renseanleggene opereres ved  $Q_{maksdim}$  og over  $Q_{maks}$  gjennom hele simuleringsperioden for alle modellene. Dette ble gjort i Excel ved å telle antall datapunkter som hadde verdi over henholdsvis  $Q_{maksdim}$  og  $Q_{maks}$ , der hvert datapunkt representerte volumstrømmen for ett minutt. Målet var at disse verdiene skulle være lavest mulig, for å ha god rensing. Dette kan sees på som et tegn på jevn volumstrøm. Diskusjonskapittelet vil diskutere resultatene med samme struktur. I tillegg vil det komme forslag til tiltak og forslag til videre arbeid.

## 4 Resultater

### 4.1 Resultater for modeller som utnytter eksisterende ledningsnett

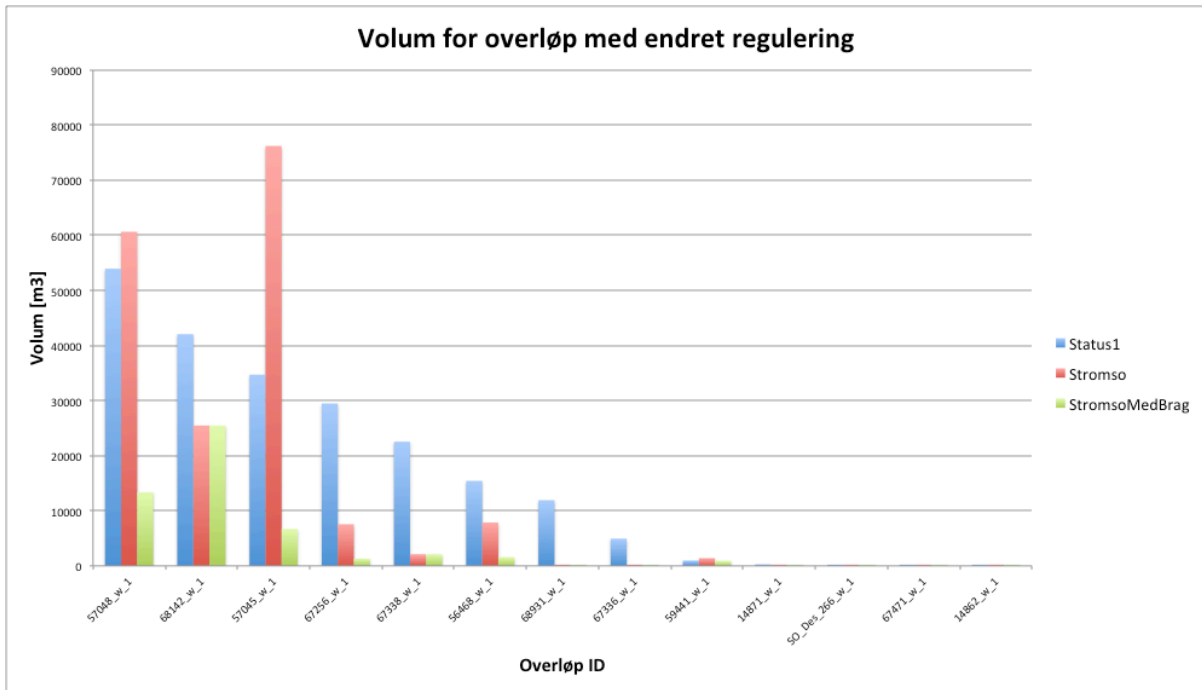
Tabell 4-1 viser totalt overløpsvolum for oktober 2014 for tre modeller. Status1Okt er referansemodellen, som representerer dagens forhold, Stromso er modellen med endringer i reguleringer på Strømsø, og StromsoMedBrag er modellen med ytterligere styring av Søren Lemmich-pumpene på Bragernes. Tabellen viser også reduksjonen i overløp i forhold til Status1, både i volum og i prosent av totalt volum i Status1. Tallene for Status1, som er vist i tabell A-1 i Vedlegg A, viser at oktober hadde over en tredjedel av overløpet for hele året.

Tabell 4-1: oversikt over totalt overløpsvolum i oktober 2014 for modellene som utnytter eksisterende ledningsnett,

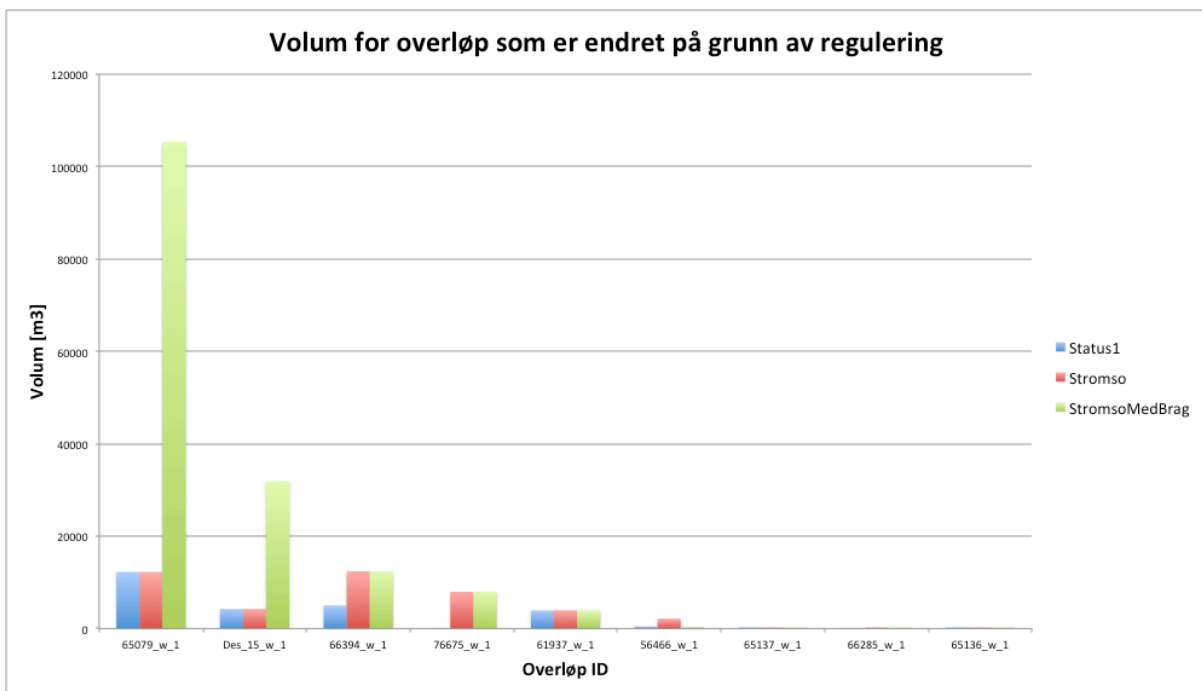
Case	Egen	Oktober [m3]	Diff Status1 [m3]	Diff Status1 [%]
Case A	Status1Okt	783305	0	
Case B	Stromso	765458	17847	2,3%
Case C	StromsoMedBrag	754726	28579	3,6%

I figur 4-1 kan man se overløpsvolumet for hvert overløp som har fått justert regulering, for hver av de tre nevnte modellene. Rekkefølgen er sortert etter volumet for hvert overløp fra Status1, noe som kommer tydelig fram fra de blå søylene. Figur 4-2 viser på samme måte som figur 4-1 overløpsvolum for noen utvalgte overløp. Dette er andre overløp der det oppstår en endring i volum på grunn av tiltakene som er gjort i Case B og C. Nøyaktige verdier som danner disse figurene kan sees i tabell A-3 i Vedlegg A.

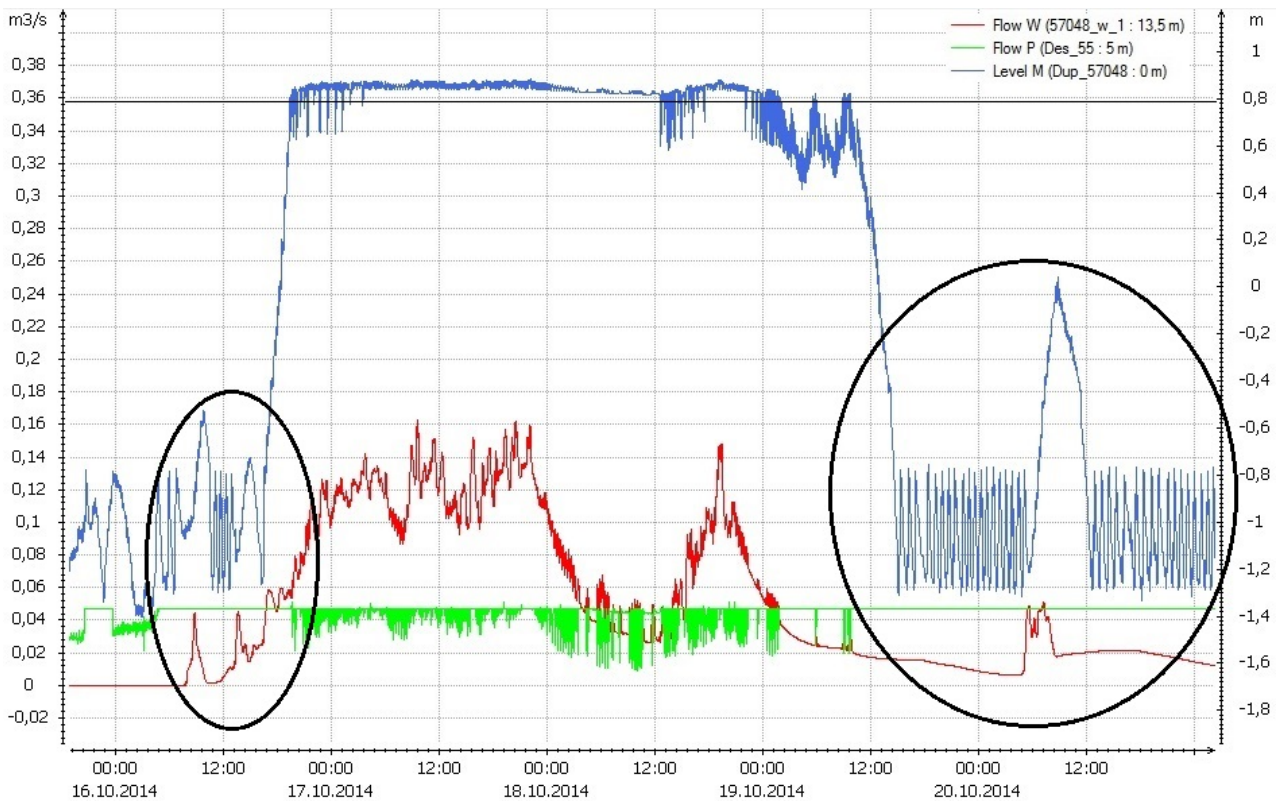
Figur 4-3 viser en graf av volumstrøm i overløp 57048 (rød kurve), volumstrøm i nedstrøms ledning med regulering (grønn kurve) og nivå i kummen nedstrøms denne ledningen (blå kurve) for en periode på noen dager for Status1-simuleringen. Svart vannrett strek representerer overløpsnivå (0,79 meter) i nedstrøms overløp. Figur 4-4 viser det tilsvarende for StromsoMedBrag-simuleringen.



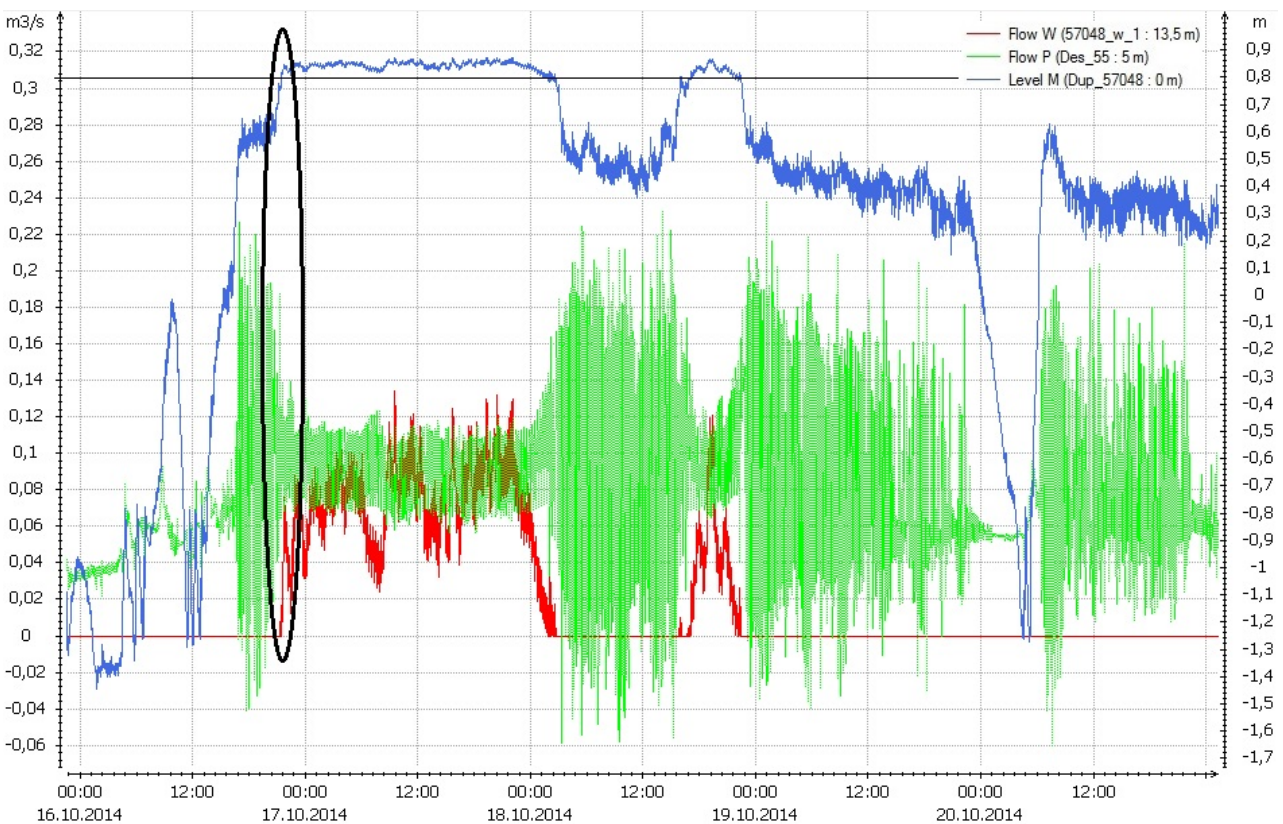
Figur 4-1: Overløpsvolum for hvert overløp som har justert regulering, for tre modeller.



Figur 4-2: Overløpsvolum for de overløp som er påvirket av justerte reguleringer, for tre modeller.



Figur 4-3: Volumstrøm i overløp 57048, nedstrøms ledning, og nivå i nedstrøms kum fra Status 1.



Figur 4-4: Volumstrøm i overløp 57048, nedstrøms ledning, og nivå i nedstrøms kum fra StromosMedBrag.



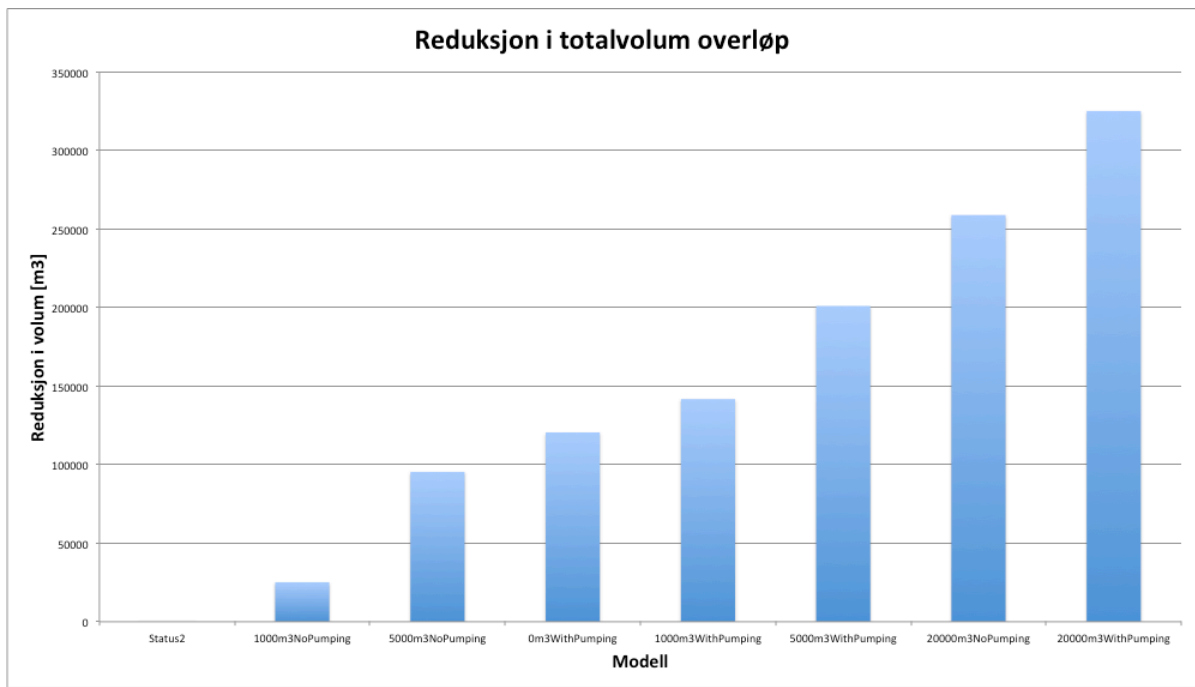
## 4.2 Resultater for modeller med nye konstruksjoner

Tabell 4-2 viser en oppsummering av resultatene for alle modellene med nye konstruksjoner på ledningsnettet, der modellene er sortert etter totalt overløpsvolum for hele 2014. Tredje kolonne viser forskjellen mellom Status1 og de respektive modellene. Siden modellene med endringer skal sammenlignes med Status2, viser fjerde kolonne forskjellen mellom Status2 og de respektive modellene. Femte kolonne viser denne forskjellen i prosent av totalt overløpsvolum for hele Drammen fra Status2.

Tabell 4-2: tabell over beregnet totalt overløpsvolum for 2014 for alle modellene med nye konstruksjoner,

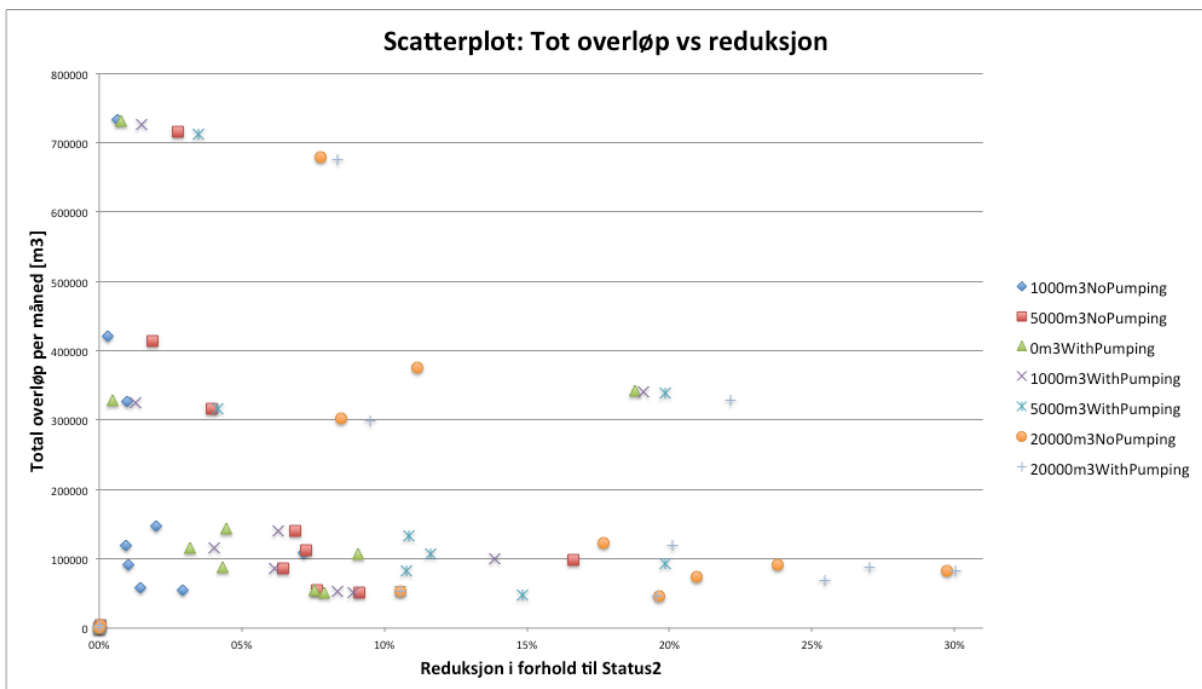
Case	Modell	Volum - 2014 [m3]	Diff fra Status1 [m3]	Diff fra Status2 [m3]	Diff fra Status2 [%]
Case A	Status1	2301872	0		
Case D	Status2	2096668	205204	0	0,00%
Case E	1000m3NoPumping	2071522	230350	25146	1,20%
Case F	5000m3NoPumping	2001256	300616	95412	4,55%
Case H	0m3WithPumping	1976164	325709	120504	5,75%
Case I	1000m3WithPumping	1954927	346945	141741	6,76%
Case J	5000m3WithPumping	1895657	406215	201011	9,59%
Case G	20000m3NoPumping	1837773	464099	258895	12,35%
Case K	20000m3WithPumping	1771521	530351	325147	15,51%

Figur 4-5 viser et søylediagram for kolonne fire i tabellen, og gir en illustrasjon av endringen i totalt overløpsvolum for de forskjellige modellene i forhold til Status2.



Figur 4-5: Diagram som viser reduksjon i total overløpsmengde i forhold til Status 2.

Figur 4-6 viser et "scatterplot" der totalt overløp per måned (hentet fra tabell A-1) plottes mot tilsvarende reduksjon av overløp i prosent av Status2 for samme måned (hentet fra tabell A-4). Punktene øverst til venstre i grafen representerer verdier fra oktober, som var den måneden med mest overløp.



Figur 4-6: Scatterplot av sammenhengen mellom totalt overløp per måned, og reduksjon i forhold til Status2 for hver modell.

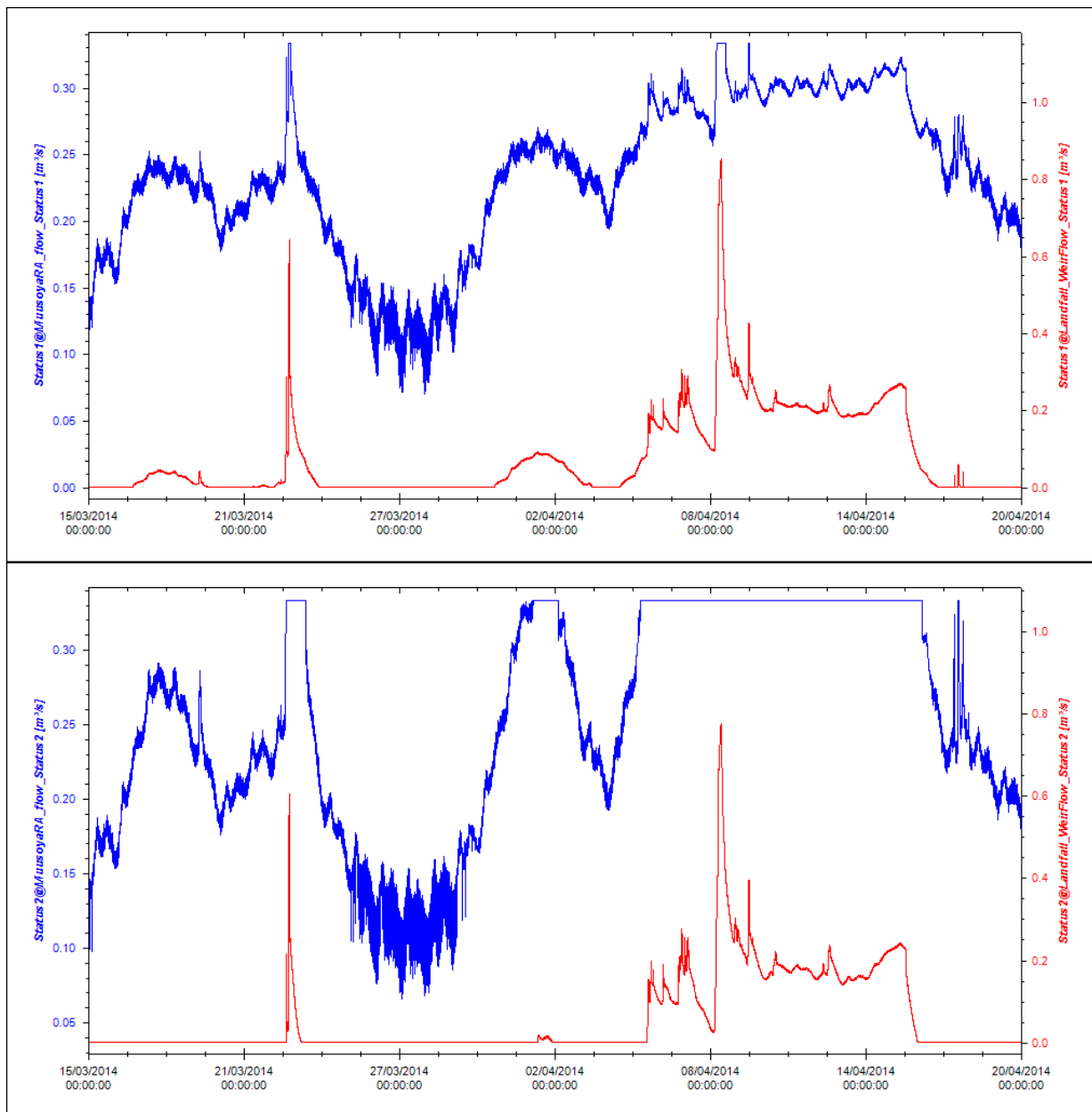
#### 4.2.1 Status1 vs Status2

Tabell 4-3 viser de overløpene som endres mer enn 350 m<sup>3</sup> fra Status1 til Status2. Det vises total overløpsmengde for hele 2014, for begge modellene, samt forskjellen mellom disse. Negativ verdi indikerer en økning i overløpsmengde.

Tabell 4-3: Sammenlikning av utvalgte overløp for Status1 og Status2.

<b>WeirID</b>	<b>Status1</b>	<b>Status2</b>	<b>Status1-Status2</b>
50433_w_1	2255	5751	-3496
505_Store Landfall	4128	6016	-1888
507_Landfall	682399	456171	226229
Des_6_w_1	36	12638	-12603

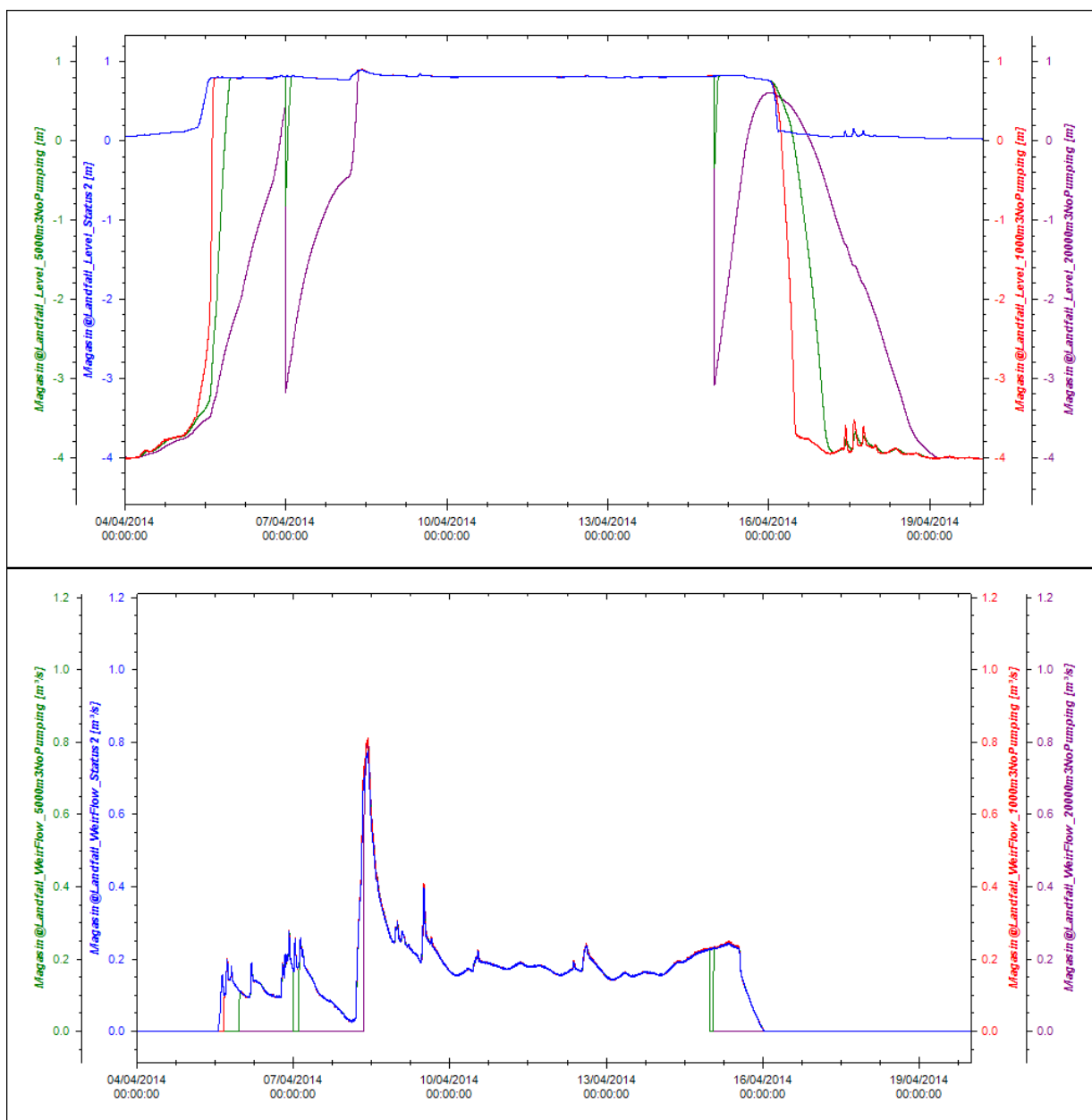
Figur 4-7 viser volumstrøm for Muusøya RA i blått, og Landfalloverløpet i rødt, for en periode på litt over en måned, for Status1 og Status2. Renseanleggets kapasitet er på 0,333 m<sup>3</sup>/s, og man kan se at den blå kurven aldri går over denne verdien.



Figur 4-7: Graf for volumstrøm i Muusøya RA og i Landfalloverløpet, for Status1 (øverst) og Status2 (nederst).

#### 4.2.2 Effekten av fordrøyningsmagasin

I figur 4-8 sammenliknes nivået i kummen for Landfalloverløpet (øverste graf), og volumstrøm for overløpet (nederste graf), for Case D-G for en toukers periode. Case D (Status2) er i blått, Case E (1000m3NoPumping) i rødt, Case F (5000m3NoPumping) i grønt og Case G (20000meNoPumping) i lilla.

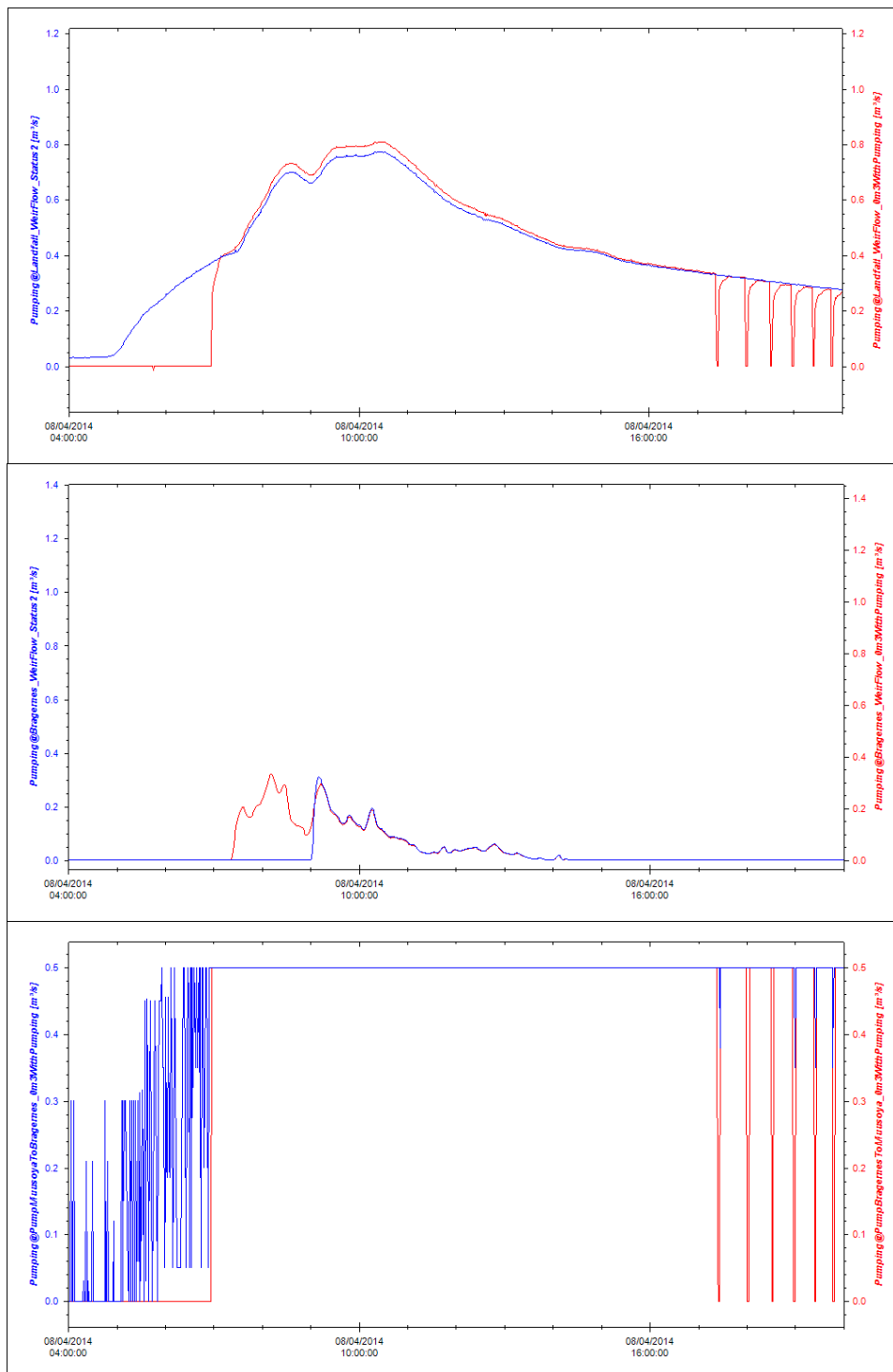


Figur 4-8: Graf av nivå og volumstrøm for Landfalloverløpet, for fire modeller.

#### 4.2.3 Effekten av pumping mellom Muusøya og Bragernes

Figur 4-9 viser en tidsserie av overløp ved Landfalloverløpet (øverst) og Søren Lemmich-pumpe-stasjonen (i midten), samt volumstrøm for pumpen som pumper mellom Muusøya og Bragernes (nederst). I de to øverste grafene representerer blå kurve Case D (Status2) og rød kurve Case H (0m<sup>3</sup>WithPumping). I nederste grafen representerer blå kurve volumstrøm for pumpen som

pumper fra Muusøya til Bragernes i Case H, mens rød kurve representerer pumpen som pumper motsatt vei i samme modell.



Figur 4-9: Graf av volumstrøm i Landfalloverløpet øverst, volumstrøm i Søren Lemmich-overløpet i midten, og volumstrøm i pumpene som pumper mellom Muusøya og Bragernes nederst.

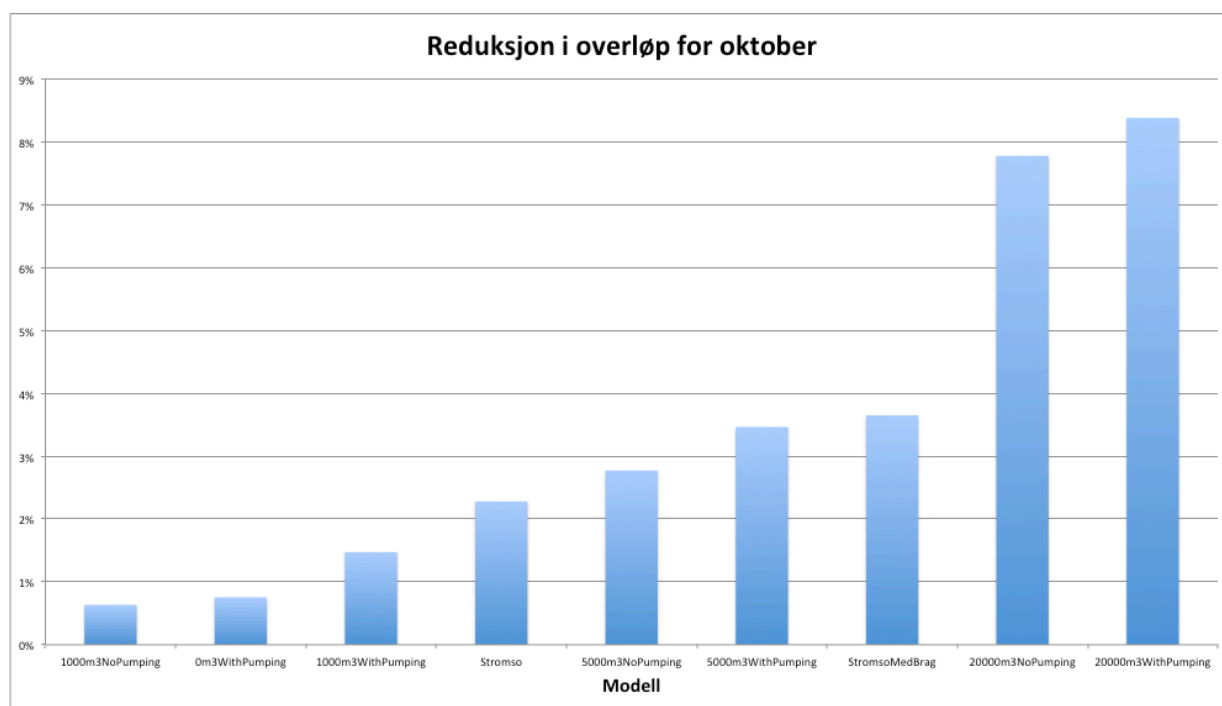
I tabell 4-4 kan man se overløpsvolumene for hele 2014 i de overløpene med betydelige endringer i de forskjellige modellene med pumping mellom Muusøya og Bragernes, i forhold til Status2.

Tabell 4-4: Overløpsvolum i m<sup>3</sup> for utvalgte overløp for modeller med pumping mellom Muusøya og Bragernes,

WeirID	Status2	0m3With Pumping	1000m3With Pumping	5000m3With Pumping	20000m3With Pumping
50433_w_1	5751	10382	9722	8336	4245
505_Store Landfall	6016	6778	6511	5981	4950
507_Landfall	456171	323404	311159	266370	162722
508_Landfall	7113	7099	6820	6339	5419
65079_w_1	24174	38521	32709	25639	13388
Des_15_w_1	8766	13555	12370	9223	5262

### 4.3 Sammenlikning av resultater i 4.1 og 4.2

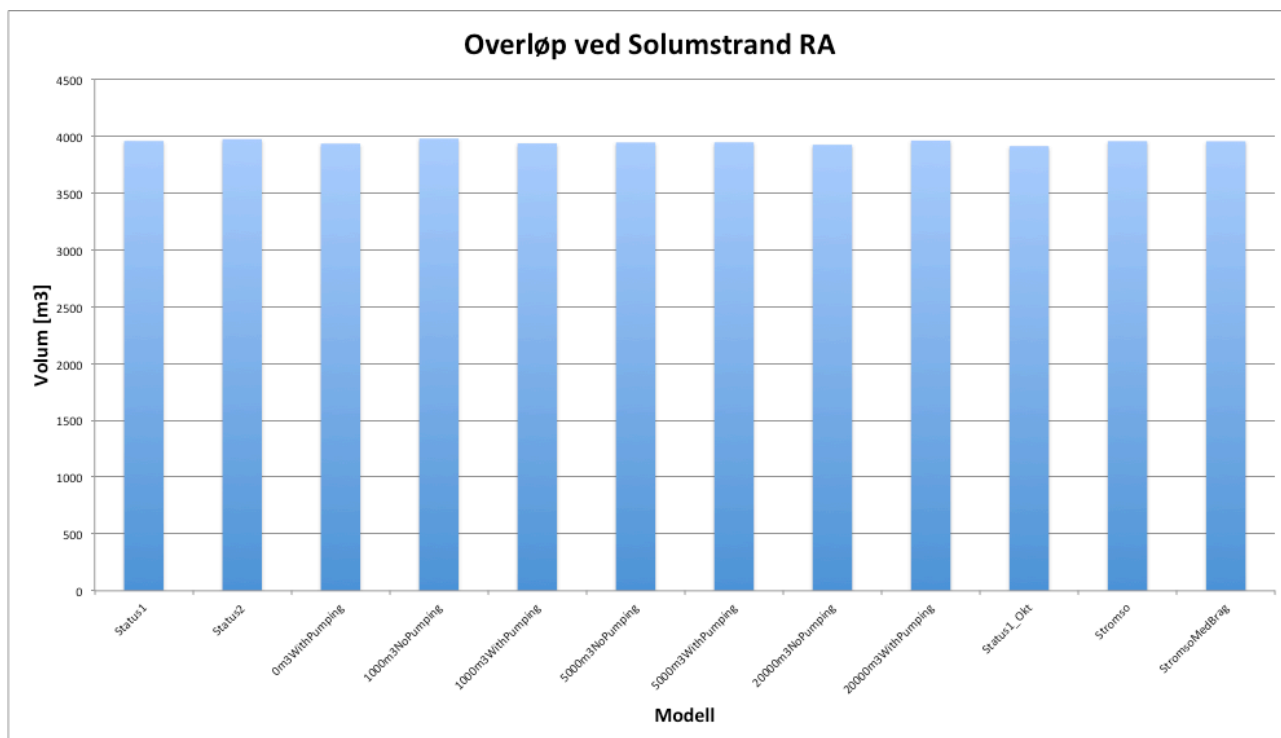
Figur 4-10 viser effekten av alle modellene bortsett fra Status1 og Status2. Det vises en søyle for hver modell som representerer prosentvis reduksjon i forhold til opprinnelig modell. Case B (Stromso) og Case C (StromsoMedBrag) er vist i forhold til Status1, mens resten er vist i forhold til Status2. Dette fordi Case B og C ikke inneholder den utvidede ledningen i Status2, som utgjør mye av effekten for de andre modellene. Tabell A-5 i Vedlegg A viser tallene og beregningene bak figur 4-10.



Figur 4-10: Diagram som viser reduksjon i total overløpsmengde for alle modellene i forhold til opprinnelig modell, for oktober 2014.

## 4.4 Påvirkninger på renseanleggene

I figur 4-11 kan man se hvor mye som gikk i overløp ved Solumstrand RA i løpet av oktober måned for alle modellene.



Figur 4-11: Overløpsvolum ved Solumstrand RA for oktober måned.

### 4.4.1 Påvirkningen modeller med eksisterende ledningsnett har på renseanleggene

Tabell 4-5 viser hvor mange timer Solumstrand RA opererte ved  $Q_{maksdim}$  og over  $Q_{dim}$  i løpet av oktober for referansemodellen Status1 og de to modellene som utnytter det eksisterende ledningsnett. Disse endringene påvirket ikke Muusøya RA, så tallene for dette anlegget er ikke tatt med.

Tabell 4-5: antall timer over  $Q_{dim}$  og  $Q_{maksdim}$  for renseanleggene i løpet av oktober 2014,

Oktober 2014	Solumstrand	
	Timer ved $Q_{maksdim}$ (3100 m3/t)	Timer over $Q_{dim}$ (2000 m3/t)
Status1	123	394
Stromso	124	408
StromsoMedBrag	126	416



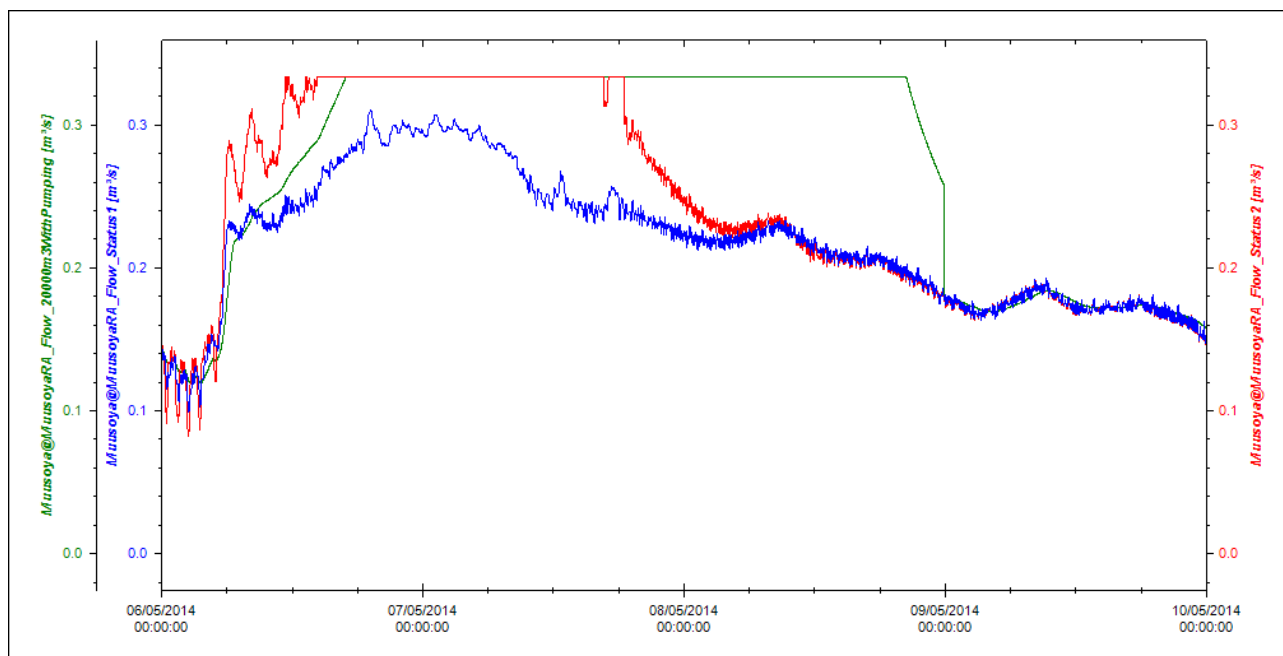
#### 4.4.2 Påvirkningen modeller med nye konstruksjoner har på renseanleggene

Tabell 4-6 viser hvor mange timer Solumstrand RA og Muusøya opererte ved sine respektive  $Q_{maksdim}$  og over  $Q_{dim}$  i løpet av 2014 for referansemodellene Status1 og Status2, og alle modellene med nye konstruksjoner på ledningsnettet.

Tabell 4-6: antall timer over  $Q_{dim}$  og  $Q_{maksdim}$  for renseanleggene i løpet av 2014,

Hele 2014	Solumstrand		Muusøya	
	Antall timer ved $Q_{maksdim}$ (3100 m <sup>3</sup> /t)	Antall timer over $Q_{dim}$ (2000 m <sup>3</sup> /t)	Antall timer ved $Q_{maksdim}$ (1200 m <sup>3</sup> /t)	Antall timer over $Q_{dim}$ (780 m <sup>3</sup> /t)
Status1	218	1132	86	1539
Status2	218	1135	831	1625
0m <sup>3</sup> WithPumping	221	1221	815	1621
1000m <sup>3</sup> NoPumping	220	1134	926	1639
1000m <sup>3</sup> WithPumping	221	1213	922	1639
5000m <sup>3</sup> NoPumping	219	1132	1032	1708
5000m <sup>3</sup> WithPumping	219	1210	1029	1706
20000m <sup>3</sup> NoPumping	218	1132	1160	1910
20000m <sup>3</sup> WithPumping	219	1183	1159	1911

Figur 4-12 viser volumstrømmen i løpet av 4 dager for tre av modellene som ble simulert for hele 2014. Status1 er blå kurve, Status2 er rød kurve, og 20000m<sup>3</sup>WithPumping er grønn kurve.



Figur 4-12: Volumstrøm i Muusøya RA for 3 modeller.

## 5 Diskusjon

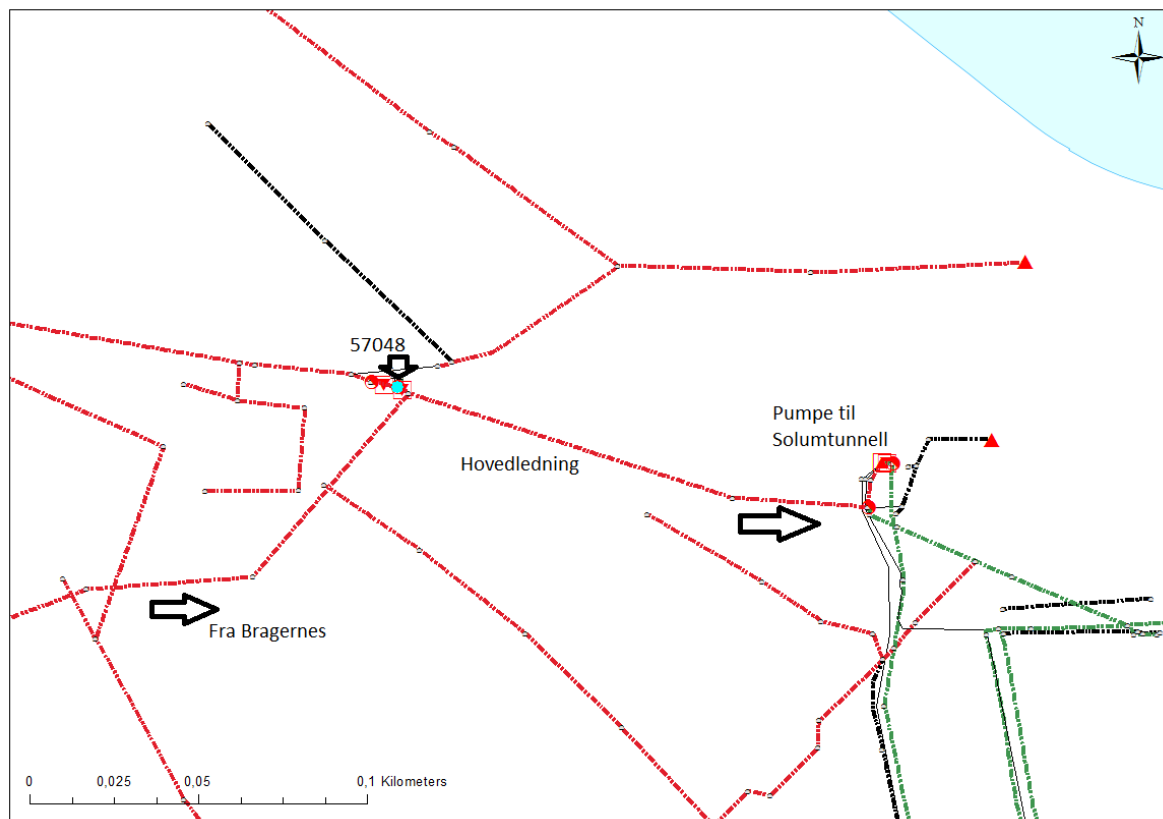
Dette kapittelet går gjennom resultatene, drøfter de og kommer med forklaringer. Videre kommer det forslag til tiltak og videre arbeid.

### 5.1 Modeller som utnytter eksisterende ledningsnett

Tatt i betraktning at Case B tar for seg endringer som har effekt på kun en liten del av ledningsnettet, må man kunne si at tiltaket har en god effekt. Som vist i tabell 4-1, sørger denne modellen for en reduksjon på 17847 m<sup>3</sup> i overløp i løpet av oktober 2014. Videre viser tabellen at Case C gir en ytterligere effekt, omtrent 60 % mer enn Case B. Dette viser at jo større del av ledningsnettet som fylles opp før det oppstår overløp, jo mindre blir overløpsvolumet. Tabellen viser også at modellene fjerner henholdsvis 2,3 og 3,6 % av totalt overløp for kommunen. Tabell A-3 i Vedlegg A viser at denne endringen er på henholdsvis 7,4 og 11,8 % av total overløpsmengde i de overløpene som er påvirket av tiltakene. I delkapittel 5.2 blir det vist hvordan denne andelen er høyere i måneder med mindre overløp, slik at man kan forvente at den prosentvise effekten for hele året for disse modellene er høyere.

For å se hvilken effekt de forskjellige 13 tiltakene har, kan man se på figur 4-1, og se forskjellen i volum ved hvert overløp for de respektive modellene. For de 4-5 siste overløpene er volumene så små at de ikke synes i figuren, men det er uansett de største volumene som er mest interessante. Man kan se nærmere på de faktiske tallene i tabell A-3. I de overløpene som har betydelige volumer, kan man tydelig se effekten av tiltakene. For Case C (StromsoMedBrag) er overløpsvolumet betydelig redusert for alle overløpene. For Case B (Stromso) har to av overløpene (57048 og 57045) en økning i volum. Dette kommer av at disse overløpene ligger tett opptil hovedledningen, som fylles opp i større grad når alle ledningene med justert regulering åpnes på grunn av oppstuvning i overløpskum. Når oppstuvning oppstår i denne ledningen, ville dette forplante seg til disse overløpskummene. Som eksempel viser figur 5-1 hvordan overløp 57048 ligger i forhold til hovedledningen. Som figur 4-1 viser, tar styringen av Søren Lemmich-pumpene seg av dette, og minker volumstrømmen i hovedledningen såpass at denne oppstuvningen ikke oppstår i like stor grad. Dermed får kombinasjonen av tiltakene som er gjort i Case C en meget god effekt på situasjonen på alle de utvalgte overløpene på Strømsø. Riktignok påvirker nevnte tiltak andre overløp både på Strømsø- og Bragernessiden, noe figur 4-2 og tabell A-3 viser. Noen av overløpene opplever økt overløpsvolum, fordi de befinner seg nedstrøms ett av overløpene det er

gjort tiltak på. Verdt å nevne er overløp 61937, dette er overløpet ved Solumstrand RA. Dette oppnår en minimal økning i overløp, noen som kan forventes, siden det er en økt mengde videreført avløpsvann som kommer dit. At denne økningen er så liten indikerer at Solumtunnelen har god kapasitet for denne økte volumstrømmen. Stengingen av ledningen ved Søren Lemmich-pumpene forårsaker oppstuvning på Bragernes, noe som forklarer den kraftige økningen i overløpsvolum ved overløpene 65079 (som er tilknyttet pumpene) og Des\_15. Likevel ser man, som nevnt, at den totale overløpsmengden går ned, slik at disse tiltakene kan forsvares, selv med økt overløp visse steder.



Figur 5-1: Utsnitt av modellen som viser plasseringen av overløp 57048 i forhold til hovedledningen.

Overløpet 57048 er tatt som utgangspunkt for å gi et eksempel på utfordringene med de opprinnelige forholdene, og effekten av tiltakene i Case B og C. I figur 4-3 viser de svarte ringene eksempler på tider der vann går i overløp (rød kurve), samtidig som nivået i nedstrøms kum (blå kurve) indikerer at det er ledig kapasitet nedstrøms. Dette kommer av at reguleringen i ledningen mellom (grønn kurve) begrenser videreført vannføring til  $0,047 \text{ m}^3/\text{s}$ . I figur 4-4 viser svart ring at overløp først oppstår i det nivået i nedstrøms kum er over overløpskanten for overløp 57048, slik at det ikke er noen høydeforskjell, og dermed ingen volumstrøm i ledningen imellom. Man kan også se at nivået i nedstrøms kum avtar tregere, på grunn av vann som er blitt fordrøyd her og andre

steder, og som renner av senere. Merk at volumstrømmen i ledningen med regulering varierer veldig, fordi reguleringen justeres opp og ned i takt med referansekummen (57048). Dette er ikke hensiktsmessig i en reell situasjon, der man må ha et bedre system for mer jevn styring. I modellsammenheng er dette likevel en god tilnærming, for å få denne styringen til å skje automatisk.

Tiltaket i Case C, som er styring av Søren Lemmich-pumpene, kan anses som et mye enklere tiltak i praksis enn alle de 13 tiltakene som ble gjort i Case B. Muligens kan allerede eksisterende nivåmålere brukes, som videre kan gi informasjon for aktiv styring av selve Søren Lemmich-pumpene, og ikke ledningen som tilfører vann. Dette tiltaket vil riktignok ha liten effekt alene, siden det er få problemer med overløp nedstrøms utløpet til pumpeledningen på Strømsø siden (overløp 56466 hadde kun 441 m<sup>3</sup> overløp hele oktober i Status1). Denne hovedledningen utnyttes ikke til det fulle under dagens forhold, men blir utnyttet fullt når tiltakene i Case B iverksettes. I en slik situasjon er det her vist at styring av Søren Lemmich-pumpene har en god effekt. Case B anbefales derfor ikke som tiltak alene, derimot anbefales Case C, med både tiltak på Strømsø og ved Søren Lemmich-pumpene, som et mulig tiltak.

7 av reguleringene på Strømsø oppnår et redusert overløpsvolum på over 10000 m<sup>3</sup> ved sine respektive overløp, også tatt i betraktning bieffekter nedstrøms. I prioritert rekkefølge anbefales det å innføre justert regulering ved overløpene i kum 57048, 57045, 67256, 67338, 68142, 56468 og 68931. Dette forutsetter at det også innføres styring av Søren Lemmich-pumpene på Strømsø. De resterende 5 tiltakene står bare for en ørliten del av den totale effekten, og anbefales derfor ikke å iverksettes.

## 5.2 Modeller med nye konstruksjoner på ledningsnett

Resultatene i tabell 4-2 viser at endringen fra Status1 til Status2 alene har en effekt på over 200 000 m<sup>3</sup> i redusert overløp. Denne endringen var å øke diameteren på en ledning i modellen fra 0,3 til 0,6 meter, noe som sannsynligvis tilsvarer å flushe ledningsstrekket fra Landfall-overløpet til Muusøya RA rent for sedimenter. Tabellen viser at dette tiltaket har omtrent tilsvarende effekt som et fordrøyningsmagasin på 5000 m<sup>3</sup> kombinert med pumping mellom Bragernes og Muusøya. Som ventet ser man i figur 4-5 at det største magasinet (20 000 m<sup>3</sup>), med pumping, får størst effekt, med en reduksjon på 15,5 % i overløp for hele Drammen. Likevel ser man også at magasinet på 5000 m<sup>3</sup>, som er en fjerdedel av volumet, oppnår en reduksjon på 9,6 %, altså godt over halve effekten.

Man kan også se at et tiltak med en ledning som pumper vann mellom Muusøya og Bragernes, men uten fordrøyningsmagasin, gir en total reduksjon på 120 000 m<sup>3</sup>, eller 5,8 % av overløpsvolumet for hele Drammen. Dette er mer enn et fordrøyningsmagasin på 5000 m<sup>3</sup>, uten pumping mellom Muusøya og Bragernes, vil gi.

Hensikten med Figur 4-6 er å vise at den prosentvise effekten av tiltakene i de forskjellige modellene ikke nødvendigvis er høyest i de månedene med mest overløp. Man kan se at de høyeste verdiene for reduksjon forekommer i måneder med mer moderat overløp. Dette kommer av at det ligger i overløpets natur å ha en progressiv økning i overløpsvolum i forhold til økt volumstrøm inn mot overløpet.

### 5.2.1 Status1 vs Status2

Som tabell 4-3 viser, ligger forklaringen til endringen i totalt overløp fra Status1 til Status2 i reduksjonen i Landfall-overløpet (507\_Landfall). Da den ene ledningen mellom Landfalloverløpet og renseanlegget med diameter på 0,3 meter ble endret til 0,6 meter, som resten av ledningsstrekket, sørget dette for mindre oppstuvning ved Landfalloverløpet. Dette førte til en større belastning nedstrøms, noe som førte til noe økt overløpsmengde i overløpet ved renseanlegget (Des\_6) og to overløp like vest for renseanlegget. Øverste graf i figur 4-7 viser et eksempel på en periode der Landfalloverløpet er i drift store deler av tiden, på tross av at man kan se at renseanlegget opererer ved full kapasitet i kun noen korte perioder. Dette er i strid med prinsippet om at vann ikke skal gå i overløp så lenge renseanlegget har ledig kapasitet. Derfor anbefales det å sørge for at strekket mellom Landfalloverløpet og renseanlegget har tilstrekkelig kapasitet, for å sørge for at mest mulig vann går til renseanlegget. Slik får man overløp kun når renseanlegget opererer med full kapasitet, noe man kan se i nederste graf i figur 4-7.

### 5.2.2 Effekten av fordrøyningsmagasin

Så og si hele endringen i overløp i modellene med kun fordrøyningsmagasin kommer av redusert overløpsvolum i Landfalloverløpet, i tillegg til at overløpet ved renseanlegget (Des\_6) er fjernet. I figur 4-8 ser man at jo større magasinet er, jo lengre tid tar det før det fylles opp. Man ser også at det tar lengre tid å tømme de store magasinene, men det går kortere tid før nivået senkes under overløpskanten. På denne måten gir fordrøyningsmagasinene mindre overløp. Merk at i det

magasinet er fylt opp, har det ingen effekt, og har like høy volumstrøm i overløpet som mindre magasin.

### 5.2.3 Effekten av pumping mellom Muusøya og Bragernes

For å vise effekten av en pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes som kan flytte vann begge veier, viser figur 4-9 forskjellen i overløp i Landfalloverløpet ved Muusøya (øverste graf) og Søren Lemmich-overløpet på Bragernes (graf i midten), mellom Case D (Status2) og Case H (0m3WithPumping). Man ser at overløp oppstår senere ved Landfalloverløpet i Case H, fordi det begynner å flyttes vann til Bragernes, siden det der fortsatt er ledig kapasitet. Dette gjør at Bragernes fylles opp raskere enn normalt, og overløp oppstår raskere der. På det tidspunktet ser man i nederste graf at pumpene går for fullt begge veier, noe som tilsvarer at det ikke forekommer pumping mellom Muusøya og Bragernes, siden pumpene utlikner hverandre. Mot slutten av tidsserien ser man at nivåene på Bragernes senker seg, slik at vann igjen kan flyttes fra Muusøya til Bragernes. Dette viser hvordan den totale overløpsmengden reduseres ved dette tiltaket. Med bedre innstillinger av pumpevolum og start-og stoppnivå, vil effekten av dette tiltaket bli enda bedre. Når et fordrøyningsmagasin kombineres med disse pumpene, kan magasinet fungere som fordrøyning både for Muusøya og Bragernes, og man får et stort potensiale til å redusere overløp, som nevnt tidligere. Dette kan man se i tabell 4-4, der spesielt overløpsvolumet i Landfalloverløpet blir kraftig redusert, og så mye som 64 % for modellen med 20000 m<sup>3</sup> magasin. Man ser at spesielt overløpene 65079 og Des\_15, som er på Bragernes, får en økning i overløp for de mindre magasinene, men oppnår en reduksjon for det største magasinet. Dette er fordi de små magasinene raskt fylles opp, slik at mer vann flyttes fra Muusøya til Bragernes. For det største magasinet blir det motsatt, slik at denne avlaster Bragernes i tillegg til Muusøya. Likevel får alle magasin størrelser en positiv effekt på den totale overløpsmengden.

## 5.3 Sammenlikning av modeller med og uten nye konstruksjoner

For å kunne sammenlikne modeller med og uten nye konstruksjoner, blir det her sett på resultater for oktober 2014, siden modellene uten nye konstruksjoner kun ble simulert for denne måneden.

Som figur 4-10 viser, er det kun modellene med fordrøyningsmagasin på 20000 m<sup>3</sup> som viser bedre resultater enn Case C (StromsoMedBrag), med styring av Søren Lemmich-pumpene på Bragernes og overløpsreguleringene på Strømsø. Case B (Stromso), med styring kun på Strømsø, presterer

også godt i forhold til de andre modellene. Hvis man antar at Case C presterer omtrent som Case J (5000m<sup>3</sup>WithPumping) også resten av året, kan man forvente at dette tiltaket gir en redusert overløpsmengde på omtrent 200 000 m<sup>3</sup>. Disse resultatene viser at ved å utnytte det eksisterende ledningsnett, kan man oppnå vel så bra resultater som ved å bygge nye ledninger eller magasiner. Dette forutsetter installasjon av luker som kan styres i sanntid, med god kontroll av videreført vannmengde, mulighet for aktiv kontroll av pumper, måleinstrumenter som leverer gode, kalibrerte måleverdier, og et robust system for å utnytte disse måleverdiene til sanntidsstyring. En slik investering må kunne anses å være en mye rimeligere investering enn forslagene med nye konstruksjoner.

## 5.4 Påvirkninger på renseanleggene

Redusert overløpsvolum på grunn av tiltak på ledningsnett vil føre til økt volumstrøm til renseanleggene. Man kan derfor forvente en høyere volumstrøm til tider der det ellers ville gått vann i overløp. I de periodene volumstrømmen til renseanleggene øker på grunn av redusert overløp, er det allerede høy belastning på renseanleggene. Derfor er det naturlig at redusert overløpsvolum fører til økt antall timer ved full belastning og over  $Q_{dim}$  ved renseanlegget. Dette er likevel å foretrekke fremfor at vann går via overløp og urensset ut i resipienten. I figur 4-11 ser man at overløpet ved Solumstrand RA er så og si uberørt av tiltakene i modellene. Dette er trolig fordi Solumtunnellen utjevner endringene. Tilsvarende figur for Muusøya er ikke fremstilt, siden de modellene som påvirker forholdene der, har gjort omfattende endringer rundt renseanlegget, slik at man ikke har grunnlag for å sammenlikne.

### 5.4.1 Påvirkningen modeller med eksisterende ledningsnett har på renseanleggene

Tabell 4-5 viser at Solumstrand RA får ørliten økning i antall timer renseanlegget går ved full kapasitet og over  $Q_{dim}$ . Dette er forventet på grunn av den økte volumstrømmen, som nok blir utjevnet en del, spesielt i Solumtunnelen.

### 5.4.2 Påvirkningen modeller med nye konstruksjoner har på renseanleggene

I tabell 4-6 ser man at Solumstrand RA er så og si uberørt av endringene i disse modellene, siden disse har størst effekt i Muusøya rensedistrikt. Muusøya RA har en kraftig økning i antall timer ved maks kapasitet fra Status1 til de andre modellene. Dette har sin forklaring i tidligere nevnte

problemer med at vann går i overløp uten at renseanlegget går for fullt på grunn av oppstuvning ved Landfalloverløpet. Når dette problemet blir løst, går vesentlig mindre vann i overløp, noe som øker belastningen på renseanlegget. Den jevne økningen i antall timer over  $Q_{dim.}$ , i forhold til størrelsen på magasinene, er også i takt med den reduserte overløpsmengden. I figur 4-12 ser man forskjellene i volumstrømmen for noen av de forskjellige modellene. Som nevnt, når aldri kurven for Status1 opp til maksimal kapasitet for renseanlegget, på grunn av begrenset kapasitet i ledningen mellom Landfalloverløpet og renseanlegget. Kurven for Status2 viser at tiltaket har effekt, og renseanlegget oppnår drift ved full kapasitet over en lengre periode. Forskjellen mellom disse kurvene representerer volumet avløpsvann som blir rensed istedenfor at det går i overløp. Videre ser man at modellen med magasinering har drift ved full kapasitet mye lenger, som også er på grunn av vann som ellers ville gått i overløp. Renseanlegget går for fullt mens magasinet tappes ned. Ved aktiv styring, og med kunnskap om fremtidig innkommende volumstrøm, kan vannet holdes igjen lenger i magasinet for å unngå maksimal påkjenning på renseanlegget over lengre tid. Man kan også se at kurven for 20000 m<sup>3</sup> magasin har mindre variasjon (oscillering), noe som viser at disse magasinene har en utjevne effekt på volumstrømmen i renseanlegget. Tilsvarende kurver for magasiner med mindre volum havner et sted mellom Status2 og 20000m<sup>3</sup>WithPumping.

## 5.5 Forslag til tiltak

Et fordrøyningsvolum på 20000 m<sup>3</sup> kan representeres ved en 3 kilometer lang tunnel, med diameter på 3 meter, mellom Muusøya og Bragernes. Denne tunnelen kan få tilførsel fra flere overløp, og kan ha ei pumpe i hver ende som pumper ut når det er ledig kapasitet i ledningsnett. Dette er nærmest en utopi å regne, men effekten av et slikt prosjekt er uansett vist i denne oppgaven. Oppgaven viser videre at en pumpeledning mellom Muusøya og Bragernes, uten fordrøyningsmagasin, gir en god effekt på overløpsmengden. Det ble diskutert med Drammen kommune en mulig løsning med et rør som ble lagt i Drammenselva, langs bredden, og med pumper i hver ende, som et tiltak det kunne vært mulig å realisere.

Case B og C viser at økt videreføring av avløpsvann ved oppstuvning nær overløp bidrar til å fylle større deler av ledningsnett, noe som igjen reduserer den totale overløpsmengden. Det finnes overløp med tilsvarende reguleringer i andre deler av Drammen, som denne oppgaven ikke har sett på, spesielt i Konggata på Bragernes. Ved å iverksette tiltakene brukt i Case B i mer utstrakt stil over hele ledningsnett, vil man potensielt kunne redusere store mengder overløp, uten å installere nye konstruksjoner og utvidelser av ledningsnett.



## 6 Konklusjon

Ved hjelp av modelleringsverktøy kommer denne oppgaven med forslag til tiltak på avløpsnett i Drammen kommune, med formål å redusere overløpsutslippet. Oppgaven viser tiltak som kan gjøres på det eksisterende ledningsnett, som ved hjelp av aktiv styring av luker og pumper vil bidra til å nå dette målet. Videre presenteres det mulige løsninger som innebærer nye konstruksjoner i form av fordrøyningsmagasin, og en pumpeledning som fordeler vann mellom de to rensedistriktene. Simuleringer av modellene viser at disse tiltakene gir en reduksjon i overløpsutslipp i kommunen. Det oppfordres til videre undersøkelser av forslagene, og investerings- og driftskostnader knyttet til disse.

Under arbeidet med oppgaven har oppgavens målsetning forandret seg flere ganger, noe som har ført til at oppgaven fremstår som todelt. Dette i form av to forskjellige prinsipper for hva slags type tiltak som skal undersøkes. En del av oppgaven har sett på aktiv styring av ledningsnett, uten nye konstruksjoner. Den andre delen har foreslått nye konstruksjoner for fordrøyning og fordeling av avløpsvann. Dette har ført til en interessant sammenlikning av de to måtene å utvikle håndteringen av avløpsvann på ledningsnett.

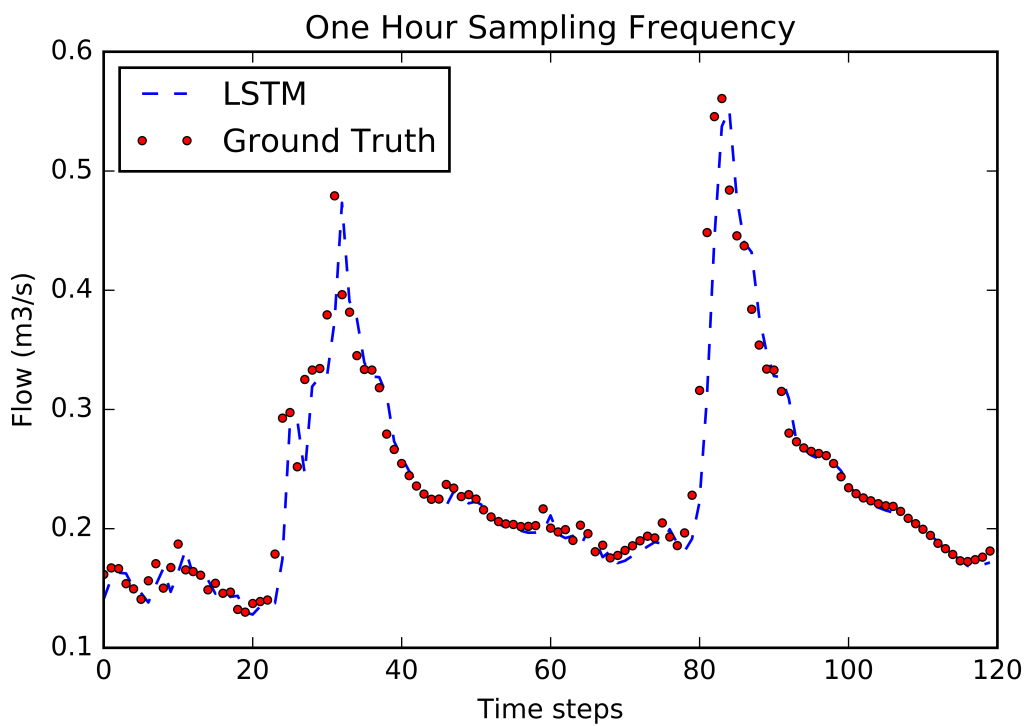
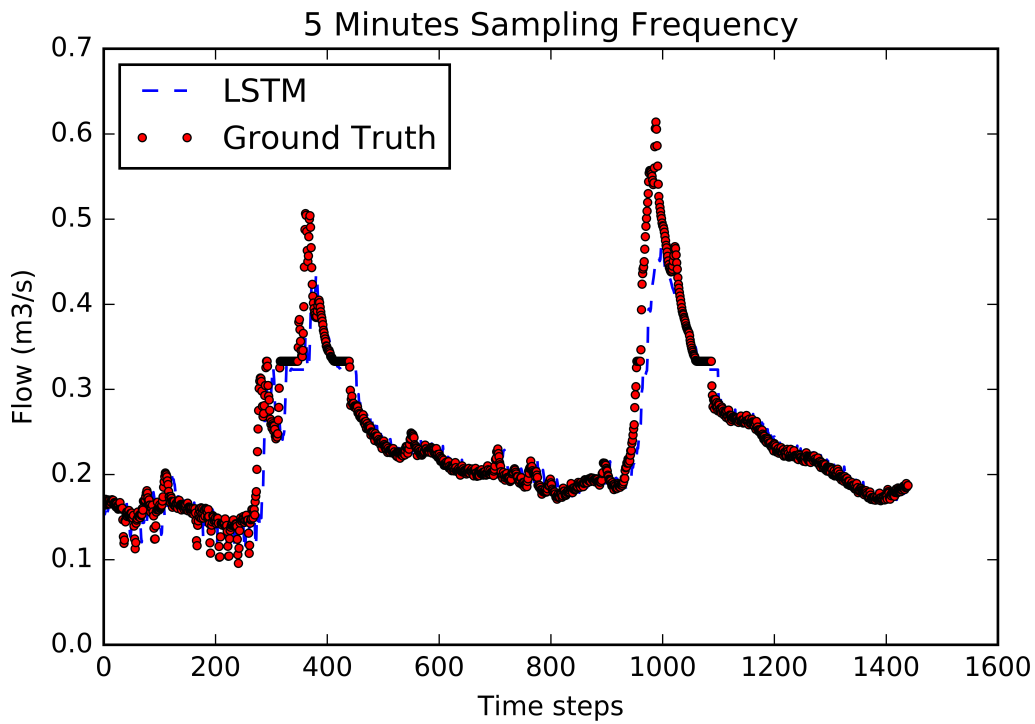
Resultatene som ble fremstilt av Rosim AS, som var simulering av ni modeller for hele 2014, var svært omfattende og tok tid å simulere og fremstille. Det var en del tekniske utfordringer underveis, som gjorde at det tok mye lenger tid enn planlagt å få resultatene. Dette gjorde at resultatene ikke ble undersøkt i så stor grad som det opprinnelig var ønsket. Det kunne vært interessant å gå mer i dybden, undersøke flere årsakssammenhenger i modellen, og kunne forklare mer i detalj hvordan endringer påvirker ledningsnett. Likevel anser undertegnede problemstillingen som besvart, og opplever at effekten av de foreslåtte tiltakene er blitt tilstrekkelig dokumentert. Oppgaven vil bli brukt som grunnlag til videre arbeid av Duo Zhang ved NMBU, for å utvikle en modell der deep learning benyttes for å forutsi volumstrøm og vannivå i nær fremtid.

## 7 Videre arbeid

Siden løsningen med pumping mellom Muusøya og Bragernes, uten fordrøyningsmagasin, har en noe bedre effekt enn et fordrøyningsmagasin på 5000 m<sup>3</sup> med pumping, kan det være interessant å sammenlikne investeringskostnadene for disse to tiltakene. Dermed kan man se hvilke av de to konseptene som er mest lønnsomme.

På grunn av tidspress, ble ikke resultatene for simuleringene gått like i dybden som de kunne ha blitt. Siden resultatene for disse vil være tilgjengelig i framtiden, er det mulig for andre å studere disse videre, for å få en dypere forståelse for effekten av de forskjellige tiltakene.

Denne oppgaven viser hvordan automatisk styring av luker og pumper ut fra nivået i kummer kan redusere overløpsvolumet. Denne styringen ble valgt fordi det er det som er praktisk mulig i modellsammenheng. I virkeligheten kan slik styring foregå aktivt ut fra overvåking av tilstand i ledningsnett, og kortsiktige værvarsler. Dette vil kunne bidra til at man kan øke effekten av tiltakene ytterligere, ved å kompensere for oppstuvning før det faktisk oppstår. Hydraulisk modellering er derimot utfordrende å bruke i forbindelse med aktiv sanntidsstyring, på grunn av lang beregningstid. For å assistere denne aktive styringen, kan man integrere intelligent overvåking, modellering og kontrolløsninger, ved å benytte en modell som forutsier volumstrøm i nær framtid sammen med fastsatte regler for kontroll. Duo Zhang ved NMBU er i gang med utviklingen av en slik modell, med utgangspunkt i tiltakene som foreslås i denne oppgaven. Zhang vil der benytte ”deep learning” for å overkomme de nevnte utfordringene. Hans foreløpige arbeid viser at LSTM-metoden viser best resultater med hensyn til RSME, NSE og  $R^2$  når hans resultater sammenliknes med resultatene i denne oppgaven. Et eksempel på sammenhengen kan sees i figur 7-1. Her vises forholdet for prediksjoner med 5-minutters (øverst) og en times (nederst) oppløsning av prediksjonen. Verdiene for RSME, NSE og  $R^2$  for disse beregningene viser en meget god sammenheng, noe som tyder på at dette vil være en god metode for å forutsi volumstrøm og vannivå i nær fremtid.



Figur 7-1: Sammenlikning av LSTM og opprinnelige verdier (Zhang 2017).

## 8 Litteraturliste

- Aaby, L. & Lindholm, O., 2008. Regnvannsoverløp i fokus. Dagens tilstand , vanndirektivets mål og klimaendringer gjør det nødvendig. *Vann*, (4), s.323–329.
- Butler, D. & Davies, J.W., 2004. *Urban Drainage 2*. utgave., London, UK: Spon Press.
- Cramer, J. & Gaut, S., 2016. Vannets kretsløp. *Amerikas geologiske undersøkelse*. Tilgjengelig fra: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclenorwegian.html> [Åpnet februar 27, 2017].
- Dannevig, P., 2009. Nedbør. *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/nedbør> [Åpnet februar 16, 2017].
- Dannevig, P. & Harstveit, K.E., 2017. Klima. *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klima> [Åpnet januar 26, 2017].
- DHI, 2000. Mouse - Short introduction and tutorial.
- DHI, 2016a. MOUSE Pipe Flow Reference Manual. , s.1–114.
- DHI, 2016b. Rainfall Dependent Inflow and Infiltration Reference Manual.
- DHI, 2016c. Runoff Reference manual. , s.1–50.
- Dingman, S.L., 2008. *Physical Hydrology 2*. utgave., Long Grove, IL, USA: Waveland Press, Inc.
- Drammen Kommune, 2017. Fakta om Drammen. Tilgjengelig fra: <https://www.drammen.kommune.no/om-drammen-kommune/organisasjon-og-administrasjon/fakta-om-drammen/> [Åpnet april 10, 2017].
- Fuglestvedt, J.S. mfl., 2017. Klimaendringer. *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klimaendringer> [Åpnet mai 4, 2017].
- Godt Vann, 2010. Felles hovedplan for vannforsyning og avløp i Drammensregionen 2010 - 2021. , (April), s.52.
- Grum, M. mfl., 2011. Full-Scale Real Time Control Demonstration Project in Copenhagen's Largest Urban Drainage Catchments. *12th International Conference on Urban Drainage*, (September), s.1–7.
- Lindholm, O. mfl., 2012. *Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportssystem R193* utg., Hamar: Norsk Vann.
- Lindholm, O. mfl., 2008. *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering R162* utg., Hamar: Norsk Vann.
- Lindholm, O., Nie, L. & Bjerkholt, J., 2007. Klimaeffektens betydning for oppstuvninger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer - PDF. *IMT-Rapport nr. 16/2007*. Tilgjengelig fra: <http://docplayer.me/4281653-Klimaeffektens-betydning-for-oppstuvninger-og-forurensningsutslipp-fra-avlopssystemer-i-byer.html> [Åpnet mars 6, 2017].

- Lovdata, 2005. Forskrift om begrensning av forurensning (forurensningsforskriften) - Del 4. Avløp - Lovdata. Tilgjengelig fra: [https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/KAPITTEL\\_4#KAPITTEL\\_4](https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-931/KAPITTEL_4#KAPITTEL_4) [Åpnet mars 29, 2017].
- Lovdata, 1981. Lov om vern mot forurensninger og om avfall (forurensningsloven) - Lovdata. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/1981-03-13-6?q=forurensningsloven> [Åpnet mars 29, 2017].
- Madsen, A.B., 2007. Flomskader og forureningsutslipp i Bergen. Analyse av klimaendringers virkninger. *Masteroppgave, UMB*.
- Mamen, J. & Benestad, R., 2016. Drivhuseffekten. *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/drivhuseffekten> [Åpnet april 4, 2017].
- Martinez, N., 2016. Analyse av fordrøyningstiltak på eksisterende avløpsnett i Solumstrand rensedistrikt. *Masteroppgave, NMBU*.
- Meteorologisk Institutt, 2017a. Hva er klima? - met.no. *Meteorologisk Institutt*. Tilgjengelig fra: [https://met.no/Klima/Hva\\_er\\_klima/](https://met.no/Klima/Hva_er_klima/) [Åpnet februar 1, 2017].
- Meteorologisk Institutt, 2017b. Klima i Norge. *Meteorologisk Institutt*. Tilgjengelig fra: [https://met.no/Klima/Klima\\_i\\_Norge/](https://met.no/Klima/Klima_i_Norge/) [Åpnet februar 8, 2017].
- Meteorologisk Institutt, 2017c. Været som var (klima) - Drammen (Buskerud). Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/sted/Norge/Buskerud/Drammen/Drammen/klima.html> [Åpnet april 27, 2017].
- Miljødirektoratet, 2016a. Drivhuseffekten. *Miljødirektoratet*. Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/drivhuseffekten/> [Åpnet februar 8, 2017].
- Miljødirektoratet, 2017. Klima i Norge. Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/klimainorge/> [Åpnet mars 8, 2017].
- Miljødirektoratet, 2016b. Temperaturøkning. Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/temperaturokning> [Åpnet mars 8, 2017].
- Mølmen, A., 2017a. *Beregning av overløp Muusøya RD - år 2015*,
- Mølmen, A., 2017b. *Beregning av overløp Solumstrand RD - år 2015*,
- Mølmen, A., 2017c. Samtale under møte med Drammen Kommune - 24. februar.
- Mosevoll, G., 1975. *Regnvannsoverløp og fordrøyningsbasseng.*, Oslo. Tilgjengelig fra: <http://www.nb.no/nbsok/nb/b331ca5c1d5e6401b6f97c5e91d44d6d?lang=no#41> [Åpnet april 3, 2017].
- Moum, K.A., 2005. UTSLIPPSTILLATELSE 6.9.2005.pdf. , s.10.
- NOU, 2015. Overvann i byer og tettsteder. *Departementenes sikkerhets- og serviceorganisasjon*.

- NVE, 2016. Urbanhydrologi. *NVE*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/hydrologi/urbanhydrologi/> [Åpnet mars 1, 2017].
- Ødegaard, H., 2014. *Vann- og avløpsteknikk 2*. utgave. F. I. Aasand, red., Norsk Vann.
- Ødegaard, H. mfl., 2009. *Veiledning for dimensjonering av avløpsanlegg* R168 utg., Hamar: Norsk Vann.
- Olsbu, V., 2017a. Mailkorrespondanse - Drammen Kommune.
- Olsbu, V., 2017b. Samtale under møte i Drammen 24. februar - Drammen Kommune.
- Regnbygge 3M, 2017. Om Regnbygge 3M. Tilgjengelig fra: <http://web.rosim.no/regnbygge3m/index.php/om-regnbygge-3m/> [Åpnet april 28, 2017].
- Rosim AS, 2011. *Modellering av Muusøya rensedistrikt*, Oslo.
- Rosim AS, 2016. *Modelloppbygging, målinger og kalibrering for Solumstrand rensedistrikt*, Oslo.
- Rosim AS, 2017a. ROSIE. Tilgjengelig fra: <http://web.rosim.no/index.php/produkter-2/desktop/rosie/> [Åpnet april 12, 2017].
- Rosim AS, 2017b. ROSIE Help Menu.
- SINTEF, 2012. Vann i by - håndtering av overvann i bebygde områder - Byggforskserien. Tilgjengelig fra: [https://www.byggforsk.no/dokument/2562/vann\\_i\\_by\\_haandtering\\_av\\_overvann\\_i\\_bebygde\\_omraader](https://www.byggforsk.no/dokument/2562/vann_i_by_haandtering_av_overvann_i_bebygde_omraader) [Åpnet mars 6, 2017].
- Tian, Y., 2016. *Drammen Kommune Årsrapport Renseanlegg 2015*, Drammen.
- University of Maryland, 2012. Introduction to GIS Using ArcGIS Desktop 10. , (January), s.47.
- Vári, H.E., 2017. Mailkorrespondanse - Drammen Kommune.
- Velez Quintero, C.A., 2012. *Optimization of Urban Wastewater Systems using Model Based Design and Control :: TU Delft Institutional Repository*, Tilgjengelig fra: <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:248022cb-4395-4178-8eb8-74e8adfff346/>.
- Wang, Q. mfl., 2015. Optimal Operation of Bidirectional Inter-Basin Water Transfer-Supply System. *Water Resources Management*, 29(9), s.3037–3054.
- West Virginia Globe, 2009. ArcMap Tutorial 1.0. *West Virginia View*, s.10. Tilgjengelig fra: [http://www.wvview.org/ArcMap\\_Tutorial.pdf](http://www.wvview.org/ArcMap_Tutorial.pdf).
- Zhang, D., 2017. Upublisert arbeid - NMBU.

# 9 Vedlegg

## 9.1 Vedlegg A

I tabell A-1 kan man se overløpsvolum for hele Drammen fordelt på hver måned i 2014, for de modellene som ble simulert for denne perioden.

*Tabell A-1: overløpsvolum for hver modell, for hver måned gjennom året 2014,*

<b>Modell</b>	<b>JAN</b>	<b>FEB</b>	<b>MAR</b>	<b>APR</b>	<b>MAI</b>	<b>JUN</b>	<b>JUL</b>	<b>AUG</b>	<b>SEP</b>	<b>OKT</b>	<b>NOV</b>	<b>DES</b>
Status1	8698	4235	75086	470152	66732	134055	132566	167500	106282	783485	351887	1195
Status2	7929	4216	58633	422122	56382	120189	116986	149685	92498	737182	329652	1195
1000m3NoPumping	7929	4215	57784	420834	54732	119065	108576	146716	91541	732503	326433	1195
5000m3NoPumping	7929	4214	54162	414206	51236	111459	97531	139422	86532	716762	316609	1195
0m3WithPumping	7929	4215	54199	342789	51937	116375	106363	143005	88476	731620	328060	1195
1000m3WithPumping	7929	4233	53723	341477	51350	115340	100775	140273	86817	726333	325481	1195
5000m3WithPumping	7929	4214	52430	338330	48020	106239	93774	133414	82536	711645	315933	1195
20000m3NoPumping	7929	4214	52430	375023	45310	91576	82197	123216	73105	679867	301713	1195
20000m3WithPumping	7931	4215	52430	328623	45353	87710	81837	119563	68936	675431	298298	1195

Tabell A-2 viser ID for alle ledninger med endret regulering, ID for tilhørende overløpskum,  $Q_{maks}$  ved normale forhold, absolutt høyde på overløpskant, hvilken høyde nivået i overløpskum må nå før ledningen åpnes, og  $Q_{maks}$  når ledningen er åpnet. Des\_55 ligger i serie med 67753, derfor har disse like innstillinger, basert på overløpskum mellom disse to ledningene, siden dette er kummen med lavest terskel og som derfor får overløp først. Des\_55 har opprinnelig  $Q_{maks}$  på 0,047 m<sup>3</sup>/s.

Tabell A-2: Innstillinger for alle endrede reguleringer for Case B og C på Strømsø,

Regulation	Overløp Kum	Qmaks	Åpnes ved			
pipe ID	ID	normalt [m <sup>3</sup> /s]	Overløpskant [moh]	høyde [moh]	Qmaks åpnet [m <sup>3</sup> /s]	
Des_58	56468	0,025	0,78	0,73	0,20	
67753	67471	0,255	0,90	0,74	0,50	
Des_55	57048	0,255	0,79	0,74	0,50	
15765	14871	0,013	1,51	1,46	0,10	
57058_A	57045	0,008	0,95	0,90	0,05	
57058_B_A	68931	0,025	1,39	1,34	0,20	
67343	67338	0,033	3,26	3,21	0,10	
67340	67336	0,07	3,60	3,55	0,20	
15763	14862	0,112	1,53	1,48	0,30	
Des_57	67256	0,018	1,32	1,28	0,20	
61205	SO_Des_266	0,271	0,90	0,85	0,50	
60329	68142	0,05	0,82	0,77	0,50	
59657	59441	0,01	1,00	0,95	0,10	



Tabell A-3 viser overløpsvolum for de overløp som er påvirket av tiltakene i Case B (Stromso) og Case C (StromsoMedBrag). Tall med fet skrift og hvit bakgrunn er for overløpene med justert regulering. Tall med gul bakgrunn er andre overløp som er påvirket av endringene på Strømsø. Tall med grønn bakgrunn er overløp som er påvirket av justeringen ved Søren Lemmich-pumpene på Bragernes. Differansen vises respektivt for både ”Stromso” og ”StromsoMedBrag” reduksjonen i forhold til Status1, både i volum og i prosent av volum i Status1. Negative verdier her representerer en økning i overløp i forhold til Status1. Nederst viser endring totalt for alle overløpene.

Tabell A-3: overløpsvolum for utvalgte overløp for Case A-C,

WeirID	Stromso		Stromso		StromsoMedBrag	StromsoMedBrag	
	Status1 [m3]	[m3]	Diff Status1 [m3]	Diff Status1 [%]		Status1 [m3]	Diff Status1 [%]
57048_w_1	53930	60643	-6714	-12,4%	13335	40595	75,3%
68142_w_1	42049	25469	16580	39,4%	25469	16580	39,4%
57045_w_1	34707	76219	-41512	-119,6%	6676	28031	80,8%
67256_w_1	29474	7558	21916	74,4%	1303	28171	95,6%
67338_w_1	22531	2120	20411	90,6%	2120	20411	90,6%
56468_w_1	15421	7861	7561	49,0%	1581	13841	89,7%
68931_w_1	11908	11	11897	99,9%	11	11897	99,9%
67336_w_1	4940	35	4906	99,3%	35	4906	99,3%
59441_w_1	972	1391	-420	-43,2%	928	44	4,5%
14871_w_1	292	21	271	92,7%	15	277	94,9%
SO_Des_266_w_1	70	1	70	99,2%	1	70	99,2%
67471_w_1	49	40	9	18,7%	14	34	70,5%
14862_w_1	17	24	-6	-35,4%	19	-1	-7,0%
65079_w_1	12255	12255	0	0,0%	105308	-93053	-759,3%
Des_15_w_1	4228	4228	0	0,0%	31874	-27647	-654,0%
66394_w_1	4998	12410	-7413	-148,3%	12410	-7413	-148,3%
76675_w_1	0	7948	-7948		7948	-7948	
61937_w_1	3910	3953	-44	-1,1%	3952	-43	-1,1%
56466_w_1	441	2131	-1689	-382,9%	392	49	11,1%
65137_w_1	71	71	0	0,0%	217	-146	-205,3%
66285_w_1	0	28	-28		28	-28	
65136_w_1	2	2	0	0,0%	4	-2	-129,7%
<b>SUM</b>	<b>242264</b>	<b>224417</b>	<b>17847</b>	<b>7,4%</b>	<b>213639</b>	<b>28626</b>	<b>11,8%</b>

Tabell A-4 viser overløp tilsvarende tabell A-1, i prosent av Status2.

Tabell A-4: redusert overløpsvolum for hver modell, for hver måned gjennom 2014, i forhold til Status2,

Modell	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DES
Status2	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1000m3NoPumping	0,0%	0,0%	1,4%	0,3%	2,9%	0,9%	7,2%	2,0%	1,0%	0,6%	1,0%	0,0%
5000m3NoPumping	0,0%	0,0%	7,6%	1,9%	9,1%	7,3%	16,6%	6,9%	6,5%	2,8%	4,0%	0,0%
0m3WithPumping	0,0%	0,0%	7,6%	18,8%	7,9%	3,2%	9,1%	4,5%	4,3%	0,8%	0,5%	0,0%
1000m3WithPumping	0,0%	-0,4%	8,4%	19,1%	8,9%	4,0%	13,9%	6,3%	6,1%	1,5%	1,3%	0,0%
5000m3WithPumping	0,0%	0,0%	10,6%	19,9%	14,8%	11,6%	19,8%	10,9%	10,8%	3,5%	4,2%	0,0%
20000m3NoPumping	0,0%	0,1%	10,6%	11,2%	19,6%	23,8%	29,7%	17,7%	21,0%	7,8%	8,5%	0,0%
20000m3WithPumping	0,0%	0,0%	10,6%	22,1%	19,6%	27,0%	30,0%	20,1%	25,5%	8,4%	9,5%	0,0%

Siste kolonne i tabell A-5 er brukt for å lage figur 4-10, denne tilsvarer prosentvis reduksjon i forhold til Status2 for alle modellene, unntatt Case B og C, som representerer tilsvarende i forhold til Status1.

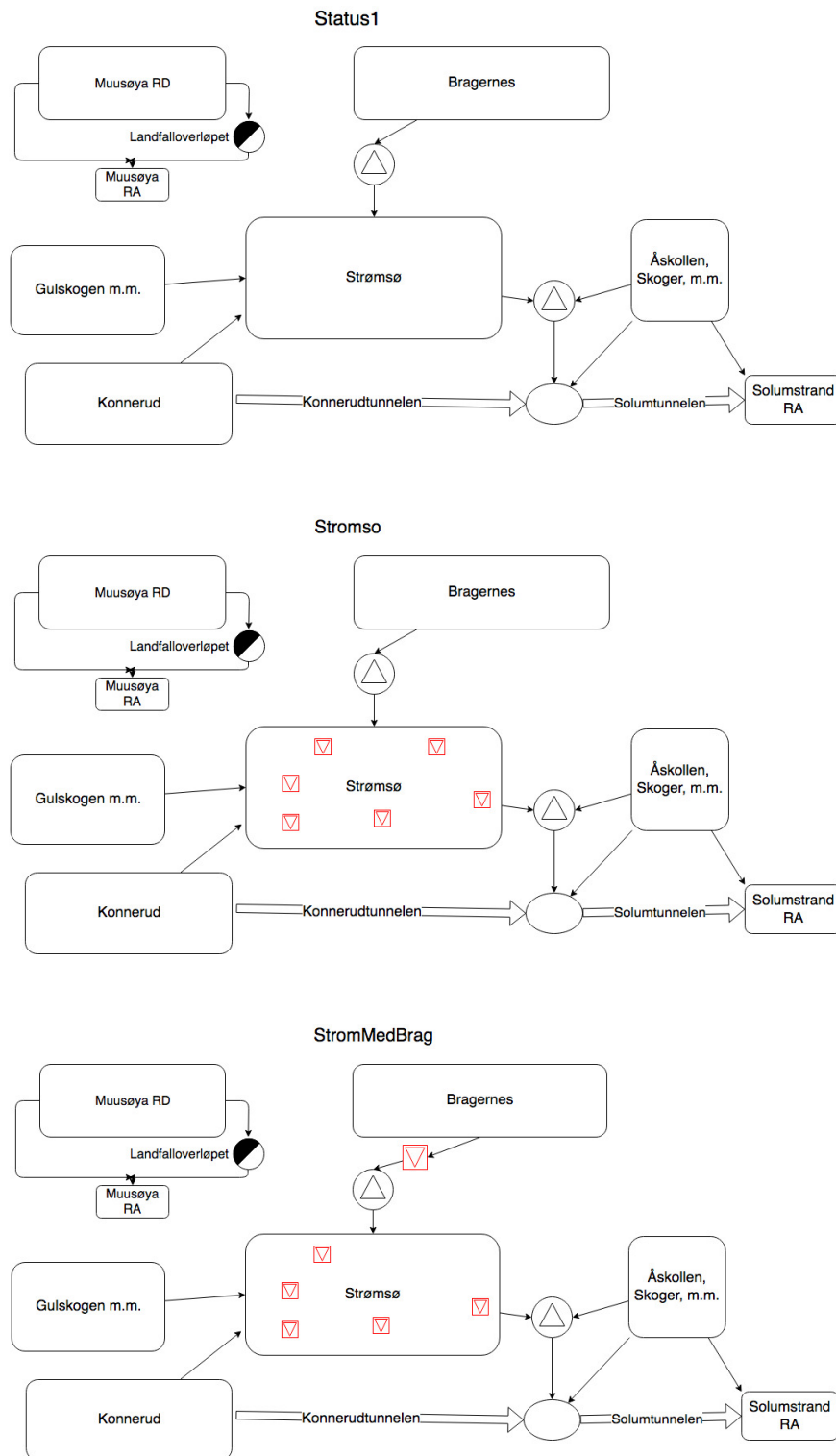
Tabell A-5: Beregning av reduksjon i total overløpsmengde for alle modellene i forhold til opprinnelig modell, for oktober 2014.

Case	Modellnavn	Okt	Diff	Diff	Diff	Diff	Reduksjon
		Overløp	Status1	Status1	Status2	Status2	
		[m3]	[m3]	[%]	[m3]	[%]	[%]
Case K	20000m3WithPumping	675431	108054	13,8%	61751	8,4%	8,4%
Case G	20000m3NoPumping	679867	103618	13,2%	57315	7,8%	7,8%
Case C	StromsoMedBrag	754726	28579	3,6%			3,6%
Case J	5000m3WithPumping	711645	71840	9,2%	25536	3,5%	3,5%
Case F	5000m3NoPumping	716762	66723	8,5%	20420	2,8%	2,8%
Case B	Stromso	765458	17847	2,3%			2,3%
Case I	1000m3WithPumping	726333	57152	7,3%	10849	1,5%	1,5%
Case H	0m3WithPumping	731620	51865	6,6%	5562	0,8%	0,8%
Case E	1000m3NoPumping	732503	50982	6,5%	4679	0,6%	0,6%

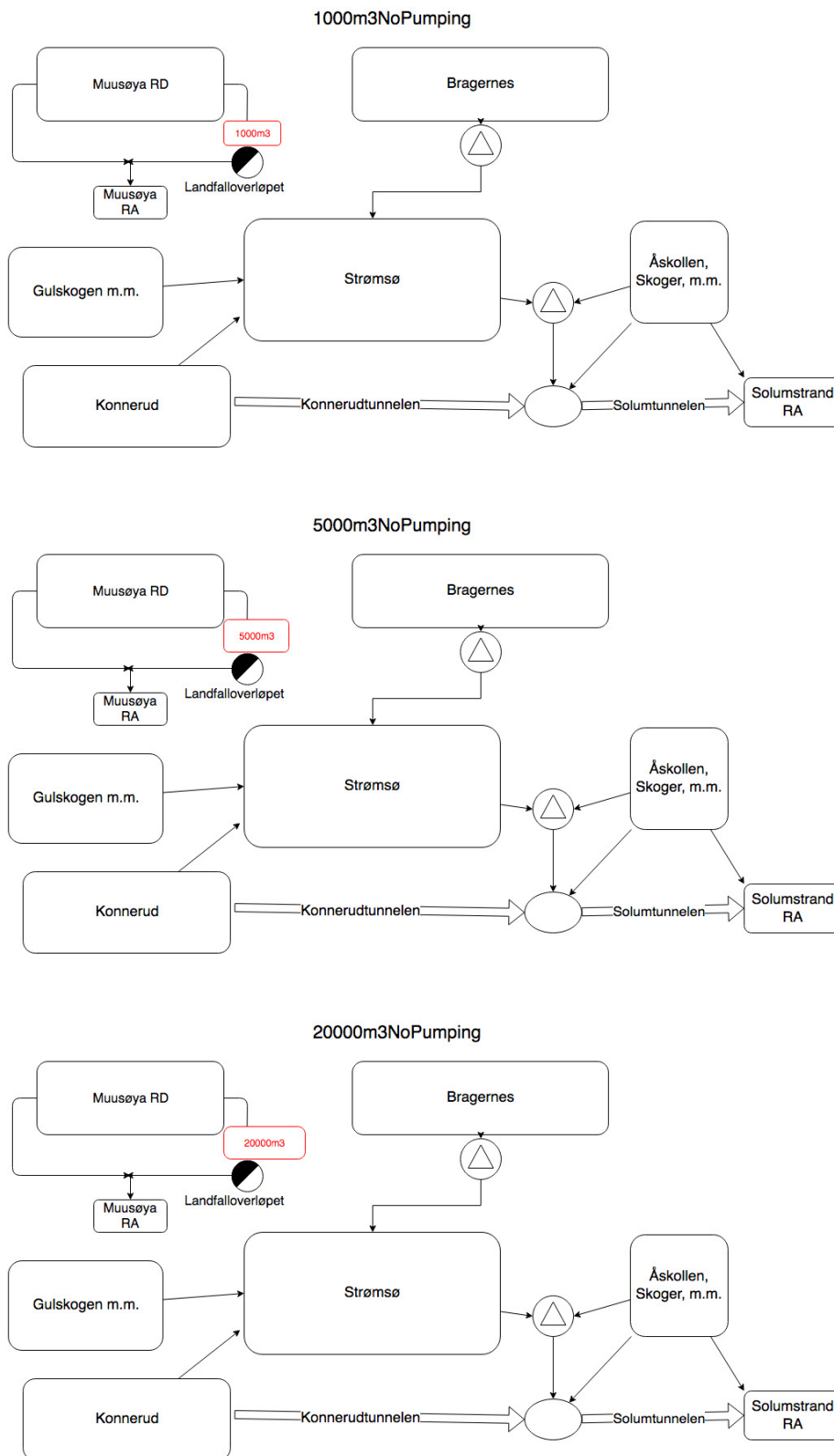
### 9.3 Vedlegg B – Prinsippskisser

Dette vedlegget viser helt enkle prinsippskisser av de forskjellige modellene, med vekt på endringene som er gjort. Figurer og tekst i rødt representerer endringer fra opprinnelig modell.

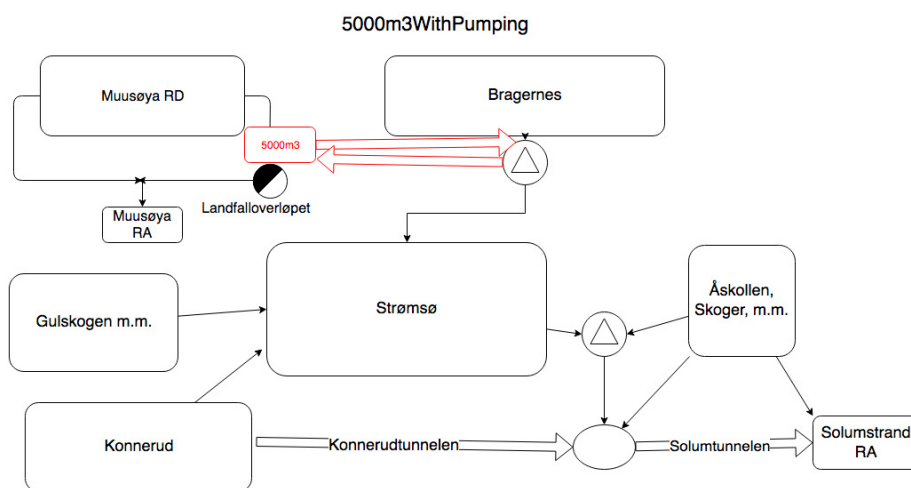
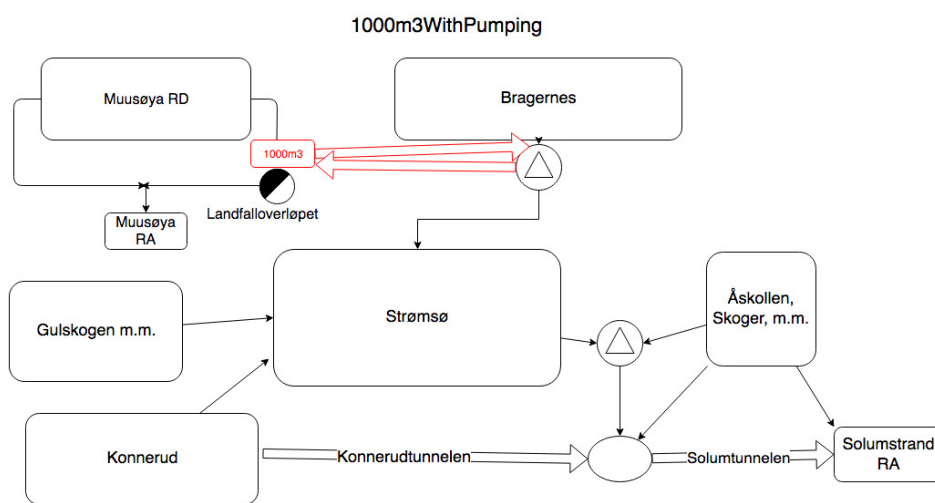
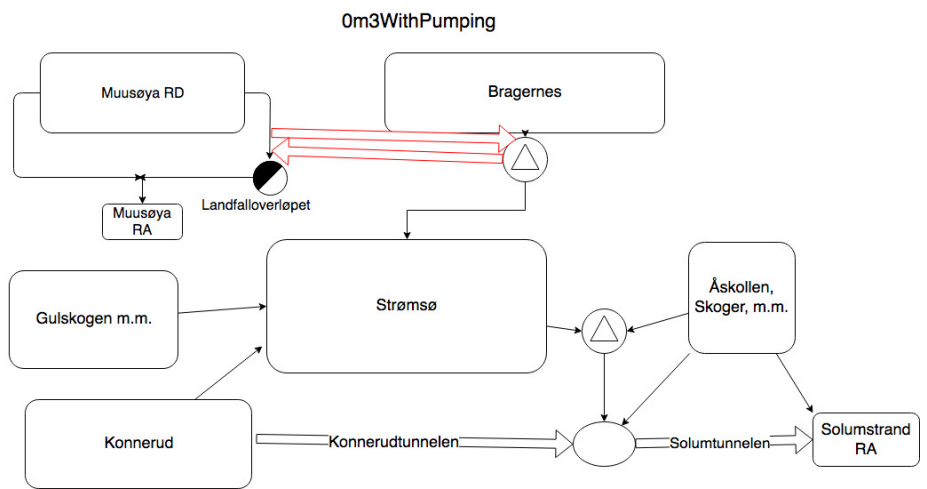
Forskjellen mellom Status1 og Status2 kommer ikke fram i skissen, og Status2 er derfor ikke vist.



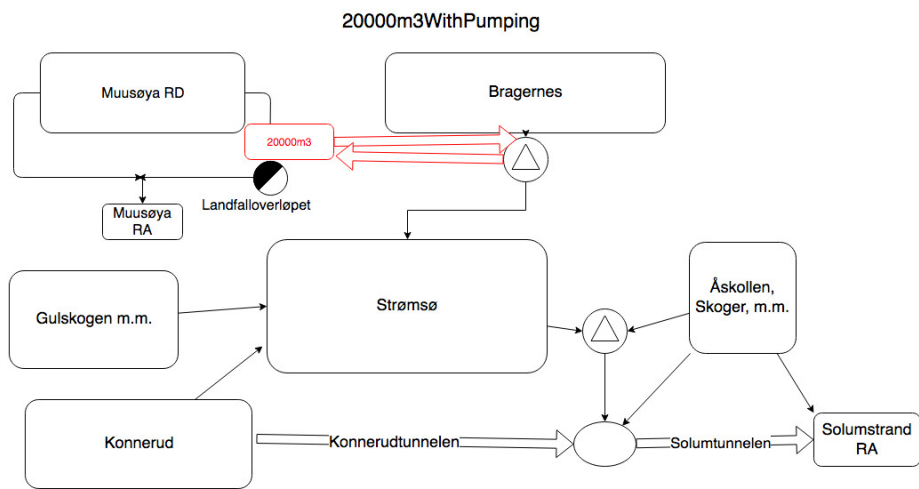
Figur B-1: Prinsippskisser av modellene Status1, Stromso og StromMedBrag.



Figur B-2: Prinsippskisser av modellene 1000m3NoPumping, 5000m3NoPumping og 20000m3NoPumping.



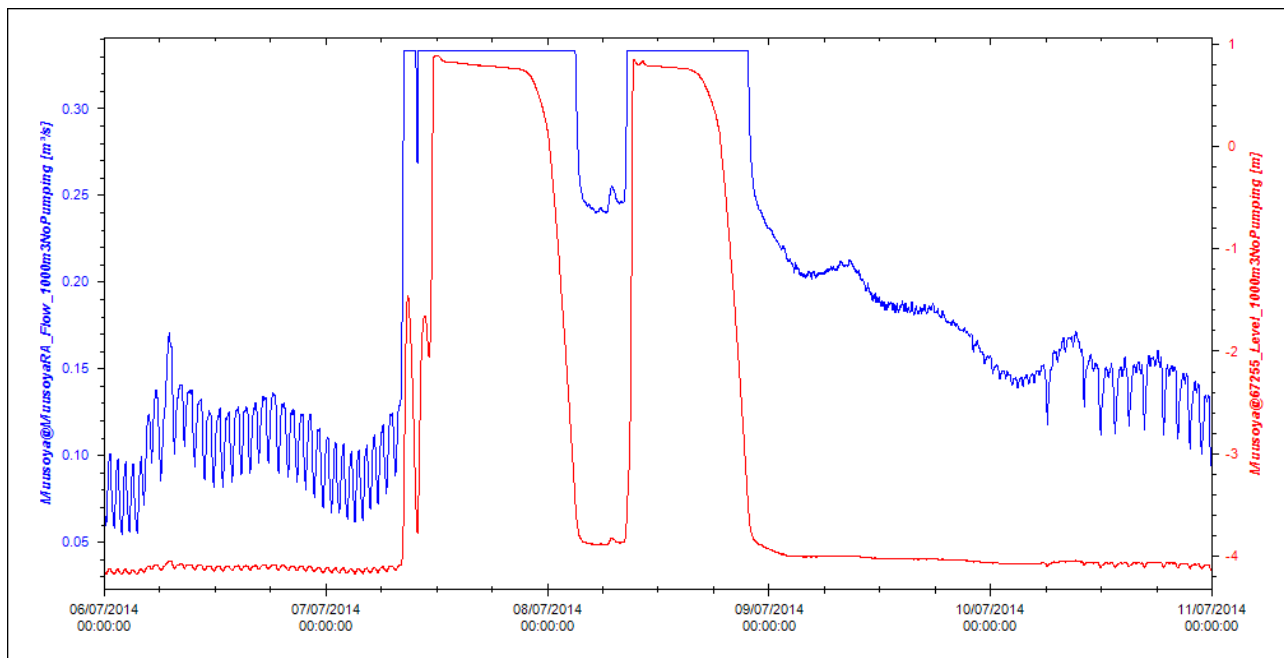
Figur B-3: Prinsipsskisser av modellene 0m3WithPumping, 1000m3WithPumping og 5000m3WithPumping.



Figur B-4: Prinsippskisse av modellen 20000m3WithPumping.

### 9.3 Vedlegg C – Figurer

Som et eksempel på sammenhengen mellom volumstrøm i pumpen som representerer Muusøya RA, og nivået i kummen den befinner seg i, viser figur C-1 kurver for disse for en periode på fem dager.



Figur C-1: Volumstrøm for Muusøya RA (blått) og nivå i kum 67255 (rødt) for modellen 1000m3NoPumping.



Norges miljø- og biovitenskapelig universitet  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway