



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp  
Institutt for matematiske realfag og teknologi, IMT

# **Gjenåpningen av Veumbekken fra kulvert til åpen kanal. Hydraulisk analyse og modellering i SWMM.**

Eivind Dalevold  
Vann- og Miljøteknikk



# Forord

Oppgaven er skrevet våren 2016, og er den avsluttende oppgaven på mitt masterstudie i Vann- og Miljøteknikk ved Norges Miljø og Biovitenskapelige Universitet. Oppgaven er skrevet i samarbeid med COWI Fredrikstad og bygger videre på tidligere masteroppgave skrevet av Jamal Haqi.

Oppgaven omhandler overvannsproblematikk i Veumdalen i Fredrikstad. Og bruker SWMM for å analysere ulike flomsituasjoner og hvordan disse situasjonene påvirker VA-ledningsnett i Fredrikstad. Oppgaven er forsøkt skrevet på en slik måte at den skal være forståelig for ulike grupper mennesker og ikke bare VA-folk.

Jeg har lært mye underveis i oppgaven. Både om overvannsproblematikk og programmet SWMM, men også generelt om å skrive en så omfattende oppgave. Dersom jeg skulle startet i dag ville utførelsen av oppgaven antageligvis blitt noe annerledes, men jeg er allikevel fornøyd og jeg er fornøyd med å nå kunne tre inn i arbeidslivet.

Jeg vil takke Jamal Haqi for å ha overlevert sin SWMM modell og grunnlagsdata brukt i oppgaven. Sverre Olav Gjerløw, Jon Arne Engan og Eyvind Hesselberg for gode råd og innspill. Sara, Sofie og Jørgen for frisbeekasting, kaffepauser og god stemning på akropolis. Takk til Guro som har støttet meg og motivert meg til å stå på. Takk til mamma som har kommet med jevnlige bekymringsmeldinger og pappa som overbeviste meg om at det var lurt å velge VA.

Til slutt vil jeg rette en stor takk til hovedveileder Arve Heistad for gode råd og veiledning.

Eivind Dalevold

18.05.2016

# Sammendrag

Klimaendringene medfører at vi får et stadig varmere og mer ekstremt klima. De siste årene har det vært en økning i både temperatur, nedbørsmengder og nedbørintensitet i Norge, og denne trenden vil fortsette dersom man ikke klarer å redusere utslipp av klimagasser. For håndtering av overvann byr dette på store problemer da overvannsystemene ikke er dimensjonert for å takle den økende avrenningen forårsaket av kraftigere regnbyger, urbanisering og fortetting.

Veumbekken renner igjennom Veumdalen før den går i en lukket kulvert (Holmenkulverten) gjennom Fredrikstad sentrum. Ved kraftige nedbørshendelser og flom i Veumbekken har kulvertens kapasitet blitt overskredet og vann har stuvet opp ved kulvertens innløp. Dette har ført til store skader som følge av oversvømmelser i nedre deler av Veumdalen og Fredrikstad sentrum. Fredrikstad kommune ønsker nå å åpne opp deler av Holmenkulverten. En åpen kanal vil bli en blå-grønn tunge gjennom sentrum som i tillegg til å berike bymiljøet vil kunne ha en flomdempende effekt for området.

I 2015 ble det av Jamal Haqi i 2015 laget en nedbør-avrenningsmodell i programmet SWMM (Storm Water Management Model). Modellen omfattet nedbørfeltet til Veumbekken ned til innløpet av Holmenkulverten. Denne modellen er blitt kvalitetssikret og noen små feil er rettet opp i som har gjort modellen en litt mer presis beskrivelse av virkeligheten.

For å se hvordan en åpen kanalløsning vil påvirke de eksisterende forholdene i nedre deler av Veumbekken er den gamle SWMM-modellen blitt utvidet. Det ble laget en modell med Holmenkulverten slik den ligger i dag og en med en åpen kanal fra Oslogata til Vesterelva. Simuleringer ble kjørt for ulike situasjoner med kraftige nedbør i Veumdalen og stormflo i Vesterelva for å se hvordan man med en gjenåpning vil kunne øke kulvertens kapasitet, og bidra til å redusere faren for oppstuvning og oversvømmelser ved ekstremvær. Simuleringene ble gjort for flere ulike kanaltverrsnitt for å finne hvilke kanaltverrsnitt som ville bidra til økt kapasitet i kulverten. Resultatene viste at det trengtes relativt små kanaltverrsnitt for å bedre kulvertens kapasitet, men at den resterende delen av kulverten som vil ligge igjen etter en kanalåpning vil være en flaskehals og det vil være stor fare for oppstuvning i kulverten ved situasjoner der kraftig nedbør oppstår likt med stormflo i Vesterelva.

# Abstract

Climate change has caused temperatures to rise and has caused more extreme weather. In recent years there has been an increase in both temperature as well as an increase in the amount and intensity of precipitation in Norway. This trend will continue if we do not manage to reduce greenhouse gas emissions. For storm water management this poses major problems as our storm water systems are not designed to cope with the increased runoff caused by heavier rainfall, urbanisation and more impervious surfaces.

Veumbekken is a small creek that runs through Veumdalen before it enters a closed culvert that runs through the city centre of Fredrikstad. When heavy rain causes flooding in Veumbekken the culvert's capacity has been exceeded and water has been ponding up and overflowing to areas near the culvert inlet. This has led to major damage caused by floods in the lower parts of Veumdalen and central parts of Fredrikstad. The municipality of Fredrikstad wants to open the lower parts of Holmenkulverten. An open channel will work as a blue-green tongue through the centre that will enrich the urban environment and it could also reduce flooding in the area by improving the capacity of Veumbekken.

In 2015, Jamal Haqi made a rainfall-runoff model in the program SWMM. The model included the basin of Veumbekken with the inlet of Holmenkulverten as the model's exit point. This model has been quality assured and some small errors have been corrected which has made the model a slightly more accurate description of the reality.

To see how an open channel will affect the existing conditions in the lower parts of Veumbekken the old SWMM model has been extended. There were developed new versions of the model which included Holmenkulverten as it lays today and a version with an open channel from Oslogata to Vesterelva. Simulations were run for various situations with heavy rainfall in Veumdalen and storm surge in Vesterelva to see how an opening from culvert to channel could increase capacity and help reduce the risk of ponding and flooding in events of extreme weather conditions.

Model simulations showed that making the lower parts of Holmenkulverten into an open channel would increase the capacity and simultaneously reduce the risk of ponding and flooding.

# Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b> .....	<b>I</b>
<b>Sammendrag</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Innholdsfortegnelse</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Introduksjon</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Problemstilling</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Bakgrunn</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Klima og klimaendringer</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Overvann og overvannshåndtering</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3 Situasjonen i Fredrikstad</b> .....	<b>14</b>
2.3.1 Gjenåpning av Veumbekken .....	17
2.3.2 Klimaendringer i Fredrikstad .....	20
<b>3 Teori</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1 Hydrologi</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2 Nedbør og nedbørsdata</b> .....	<b>25</b>
3.2.1 Nedbør og overflateavrenning .....	27
3.2.2 Måling av nedbør .....	29
3.2.3 Nedbørfelt og vannskille .....	32
<b>3.3 SWMM</b> .....	<b>33</b>
3.3.1 Modelloppbygning SWMM .....	33
3.3.2 Nedbørmåler .....	34
3.3.3 Nedbørfelt .....	34
3.3.4 Infiltrasjon og Hortons likning .....	36
3.3.5 Noder .....	36
3.3.6 Transportsystem (conduits) .....	39
3.3.7 Strømningsberegninger i SWMM .....	42
3.3.8 Oversvømmelse av knutepunkter .....	44
3.3.9 Kontinuitetsfeil .....	45

3.3.10	Fremstilling av resultater i SWMM.....	46
<b>3.4</b>	<b>Modellvalidering.....</b>	<b>47</b>
<b>4</b>	<b>Analyse av opprinnelig modell .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Fremgangsmåte for analyse og endringer i modell .....</b>	<b>49</b>
4.1.1	Andre justeringer.....	52
<b>5</b>	<b>Utvidelse av modell .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1</b>	<b>Nytt nedbørfelt Bjørndalen .....</b>	<b>55</b>
<b>5.2</b>	<b>Beskrivelse av modellen.....</b>	<b>57</b>
<b>5.3</b>	<b>Kalibrering og validering av modell .....</b>	<b>60</b>
<b>6</b>	<b>Resultater og Diskusjon .....</b>	<b>63</b>
<b>6.1</b>	<b>Analyse av opprinnelig modell .....</b>	<b>63</b>
<b>6.2</b>	<b>Sammenligning av kulvert og åpen kanalløsning .....</b>	<b>67</b>
6.2.1	Dagens kulvertløsning .....	67
6.2.2	Åpen kanalløsning .....	70
6.2.3	Åpen løsning, år 2100 .....	74
<b>6.3</b>	<b>Usikkerhet rundt resultatene: .....</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Konklusjon.....</b>	<b>76</b>
<b>8</b>	<b>Anbefalinger til videre arbeid .....</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Bibliografi .....</b>	<b>78</b>
<b>Vedlegg A</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>
<b>Vedlegg B</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>
<b>B – 1</b>	<b>Maksimalvannføring med den rasjonelle metode .....</b>	<b>I</b>
B – 2	HEC-RAS profil av Holmenkulverten .....	II
<b>B – 3</b>	<b>Kanalens kapasitet beregnet med Mannings formel.....</b>	<b>III</b>





# 1 Introduksjon

Store mengder overvann er et stadig økende problem i norske byer og tettsteder. Økende urbanisering og fortetting i eksisterende urbane områder medfører økte andeler tette flater. Store andeler tette flater i samspill med store nedbørsmengder gir store avrenningstopper som skaper oversvømmelser og skade i byene. Man ser også at det i dag er en økning i intensitet og hyppighet av regnskyll som skaper problemer med overvann, sammenlignet med tidligere. Disse hendelsene er forventet å forsterkes ytterligere av fremtidige klimaendringer. På grunn av denne økningen i hyppighet og intensitet vil problemer med overvann virkelig være en utfordring for fremtidens byer, og man må sørge for å utvikle ny infrastruktur for håndtering av overvannsmengdene.

Det er i dagens byer mange steder et etterslep i vedlikehold og oppgradering av infrastrukturen for overvannshåndtering og ved kraftige nedbørshendelser vil overvannsmengdene kunne forårsake omfattende skader på infrastruktur som vei, baner og bygninger. Klimatilpasningsutvalget har i sin rapport NOU 2010: 10 fastslått at skadekostnadene tilknyttet overvann på landsbasis ligger i området 1,6 til 3,6 milliarder kroner per år, og spår at skadekostnadene i fremtiden vil øke dersom det ikke skjer en opprustning av infrastrukturen for overvannshåndtering.

Fredrikstad kommune har de siste årene hatt store problemer med overvann etter kraftige nedbørshendelser. Området Veum-Holmen har vært et spesielt utsatt da store nedbørsmengder har ført til flom i Veumbekken. Veumbekken renner fra veumdalen nord for Fredrikstad sentrum og inn i en kulvert ved Fredrik II videregående skole. Kulverten er en del av et fellesledningssystem og ved høye vannstander i Veumbekken har det oppstått problemer med tilbakeslag av vann til kjellere og oppstuvning ved kulvertens innløp har medført oversvømmelse av nærliggende områder (se Bilde 1-1).



Bilde 1-1 Oversvømmelse av undergang ved jernbanelinjen i Holmegata ved flommen 14.08.2008. Overvannet kommer fra innløpet til Holmenkulverten som ligger ca. 180 m til høyre utenfor bildet. (Norconsult 2015b)

Som tiltak mot problemene med oversvømmelse i de nedre områdene av Veum og Holmenområdet ble det bygget en avledningstunell lengre oppe i Veumdalen med kapasitet til å avlede store mengder vann fra Veumbekken og videreføre dette til Seutelva. Det ble i denne forbindelse laget en nedbørs-avrennings modell av Jamal Haqi i programmet SWMM som skulle simulere den flomdempende effekten av avledningstunellen på de nedre delene av Veumdalen, samt å undersøke om det vil oppstå kapasitetsproblemer i Holmenkulverten for en rekke nedbør- og avrenningssituasjoner. Modellen viste at avledningstunellen ville fungere tilfredsstillende og at kapasiteten til Holmenkulverten ikke ble overskredet selv for nedbørshendelsen som oppstod 14.08.2008 som førte til høyere avrenning en et 100-årsregn. For å ytterligere legge til rette for reduksjon av faren for flom og overvannsproblemer i nedre Veumdalen og Holmenområdet ved kraftig regnvær har Fredrikstad kommune vurdert muligheten for en åpning av Holmenkulverten fra Oslogata til Seutelva. En åpning av kulverten vil kunne bidra positivt både til rekreasjon og bymiljø men også som flomvei ved ekstreme avrenningssituasjoner.

Oppgaven har sin bakgrunn i det stadig økende behovet for oppgradering av infrastrukturen for overvannshåndtering som følge av at stadig økende nedbørsmengder og fortetting skaper store flomproblemer i Norske byer.

*Hovedmålene med denne oppgaven har derfor vært å:*

- 1. Kvalitetssikre den eksisterende modellen.*
- 2. Utvide modellen med en åpen kanalløsning langs Holmegata for å kunne simulere strømningsforhold og danne et grunnlag for valg av kanal med et tilstrekkelig stort tverrsnitt, for store flomvannføringer som oppstår ved nedbørhendelser tilsvarende monsterregnet av 14.08.2008.*

## 1.1 Problemstilling

- Er den eksisterende SWMM-modellen for Veumbekken tilfredsstillende modellert og kan den forbedres?
- Hvordan vil en åpning av Holmenkulverten påvirke de hydrauliske forholdene i nedre Veum og Holmenområdet?
- For hvilke kanaltverrsnitt vil en åpning av de nedre delene av kulverten ha en flomdempende effekt?



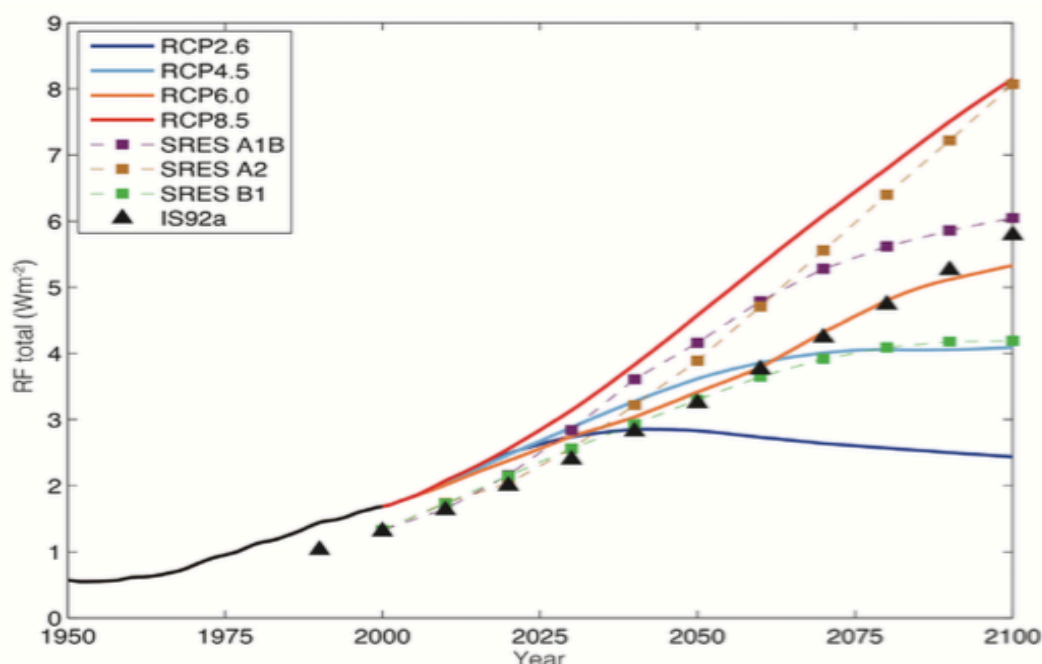
## 2 Bakgrunn

### 2.1 Klima og klimaendringer

Man hører stadig om globale klimaendringer og hvilke utfordringer klimaendringene vil skape i fremtiden. Globale klimaendringer er endringer i klodens klimasystem over tid. Disse endringene kan være naturlige, menneskeskapte eller en kombinasjon av dette. FNs klimapanel regner det som 95-100% sannsynlig at klimaendringene vi ser i dag er menneskeskapt. (Miljødirektoratet 2015) De menneskeskapte klimaendringene kommer fra utslipp av klimagasser. Klimagassene vil samle seg opp i atmosfæren og bidra til å forsterke drivhuseffekten. Drivhuseffekten omhandler kort at solinnstråling passerer lettere gjennom klimagasser og skyer i atmosfæren enn den langbølgede varmestrålingen sendt ut fra jorden, varmestrålingen blir lettere reflektert tilbake til jordoverflaten av klimagassene. En økt mengde klimagasser i atmosfæren vil derfor bidra til en økt netto innstråling og vil dermed bidra til en økt oppvarming av jordoverflaten. Den globale temperaturøkningen er et viktig mål på at det nå foregår klimaendringer som er menneskeskapte. Siden temperaturmålingene startet rundt år 1880 har den globale gjennomsnittstemperaturen økt med omlag 0,85 °C og temperaturøkningen har en økende trend. Det er store lokale variasjoner i temperaturøkningen, og økningen vil bli størst i de nordligste områdene av verden. En global temperaturøkning vil blant annet føre til at snø og is smelter i større grad enn før, og områder dekket av helårsis og permafrost vil dermed reduseres. Smeltevannet vil renne ut i havet og bidra med en økning av globalt havnivå. Havet i seg selv er også direkte påvirket av den økende temperaturen. Som følge av de økte overflatetemperaturene vil det skje en varmeutvikling i havet som vil føre til et økt havvolum. Denne volumøkningen vil sammen med store mengder smeltevann føre til en heving av det globale havnivået. Et høyere havnivå vil kunne skape store problemer med oversvømmelse i byer og andre områder som ligger nær havet. FNs klimapanel har også konkludert med menneskeskapte klimaendringer sannsynligvis har bidratt til at det allerede i dag er større sannsynlighet for flere og hyppigere episoder av ekstremvær som hetebølger, ekstreme nedbørsmengder og flom. For få sikre målinger av ekstremvær på global skala er det nødvendig med et godt nettverk av målestasjoner ulike steder i verden. Ekstremvær oppstår ofte svært lokalt og det er mange steder uten gode målestasjoner. Der er derfor vanskelig å konstatere endringer i ekstremvær for større områder. (Miljødirektoratet 2015)

For å kunne beskrive hvordan klima utvikler seg lages det klimamodeller som genererer klimaframskrivninger. Modellene bygger på naturvitenskapelige lover, samt sammenhengen mellom virkelige observasjoner og statistikk. FNs klimapanel har i sine klimaframskrivninger i hovedsak tatt utgangspunkt i tre ulike scenarier. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015) Scenariene kalles for RCP8.5, RCP4.5 og RCP2.6. RCP står for ”Representative Concentration Pathways” og beskriver mulige scenarier for fremtiden basert på hvor store utslippskutt vi klarer å utføre. Tallverdiene (8.5, 4.5 og 2.6) representerer en økning i netto positiv effekt av solinnstråling (strålingspådriv) til jorden i  $W/m^2$  som følge av drivhuseffekten. Figur 2-1 viser utviklingen i strålingspådriv fra 1950 til 2100. Verdiene er i forhold til et nullnivå satt til år 1750, altså før den industrielle revolusjon. De ulike klimascenarioene baserer seg på menneskelige utslipp og beskrives kort som:

1. RCP8.5 – Et scenario hvor utslipp av klimagasser fortsetter å øke i dagens tempo frem til slutten av dette århundre.
2. RCP4.5 – Innebærer små utslippskutt frem til 2050 og deretter utslippskutt
3. RCP2.6 – Innebærer drastiske utslippskutt allerede fra år 2020

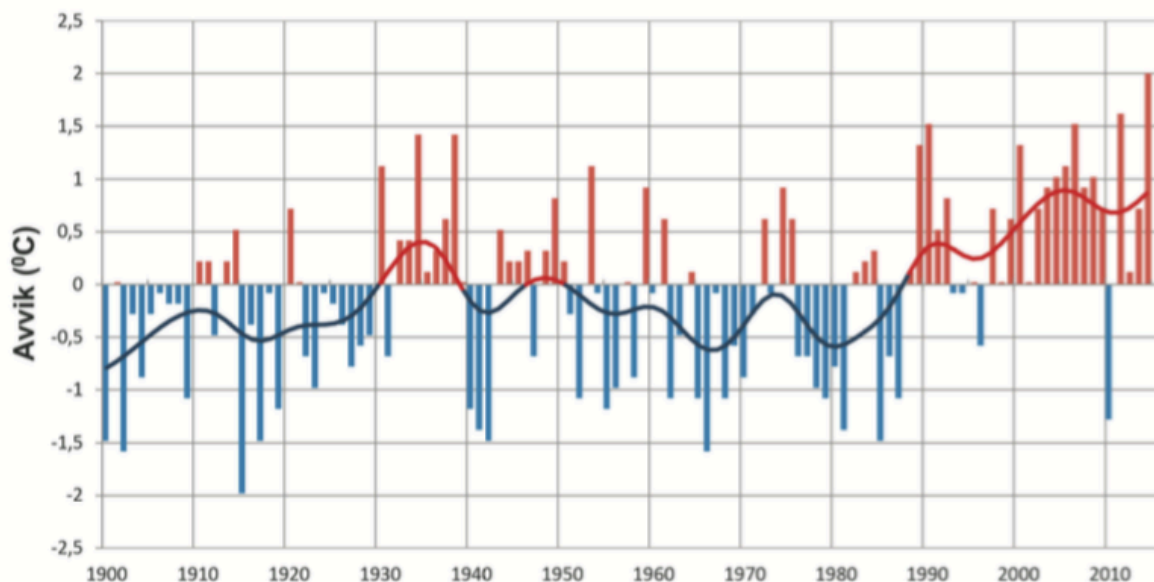


Figur 2-1 Historisk og framtidig klimapådriv i  $W/m^2$  fra 1950 til 2100. Pådrivet er gitt i forhold til førindustriell tid. Scenarier fra tidligere IPCC rapporter (IS92a, SRES A1B, A2 and B1) er framstilt sammen med de nye RCP-verdiene. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015)

Det har i Norge de siste 100 årene vært store svingninger i årsmiddeltemperatur, men det er de siste 40 årene vært en markant økning i årsmiddeltemperatur for Norge generelt. Figur 2-2

viser avvik i årsmiddeltemperatur de siste hundre årene, avviket er sett i forhold til årsmiddeltemperaturen for referanseperioden 1971-2000.

I Norge vil klimaendringene bli merket ved at vi får en høyere middeltemperatur. Økningen frem til nå har vært størst om våren og minst om sommeren. Som følge av økte temperaturer og mildere vintre vil vi generelt sett få forlengede høst og vårperioder. Årsnedbøren vil øke i takt med at vi får hyppigere regnbyger og flere kraftige nedbørshendelser som også vil være enda kraftigere enn det vi ser i dag. Fordi havnivået stiger langs norskekysten vil det også bli mer ekstreme episoder av spring- og stormflo.



Figur 2-2 Avvik fra årsmiddeltemperatur for perioden 1900-2010 (I. Hanssen-Bauer et al. 2015)

Fordi Norge er en kystnasjon med store byer og infrastruktur liggende ved havet vil en fremtidig økning i havnivå kunne få store konsekvenser for områder langs kysten. Norge har i dag en pågående heving av fastlandet som har vart fra forrige istid og som har ført til at havnivået langs norskekysten har sunket. Det ser likevel nå ut som at økningen i havnivå går så fort at havnivået mange steder vil øke til tross for landhevingen. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015) Økningen i havnivå vil også variere fra sted til sted blant annet på grunn av lokale forskjeller i varmeutvikling i havet og lokale forskjeller i landheving Klimaframskrivningene for havnivå i Norge viser at det innen år 2100 vil være en heving av havet langs norskekysten på +15 til +55 cm ved høyutslippsscenarioet RCP8.5. For lavutslippsscenarioet, RCP2.6 vil endringen av havnivå i Norge ligge mellom -10 cm til +30 cm. Økningen i havnivå vil føre til

at springflo og stormflo i fremtiden vil bli enda høyere enn i dag. Stormflo oppstår som følge av kombinasjonen av kraftig lavtrykk og sterk pålandsvind. Fordi lufttrykket over havet er lavt vil havet stige og ved sterk pålandsvind vil havet presses mot land og stuve opp langs kysten. Når disse hendelsene oppstår likt med høyt tidevann(springflo) vil man kunne få et scenario med svært høy stormflo. Da det antageligvis blir mer ekstremvær langs norskekysten i fremtiden vil stormflohendelser kunne oppstå oftere og føre til mer skade enn tidligere.

Man ser allerede i dag store problemer med overvann som følge av kraftige nedbørshendelser og manglende eller underdimensjonert infrastruktur for overvannshåndtering. Den årlige nedbøren er i dag beregnet til 1600 mm som et gjennomsnitt for hele landet. I fremtiden er det beregnet at både årsnedbør og antall dager med kraftig nedbør vil øke. For utslippsscenarioet RCP8.5 viser medianframskrivningen en økning i årsnedbør i Norge på 18% mot slutten av århundret. Scenariet gir også en dobling av antall dager med kraftig nedbør og en økning i nedbørsmengde på 19% for dager med kraftig nedbør. De økte nedbørsmengdene vil medføre større og mer hyppige flomepisoder mange steder i landet. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015)

Med økte nedbørsmengder vil det bli økt overflateavrenning. Da det stort sett er kraftige regnhendelser som fører til overvannsproblemer vil flere kraftige regnhendelser med økt intensitet bli en stor utfordring innen overvannshåndtering i fremtiden.



## 2.2 Overvann og overvannshåndtering

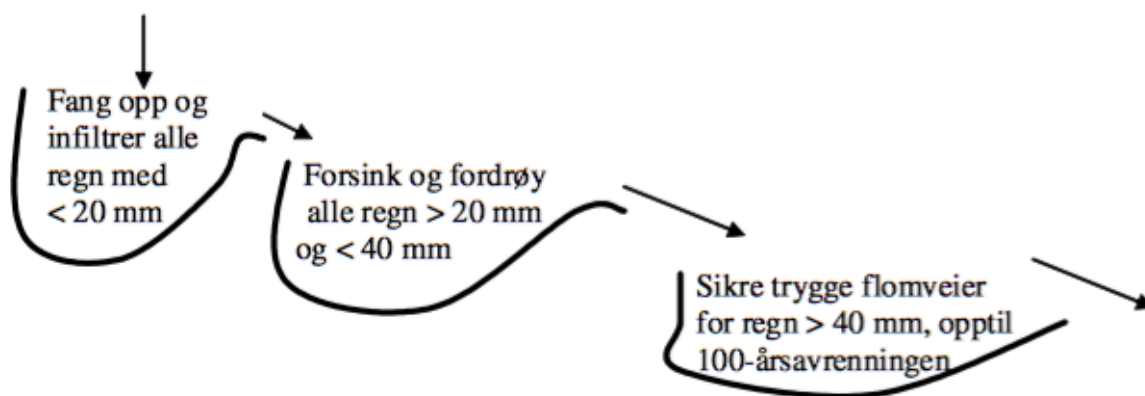
Overvann er betegnelsen på vann som av ulik årsak renner av på overflaten. Dette kan være regnvann, smeltevann, eller overflatevann som følge av spring- eller stormflo. Utfordringene som skapes av store mengder overvann er et økende problem i mange byer i Norge. Store mengder overvann i byer og tettsteder vil dersom det ikke håndteres kunne medføre forurensning og skade på bygg og infrastruktur. Klimatilpasningsutvalget fastslår i NOU 2010: 10 at skadekostnadene knyttet til overvann ligger i området 1,6 til 3,6 milliarder kroner per år. Dersom forebyggende tiltak ikke blir iverksatt er det ventet en lignende utvikling i skadekostnader, og utvalget antyder kostnader i størrelsesorden 45 til 100 milliarder kroner over de neste 40 årene. Akkurat hvor store skadekostnadene som følge av overvann vil bli kommer an på hvor godt man klarer å håndtere overvannet i fremtiden.

Tradisjonelt sett har overvannshåndtering gått ut på å føre overvann til rørsystemer som transporterer dette bort til nærmeste resipient eller renseanlegg. Fra midten av 1800-tallet startet norske kommuner utbyggingen av avløpssystemer. Avløpet gikk da i hovedsak til nærmeste resipient, og ofte utgjorde vassdrag byens hovedkloakker. Vassdragene ble sterkt forurenset og førte til sjenerende lukt, og som følge av dette ble mange vassdrag lagt i rør. Avløpsledningene skulle lede bort både avløpsvann fra kjøkken, bedrifter, regnvann, smeltevann og annet overskuddsvann, men ikke toalett vann. (Helge Skaaraas et. al. 2015) Det ble sett på som en fordel at avløpsledningene også førte overvann, fordi man da også fikk spylt ledningene. Det ble derfor lagt det vi i dag kaller avløp fellesledninger som fører både overvann og avløpsvann. I forbindelse med sunnhetsloven i 1860 ble sunnhetskommisjonen etablert og drenering av skadelig vann satt i system. Avløpsledninger som førte overvann ble sett på som et viktig forbedringstiltak og vassdrag tilført sanitært avløpsvann ble av helsemessige årsaker lukket. Avledning av overvann i ledninger ble i 100 år ansett som tilstrekkelig for å hindre overvannsproblematikk.

I kommunenes KOSTRA-rapport fra 2013 vises det til at det i Norge er 7700 km fellesledninger, 28 800 km spillvannsledninger og 16 000 km overvannsledninger. Ledningene ble dimensjonert etter daværende kunnskap om nedbørsforhold og befolkningsvekst og tok i liten grad høyde for fortetting og klimaendringer.

Byforholdene med stor andel tette flater kombinert med store regnskyll fører ofte til problemer med oversvømmelser i byene som følge av at overvannsledningenes kapasitet overskrides. I 1978 ble det av Statens forurensningstilsyn utgitt retningslinjer for overvannshåndtering. Retningslinjene la til grunn at overvannet i stedet for å transporteres i rør burde følge det naturlige avrenningssystemet. Nye metoder for overvannshåndtering i byer fokuserer derfor på å reversere den økte avrenningstrenden skapt av urbanisering. Ved å sørge for at mer vann går til infiltrasjon, magasinering og evapotranspirasjon, vil man samtidig redusere mengden vann som går til avrenning. I dag benyttes det en hydrologisk tilnærming som bygger på lokal overvannsdiskonering (LOD) som supplement til overvannsledninger. LOD-tiltakene kan eksempelvis være i form av grønne flater implementert i et bymiljø dominert av tette flater og stor avrenning. Tilbakeholdelse av vann og infiltrasjon til grunnen i disse flatene vil sørge for en redusert flomtopp, og dermed redusere risikoen for å overskride overvannsledningenes kapasitet.

En kjent strategi for lokal overvannsdiskonering (også omtalt som lokal overvannshåndtering, LOH) er treleddsstrategien, som vist i Figur 2-3. Dersom man implementerer LOD-tiltak etter prinsippene i treleddstrategien, skal man kunne håndtere overvann for hendelser som tilsvarer opptil 100-årsavrenning.



Figur 2-3 Treleddstrategien. (Lindholm 2009)

I dag er målene for overvannshåndtering på et overordnet nivå å:

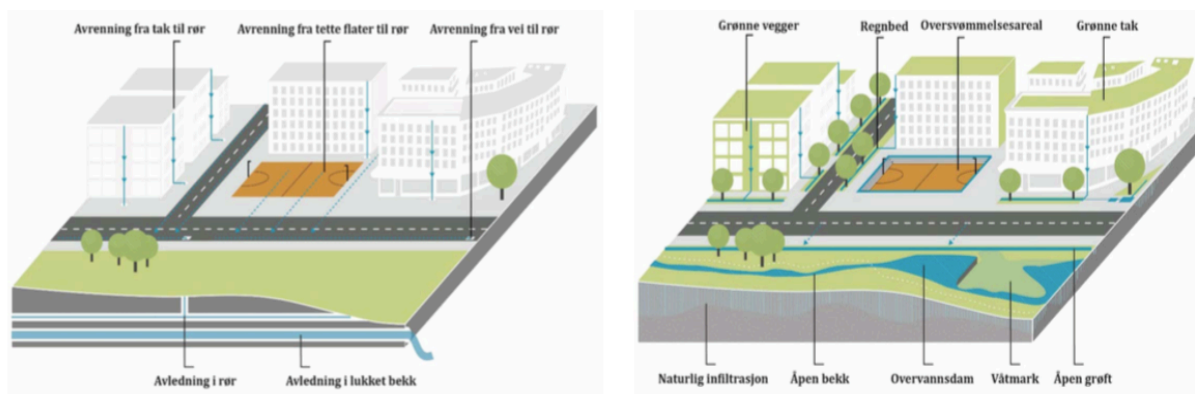
1. Forebygge skade på helse, miljø, bygninger og infrastruktur.
2. Benytte overvann som en ressurs.
3. Styrke biologisk mangfold i bymiljøer

Å forebygge skade har alltid vært hovedmålet med overvannshåndtering, mens det å benytte overvann som en ressurs har stort sett vært knyttet selvreising i fellesrør. I dag er det derimot et større fokus på det å utnytte overvann som ressurs. Dette som oftest i forbindelse med å åpne opp for avrenning i naturlige vassdrag i tettbebygde strøk. Overvannet vil da ha berikende effekt på bymiljø, og blir en ressurs for opplevelse, lek og biologisk mangfold. Et eksempel



Bilde 2-1 Åpen overvannsløsning for boligområde (Statsbygg 2014)

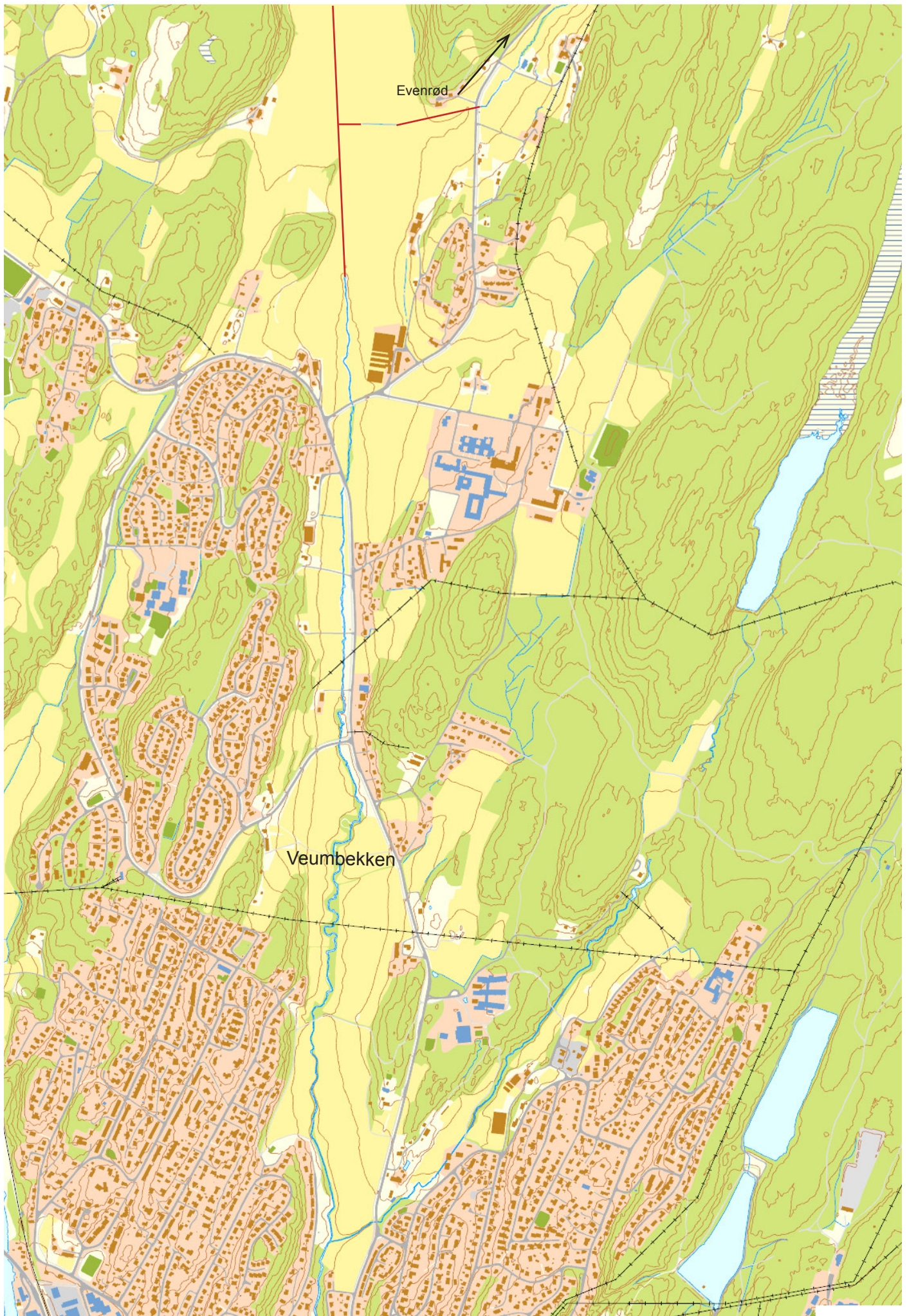
som blant annet viser den visuelle verdien av åpne overvannsløsninger i tettbebygde strøk er vist i Bilde 2-1. I tillegg til å virke berikende for bymiljøet kan åpne løsninger utformes som effektive flomveier som frakter overvann trygt gjennom byen. Overvann som ellers ville gått som overflateavrenning til nærmeste lavpunkt eller sluk og bidratt til å overskride kapasiteten til overvann og avløpsledningsnett. Figur 2-4 viser ulike LOD tiltak og åpne løsninger i samspill. (Statsbygg 2014)



Figur 2-4 Prinsippkisse som viser overgang fra tradisjonell til "nytenkende" overvannshåndtering i by. (Statsbygg 2014)



Figur 2-5 Oversiktskart over nedre deler av Veumdalen og deler av Fredrikstad sentrum. Grunnlagskart hentet fra [kart.fredrikstad.kommune.no](http://kart.fredrikstad.kommune.no)  
Redigert av forfatter i Indesign.



Figur 2-6 Oversiktskart over øvre Veumdalen. Grunnlagskart hentet fra [kart.fredrikstad.kommune.no](http://kart.fredrikstad.kommune.no). Redigert av forfatter i Indesign.

### 2.3 Situasjonen i Fredrikstad

For at leseren skal få et grunnlag til å orientere seg er det laget et oversiktskart (side 12 og 13) over de fleste steder, kulverter og elver/bekker nevnt i oppgaven.

Kulverter/overvannsledninger er markert med rød linje, forslag til åpen kanal er markert med stiplede grønt. Kartet er rettet mot Nord. Kartgrunnlag hentet fra Fredrikstad kommune. (kart.fredrikstad.kommune.no)

Det har de siste årene vært gjentakende problemer med oversvømmelse av områdene i nedre Veumdalen, Frydenberg og Holmenområdet som følge av flom i Veumbekken ved kraftige nedbørshendelser. Veumbekken renner gjennom Veumdalen som strekker seg nordover fra Fredrikstad sentrum. Rett nord for jernbanen ved Fredrik II videregående skole renner bekken inn i en Holmenkulverten som er en del av et fellesavløpssystem. Kulverten ble lagt på 1920-tallet og går i store deler under Holmegata med utløp i Vesterelva ved Trosvikstranda.

I perioder med kraftig nedbør har kulvertens kapasitet blitt overskredet noe som har ført til oppstuvning av vann ved innløpet av kulverten. Som følge av oppstuvningen ved kulvertinnløpet har omkringliggende områder vært utsatt for store oversvømmelser, som har resultert i skade på bygg og infrastruktur. Fordi fellesledninger har direkte utløp eller overløp til kulverten har perioder med oppstuvning i kulverten også medført kjelleroversvømmelser i boliger tilknyttet fellesledningene og omfattende utslipp av avløpsvann i Vesterelva.

For å hindre skader forårsaket av flom i Veumbekken bygget Fredrikstad kommune en avledningstunell som skulle bidra til å avlaste Veumbekken som flomvei ved kraftig nedbør. Tunellen stod ferdig våren 2015 og fører overvann fra Veumbekken til Seutelva med en maksimal kapasitet på omlag 8,5 m<sup>3</sup>/s.

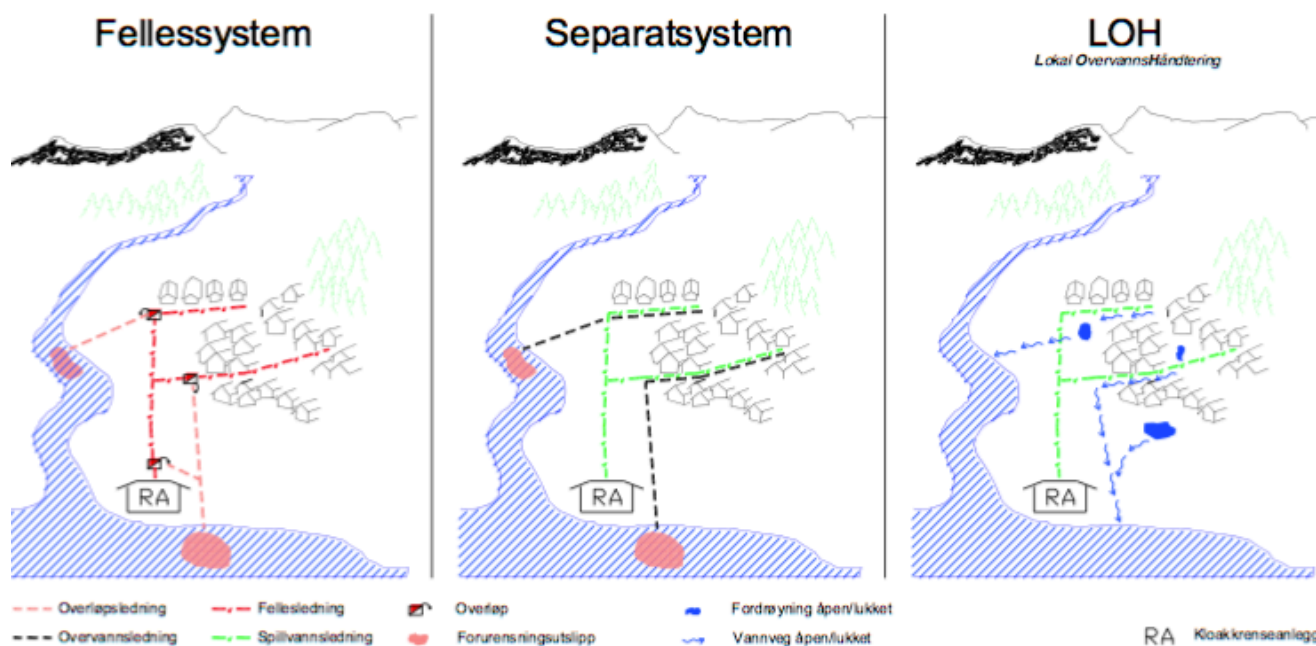
Den samme våren ble det også utarbeidet en nedbørs-avrenningsmodell i programmet SWMM som skulle simulerte avledningstunnellens effekt på vannføringen i Veumbekken. Modellen ble laget av Jamal Haqi i forbindelse med hans masteroppgave ”Modellering av nedbørfeltet- Veumdalen i Fredrikstad med programmet SWMM”. (Haqi 2015)

Modellen ble laget med forskjellige egenskaper for ulike årstider, og disse ble kjørt for regnhendelser med 10, 20 og 100-års gjentakintervall, samt monsteregnet som oppstod over Fredrikstad i August 2008 med regnvarighet opptil 300 minutter.

Modellsimuleringene viste at den nye avledningstunnelen var et effektivt tiltak for å hindre problemer med oppstuvning i de nedre delene av Veumbekken, og gav tilfredsstillende resultater for nedbørshendelsen som oppstod 14.08.2008, ved sommer og høstsituasjon. Kun med modellparametere innstilt for en vintersituasjon der nesten all nedbør renner direkte av som overvann vil det oppstå kapasitetsproblemer. Dette var når modellen ble kjørt med nedbørmengder tilsvarende «monsterregnet» som inntraff 14.08.2008 og det ble i oppgaven konkludert med at sannsynligheten for en slik regnhendelse på vinterstid er svært lav. (Haqi 2015)

Store deler av avløpsnett i Fredrikstad består av fellessystem, der overvann og spillvann går i de samme ledningene. I tørre perioder vil det være mest spillvann som går til renseanlegget, men i perioder med kraftig nedbør vil ledningene fylles med overvann i tillegg til spillvannet. Renseanlegget er ikke dimensjonert for å takle de store vannmengdene man får i en flomperiode og fellesledningene er derfor utstyrt med overløp. I perioder med mye nedbør og flom vil ledningene fylles opp av overvann blandet med spillvann og gå i overløp til nærmeste resipient, som vil være Veumbekken, Oldenborgbekken, Seutelva eller Glomma. Dette fører til forurensninger av resipientene.

Avløpsrenseanlegget i Fredrikstad ligger på Øra, og er et kjemisk/mekanisk renseanlegg. Kravene til renseanlegget ligger på 85% total fosfor og 60% total organisk karbon. Renseanlegget overholder normalt sett rensekravet til fosfor med god margin, men i nedbørsperioder når det oppstår store mengder overvann i fellesledningene blir det en reduksjon i konsentrasjonen av forurensninger i vannet. Dette fører til at renseseffekten reduseres og det blir vanskelig å overholde kravene til rensing. (Fredrikstad kommune 2008) Foruten kostnader tilknyttet flom og kjelleroversvømmelser vil det derfor i perioder med kraftig nedbør også bli en unødvendig stor forurensning av resipientene på grunn av overløp til kulverten.



Figur 2-7 Oversikt over renseanlegg, pumpestasjoner og overløp (Fredrikstad Kommune 2007)

I Figur 2-7 kan man se en skisse av dagens fellessystem med overløp fra pumpestasjoner sammenlignet med hvordan situasjonen vil være med et separatsystem og separatsystem + LOH-tiltak.

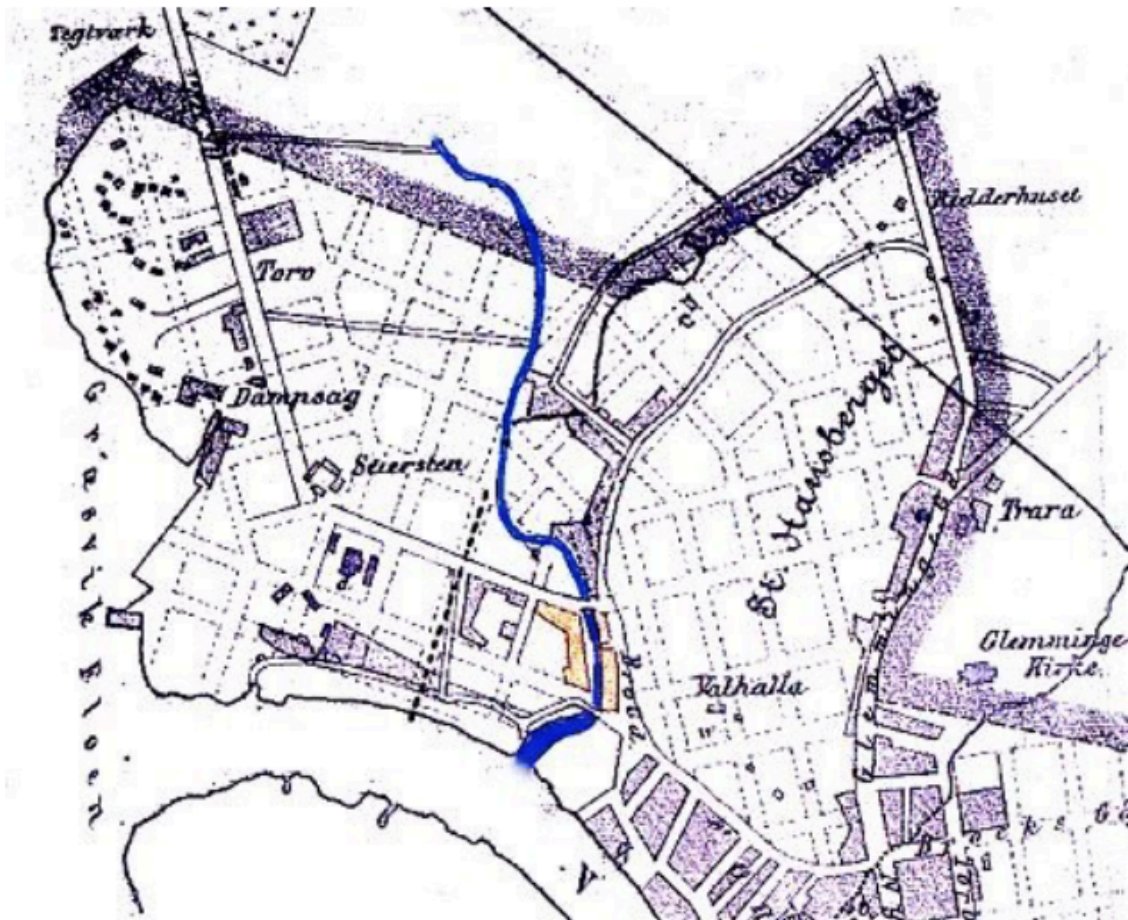
For å vurdere vannkvaliteten utfører kommunen prøvetaking i en rekke resipienter. Variasjonene som registreres på prøvene kan skyldes flere forhold som avrenning fra jordbruk, utslipp fra overløp i fellessystem, feilkoblinger og utslipp av forurenset overvann fra urbane områder. Store områder i Veumdalen består av landbruk og det finnes overløp fra fellesledninger som går direkte til Veumbekken. Dette fører totalt sett til en betydelig forurensning av Veumbekken, som igjen medfører forurensning av Vesterelva. (Fredrikstad Kommune 2007)

Som tiltak mot problemene tilknyttet flom og overvann i Fredrikstad har kommunen planlagt en overgang til separatsystem og en gjenåpning av Veumbekken fra Oslogata til Vesterelva. Dette vil bidra til å redusere problemer med flom og forurensning, og redusere faren for kjelleroversvømmelser i utsatte områder.



### 2.3.1 Gjenåpning av Veumbekken

For 100 år siden rant Veumbekken gjennom Fredrikstad sentrum som vist i Figur 2-8. Men på grunn av problemer med forurensning av bekken som blant annet førte til lukt, ble bekken lukket. Lukkingen skjedde etappevis og siste del av bekken havnet i rør i 1939. (Fredrikstad blad 2009)



Figur 2-8 Veumbekkens gamle løp gjennom Fredrikstad sentrum. (Fredrikstad blad 2009)

Fredrikstad kommune har i samarbeid med Norconsult utført planleggingsarbeid som omfatter en åpning av den nedre delen av Holmenkulverten. Tiltaket vil bli utført i forbindelse med et stort behov for oppgradering av eksisterende infrastruktur. Det vil også ytterligere bidra til å hindre flomproblemer, samt at det å få en åpen kanal gjennom sentrum vil ha en viss rekreasjonsverdi. Tiltaket vil føre til store inngrep i Holmegata slik den er i dag, og det vil være store kostnader tilknyttet bekkeåpningen. Gjentakende oversvømmelser av nedre Veum og Holmenområdet vil derimot på sikt kunne medføre store erstatningskostnader for kommunen som følge av utilstrekkelig arealplanlegging. I episoder der kapasiteten til

Holmenkulverten er blitt overskredet har vannet tatt den ”naturlige flomveien” ned mot Holmegata. Med en åpen kanal vil det være mulig å lede dette overflatevannet direkte ned i kanalen og dermed ytterligere redusere problemer som oppstår i episoder der vannet tar veien via overflaten og ned Holmegata.

I forbindelse med utarbeidelse av saneringsplan for Holmen-området i 2006 ble det gjort inspeksjoner av Holmenkulverten som viste at den hadde begrenset levetid. Det ble også utført inspeksjoner i 2010 og 2014 som viste at belastningen og skadene på kulverten er størst under den sterkt trafikkerte Holmegata. Mest utsatt er taket i kulverten, her skadene er jevnt fordelt over kulvertens lengde og det er hovedsakelig de friske områdene rundt skadene som bærer trafiklasten. Bæreevnen til kulverten er allerede svekket og vil over tid bli enda svakere. Dette kan i verste tilfelle føre til en kollaps av kulverten dersom noe ikke gjøres.

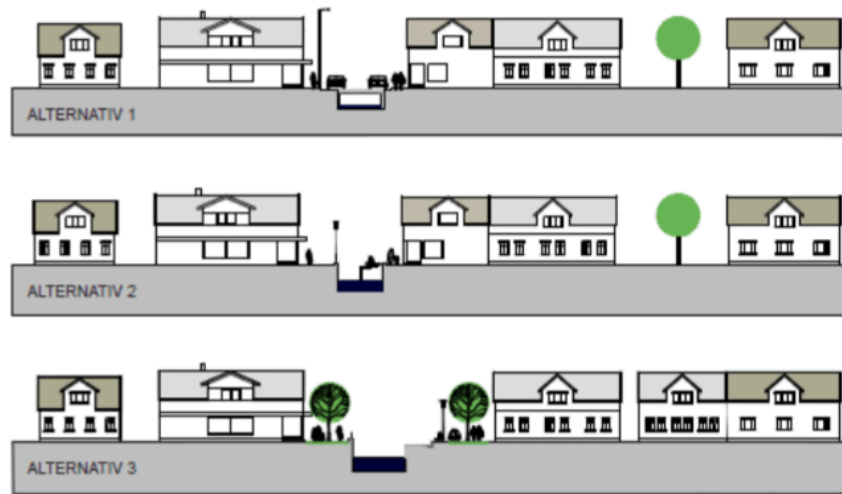
Norconsult konkluderte derfor i ”Forslag for detaljregulering for Veumbekken – Holmen” at kulverten må ”repareres og/eller skiftes ut i overskuelig fremtid.” (Norconsult 2015a)

Arbeidet med saneringen av vann og avløpsnett i Holmen-området var nærmest i gang, men oppdagelsen av saneringsbehovet til Holmenkulverten førte til langt høyere kostnader enn forutsatt. Da det allikevel var skulle gjøres store inngrep med tilsvarende store kostnader ønsket kommunen å se på muligheter for å utvikle området best mulig for kommende generasjoner. Med bakgrunn i behovet for oppgradering av eksisterende VA-infrastruktur i Holmen-området ønsker Fredrikstad kommune nå en løsning der eksisterende kulvert byttes ut med en åpen blå-grønn løsning. Visjonen bak åpningen av Veumbekken er at en ny blå-grønn løsning skal gjøre Holmegata til et attraktivt parkområde i byen, med unike kvaliteter og høy rekreativ verdi for området. En ny kanal skal også gjøre byen bedre rustet til å takle utfordringer med klimaendringer samt å sette fokus på alternativer for bytrafikk og fremme byutvikling i en mer bærekraftig og klimariktig retning. (Norconsult 2015a)

Forslag til mål for åpningen av Holmenkulverten vil være:

- Etablere en bypark med unike kvaliteter og høy rekreativ verdi for nærmiljøet.
- Etablere en blågrønn forbindelse for gående og syklende med høy opplevelsesverdi.
- Etablere en åpen kanal for Veumbekken i Holmegata og redusere fare for flom fra Veumbekken, samt øke biologisk mangfold i byen.
- Opprustning av infrastruktur.
- Videreføring av det bevaringsverdige bygningsmiljøet.

Det ble av Norconsult i 2012 gjort et forprosjekt som gjør rede for tre alternativer for utførelse av gjenåpningen av Veumbekken. Alternativene er illustrert i Figur 2-9 nedenfor.



Figur 2-9 Alternativer til løsning, vurdert i forprosjekt (Norconsult 2015a)

- Alternativ 1: Viser en løsning med åpen bekk mellom Vesterelva og Borggata, ny kulvert i Holmegata som opprettholdes som bilgate.
- Alternativ 2: Løsning med åpen bekk i eksisterende gatetverrsnitt fra Oslogata gjennom Holmegata og ut i Vesterelva.
- Alternativ 3: Løsning med åpen bekk i et utvidet gatetverrsnitt fra Oslogata gjennom Holmegata og ut i Vesterelva.

Alle alternativene består av en løsning der eksisterende kulvert erstattes, og alle alternativene vil i større eller mindre grad føre til en åpning av kulverten. Alternativ 3 vil gi størst handlingsrom og være det alternativet som bidrar mest til rekreasjon, med grøntarealer og sykkelstier langs veumbekken. Dette alternativet vil i midlertidig være det alternativet som bidrar til størst inngrep i Holmegata, og det har vært motstand fra huseiere som blant annet påpeker de negative sidene ved redusert fremkommelighet med bil.

(Norconsult 2015a)

### 2.3.2 Klimaendringer i Fredrikstad

Hovedutfordringen i Fredrikstad som følge av klimaendringene vil hovedsakelig være knyttet til flom som følge av mer ekstremvær. Fredrikstad sentrum er omkranset av Vesterelva sør for sentrum, Seutelva i vest og Glomma i øst. Elvene munner ut i havet ved Fredrikstad og vannstanden i elvene vil være direkte påvirket av havnivået. Tall hentet fra rapporten ”Klima i Norge i 2100” (I. Hanssen-Bauer et al. 2015) viser at Fredrikstad i fremtiden kan vente seg mer kraftig nedbør og en økt intensitet på den kraftige nedbøren sammenlignet med dagens verdier. Dette kan sees i Tabell 2-1 som viser at det i fremtiden vil kunne bli en dobling av antall dager kraftig nedbør for indre Østfold ved RCP8.5, og Tabell 2-2 som viser at også nedbørsmengdene på disse dagene vil kunne øke med omlag 20%.

Tabell 2-1 Endring i kraftig nedbør oppgitt i % økning sammenlignet med referanseperioden. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015)

Region	Sesong	1971–2000 til 2071–2100: Endring (%) i antall dager med kraftig nedbør					
		RCP 4.5			RCP 8.5		
		Med	Lav	Høy	Med	Lav	Høy
NR-1: Østfold	År	45	18	109	87	66	171
	Vinter DJF	68	19	141	157	87	264
	Vår MAM	82	13	149	105	49	183
	Sommer JJA	42	1	126	103	25	161
	Høst SON	39	-28	112	91	20	164

Tabell 2-2 Endring i nedbørsmengde på dager med kraftig nedbør oppgitt i % endring sammenlignet med referanseperioden. (I. Hanssen-Bauer et al. 2015)

Region	Sesong	1971–2000 til 2071–2100: Endring (%) i nedbørsmengde på dager med kraftig nedbør					
		RCP 4.5			RCP 8.5		
		Med	Lav	Høy	Med	Lav	Høy
NR-1: Østfold	År	10	4	23	19	14	32
	Vinter DJF	14	3	24	23	15	39
	Vår MAM	19	4	29	22	11	36
	Sommer JJA	12	1	30	25	5	41
	Høst SON	8	-6	19	18	4	25

Økte nedbørsmengder i fremtiden vil medføre at store regnflommer forekommer oftere enn i dag sammen med en heving av havnivået vil dette øke faren for oversvømmelse av Fredrikstad sentrum, spesielt ved stormflo. Av Tabell 2-3 kan man se nåværende verdier for stormflo fra to ulike kilder mens Tabell 2-4 viser beregnet økning i havnivå og beregnet 100-års stormflo i Fredrikstad frem mot år 2100.

Ved dagens nivå er middelvannstanden i Fredrikstad på -15 cm iht. NN1954, med en økning i havnivå vil middelvannstanden i 2100 ligge på +37 cm. Tidevannstanden i Vesterelva vil påvirke vannstanden i

Holmenkulverten og avløpsnett i de lavtliggende områdene i Fredrikstad sentrum og en økning i middel og tidevannstand vil i seg selv kunne by på utfordringer med oppstuvning i avløpsnett. Ved flom og stormflo vil det i disse områdene være stor fare for oppstuvning i avløpsnett som gir forurensning av resipient og

kjelleroversvømmelser. Flomvannet vil også kunne forårsake skade på bygg og infrastruktur.

Tabell 2-3 Vannivå ved stormflo for dagens klima fra seHavnivå.no og NVE med NN2000 som referanse. (Norconsult 2015b)

Gjentaksintervall (år)	seHavnivå.no	NVE
500	1,76	2,1
200	1,65	1,87
100	1,56	1,72
50	1,47	1,57
20	1,34	1,39
10	1,24	1,26
1	0,90	1

Tabell 2-4 Oversikt over landheving, økning av havnivå og stormflohøyder for Fredrikstad kommune frem mot år 2100. Økningen i havnivå er relativ til landhevingen. (Fredrikstad Kommune 2011)

Relativt år 2000	2050	2050	2050	2100	2100	2100
Kommune	Landheving (cm)	Beregnet havstigning i cm (usikkerhet -8 /+14cm)	100 års stormflo (usikkerhet -8 /+14cm)	Landheving (cm)	Beregnet havstigning i cm (usikkerhet -20 /+35cm)	100 års stormflo (usikkerhet -20 /+35cm)
Fredrikstad	19	12 (4 – 26)	172 (164 – 186)	38	52 (32 – 87)	217 (197 – 252)



## 3 Teori

### 3.1 Hydrologi

Hydrologi er læren om vannets kretslop, den beskriver vannets forekomst og vekselvirkning med omgivelsene og er av amerikanske "University Council on Water Resources fra 1967" blitt definert som:

"En geofysisk vitenskapen om vannet på jorden, vannets opptreden, sirkulasjon og fordeling, samt fysiske egenskaper og omgivelsenes reaksjoner."

Dette begrepet omfatter hele vannets sirkulasjonssyklus på jorden. (Wikipedia 2016a)

Figur 3-1 illustrerer ulike hydrologiske prosesser i vannets kretslop, og vekselvirkningen mellom de ulike prosessene vil variere med årstidene.



Figur 3-1 hydrologiske prosesser i vannkretsløpet. (Wikipedia 2016b)

Nedbør kan falle som regn eller snø avhengig av lufttemperatur. Når nedbøren faller vil den avhengig av temperatur og værforhold kunne lagres i overflatemagasiner eller som grunnvann og det vil kunne renne av som overflatevann. I varme og tørre perioder som gjerne oppstår om sommeren vil det være lavvannstand i overflatemagasiner og grunnvann, og bakken vil være tørr. Når nedbøren faller etter en slik tørr periode vil det sammenlignet med kaldere og våtere perioder bli en redusert overflateavrenning. Vannet vil i stedet infiltrere gjennom permeable jordoverflater og ned til grunnen (infiltrasjon). Vannet som blir infiltrert gjennom overflaten vil bevege seg ned i den umettede sonen for så å nå grunnvannet. Noe av vannet vil kunne lagres i den umettede sonen som markvann.

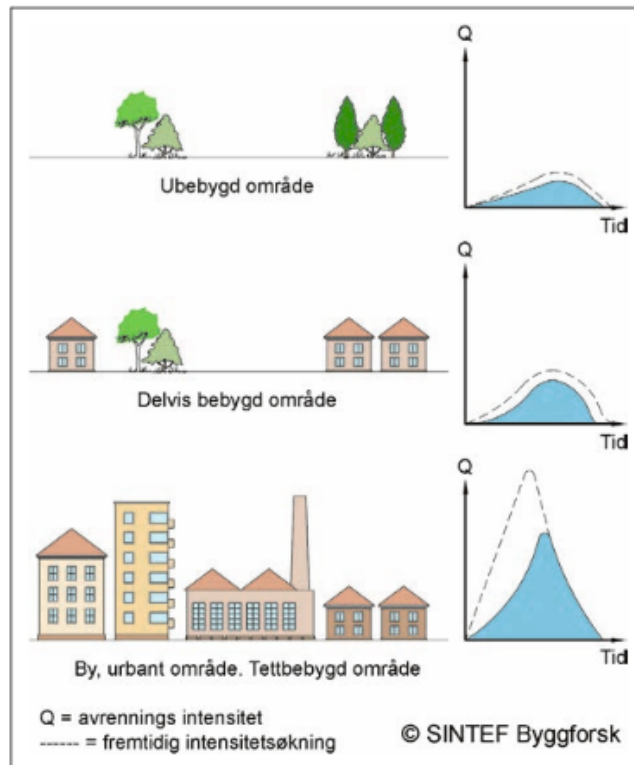
På grunn av høye temperaturer vil mye av vannet fordampe fra tette overflater eller fra planter som har tatt opp vann fra bakken, også kalt evapotranspirasjon. Evapotranspirasjon er summen av fordampning av alle overflater og transpirasjon som er fordampning av vann fra planter som skyldes plantenes evne til å ta opp vann gjennom røttene og frakte vannet til overflaten av blader, hvor det siden fordamper. Ved en høst eller vårsituasjon hvor permeable overflater i stor grad er mettet med vann som følge av vedvarende nedbør eller snøsmelting vil vannet i større grad renne av på overflatene. I disse situasjonene vil gjerne grunnvannstanden være høy, og det vil være redusert evapotranspirasjon sammenlignet med en sommersituasjon. Ved langvarig regn på mettede overflater der vannet ikke infiltrerer vil mye av vannet kunne lagres i små groper i terrenget (gropmagasinering) før det renner av som overflatevann. Om vinteren vil nedbøren hovedsakelig komme i form av snø, og is og snø kan sees på som en midlertidig lagring av nedbøren. Ved kalde temperaturer vil overflaten være frossen og gjennomtrengeligheten i permeable overflater vil være sterkt redusert. I en slik situasjon vil nedbør i form av regn på frossen mark eller en hurtig snøsmelting føre til en betydelig overflateavrenning.

Kombinasjonen av nedbørmengde og intensitet sammen med avrenningssituasjon og andel tette flater vil i stor grad være bestemmende for flomtopper i et område.



Hydrologien i urbane områder vil sammenlignet med rurale områder i stor grad være preget av tette flater som gir rask avrenning og mindre infiltrasjon, lagring og evapotranspirasjon av nedbøren. Urbanhydrologi er begrepet som omfatter vannets kretsløp lokalt i urbane områder og hvordan de hydrologiske prosessene endres i takt med utbygging av et område.

Urbanhydrologien er karakterisert ved at store andeler tette flater som takflater, asfalt eller betong fører til at en større del av nedbøren går til avrenning som igjen fører til raskere og større flomtopper. Denne effekten er illustrert i Figur 3-2. I dag blir nye LOD-metoder som grønne tak og regnbed tatt i bruk for å reversere endringene i avrenning skapt av urbaniseringen av et område. (Ødegaard 2012)



Figur 3-2 Effekten på avrenningsintensitet som følge av urbanisering (Helge Skaaraas et. al. 2015)

## 3.2 Nedbør og nedbørsdata

Når man skal dimensjonere infrastruktur for overvannshåndtering er nedbørintensitet, varighet, frekvens og areal på nedbørfeltet dimensjonerende kriterier. Av disse er nedbørintensiteten den faktoren som i størst grad bidrar til flomtopper. Regn med høy intensitet kan gi store flomproblemer til tross for kort varighet.

- **Intensitet** er et mål på nedbørmengden målt i et viss tidsrom (eks. mm/døgn, l/s ha).
- **Varighet** beskriver hvor lenge et regnfall med en bestemt intensitet varer.
- **Frekvens** beskriver hvor ofte et regn med en gitt intensitet forekommer innen en viss tidsperiode.
- **Arealfordeling** beskriver hvordan punktnedbør fordeler seg innen et gitt areal.

Generelt sett har vi 4 ulike nedbørstyper. Nedbørstypene blir kategorisert etter hvilke løftemekanisme som fører til avkjøling, kondens og regndannelse.

1. Orografisk nedbør:

Oppstår når en fuktig luftmasse beveger seg inn over et fjellområde. Fjellet trykker luften oppover hvor den blir avkjølt og fuktigheten i luften faller som regn.

2. Konvektiv nedbør:

Konvektiv nedbør dannes ved at lavtliggende luft varmes opp over et varmt underlag og stiger. Lengre opp blir luften avkjølt, fuktigheten i luften kondenserer og man får lokale skydannelser og regn. Lokale ettermiddagsbyger om sommeren er som oftest konvektiv nedbør.

3. Frontenedbør, kald front:

Frontnedbør oppstår når en kald luftfront møter en varm luftfront. Ved kaldfront vil en kald luftstrøm presse seg inn under en varm luftmasse. Kaldfronten dytter den varme luftmassen bort og opp, noe som fører til en rask nedkjøling av den varme luften og man får korte og intensive regnbyger.

Frontenedbør, varmfront:

Ved varmfront er det varm luft som kommer inn og møter et område med kald luft. Den varme luften er lettere, og vil sakte presse seg opp og over den kalde fronten. Luften vil sakte bli avkjølt og man får et langvarig regn med lav intensitet.

4. Konvergensnedbør:

Oppstår ved at to fuktige luftstrømmer trenges sammen i lavere luftlag og presser hverandre oppover. Luften avkjøles høyere opp og fuktigheten i luften kondenserer og faller som nedbør.

(Ødegaard 2012)

### 3.2.1 Nedbør og overflateavrenning

Vannbalansen beskriver forholdet mellom nedbør, evapotranspirasjon, avrenning og magasinering i vannets kretsløp for en gitt tidsperiode.

Vannbalansen er i enklere form definert som (Ødegaard 2012):

$$N = Q + E + \Delta R \quad (1)$$

Hvor:

$N$  = Nedbør

$Q$  = Avrenning

$E$  = Evapotranspirasjon

$\Delta R$  = endring i vannmagasin

Formelen ovenfor er en stor forenkling av virkeligheten. En del av nedbøren som faller på overflater vil fordampe, infiltrere eller magasineres i groper i overflaten. Det vannet som blir igjen vil renne av som overflateavrenning. For å finne mer nøyaktige verdier for overflateavrenning kan man da bruke en mer komplett vannbalanse (Ødegaard 2012):

$$Q = N - E - Int. - Inf. - G - X \quad (2)$$

hvor:

$Int.$  = Intersepsjon

$Inf.$  = Infiltrasjon

$G$  = Gropmagasinering

$X$  = Andre tap

For å enkelt finne sammenhengen mellom nedbør og avrenning for tettbebygde strøk kan man benytte seg av nedbørdata i form av IVF-kurver og den rasjonelle formel.

$$Q = \varphi * i * A * kf \quad (3)$$

Hvor:

$Q$  = dimensjonerende vannføring (l/s)

$\varphi$  = avrenningskoeffisienten.

$i$  = nedbørintensitet (l/s\*ha)

$A$  = areal av nedbørfeltet i (ha.)

$kf$  = klimafaktor. (Varierer med sted, men generelt for Norge  $Kf \approx 1.38$  (I. Hanssen-Bauer et al. 2015))

Den rasjonelle formel er en enkel og rask metode for å beregning av overvann og har i stor grad blitt benyttet for dimensjonering av overvannsystemer. Metoden har dog visse forutsetninger og begrensninger (Kristiansand Kommune 2014):

- Benytter gjennomsnittintensitet.
- Nedbøren er konstant over tid og fordelt jevnt utover hele feltet.
- Dimensjonerende vannføring forekommer når hele feltet bidrar til avrenning.
- Nedbørvarigheten ( $t_r$ ) som er lik konsentrasjonstiden ( $t_k$ ) for nedbørfeltet gir dimensjonerende vannføring.
- Avrenningskoeffisienten er basert på et gjennomsnitt av hele feltet og er konstant under hele nedbørsvarigheten.
- Beregninger gjort med de rasjonelle formel er mindre nøyaktig dersom nedbørfeltet er større enn 20 ha<sup>1</sup>. Dette er derimot ingen absolutt grense, men mer som en veiledning for bruk. Andre forhold som feltets geometri bidrar også til begrenset bruk.

(Kristiansand Kommune 2014)

---

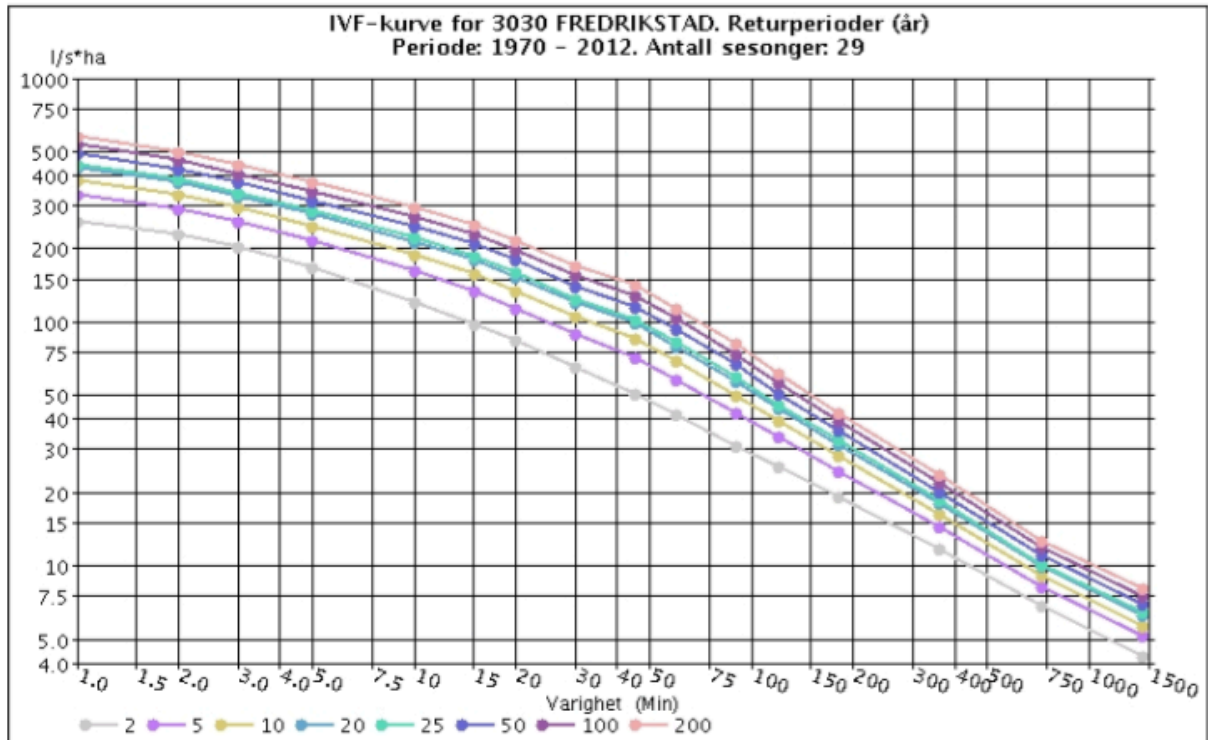
<sup>1</sup> Grensen på 20 ha er ikke et endelig mål, og kan variere fra. For eksempel har NVE i sine retningslinjer satt en grense på 50 ha.

### 3.2.2 Måling av nedbør

Nedbør måles ved beholdere som kan samle opp regn plasseres på bakken eller på stolper. Etter et regnfall kan man måle vannhøyden i beholderen eller helle vannet over i et måleglass. For å finne høyden på regnet, deler man volum vann samlet opp på oppsamlingsareal (tverrsnitt). Nedbørmålere kan i midlertidig gi store feilmålinger. Den største feilkilden ligger i at det dannes uregelmessige luftstrømmer rundt selve nedbørmåleren. Luftstrømmene vil kunne hindre regndråper å falle i målere. Dette kan forhindres ved å sette opp vegger rundt nedbørmåleren som beskytter mot vinden. Dersom man ønsker detaljerte nedbørsdata bruker man en pluviograf i stedet for en tradisjonell nedbørmåler. Pluviografen kan registrere nedbør automatisk og kan gi en detaljert fordeling av nedbør over korte perioder. Pluviografer bruker ”vippeprinsippet” for å måle nedbør. Måleren består av to vippekar, en underhengene magnet, og en sensor som logger antall vipp og sender resultatene via telenettet til en sentral datalagringsenhet, hvor tallene bearbeides. Når en gitt mengde vann har kommet inn i vippekar A vipper måleren over og vannet renner ut. Magneten passerer sensoren og vippet registrert. Man vet på forhånd mengden nedbør som må til for å få ett vipp og antall vipp i en tidsperiode vil bestemme nedbørsmengden i denne perioden. Pluviografer med fin oppløsning (1-5 min) er nødvendige for å analysere nedbørsmengder som kan være kritiske for overvannsavrenning. (Ødegaard 2012)

Dataene registrert fra nedbørmålerne bearbeides til fremstilling som IVF-kurver. IVF står for Intensitet, Varighet og Frekvens, og er statistiske sammendrag av tidligere nedbørshendelser. IVF-kurve for Fredrikstad er vist nedenfor i Figur 3-3.

Hver regnbygge omdannes til et kasseregner som igjen sorteres etter intensitet, varighet og frekvens. Et kasseregner er et konstruert regner og hvert kasseregner har en konstant intensitet for en gitt tid, f.eks. 75 l/s ha i 5 minutter, uavhengig av variasjoner i intensitet.



Figur 3-3 IVF-kurve for Fredrikstad, bilde hentet fra metrologiske institutt, (met.no)

IVF-kurven kan benyttes direkte i sammenheng med den rasjonelle formel ( 3 ) for beregning av maksimal vannføring ut av et nedbørfelt. Denne metoden baserer seg på Imhoffs sats som sier at maksimal vannføring ut av et nedbørfelt oppstår etter at hele nedbørfeltet bidrar til avrenning i feltets utløp, dvs. ved å bruke avrenningen som tas ut fra IVF-kurven ved feltets konsentrasjonstid ( 4 ).

$$t_k = t_t + t_s \quad (4)$$

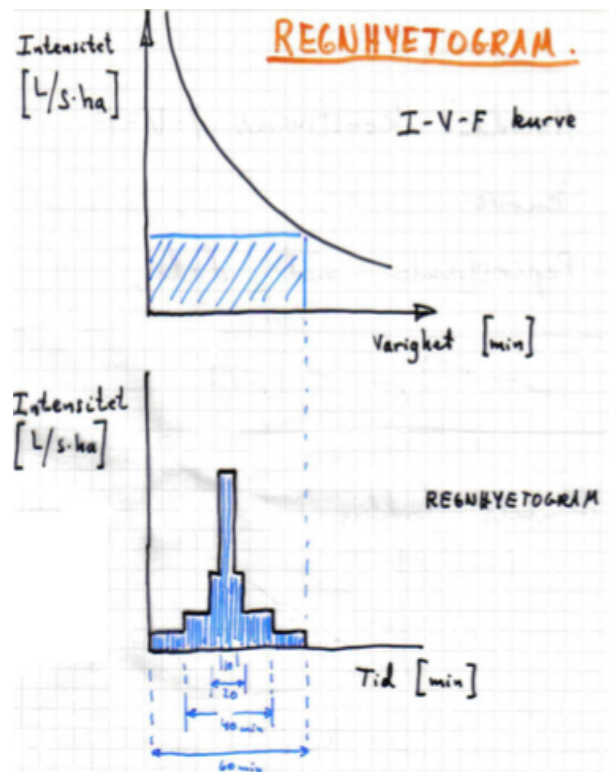
$t_k$  = konsentrasjonstid, total tid vann bruker fra ytterst i nedbørfelt til utløpet.

$t_t$  = tilrenningstid på overflaten, fra ytterst i nedbørfeltet til kanal/rør/sluk.

$t_s$  = strømningstiden i rør/kanal.

For å finne mengden vann som faller i et nedbørfelt lager man et kasseregn ut fra IVF-kurven, som vist i Figur 3-4. Ved å trekke en linje fra regnvarigheten på x-aksen til kurven med det gjentaksintervallet som skal undersøkes, for så å trekke en linje til intensiteten på y-aksen får man et kasseregn. Dette har konstant intensitet fra regnstart til regnslutt. I virkeligheten har regn ofte en varierende intensitet, og en kort men høy toppintensitet. Det er derfor vanlig at kasseregn omdannes til et symmetrisk hyetogram for bedre å beskrive virkeligheten, og til videre databruk i f.eks. modeller.

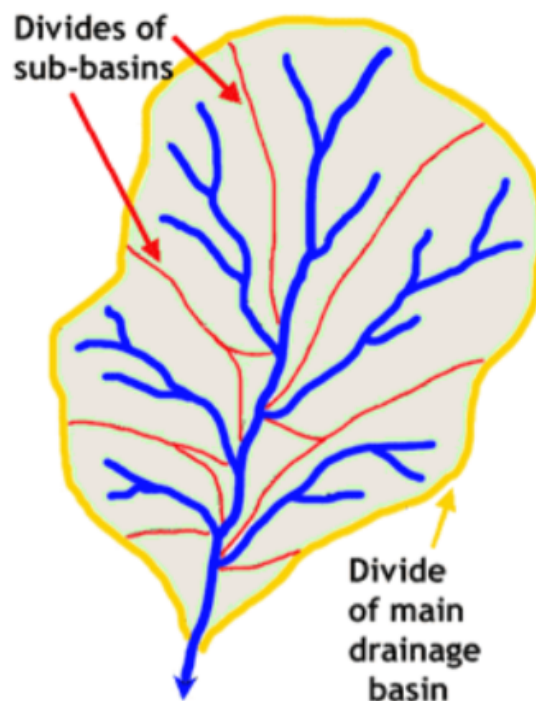
(Lindholm 2014)



Figur 3-4 Kasseregn og omdanning til symmetrisk hyetogram (Lindholm 2014)

### 3.2.3 Nedbørfelt og vannskille

Et nedbørfelt er et hydrogeografisk avgrenset område hvor alt vann som akkumuleres og renner av på overflaten ender opp i et gitt punkt eller en resipient. Nedbørfeltets størrelse vil være knyttet til resipienten det sees på. Eksempelvis vil områdene i og rundt Veumdalen være nedbørfeltet for Veumbekken, men områdene inngår også i nedbørfeltet til Glomma, da vann fra Veumbekken ender opp i Glomma før utløpet til havet. For å definere et nedbørfelt brukes det vannskille. Vannskiller er høydedragene i terrenget som fungerer som skiller mellom ulike nedbørfelt. I Figur 3-5 ser man hvordan høydedrag skaper et skille for hvilke områder som bidrar med avrenning til resipient. Avgrensningen av de rød linjene viser delfelt som hovedsakelig bidrar til sidebekkene, mens avgrensningen av gul linje viser hele feltet som bidrar til vannføring ved utløpet (blå pil).



Figur 3-5 Vannskiller for hovedfelt og delfelt – bilde hentet fra wikipedia, <https://no.wikipedia.org/wiki/Nedbørfelt>

For nøyaktige beregninger av vannføring i ut av et nedbørfelt kreves i tillegg til nedbørmålinger informasjon om de fysiske egenskapene som påvirker avrenningen i nedbørfeltet. Dette omfatter:

- Feltenes permeabilitet.
- Infiltrasjonskapasitet.
- Avstand ned til grunnvann og grunnvannsforhold.
- Type og andel vegetasjon.
- Fallgradient på nedbørfeltet.
- Groper i terrenget som fungerer som magasin (gropmagasinering).



### 3.3 SWMM

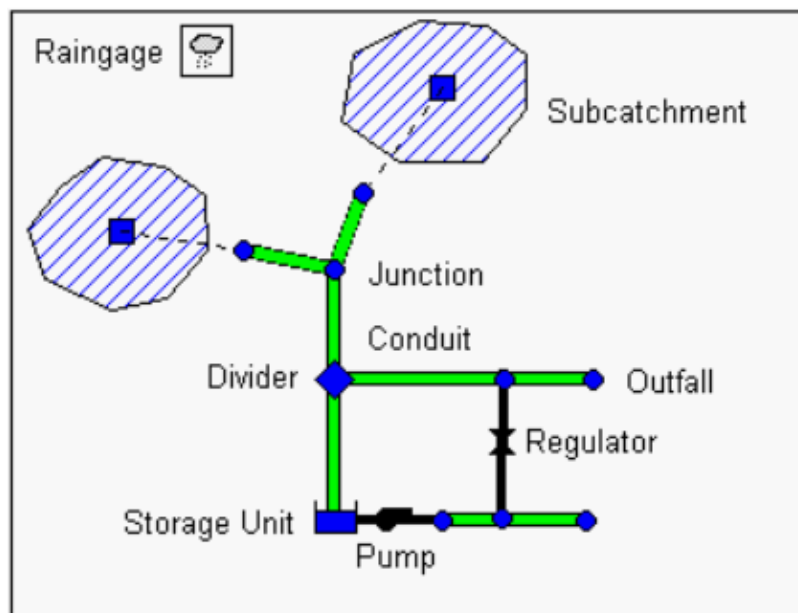
SWMM står for Storm Water Management Modell. Det er et program utviklet i USA av US EPA (United States Environmental Protection Agency) og brukes blant annet til å modellere og analysere avløps- og overvannssystemer. Programmet er gratis og kan lastes ned fra EPA sine hjemmesider.

Dette delkapittelet er ment å gi leseren et innblikk i hvordan fysiske elementer kan defineres i SWMM og hvordan programmet bruker matematiske metoder for å beskrive virkelige prosesser. Det vil også gi leseren et grunnlag for å forstå hvilke data som må tilegnes og settes inn i modellen for at programmet skal kunne gjøre simuleringer og generere resultater.

#### 3.3.1 Modelloppbygning SWMM

SWMM er et dynamisk nedbør-avrenning modelleringsprogram, og kan brukes til å simulere endringer i både vannkvalitet og vannkvantitet. Avrenningen i SWMM genereres av nedbørfelt som tilegnes en nedbørmåler. En nedbør-avrenningsmodell i SWMM består prinsipielt av:

1. Nedbørmåler, som beskriver regnets varighet og intensitet.
2. Nedbørfelt, som gir grunnlag for overflateavrenning
3. Transportsystem, ledninger, knutepunkt, mm som beskriver strømmingen gjennom modellen.



Figur 3-6 Oversikt over de fysiske elementene i SWMM. (Rossman 2010)

### 3.3.2 Nedbørmåler

For å generere avrenning i SWMM trengs en nedbørmåler. Nedbørmåleren kan kobles opp mot forskjellige nedbørfelt og leverer vann i form av nedbør til nedbørfeltene. Nedbørsdataene tilegnes til nedbørmåleren ved brukerdefinerte tidsserier eller fra en ekstern fil.

Hovedsakelig består inngangsparameterne for nedbørmåleren av:

- Nedbørsdata (intensitet, volum, eller kumulativt volum)
- Intervall for registrering (eks. 1 time, 15-min, osv.)
- Kilden til nedbørsdataene (tidsserie eller ekstern fil)
- Navn på nedbørskilden

(Rossman 2010)

Property	Value
Name	Nedbør
X-Coordinate	762.712
Y-Coordinate	51474.576
Description	
Tag	
Rain Format	INTENSITY
Time Interval	0:01
Snow Catch Factor	1.0
Data Source	TIMESERIES
TIME SERIES:	
- Series Name	N14.08.2008-300
DATA FILE:	
- File Name	*
- Station ID	*
- Rain Units	MM

Figur 3-7 Inngangsparameterne for nedbørmåler. Utklipp fra SWMM.

### 3.3.3 Nedbørfelt

Nedbørfelt er hydrologiske landenheter som med sin topografi og dreneringsegenskaper gir overflateavrenning til ett gitt utløpspunkt. Som følge av store variasjoner i egenskaper for større nedbørfelt må brukeren dele større områder inn i mange mindre nedbørfelt.

Eksempelvis må et område bestående av både skog, fjell og urbane områder deles inn i minst 3 nedbørfelt som representerer de 3 delområdene. Utløpspunktene til nedbørfeltene kan enten være noder eller andre nedbørfelt.

Nedbørfeltene kan deles inn i permeable og ikke permeable delområder, hvor overflateavrenning kan infiltrere gjennom den øvre markvannsonen i de permeable områdene, men ikke gjennom de impermeable områdene. De impermeable områdene deles inn i to delområder, enten med gropmagasinerings eller uten.

Infiltrasjon i de permeable delene av nedbørfeltet kan bli beskrevet med tre forskjellige metoder:

- Horton infiltrasjon (Se avsnitt 3.3.4)
- Green-Ampt infiltrasjon
- Curve Number infiltrasjon

Hovedsakelig består inngangsparametere tilknyttet nedbørfeltet av:

- Representativ nedbørmåler
- Utløpsnode eller nedbørfelt
- Impermeabilitet (permeabiliteten blir da: 100 - impermeabilitet [%])
- Fallgradient
- Karakteristisk bredde på overflateavrenningen
- Mannings n for overflateavrenning, både for permeable og impermeable flater i feltet.
- Dybde for gropmagasinering, både for permeable og impermeable flater i feltet.
- Prosentdel av de impermeable flatene som ikke har gropmagasinering.

(Rossman 2010)

Property	Value
Name	SB8
X-Coordinate	14106.411
Y-Coordinate	-11141.637
Description	
Tag	
Rain Gage	Nedbør
Outlet	BD3
Area	12.3
Width	440
% Slope	17.8
% Imperv	55
N-Imperv	0.012
N-Perv	0.13
Dstore-Imperv	1.3
Dstore-Perv	5.1
%Zero-Imperv	0
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration	HORTON
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0

Figur 3-8 Inngangsparametere for nedbørfelt. Utklipp fra SWMM.

### 3.3.4 Infiltrasjon og Hortons likning

Infiltrasjon er begrepet som beskriver prosessen der vann trenger igjennom de øverste lagene i overflaten og videre ned i gjennom grunnen. Modellen i oppgaven er satt opp til å bruke Hortons liknings for å beregne infiltrasjon (Rossman 2010):

$$f(t) = (f_0 - f_c)e^{-kt} + f_c \quad (5)$$

$f(t)$  = Feltets infiltrasjonsskapasitet etter en gitt tid med regnvær. [mm/min]

$f_0$  = Infiltrasjonsskapasitet før regnvær starter. [mm/min]

$f_c$  = minimum infiltrasjonsskapasitet for feltet [mm/min]

$k$  = infiltrasjonskonstant [ $\text{min}^{-1}$ ]

$t$  = tiden etter start av regnvær [min]

I SWMM blir infiltrasjonsskapasitet beregnet for hvert enkelt nedbørfelt og brukeren må selv legge inn verdier for maksimum og minimum infiltrasjonsrate, infiltrasjonskonstant og tørketid i dager.

(Rossman 2010)

### 3.3.5 Noder

#### 3.3.5.1 Knutepunkter (junction nodes)

Knutepunkt er modellenheten som forbinder ledninger. De kan representere kummer, ledningsskjøter, sammenløpet av to bekker eller brukes for å stykke opp lange ledningstrekk for å få riktig verdier for fall og ruhet. Eksterne vannmengder (f.eks. avrenning fra nedbørfelt) kommer inn i systemet via knutepunktene. Overskuddsvann i knutepunktene kan bli trykksatt dersom de tilkoblede ledningene overbelastes. Dette medfører enten at vann forlater systemet eller at det stuver opp over knutepunktet og renner inn igjen når det igjen blir ledig kapasitet.

Property	Value
Name	N3
X-Coordinate	2984.330
Y-Coordinate	-18293.746
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	0.681
Max. Depth	0
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0

Figur 3-9 Inngangsparametere for knutepunkt. Utklipp fra SWMM.

Hovedsakelig består inngangsparameterne for knutepunkt av:

- Invert elevation – høyden fra referansenivå til knutepunktets bunnivå.
- Høyde til bakkenivå
- Oppstuvningsareal ved overskridelse av kapasitet (valgfritt)

(Rossman 2010)

### 3.3.5.2 Utløpsnoder (outfall nodes)

Utløpsnoder blir brukt som systemets utløp og er den siste nedstrøms grensen ved dynamisk bølge-ruting. For andre strømmingstyper kan utløpsnodene fungere som et knutepunkt. I alle tilfeller kan kun en ledning kobles til en utløpsnode. Grensetilstandene ved et utløp kan

beskrives ved:

- Dybden av normalstrømmingen/den kritiske strømmingen i den tilkoblede ledningen.
- Et gitt vannivå.
- Tidevannsnivå beskrevet i tabell over variasjon av tidevannshøyder og tid.
- Brukerdefinerte tidsserier over variasjoner i vannivå og tid.

Hovedsakelig består inngangsparameterne for utløpsnoder av:

- Bunnhøyde over referansenivå.
- Type grensetilstand.
- Om utløpet inneholder en fallport for å hindre tilbakestrømning gjennom noden.

(Rossman 2010)

Property	Value
Name	UtløpVestreelva
X-Coordinate	6185.542
Y-Coordinate	-45474.345
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	-1.15
Tide Gate	NO
Type	FREE
<b>Fixed Outfall</b>	
Fixed Stage	2.1
<b>Tidal Outfall</b>	
Curve Name	*
<b>Time Series Outfall</b>	
Series Name	*

Figur 3-10 Utløpsnode med valgt grensetilstand for fritt utløp. (Ved endring fra type FREE til fixed vil utløpet oppføre seg som om det står 2,1 m under vann). Utklipp fra SWMM.

### 3.3.5.3 Fordelingsnoder (Flow divider nodes)

Vannfordelingsnoder brukes i tilfeller der man ønsker å fordele vann fra en innkommende ledning til to ledninger. Fordelingsnodene kan kun brukes ved kinematisk bølge ruting, og vil oppføre seg som et vanlig knutepunkt ved bruk av dynamisk bølge. Man kan fortsatt benytte seg av fordelingsnoder ved bruk av dynamisk bølge, men fordelingen av vannet blir styrt av trykkforhold i systemet og ikke direkte av innstillingene. Dersom fordelingsnoden er tilkoblet to ledninger, ledning 1 og 2, vil all vannføring i utgangspunktet gå til ledning 1, mens man gir et kriterium for hvor mye av vannføringen som skal avledes til ledning 2. Man kan velge mellom 4 typer fordelingsnoder avhengig av hvordan man vil fordele vannmengdene:

- Cutoff divider: All vannføring over en gitt brukergrense vil fordeles til ledning 2.
- Overflow divider: Fordeler all vannføring som overskrider kapasiteten til ledning 1.
- Tabular divider: Benytter en brukerdefinert tabell som uttrykker avledet vannføring til ledning 2 som en funksjon av total vannføring inn i noden.
- Weir divider: Benytter en demning til å fordele vannet. Den vannmengden som går over demningen blir ledet til ledning 2.

(Rossman 2010)

Property	Value
Name	OL1(3+03)
X-Coordinate	4161.392
Y-Coordinate	-5253.165
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	2.53
Max. Depth	2
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	0
Diverted Link	C139
Type	CUTOFF
<b>Cutoff Divider</b>	
Cutoff Flow	50
<b>Tabular Divider</b>	
Curve Name	*
<b>Weir Divider</b>	
Min. Flow	0
Max. Depth	0
Coefficient	0

Figur 3-11 Fordelingsnode med CUTOFF funksjon. Ved kinematisk bølge-ruting vil vann opp til 50 l/s kun gå til link C139. Utklipp fra SWMM.

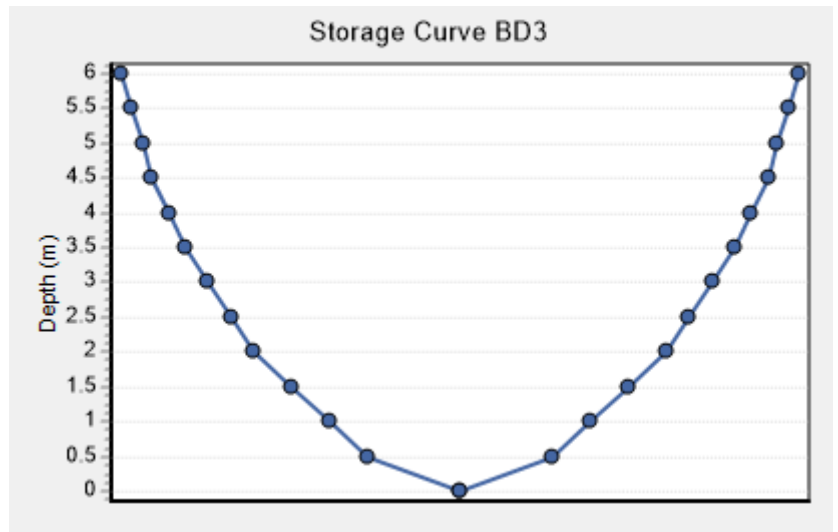
### 3.3.5.4 Lagringsenheter (Storage units)

For å beskrive lagringen av vannmasser bruker SWMM lagringsnoder. Disse kan representere alt fra et sandfang til større vann og innsjøer. De volumetriske egenskapene til lagringsenhetene blir beskrevet av brukeren i form av en funksjon eller tabell som gir overflateareal og høyde.

Hovedsakelig består inngangsparameterne for lagringsenheten av:

- Høyde over referansenivå
- Maksimal dybde
- Dybde-overflateareal data
- Evaporasjonspotensial
- Oppstuvningsareal ved flom (valgfritt)
- Ekstern tilføring av innløpsdata (valgfritt)

(Rossman 2010)



Figur 3-12 Lagringskurven til den nederste Bjørndalsdammen. Utklipp fra SWMM.

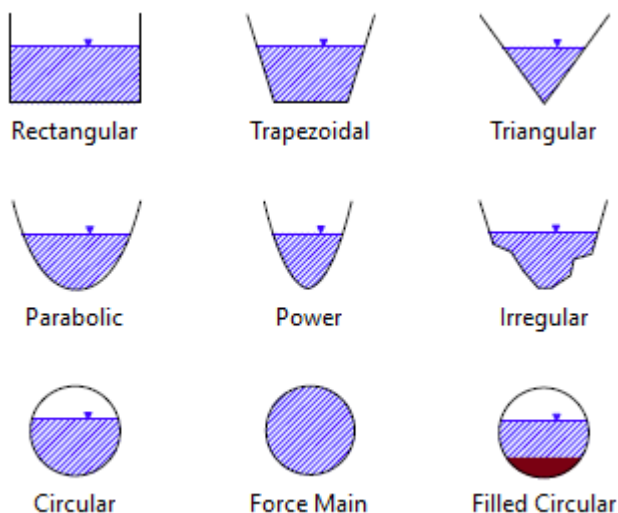
### 3.3.6 Transportsystem (conduits)

Transportsystemet i SWMM består av rør eller åpne kanaler. Disse frakter vannmasser gjennom modellen og må alltid være avgrenset av to noder.

Når man har tegnet opp en ledning i SWMM kan man blant annet velge lengde, ruhet og tverrsnittet på denne. Det finnes mange ferdiglagde former med ulike egenskaper inne i programmet, som f.eks. rektangulær kanal, parabolisk kanal, sirkulært rør og fylt sirkulært rør.

I modellen er det benyttet sirkulære rør, parabolisk kanal og irregulær kanal som lar brukeren lage et egendefinert kanaltverrsnitt med mulighet for ulik ruhet for ulike deler av tverrsnittet.

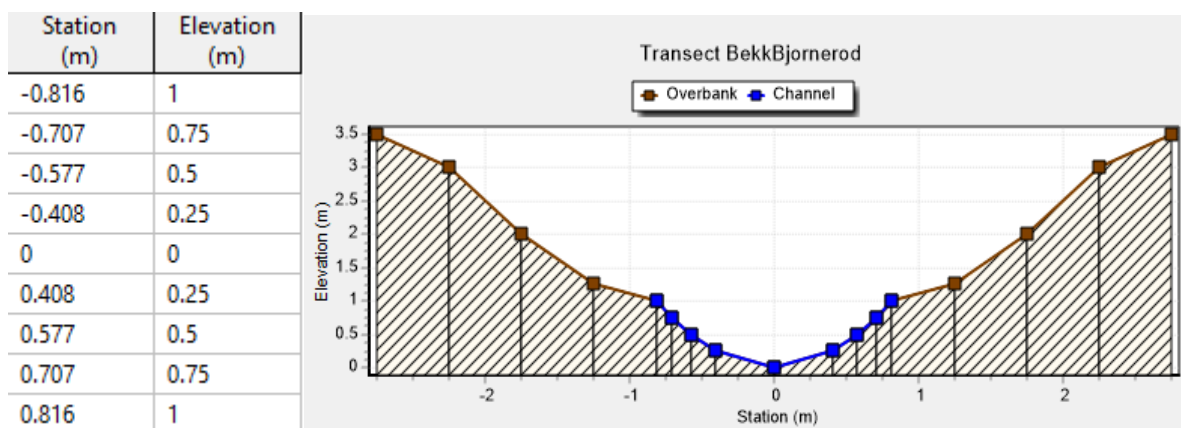
Se Figur 3-13.



Figur 3-13 - Utdrag av ulike tverrsnitt en kan velge for rør/kanal i SWMM. Utklipp fra SWMM.

For sirkulære rør trenger brukeren kun å fylle inn maksimum dybde(diameter) for røret. Ved bruk av parabolisk kanal angir brukeren en maksimal dybde for kanalen i tillegg til en maksimal bredde for toppen av kanalen. SWMM benytter disse verdiene og lager et tverrsnitt utformet som en parabol. (Rossman 2010)

Ved bruk av irregulær kanal kan brukeren ved hjelp av ”transect editor” bestemme utformingen av kanalen. For å bestemme tverrsnittet av en irregulær kanal fyller brukeren inn verdier for dybde med korresponderende lengdeverdier for avstand fra midten av kanalen, et eksempel på dette er vist i Figur 3-14.



Figur 3-14 – Høyde og breddeverdier angitt i tabell og utforming av bekketverrsnitt. Utklipp fra SWMM.



Ved å bruke irregulær kanal får man også muligheten til å velge deler av tverrsnittet som elvebredder, og elvebreddene kan tilegnes en egen Mannings ruhetskoeffisient. For å fortelle programmet at deler av tverrsnittet skal defineres som elvebredder velger man en stasjon (punkt i tverrsnittet) for venstre side og en fra høyreside. De delene av tverrsnittet som ligger utenfor disse verdiene vil nå defineres som elvebredder, og vil kunne tilegnes en annen ruhet enn selve kanalen/bekkeløpet. Man kan velge å forhåndsvisse tverrsnittet basert på verdiene man har innført, en slik forhåndsvisning er vist i Figur 3-14.

(Rossman 2010)

Property	Value
<b>Roughness:</b>	
Left Bank	0.06
Right Bank	0.06
Channel	0.04
<b>Bank Stations:</b>	
Left	-0.816
Right	0.816
<b>Modifiers:</b>	
Stations	0.0
Elevations	0.0
Meander	0.0

Figur 3-15 Valg av elvebredder og dens n-verdi. (Under «modifiers» kan man gi SWMM muligheten til å skalere tverrsnittet). Utklipp fra SWMM.

### 3.3.7 Strømningsberegninger i SWMM

Strømningsberegningene i SWMM er styrt av funksjoner for bevaring av masse og moment for et varierende strømningsmønster. SWMM bruker St. Venants likninger for å gjøre beregningene og man kan velge mellom 3 ulike metoder basert på i hvilken grad man forenkler St. Venants likning. I SWMM har man derfor valget mellom:

1. Steady flow (Stasjonær strømming)
2. Kinematic wave (Kinematisk bølge)
3. Dynamic wave (Dynamisk bølge)

(Rossman 2010)

Kontinuitetslikning:

$$\frac{\partial(Vy)}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Momentlikning:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (7)$$

V = Vannhastighet

t = tid

x = rørlengde

g = gravitasjonskonstant

y = vanndybde

S<sub>0</sub> = bunnhelning

S<sub>f</sub> = energihelning

- 1) Stasjonær strømming er den mest forenklete metoden for strømningsberegninger. Den tar utgangspunkt i at all strømming er stasjonær og uniform for hvert beregningssteg. Likningen beregner strømningsmønsteret ut av en ledning kun basert på vannmengdene som går inn i ledningen og tar ikke hensyn til forsinkelser eller formendringer.

- 2) Kinematisk bølge løser kontinuitetslikningen og en forenklet versjon av momentlikningen for hver ledning. Metoden baserer seg på at gradienten til vannspeilet i ledningen hele tiden er lik fallgradienten på samme ledning, og tar på denne måten ikke med endringer i energihøyden. Dette gir en maksimal volumstrøm gjennom ledningen tilsvarende normalstrømningen ved fullt tverrsnitt. All innstrømning som overgår denne verdien vil enten forsvinne fra modellen, eller stuve opp over knutepunktet dersom oppstuvning tillates i modellen.
- 3) Ved bruk av beregninger for dynamisk bølge bruker modellen både kontinuitetslikningen og den fulle momentlikningen for å beregne strømmingen i ledninger. Dette er teoretisk sett den mest nøyaktige metoden å gjøre strømningsberegninger på.
- Metoden tar høyde for endringer i energilinjen. Det er derfor ved bruk av denne metoden mulig å beregne trykksatt volumfluks når en lukket ledning fylles opp. Dynamisk bølge metoden tar også høyde for lagring av vann i ledninger, oppstuvning, tap ved innløp/utløp og reversert strømning.

Alle de tre metodene for strømningsberegning nevnt ovenfor bruker Mannings formel for beregninger av volumfluks relativt til vannspeil og friksjonsgradient.

(Rossman 2010)

Mannings formel uttrykker forholdet mellom volumfluks, tverrsnittsareal, hydraulisk radius og hydraulisk gradient.

$$Q = A * M * R^{2/3} * S^{1/2} \quad (8)$$

$Q$  = Volumfluks [ $m^3/s$ ]

$A$  = Tverrsnittsareal [ $m^2$ ]

$M$  = mannings tall [ $m^{1/3}/s$ ]

$R$  = hydraulisk radius [ $m$ ]

○  $R = A/P$

○  $P$  = våt periferi. Dvs. Omkretsen av den delen av kanalen/rørets tverrsnitt som er dekket med vann.

$S$  = hydraulisk gradient [ $m/m$ ]

For trykksatte rør brukes enten Hazen-Williams eller Darcy-Weisbachs formel i stedet for Mannings formel. I modellen er det brukt Darcy-Weisbachs formel:

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{f}} AR^{1/2} S^{1/2} \quad (9)$$

hvor:

f = Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor.

Formelen kan skrives om for å gi et uttrykk for friksjonstap ved å innføre  $I = h_f/L$  gir dette:

$$h_f = \frac{L}{A^2 M^2 R^{4/3}} Q^2 \quad (10)$$

L = Lengde av kanal/rør.

$h_f$  = friksjonstap over lengden L.

### 3.3.8 Oversvømmelse av knutepunkter

«Flooding» er hendelsen der transportsystemets kapasitet overskrides og vannstanden overgår knutepunktens høyeste angitte verdi. Dette medfører at vann forsvinner ut av transportsystemet og kan i en situasjon med et bekketversnitt sammenlignes med at vannet går over bekkens bredder. SWMM har 3 ulike måter å behandle dette.

1. Dersom man ønsker at vann som går over de gitte høydene for bekketversnittet skal forsvinne fra modellen, velger man å ikke tillate ”ponding”(oppstuvning) i programinnstillingene. Dersom man velger ”allow ponding”, men ikke tilegner nodene et ponding area, vil alt vann som stuver opp over nodenes maksimale høyde også forsvinne fra modellen.
2. I noen situasjoner renner vann ut av transportsystemet men lagres i groper og dammer på overflaten, før det igjen renner inn i systemet. For å simulere dette i SWMM velger man å tillate oppstuvning i programinnstillingene og angir et grunnareal for gropen/dammen som vannet lagres i. SWMM vil automatisk bestemme geometrien på dette arealet, brukeren har dermed ingen mulighet til å sette inn verdier for beskrive

arealet for oppstuvning. Høyden på oppstuvningen blir automatisk generert ut i fra arealet som er valgt, samt hvor mye vann som stuver opp. Ved denne innstillingen vil alt vann som stuver opp på overflaten av en node bli midlertidig lagret for så å renne tilbake i samme node når det er ledig kapasitet.

3. En tredje mulighet er å tilegne noden en høydeverdi for surcharge depth. Denne verdien representerer hvor mye overtrykk som kan oppstå før vann flyter ut av noden og er tiltenkt kummer med fast lukk, eller noder plassert i der det går et lukket rør.

(Rossman 2010)

### 3.3.9 Kontinuitetsfeil

Når man har kjørt en simulering i SWMM vil man få opp et vindu som viser prosentvis feil i kontinuitet for overflateavrenning og vannføring i transportnett. Feilene representerer den prosentvise forskjellen mellom vannmengdene lagret i modellen ved start av simuleringen + den totale mengden vann som går inn i modellen, og vannmengdene lagret i modellen ved slutten av simuleringen + den totale vannmengden som renner ut av modellen, for hele avrenningssystemet. Dersom disse prosentfeilene overstiger et fornuftig nivå som f.eks. 10 prosent, må det settet spørsmål til validiteten til analyseresultatene. De mest vanlige feilene som fører til høye kontinuitetsfeil er at man enten har for lange tidsintervaller eller at man har for korte ledninger i modellen. For å sjekke om sistnevnte er tilfelle har SWMM en funksjon som heter ”conduit lengthning” der programmet vil automatisk vil forlenge de ledningene som skaper store kontinuitetsfeil. (Rossman 2010)

### 3.3.10 Fremstilling av resultater i SWMM

Man har flere forskjellige måter å fremstille modellresultater på i SWMM. Disse metodene samlet gir brukeren et godt grunnlag for å analysere modellen.

Sammendragsrapport:

Ved å velge funksjonen ”summary report”, oversatt til sammendragsrapport, vil man få en oversiktlig tabell over ulike modellverdier innsatt og generert i modellen.

Sammendragsrapporten gir blant annet en oversikt over maksimalverdier, kritiske tidspunkt i simuleringen og summerte verdier som total mengde vann som har strømmet inn/ut av et knutepunkt. Verdiene kan sorteres og dette gir mulighet å f.eks. analysere hvilke steder man har størst vannføring eller trykk.

Statusrapport:

Ved å velge å se modellens statusrapport vil man blant annet få opp informasjon om simuleringsalternativene brukt, viste liste over eventuelle feil ved simulering og vil oppgi massekontinuitetsfeil for avrenning og vannføring.

Grafisk fremstilling:

For å få grafiske fremstillinger av resultatene kan man benytte seg av funksjonene for å lage lengdeprofil eller grafer, man kan også se modellresultater direkte i kartet.

For å analysere vannstand og trykkehøyder over bestemte ledningstrekk kan man ta ut lengdeprofil. Dette gir et utsnitt av det valgte strekket og man kan kjøre simulering som viser endringer i vannstand og trykkehøyde over tid. Det er også mulig å ta ut grafer for forskjellige modellverdier som blant annet kan brukes til å se vannføring over tid.

## 3.4 Modellvalidering

Modell-kalibrering, verifisering og validering er alle begreper som samlet går ut på å korrigere modellen for å få resultater som best mulig korrelerer med virkeligheten. Dette kan være korrigerende av selve modellprogrammet og prinsippene dette baserer seg på, justering av fysiske parametere i modellen og generell av feilretting.

Simuleringsmodeller er i beste fall et bilde av virkeligheten, og man vil aldri kunne lage en modell som stemmer 100% med observasjoner. Men for å få en modell som er mest mulig riktig og for å bevise at en modell samsvarer med virkelige observasjoner, bør modellen bli verifisert og kalibrert i den grad at den gir pålitelige resultater for det den er ment for, først da kan modellen valideres.

Da verifisering, kalibrering og validering er generelle begreper som skal gjelde for et utvalg av forskjellige modeller, blir de for klarhet i denne oppgaven definert som:

- Verifisering: Skal besvare spørsmålet, ”Har vi bygget modellen riktig?” og går ut på å kvalitetssikre at selve modellen er bygget etter utviklerens forestilte beskrivelser og spesifikasjoner.
- Kalibrering: Går ut på å justere modellparametere for å få best mulig korrelasjon med observerte målinger.
- Validering: Er prosessen med å bestemme om en simuleringsmodell og dens tilegnede data er en nøyaktig representasjon av virkeligheten for situasjonene modellen er laget for. En validering av modellen krever derfor at modellen testes opp mot de hendelsene den er ment å simulere, og at modellresultatene samsvarer med virkelige målinger.

(Systems Engineering Guide 2016)





## 4 Analyse av opprinnelig modell

Oppgaven bygger på og viderefører arbeidet med Jamal Haqi sin avrenningsmodell for Veumbekken. Det gikk i fjor med mye tid til å bygge modellen og det ble mindre tid til å kvalitetssikre at modellen stemte. På grunn av dette gikk første del av oppgaven ut på å jobbe med å analysere og kvalitetssikre at den eksisterende modellen var bygget på riktig måte. Med anbefaling fra Jamal Haqi ble det tatt utgangspunkt i modellen med parametere innstilt for en høstsituasjon ved regnhendelse tilsvarende «monsterregnet» som oppstod i Fredrikstad i 2008. Et oversiktsbilde av modellen kan sees side 58 og 59.

### 4.1 Fremgangsmåte for analyse og endringer i modell

For å avdekke modellfeil er det blitt:

- Generert og analysert av lengdeprofiler og grafer.
- Gjennomgang av statusrapport.
- Gjennomgang av sammendragsrapport.
- Systematisk gjennomgang av ulike parametere som f.eks. permeabilitet, diametere og kotehøyder.

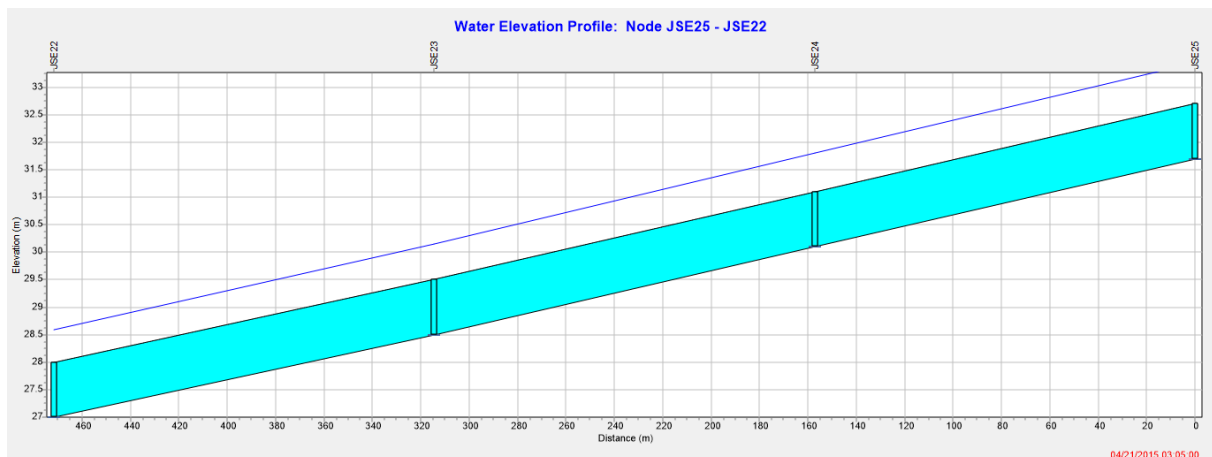
Under arbeidet ved analysering av modellen var hovedfokuset i første omgang å avdekke om det oppstod oppstuvning av vann noen steder i modellen, og dersom dette var tilfellet, hvordan modellen taklet dette. For å avdekke dette ble det brukt to metoder; generering av lengdeprofil og gjennomgang av statusrapport og sammendragsrapport.

Sammendragsrapporten ga en god oversikt over hvilke noder som i perioder var oversvømte, mens uttak av lengdeprofil ga en god grafisk fremstilling av dette.

Ved gjennomgang av statusrapporten i den originale modellen ble det funnet at ”internal outflow”, som tilsvarer vann som er tapt fra modellen, var på 2969 m<sup>3</sup>. Videre gjennomgang av sammendragsrapporten avdekket hvilke noder som var utsatt for oppstuvning. Det viste seg at mesteparten av vannet som forsvant kom fra et strekke i modellen som tilsvarte sidebekken som går fra Evenrød til Veum, heretter kalt ”Evenrødbekken”.

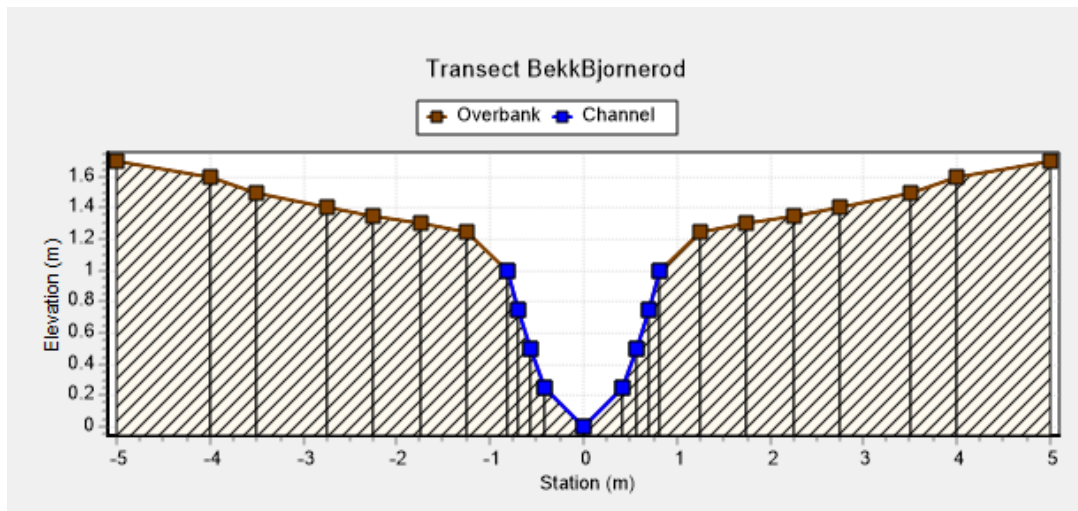
Av det totale vanntapet på 2969 m<sup>3</sup> forsvant 2608 m<sup>3</sup> ut av delen av modellen som tilsvarer Evenrødbekken. Det ble forsøkt ulike metoder for å fjerne dette vanntapet. Til å begynne med ble det gitt et oppstuvningsareal til knutepunktene som var utsatt for oppstuvning. Dette gav i midlertidig et feilaktig høyt trykk, som førte til større vannhastigheter over strekningen.

Lengdeprofil med trykklinje for en del av strekket er vist i Figur 4-1.



Figur 4-1 Lengdeprofil av midte del av "Evenrødbekken" når oppstuvning er tillat og med et oppstuvningsareal på 50m<sup>2</sup> for hver node. Blå linje viser trykkehøyden over bekken.

Å gi et oppstuvningsareal er det samme som å si at vann kan samle seg i dammer ovenfor knutepunktene til kapasiteten nedstrøms er stor nok til at dette vannet kan renne vekk. I virkeligheten vil bekkens bredder bli oversvømt men vannet vil fortsette å renne nedover over elvebreddene. For å simulere dette på best mulig måte ble det laget et nytt bekketverrsnitt for hele det strekket som tilsvarer Evenrødbekken. Det nye tverrsnittet ble laget ved bruk av "transect editor" som er beskrevet i avsnitt 3.3.6. Nytt tverrsnitt er vist i Figur 4-2. Her er mannings n satt til 0,04 for bekkeløpet og 0,06 for bekkebreddene.



Figur 4-2 Nytt tverrsnitt for Evenrødbekken, for å hindre at vann fyller tverrsnittet og forsvinner fra modellen. Vannhøyden må nå over høyeste punkt for elvebreddene før det nå forsvinner fra modellen.



Figur 4-3 Utklipp fra modellen. Området tilsvarende den midtre delen av Evenrødbekken. Tallene tilsvarende mengden vann som forsvinner ut av modellen i l/s ved tiden 2t 40 min etter simuleringsstart.

### 4.1.1 Andre justeringer

Under gjennomgangen av modellen ble det funnet andre feil knyttet til feilinnstilling av modellparametere. Dette var blant annet urealistiske verdier for areal på noen få nedbørfelt, rørdiameter og kotehøyder på ledning og punkter.

Statusrapporten gir blant annet en oversikt over de 5 nodene med høyest kontinuitetsfeil, vist ved Figur 4-4.

Node JS5(14+90) var satt opp med en vannhøyde på 2 m ved simuleringsstart. Fordi de tilkoblede ledningene og nodene ovenfor og nedenfor alle startet med 0 l/s og 0 meter vannsøyle, førte dette til at vann beveget seg oppstrøms opp til noden ovenfor ved start av simuleringen. Tilbakestrømning av vann i transportsystemet er kjent å skape kontinuitetsfeil i SWMM. Initial depth i ledningene tilknyttet node JS5(14+90) ble derfor satt til 0 m. Situasjonen var det den samme i JS10(33+80), og samme endring ble utført.

```
*****
Highest Continuity Errors
*****
Node JS5(14+90) (-209.39%)
Node JS10(33+80) (-195.57%)
Node JS11(36+20) (20.86%)
Node JS6(19+90) (16.90%)
Node JS7(20+10*2) (5.80%)
```

```
*****
Highest Continuity Errors
*****
Node JS10(33+80) (-195.82%)
Node JS11(36+20) (20.86%)
Node JS6(19+90) (12.87%)
Node JS7(20+10*2) (5.65%)
Node JS8(28+70) (3.55%)
```

*Figur 4-4 Oversikt over de 5 nodene med høyest kontinuitetsfeil.*

## 5 Utvidelse av modell

Et av målene med oppgaven var å se hvordan en åpning av kulverten ville påvirke forholdene i de nedre delene av Veumbekken. For hvilke forhold det var fare for oppstuvning i ledningsnett i områdene rundt Holmenkulverten, og ved hvilke hendelser det eventuelt ville oppstå problemer med oppstuvning ved kulvertinnløpet.

For å kunne se effekten av en åpning av Holmenkulverten måtte den eksisterende modellen utvides. Den opprinnelige modellen hadde 2 utløp ved Jernbanen der det ene utløpet simulerte Veumbekkens utløp til Holmenkulverten, det andre utløpet simulerte en fellesavløpsledning. Denne fellesledningen har overløp til Holmenkulverten litt lengre ned, og etter modellering av Holmenkulverten ble også overløp fra fellesavløpsledningen koblet til kulverten i modellen.

Utvidelsen av modellen omfattet modellering av Holmekulverten fra innløpet ved Fredrik II videregående skole og til Oslogata. Herfra er det både modellert en løsning med dagens eksisterende kulvert hele veien til utløpet i Vesterelva, og det er modellert en åpen kanal fra Oslogata til Vesterelva. Fordi det er lagt en overvannsledning fra Bjørndalsdammene til Oredalen som er en del av nedbørfeltet til Holmekulverten er dette også lagt inn i modellen. Mer om dette i avsnitt 5.1.

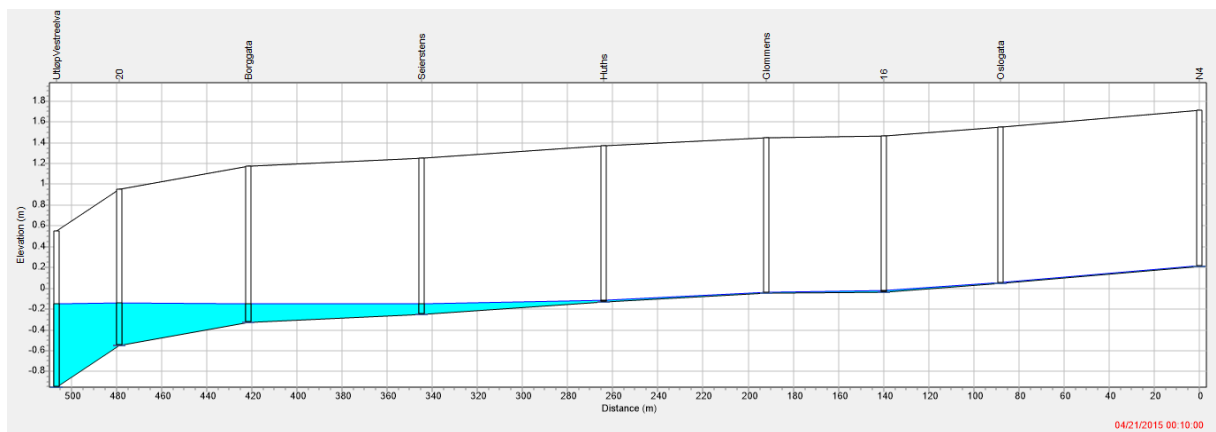
Det ble også sett på de delene av Fredrikstad sentrum som ville bidra med avrenning til kulvert/kanal nedenfor kulvertens innløp. Det ble i dette arbeidet avgrenset et nedbørfelt for Holmenkulverten ved utløpet i Seutelva. Ledningskartet til Fredrikstad kommune (hentet fra COWI) viste at det er også avløpsfellesledninger som går langs Holmegata og har overløp til kulverten. Disse ledningene har små dimensjoner og det har blitt antatt at bidraget fra disse fellesledningene ikke er stort nok til å påvirke resultatene i særlig grad. Dette området ble derfor ikke lagt inn i modellen.

Det er ikke funnet informasjon med eksakte dimensjoner på Holmenkulverten. I rapporten «Veumbekken – Hydrologisk vurdering» utført av E. Hesselberg står det at kulvertens dimensjon er 2,2 x 2,2 m. Mens det i Norconsults rapport «Vurdering av reguleringsplan for planlagt gjenåpning – Flo-og flomforhold» står: «*Det er ikke utført en fullstendig innmåling av dagens kulvert, og høyder og bredder på kulverten er basert på befaringsrapport og en*

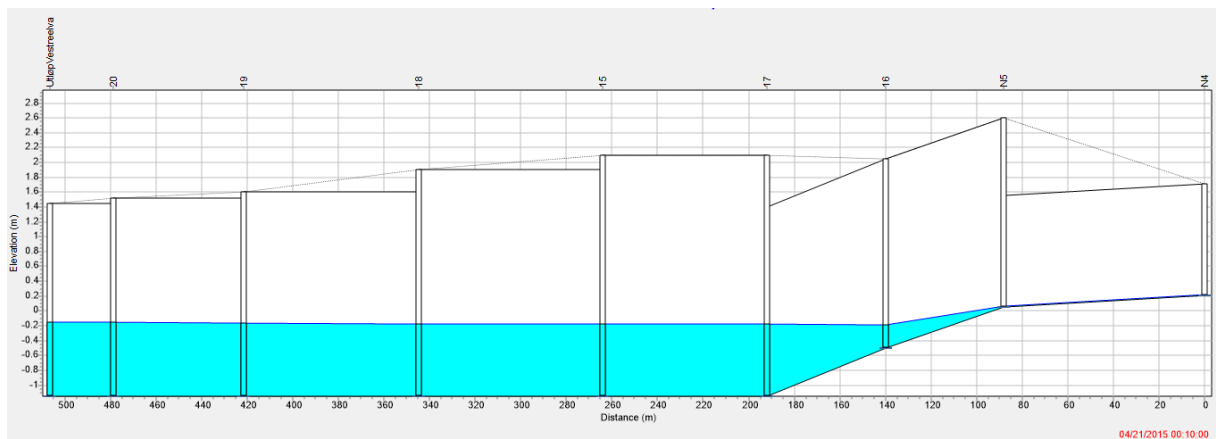
## Utvidelse av modell

3D-modell av kulverten utarbeidet ifb. andre prosjekter for Fredrikstad kommune i samme område.» Sistnevnte rapport ble lagt til grunne og kulvertens dimensjoner ble modellert med høydeverdier mellom 1,5 m og 2,2 m og med en fast bredde på 2,2 m.

I Figur 5-1 kan man se lengdeprofil av den nedre delen av eksisterende kulvert fra Oslogata og til utløpet i Vesterelva. Kulverten har utløp som ligger i høyde -0,95 m i forhold til NN1954, og har en høyde på 1,5 m langs hele denne strekningen. Fra kulvertens innløp og til like nedenfor Oslogata er høyden i kulverten satt til 2,2 m. Fordi det ikke finnes eksakte målinger av kulvertens dimensjoner må dette sees på som noe usikkert.



Figur 5-1 Viser de siste 500 m av Holmenkulverten med utløp til Vesterelva slik den ligger i dag.



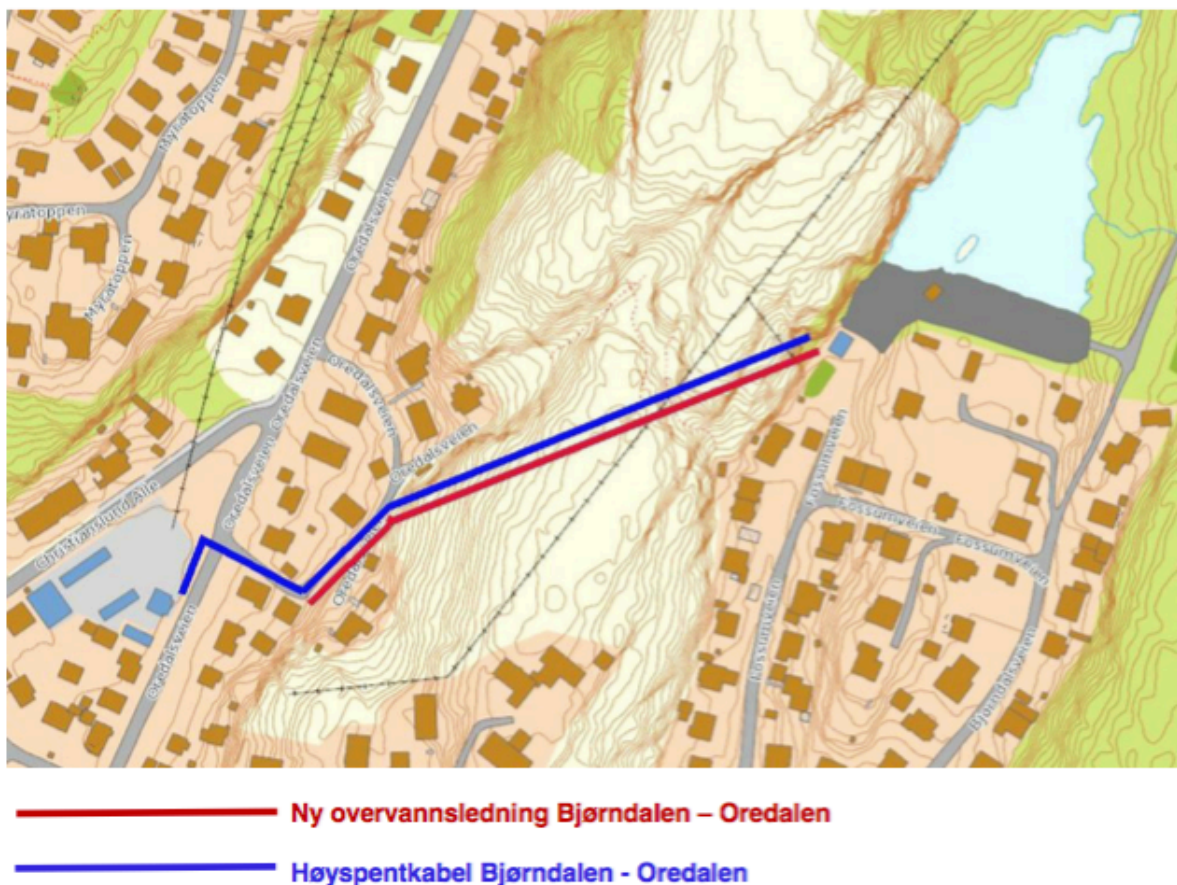
Figur 5-2 Viser den åpne delen av Holmenkulverten med utløp i Vesterelva ved dagens middelvannstand.

Figur 5-2 viser lengdeprofil av den modellerte kulvertåpningen. Ved denne utformingen vil det ved middelvann i havet (-15cm ved NN1954) stå 1 m vann i den nederste delen av kanalen, fra utløpet ved Vesterelva og opp til Glommens gate. Høyden i hver node tilsvarer terrenghøyde og nodene er plassert for å representere veikryss i Holmegata. Tverrsnittet er

kun ment for hydrauliske vurderinger og toppen av kanalen vil i virkeligheten ikke ha trappeformen slik figuren viser, men heller følge terreng høyden. Den åpne kanalen ble gitt et rektangulært tverrsnitt og ble testet for flere ulike bredder for å vurdere kapasiteten. Kanalens topp varierer med terrenget og kanaldybden varierer derfor mellom 2,6 m og 3,25 m.

## 5.1 Nytt nedbørfelt Bjørndalen

Fredrikstad kommune har siden utviklingen av den opprinnelige modellen lagt en ny overvannsledning med innløp sør for Bjørndalsdammene som går igjennom fjellet mellom Bjørndalen og Oredalen, som vist i Figur 5-3. Overvannet føres gjennom overvanns- og fellesledninger til Veumbekken. Oredalsområdet lå allerede inne som nedbørfelt i modellen, men det måtte grunnet den nye overvannsledningen avgrenses et nytt delfelt. Det nye delfeltet omfatter områdene rundt Bjørndalsdammene og strekker seg nordover til og med Høyfjell. Delfeltet er avgrenset med rød linje i kartet over hele nedbørfeltet vist i Figur A - 2 i vedlegg A.



Figur 5-3 Ny overvannsledning mellom Bjørndalen og Oredalen. Vannet blir videreført fra Oredalen til like overfor innløpet av Holmenkulverten i Veumbekken (Fredrikstad Kommune 2015)

Avgrensningen av det nye nedbørfeltet ble gjort i kombinert bruk av NVEs online karttjeneste NEVINA for autogenerering av nedbørfelt, og manuelle beregninger ved bruk av Fredrikstads kommunekart<sup>2</sup>. Kommunekartet inneholder laserskanninger som viser høydeverdier i oppløsning på 1x1m, noe ble benyttet til å finne vannskillen.

Det automatisk genererte nedbørfelt for Veumbekken ved kulvertinnløpet ble av NEVINA beregnet til å være på 1250 ha, mens feltarealet brukt til å lage modell(V1) tilsvarer 1233 ha. Forskjellen på ca. 17 ha kommer i hovedsak av et lite område som stikker ut like nordøst for Bjørndalsdammene. Området ble ikke regnet som et del av nedbørfeltet ved den manuelle avgrensningen gjort av Jamal Haqi. Denne delen er nå tatt med i nedbørfeltet til overvannsledningen fra Bjørndalsdammene.

Det nye delfeltet ble manuelt tegnet inn i tillegg til det allerede genererte nedbørfeltet. Dette gav et samlet areal for Veumbekkens nye nedbørfelt på ca. 1290 ha, hvor det nye delfeltet utgjør ca. 57 ha. Hovedsakelig består det nye delfeltet av skog, overflatevann og urbane områder. Hovedfordelingen av overflatetype er anslått til 80% skogsområder, 16,5% ferskvannsområder og 3% urbane områder.

Det nye nedbørfeltet og overvannsledningen ble så tegnet inn i den eksisterende modellen. For å ta høyde for variasjoner i topografi og overflatetype ble det nye nedbørfeltet på 57 ha delt inn i 9 mindre delfelt. Det ble gjort arealmålinger av Bjørndalsdammene og disse ble lagt inn i modellen ved bruk av funksjonen for lagringsnoder (avsnitt 3.3.5.4.).

---

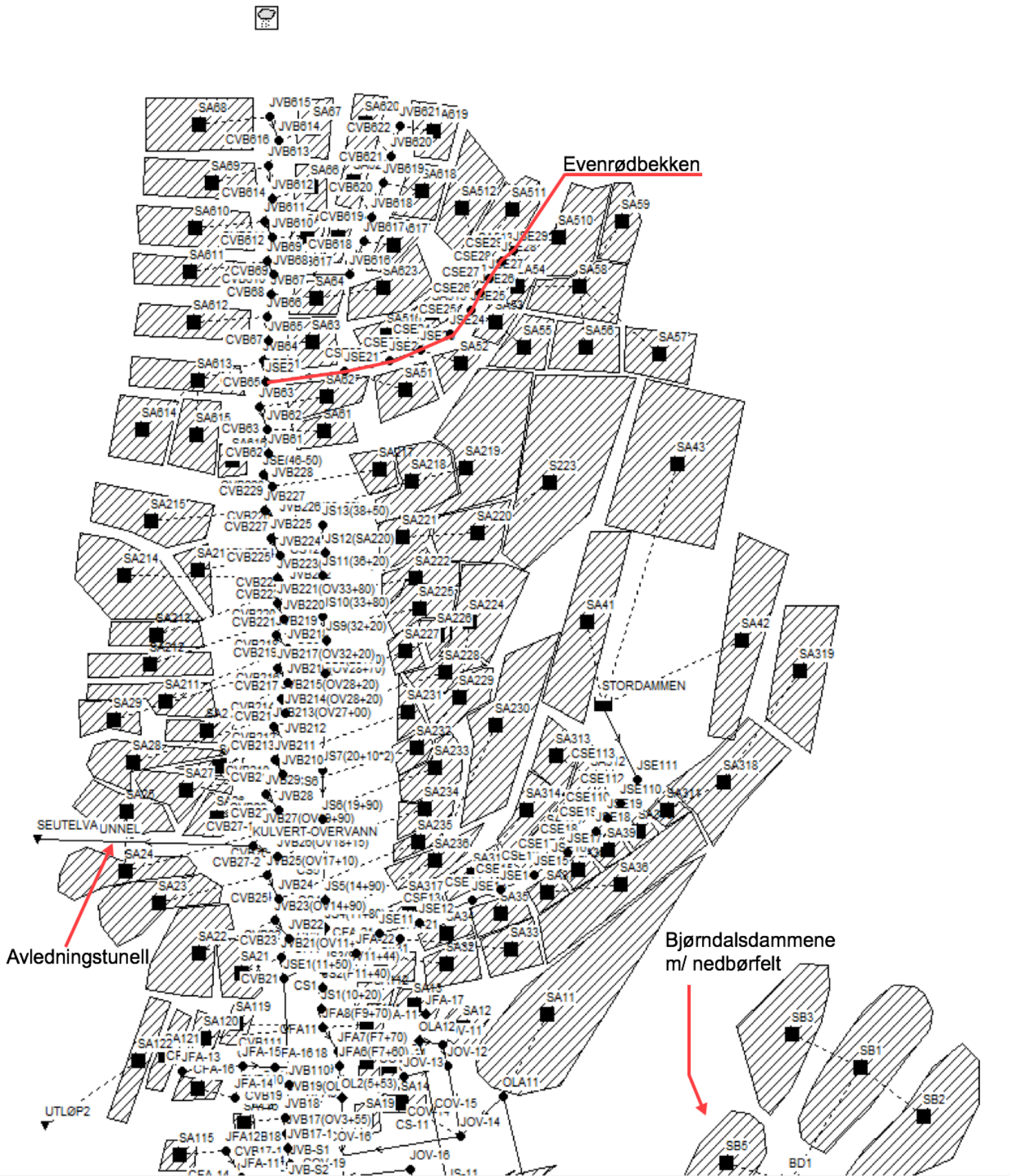
<sup>2</sup> <http://kart.fredrikstad.kommune.no/kartklient/internet/fredrikstad/Klient/>



## 5.2 Beskrivelse av modellen

SWMM modellen som er blitt analysert og utvidet i denne oppgaven er en stor og kompleks modell. Nedbørsfeltene har et samlet areal på 1290 ha, og det er også mange overvannsledninger, spillvannsledninger og fellesavløpsledninger i modellen i tillegg til Veumbekken med sidebekker. På grunn av modellens størrelse og kompleksitet har arbeidet med analyse av modellen vært tidkrevende. Det er også blitt laget flere versjoner av modellen med en kulvertløsning og kulvert/kanal med ulike kanalbredder.

For at leseren skal få en oversikt over hvordan modellen ser ut er det tatt utklipp av modellen som vises i Figur 5-4 og Figur 5-4 på de neste sidene. Områder som ofte blir nevnt i oppgaven er markert i figurene. Figur 5-4 Oversikt over øvre deler av modellen



Figur 5-4 Oversikt over øvre deler av modellen.

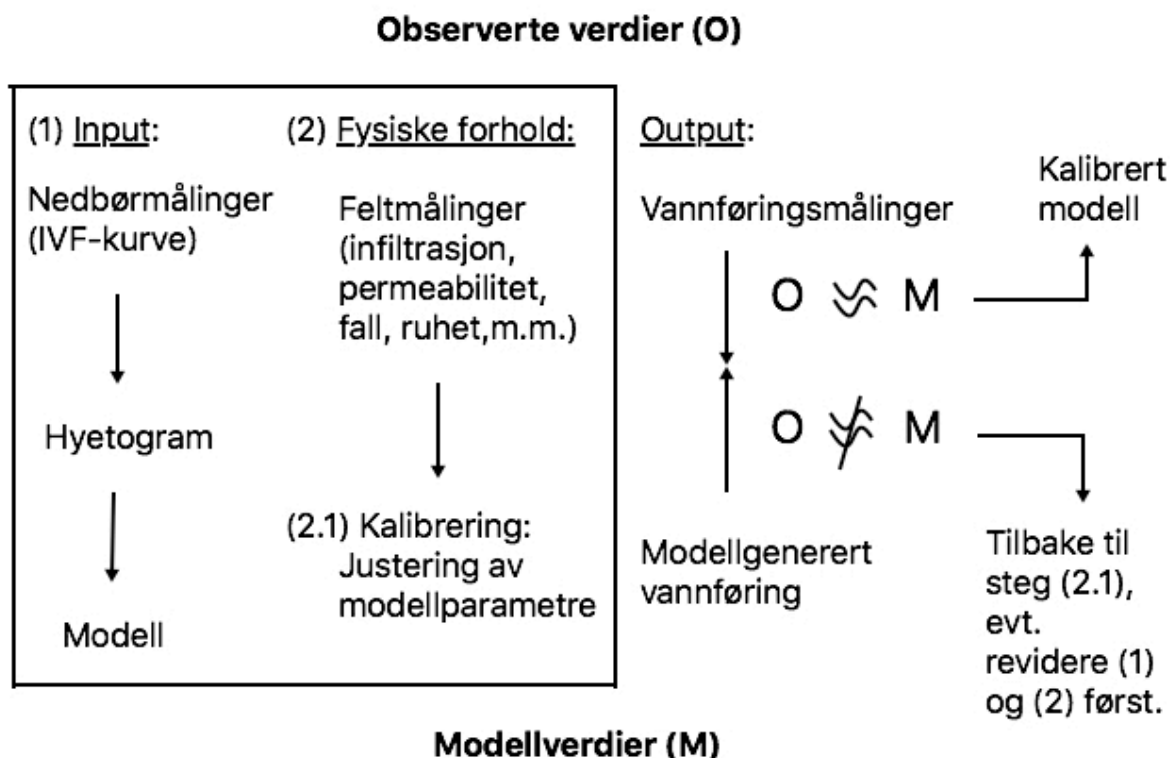


### 5.3 Kalibrering og validering av modell

Det var planlagt å kalibrere og validere den nye utvidede modellen etter samme metode som ble brukt i masteroppgaven til Jamal Haqi (Haqi 2015). Metoden baserte seg på å sammenligne modellresultater mot utregninger gjort med den rasjonelle formel. Å validere teoretiske modellresultater med en annen teoretisk metode som i tillegg er en grov forenkling av virkeligheten er ikke optimalt. Den rasjonelle metode har sitt bruksområde for å gjøre raske overslagsberegninger for vannføringen ut av mindre nedbørfelt. Ved større og mer komplekse nedbørfelt vil geometrien til nedbørfeltet spille en større rolle for maksimalvannføring og tidspunktet den inntreffer.

Tallene brukt i utregningen baserte seg på rapporten ”Veumbekken – Hydrologisk vurdering” (Hesselberg 1989). Ved å bruke rapportens verdier for arealinndeling og avrenningskoeffisienter for en høstsituasjon for regnhendelsen som inntraff 14.08.2008 gav den rasjonelle formel en maksimalavrenning ut av feltet på 40 m<sup>3</sup>/s (utregning vist i Vedlegg B). Modellen hadde en maksimalvannføring ut av feltet på 14 m<sup>3</sup>/s. Modellparameterne brukt i simuleringen er konservativt valgt for å ikke å gi for lave vannføringer og det er ingen grunn til å tro at modellen gir for lave vannføringsverdier, i hvert fall ikke i et slikt omfang.

For å kalibrere og validere modellen trengs det virkelige måleverdier til sammenligning med modellresultater. Det er ikke blitt gjort feltmålinger i arbeidet med denne oppgaven og modellen er derfor ikke kalibrert eller validert, men det er utarbeidet et forslag til fremgangsmåte for kalibrering vist ved Figur 5-6.



Figur 5-6 Forslag til fremgangsmåte for kalibrering av modellen i oppgaven. Kalibreringen bør gjøres slik at modellens output-verdier samsvarer med observasjoner for flere ulike inputverdier. Dette vil bidra til å validere modellen. Figur er utarbeidet av forfatter i paint.

Vannføringsmålinger kan brukes til sammenligning når man skal kalibrere modellen. Det er per dags dato ikke registrert vannføringsmålinger i Veumbekken. Fordi et av målene med modellen er å se hvilke maksimalvannføringer man får i Holmenkulverten ved større nedbørshendelser, tilsvarende 100-års gjentaksintervall eller mer er det disse nedbørshendelsene modellen bør kalibreres mot. Da det kan være svært tidkrevende å skaffe data for disse nedbørshendelsene kan det være interessant å gjøre vannføringsmålinger og kalibrere modellen for mindre nedbørshendelser. På denne måten vil man med høyere nøyaktighet kunne fastslå riktige verdier for de delene av modellen som vil forbli uendret uavhengig av nedbørshendelse (eks. topografi, utforming på rør/kanaler). Dette vil danne et godt grunnlag for videre kalibrering av modellen for større nedbørshendelser.



## 6 Resultater og Diskusjon

Fordi det er gjort analyser og endringer på den opprinnelige modellen før den ble utvidet er resultatene i dette kapitlet todelt; først med resultater fra endringene gjort i den eksisterende modellen, så med resultater etter utvidelse av modellen.

*Dersom annet ikke er blitt spesifisert bygger alle resultatene på nedbørshendelsen som inntraff 14.08.2008 med 300 min varighet, med modellparametere satt opp for en høstsituasjon der det ikke skjer noen evaporasjon og grunnen allerede er mettet med vann. Dvs. Ingen infiltrasjon og relativt høye avrenningskoeffisienter.*

### 6.1 Analyse av opprinnelig modell

Etter grundig analyse av modellen ble det funnet ut at modellen i seg selv er en god modell for sitt formål; å se på virkningen av avledningstunellen i de nedre delene av Veumbekken, og da spesielt om avledningstunellen fungerte godt nok til å forhindre en overskridelse av kapasiteten til Holmenkulverten selv ved regnhendelser tilsvarende og større enn 100-årsavrenningen. Fordi modellen ikke er blitt kalibrert er de eksakte vannføringsverdiene noe usikre, men modellen viser godt den flomdempende effekten av avledningstunellen. Selv om modellen ikke er kalibrert er den satt opp med høye verdier for impermabilitet, ingen infiltrasjon i nedbørfeltene og bekketverrsnitt som kanskje er litt større enn i virkeligheten. Dette i sin helhet vil bidra til at modellen antageligvis heller vil gi litt større vannføringsverdier enn virkeligheten og man kan derfor ganske sikkert anta at en regnhendelse lignende den som oppstod i 2008 ikke vil overskride kulvertens kapasitet. Man må allikevel være obs på at det kan forekomme situasjoner der det oppstår fortetting av innløpet til både avledningstunellen og Holmenkulverten i en slik situasjon vil kapasiteten reduseres og det blir større sjanse for oppstuvning ved innløpene.

Summen av endringer gjort i den eksisterende modellen har i liten grad ført til endringer i maksimalvannføringen inn i Holmenkulverten men endringene har bidratt til å gjøre modellen mer korrekt i forhold til virkeligheten.

Den mest betydningsfulle endringen i modellen var endringen av tverrsnittet til Evenrødbekken. Summen av vann som forsvant fra modellområdet som tilsvarer

## Resultater og Diskusjon

Evenrødbekken var på 2670 m<sup>3</sup> og endringen i tverrsnitt medførte at 2670 m<sup>3</sup> at dette vannet nå blir fraktet igjennom modellen eller lagret i transportsystemet ved simuleringsslutt.

Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow LPS	Max. Flow LPS	Total Volume 10 <sup>6</sup> ltr
KULVERT	100.00	1675.73	4323.91	30.811
UTLØP1	100.00	667.64	1103.05	12.290
UTLØP2	89.37	61.75	323.40	1.040
SEUTELVA	100.00	3697.40	8500.00	67.781

Tabell 6-1 Vannføringsverdier i den opprinnelige modellens utløpspunkt. Kulvert tilsvarer Holmenkulverten, Seutelva tilsvarer utløpet av avledningstunellen, Utløp 1 er en fellesledning som senere går i overløp til Holmenkulverten og Utløp 2 er en overvannsledning fra et mindre boligfelt med utløp i Seutelva.

Outfall Node	Flow Freq. Pcnt.	Avg. Flow LPS	Max. Flow LPS	Total Volume 10 <sup>6</sup> ltr
KULVERT	100.00	1772.81	4328.79	32.529
UTLØP1	100.00	671.01	1102.92	12.344
UTLØP2	89.38	61.75	323.74	1.040
SEUTELVA	100.00	3736.90	8500.00	68.494

Tabell 6-2 Vannføringsverdier ved utløpspunkt i modellV1 etter modellendringer

Ved sammenligning av Tabell 6-1 og Tabell 6-2 kan man se at vannmengdene som nå gikk ut av modellens utløp er økt med hhv.:

- 1718 m<sup>3</sup> for Holmenkulverten
- 54 m<sup>3</sup> for Utløp1
- 0,713 m<sup>3</sup> for avledningstunellen

Den totale økningen i hvor mye vann som går ut av modellen er på 2485 m<sup>3</sup>, som er 185 m<sup>3</sup> lavere enn de ekstra vannmengdene som ble bevart. Fordi modellen bruker dynamisk bølgefunksjon tar den høyde for lagring av vann i transportsystemet og de resterende 185 m<sup>3</sup> med vann er lagret i modellens transportsystem ved simuleringsslutt.

Den mest kritiske verdien for en virkelig situasjon er maksimalvannføringen inn i Holmenkulverten, representert av kombinasjonen av ”kulvert” og ”utløp1” i Tabell 6-2.



Økningen i maksimalvannføring som følge av modellendringene er totalt på ca. 5 l/s og sees på som en ubetydelig endring. Ser man derimot på endringen i gjennomsnittlig vannføring kan man se at den gjennomsnittlige vannføringen inn i Holmenkulverten er økt med omlag 100 l/s. Til sammenligning har gjennomsnittsvannføring for avledningstunellen økt med 40 l/s. Dette tyder på at avledningstuneller når sin maksimale kapasitet på 8,5 m<sup>3</sup>/s før de største vannføringene fra Evenrødbekken når innløpet. Og at flomtoppen fra Evenrød treffer innløpet til Holmenkulverten etter at den har nådd sin maksimalvannføring. Dette er et veldig godt eksempel på hvordan kompleksiteten (f.eks. avledningstunellen, varierende gradient og permeabilitet) og geometrien til nedbørfeltet gjør at det trengs mer nøyaktige verktøy for å analysere vannføringen enn f.eks. den rasjonelle metode.

Den opprinnelige modellen hadde en «internal outflow» på 2969 m<sup>3</sup> vist ved Figur 6-1. Dette er den mengden med vann som tapt fra modellen underveis i transportsystemet som følge av oppstuvning i knutepunkter. Etter endringene gjort i modellen kan man se av Figur 6-2 at vanntapet nå er nede i 376 m<sup>3</sup>.

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10 <sup>6</sup> ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow .....	0.017	0.167
Wet Weather Inflow .....	12.777	127.769
Groundwater Inflow .....	0.000	0.000
RDII Inflow .....	0.000	0.000
External Inflow .....	0.000	0.000
External Outflow .....	11.192	111.923
Internal Outflow .....	0.297	2.969
Evaporation Loss .....	0.000	0.000
Exfiltration Loss .....	0.006	0.060
Initial Stored Volume ....	0.034	0.345
Final Stored Volume .....	1.332	13.320
Continuity Error (‰) .....	0.007	

Figur 6-1 Utklipp fra SWMMs statusrapport gammel modell. Internal outflow viser hvor mye vann som underveis forsvinner fra modellen.

## Resultater og Diskusjon

*****	Volume	Volume
Flow Routing Continuity	hectare-m	10^6 ltr
*****	-----	-----
Dry Weather Inflow .....	0.017	0.167
Wet Weather Inflow .....	12.777	127.769
Groundwater Inflow .....	0.000	0.000
RDII Inflow .....	0.000	0.000
External Inflow .....	0.000	0.000
External Outflow .....	11.441	114.407
Internal Outflow .....	0.038	0.376
Evaporation Loss .....	0.000	0.000
Exfiltration Loss .....	0.006	0.060
Initial Stored Volume ....	0.021	0.212
Final Stored Volume .....	1.330	13.303
Continuity Error (%) .....	0.001	

Figur 6-2 Utklipp fra SWMMs statusrapport etter endringer. Internal outflow er har nede i 0,376 og kontinuitetsfeil ned fra 0,007 til 0,001%..

Endringene gjort for å få bedre massebevaring har ført til at det nå går 2593 m<sup>3</sup> mer vann gjennom modellen. Satt i en sammenheng er dette kun 2,6% av den samlede vannmengden transportert gjennom modellen. Det resterende tapet på 376 m<sup>3</sup> er jevn fordelt utover flere knutepunkter og tapet er så lite at det vil ha liten eller ingen betydning for videre resultater.

*****	*****
Highest Continuity Errors	Highest Continuity Errors
*****	*****
Node JS5 (14+90) (-209.39%)	Node JS6 (19+90) (21.14%)
Node JS10 (33+80) (-195.57%)	Node JS11 (36+20) (20.79%)
Node JS11 (36+20) (20.86%)	Node JS8 (28+70) (11.15%)
Node JS6 (19+90) (16.90%)	Node JS7 (20+10*2) (5.92%)
Node JS7 (20+10*2) (5.80%)	Node JS5 (14+90) (5.72%)

Figur 6-3 Noder med høyest kontinuitetsfeil før og etter modellendringer

Figur 6-3 viser at ved å sette vannstand i JS5 og JS10 ved modellstart fra 2 m til 0 m ble den høye kontinuitetsfeilen i disse nodene eliminert.

## 6.2 Sammenligning av kulvert og åpen kanalløsning

Modellutvidelsen med en modell for Holmenkulverten slik den ligger i dag, og en med en åpen kanal med varierende breddeverdier gav et godt grunnlag for å se den hydrauliske effekten av en kulvertåpning.

Resultatene i dette avsnittet baserer seg på forholdene listet opp nedenfor:

- Regnhyetogram fra regnhendelsen som oppstod 14.08.2008, 300 min varighet.
- Høstsituasjon, lav permeabilitet og ingen infiltrasjon.
- Havnivå tilsvarende dagens middelvannstand på -0,15 m.
- Regnhendelsen av 14.08.2008 i kombinasjon med en 200 års- flomvannstand i Vesterelva på 1,8 m (Stormflo).
- Regnhendelsen av 14.08.2008 med 20% klimatillegg og vannstand på +0,37 m for å simulere en kraftig nedbørshendelse ved middelvannstand i år 2100.

### 6.2.1 Dagens kulvertløsning

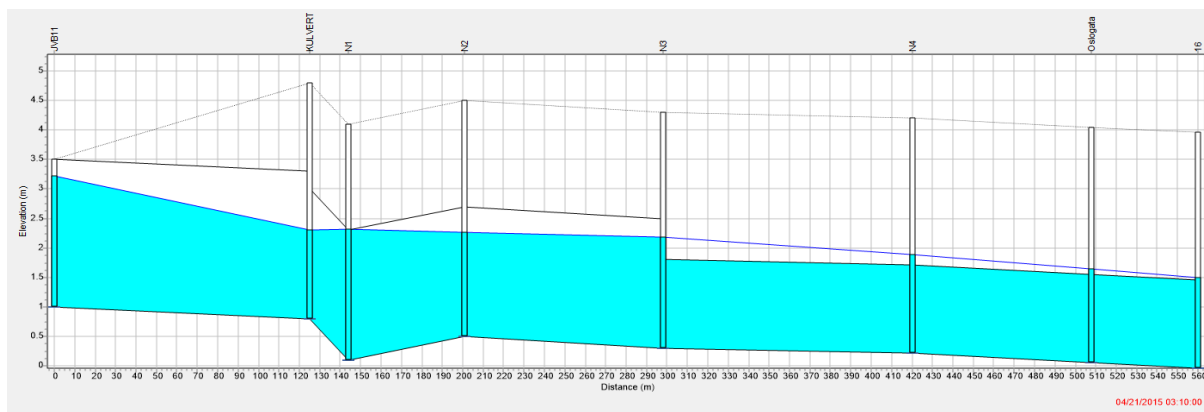
Outfall Node	Flow Freq. Pcmt.	Avg. Flow LPS	Max. Flow LPS	Total Volume 10 <sup>6</sup> ltr
UTLØP2	89.42	61.64	323.74	1.040
SEUTELVA	100.00	3724.52	8500.00	68.502
UtløpVestreelva	100.00	2555.54	5605.26	47.154

Figur 6-4 Vannføring ved utløp, med kulvert ved middelvannstand i Vestreelva på -0,15 m.

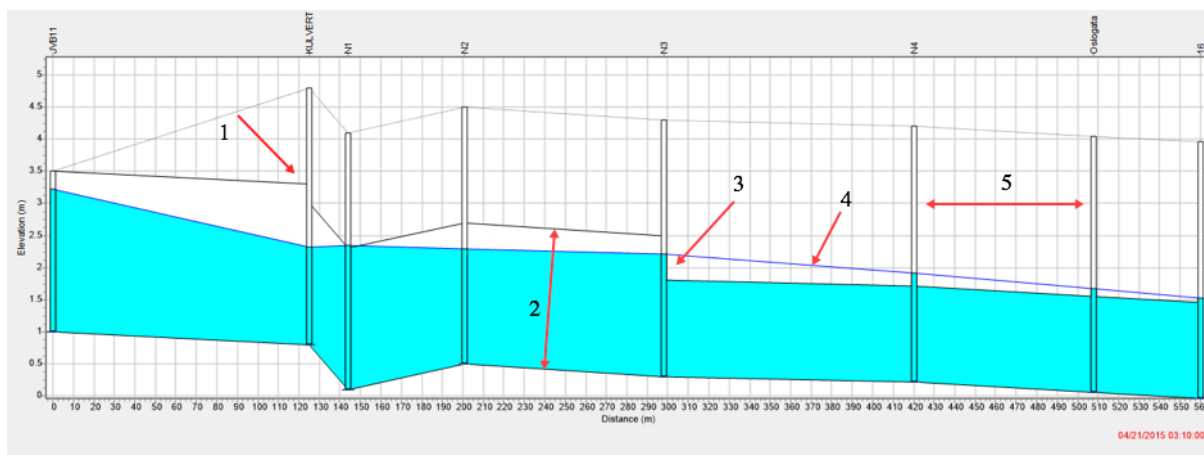
Etter de siste modellendringene med bidrag fra Bjørndalsdammene og vann fra fellesledninger (tidligere Utløp1) som kommer inn i kulverten ser man at ny maksimal vannføring i kulverten ved utløpet i Seutelva er på 5605,26 l/s. Fordi det nye nedbørfeltet var såpass lite (4,5% av det totale nedbørfeltet) ble heller ikke bidraget fra dette feltet så stort, men gav en økning i maksimalvannføring på ~170 l/s.

## Resultater og Diskusjon

Modellsimuleringer viste at ved dagens situasjon vil deler av kulverten bli trykksatt og skape fare for oppstuvning i tilkoblede fellesavløpsledningene ved vannføringer over  $\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dette kan sees i Figur 6-5 som viser lengdeprofil av kulverten ved modellsimuleringens maksimalvannføring. Figuren viser at trykklinjen ligger høyere enn kulvertens tak i områdene etter innsnevring, noe som vil føre til problemer med oppstuvning i avløpsnett med overløp eller utløp i kulverten, og som vil skape problemer ved høyere vannføringer.



Figur 6-5 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra kulvertinnløp til Oslogata. Ved vannføring  $\sim 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannstand Vesteralva - 0,15 m.



Figur 6-6 Hjelpesfigurer for forklaring av lengdeprofil.

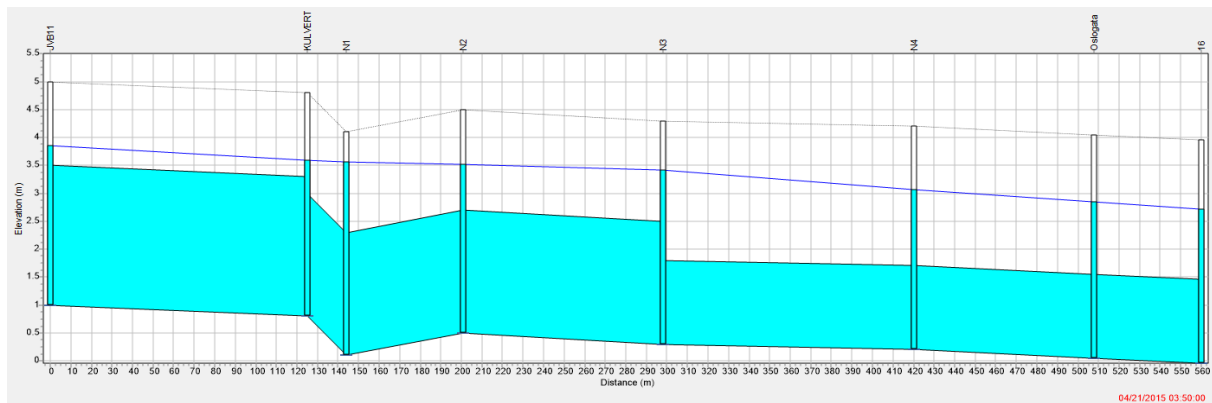
Forklaring av lengdeprofil (se Figur 6-6):

1. Kulvertens innløp.
2. Topp og bunn av kulvert.
3. Innsnevring av kulvert fra høyde 2 m til 1,5 m.
4. Vannlinje/trykklinje.
5. Knutepunkter. (makshøyden til knutepunktene er høyere kulvertens tak for å lettere kunne se oppstuvning over kulvert).

En 200-års flom i Glomma som følge av stormflo er i dag beregnet til 1,8 m. (Naserzadeh 2016)

For modellsimuleringer med en fast vannhøyde på 1,8 m ved kulvertens utløp oppstod det store problemer med oppstuvning i kulverten og ved kulvertens innløp, vist ved Figur 6-7.

Ved slike flomhendelser vil deler av Fredrikstad sentrum stå under vann (kan sees i Figur A - 1 i vedlegg A). Dersom det i tillegg til flomvannstand oppstår kraftig nedbør over Veumdalen vil det bli stor fare for lokal oversvømmelse ved innløpet av kulverten og ved kummer tilknyttet fellesavløpet kulverten er en del av. Vannet vil ved oppstuvning over kulvertens innløp renne av på terrengoverflaten mot øst og deretter ned Holmegata. Skadene fra dette overvannet vil kunne reduseres ved å føre dette til en åpen kanal.



Figur 6-7 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til Oslogata ved flomvannstand 1,8 m og vannføring  $\sim 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannstand i Vesterelva -0,15 m.

### 6.2.2 Åpen kanalløsning

Modellen ble kjørt med ulike kanalbredder for å se hvilke kanalbredder som hadde kapasitet nok til å føre maksimalvannføringen i Veumbekken skapt av nedbørshendelsen av 14.08.2008. Overslagsberegninger<sup>3</sup> med Mannings formel viste at kanalbredder over 1,3 m ville ha tilstrekkelig kapasitet, uten fare for oppstuvning og oversvømmelse av Holmegata. Modellsimuleringer viste også at det ikke oppstod oppstuvning over kanalen ved en bredde på 1,3 m.

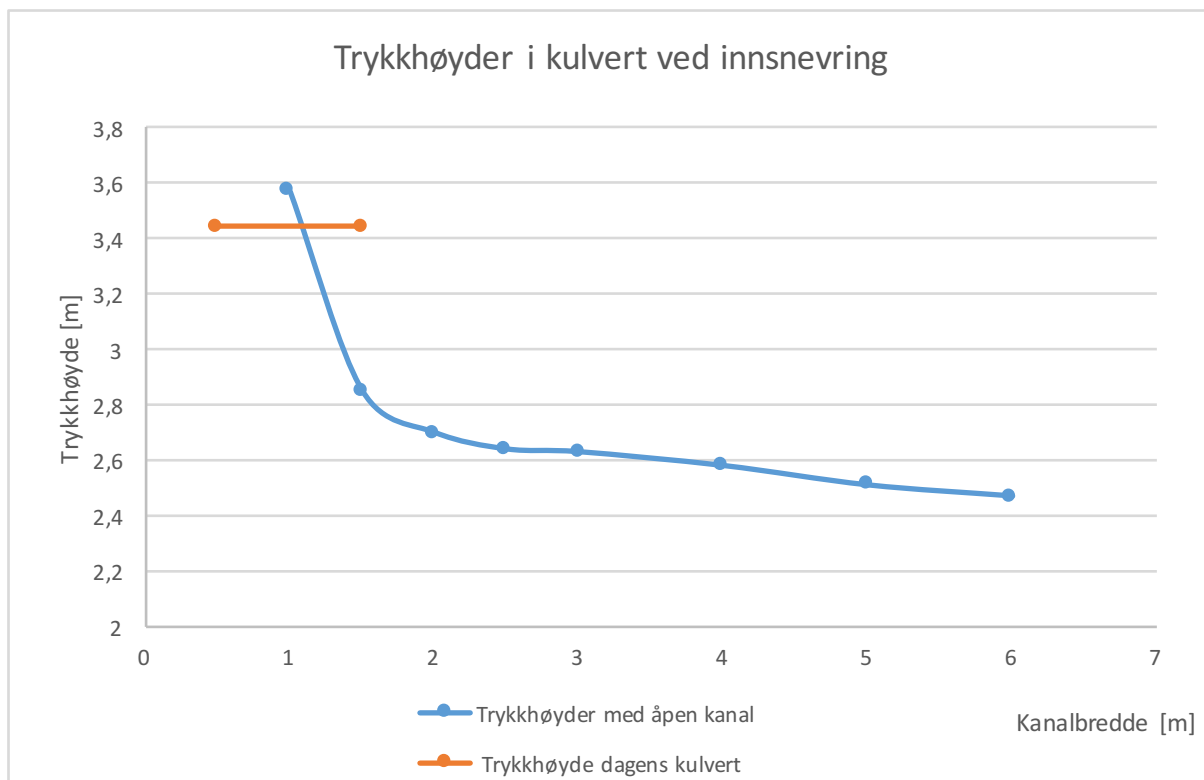
Kanalens kapasitet vil derimot påvirke strømningsforholdene oppstrøms i den resterende delen av Holmenkulverten. Ved å øke kanalens tverrsnitt kunne man redusere faren for oppstuvning av vann i kulverten. Ved mindre kanaltverrsnitt vil vannet stå høyere i kanalen og det blir mer motstand nedstrøms kulvertens utløp, noe som medfører økt oppstuvning i kulverten.

For å se hvordan en utvidelse av kanaltverrsnitt ville påvirke kapasiteten i den resterende kulverten ble modellen kjørt med ulike bredder for kanalen, og trykkehøyden i den resterende delen av Holmenkulverten ble registrert for hvert kanaltverrsnitt. Dette kan sees i Figur 6-8 som viser maksimal trykkehøyde<sup>4</sup> ved kulvertens innsnevring som funksjon av kanalbredde. Av figuren kan man se at trykkehøyden i kulverten synker betraktelig for kanalbredder opptil 2 m, etter dette er det ikke like mye å hente på å velge en bredere kanal. Kanalen skal derimot også ha en visuell effekt i området, og det er derfor tatt utgangspunkt i at kanalens bredde bør være på minst 3 m.

---

<sup>3</sup> Beregningene med Mannings formel ble gjort for å få en tilnærmet oversikt over kanalens kapasitet ved ulike kanalbredder. Beregningene er vist i Vedlegg B.

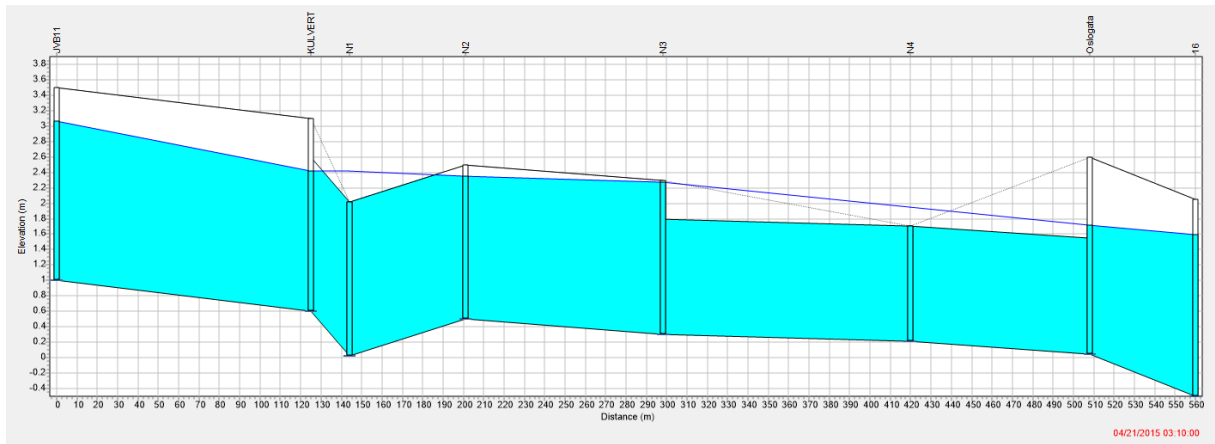
<sup>4</sup> Trykkehøyder er relative til kotehøyde = 0



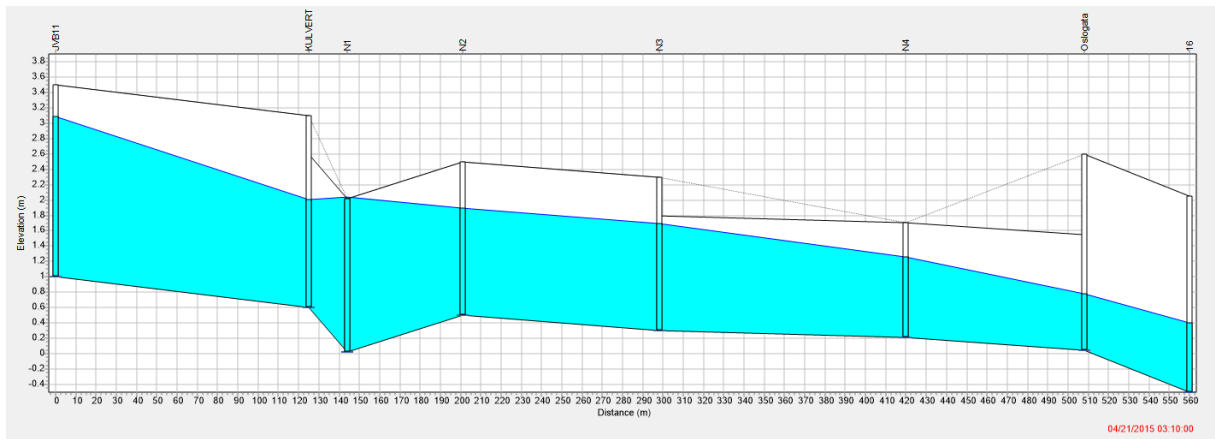
Figur 6-8 Trykkehøyder ved kulvertens innsnevring som funksjon av kanalbredde ved flomvannstand 1,8 m. Verdiene er hentet fra SWMMs sammendragsrapport.

Det ble tatt ut forskjellige lengdeprofil som viste trykkehøyden i kulverten ved ulike kanalverrsnitt. Disse ble sammenlignet med lengdeprofilet av kulverten slik den ligger i dag. Figurene på neste side viser lengdeprofil av Holmenkulverten ved ulike kanalbredder.

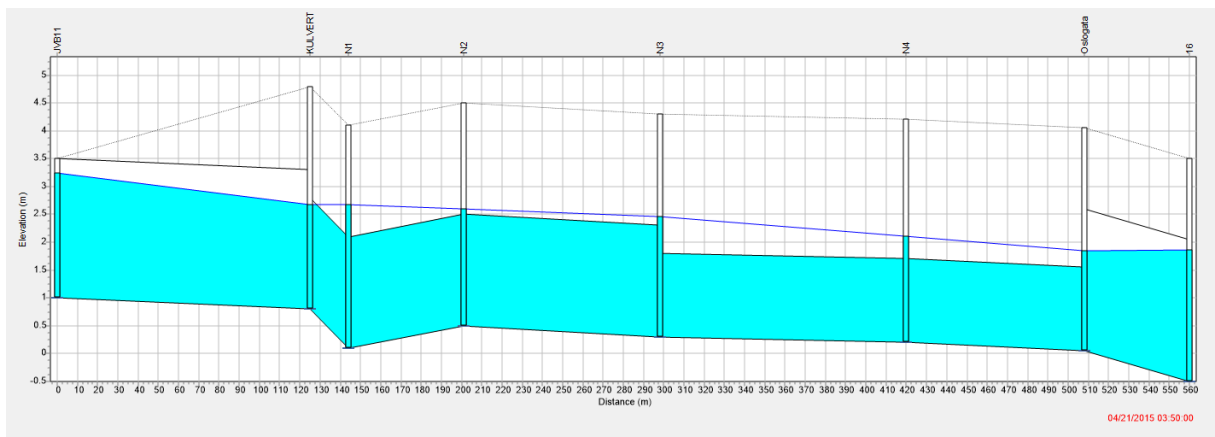
## Resultater og Diskusjon



Figur 6-9 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 1,3 m og vannføring  $\sim 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannstand i Vestereelva  $-0,15 \text{ m}$ .

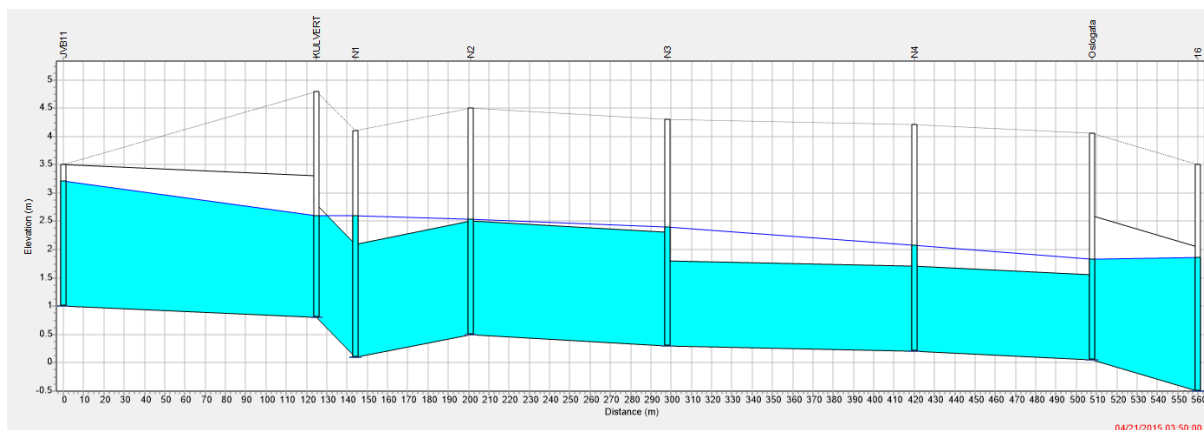


Figur 6-10 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 2,5 m og vannføring  $\sim 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannstand i Vestereelva  $-0,15 \text{ m}$ .



Figur 6-11 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 3 m og vannføring  $\sim 5,5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vannstand i Vestereelva  $1,8 \text{ m}$ , som tilsvarer flomvannstand ved stormflo.





Figur 6-12 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 6 m og vannføring  $\sim 5,5$  m<sup>3</sup>/s. Vannstand i Vesterelva 1,8 m, som tilsvarer flomvannstand ved stormflo.

Med en kanalbredde på 1,3 m (Figur 6-9) ble det høyere trykk og større fare for oppstuvning i kulverten, mens en kanalbredde på 2,5 m (Figur 6-10) gav lavere trykkehøyder og bedre kapasitet.

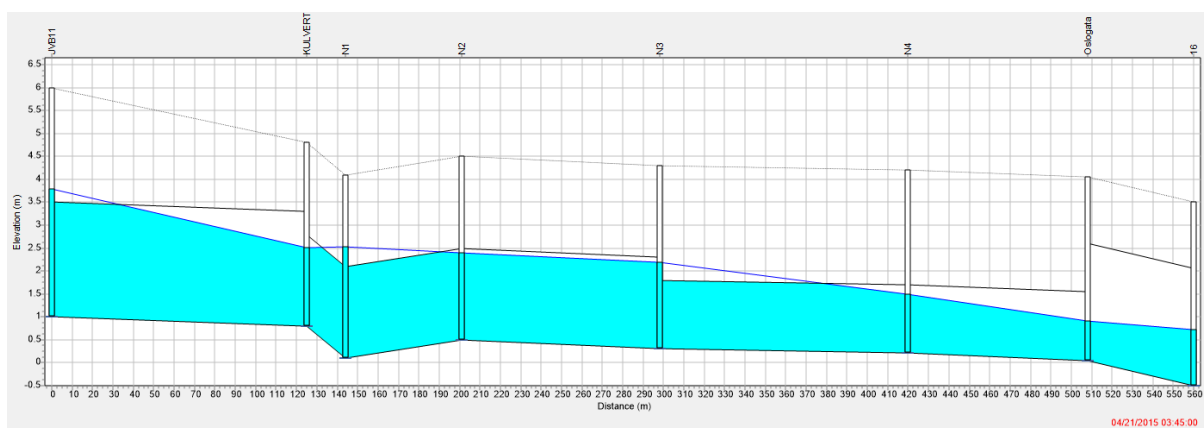
Ved kraftig nedbør i kombinasjon med en 200-års flomvannstand i Vesterelva vil en åpen kanalløsning i sterk grad kunne bidra til å redusere trykkehøyden i kulverten og ved kulvertens innløp. Figur 6-11 viser vannstanden i kulverten ved en kanal med bredde 3 m ved vannføring på  $\sim 5,5$  m<sup>3</sup>/s. Sammenlignet med Figur 6-7 som viser situasjonen ved dagens kulvertløsning, ser man at en åpen kanal med bredde på 3 m vil bidra sterkt til å redusere problemer med oppstuvning, men at det i en slik situasjon fortsatt ville oppstått problemer. Ved utvidelse av kanalen til en bredde på 6 m (Figur 6-12) ble det ingen store forskjeller i trykkehøyde i kulverten sammenlignet med kanalbredde på 3 m.

Det antas derfor at videre utvidelse av kanaltverrsnitt utover en bredde på 2,5-3 m i mindre grad vil bidra til en økning av kapasitet i kulverten. For å øke kapasiteten ytterligere må den resterende delen av kulverten oppdimensjoneres eller det må foretas en åpning av hele kulverten.

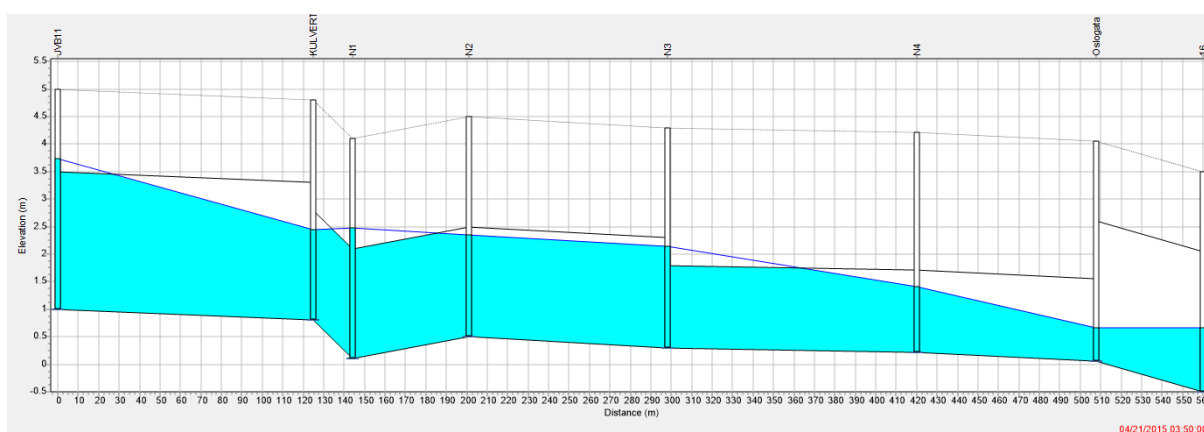
### 6.2.3 Åpen løsning, år 2100

For å få et innblikk i hvordan en kraftig regnhendelse i år 2100 ville påvirke vannføringen i kulvert/kanal ble regnhendelsen fra 14.08.2008 oppskalert med 20 %. Dette er i tråd med middelverdier for klimaframskrivninger av kraftig nedbør i indre Østfold for høstmånader vist i Tabell 2-2. På grunn av den antatte hevingen av havnivå er det i modellen gitt en fast vannhøyde ved utløpet i Vestreelva på 0,37 m (-0,15 + 52 cm) med bakgrunn i Tabell 2-4.

Modellsimuleringene for nedbørhendelsen i år 2100 viste at det også her kun var en liten reduksjon i trykklinj over kulverten ved økning av kanalbredde fra 3 m til 6 m, vist ved Figur 6-13 og Figur 6-14.



Figur 6-13 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 3 m og vannføring  $\sim 7$  m<sup>3</sup>/s. Vannstand i Vestreelva 0,37 m.



Figur 6-14 Lengdeprofil av Holmenkulverten fra innløp til åpen kanal med kanalbredde 6 m og vannføring  $\sim 7$  m<sup>3</sup>/s. Vannstand i Vestreelva 0,37 m.

## 6.3 Usikkerhet rundt resultatene

Modellresultatene er begrenset til regnhendelsen som oppstod 14.08.2008 samt for samme hendelse oppskalert med 20% i år 2100 ved en høstsituasjon. Den tar ikke høyde for f.eks. en vintersituasjon der andelen tette flater øker. Ved samme nedbørshendelse i en vintersituasjon ville avrenningen skjedd raskere og maksimalvannføringen ville blitt en høyere. Det er derimot liten sannsynlighet for å få en nedbørhendelse av den størrelsen om vinteren.

Kulvertens utforming er noe usikker. Den er modellert med verdier fra Norconsults HEC-RAS profil vist i Figur B - 2 i Vedlegg B og det er gjort noen forenklinger i forhold til denne, som at innsnevringen av tverrsnitt skjer momentant og ikke gradvis. Norconsult oppgir også i rapporten at verdiene de har brukt for kulvertens dimensjoner er usikre. Ved kulvert med dimensjon 2,2x2,2 m slik beskrevet i (Hesselberg 1989) vil kulvertens kapasitet være større og man ville fått andre resultater. Det er likevel kun fokusert på tallene fra Norconsults rapport da disse er ansett som mer sikre.

Modellen er ikke tilstrekkelig kalibrert og kan gi vannføringer som er ganske ulike virkelige vannføringer. Man kan derfor ikke være sikker på at vannføringsverdiene skapt av modellen vil være like de som oppstår i virkeligheten ved en regnhendelse tilsvarende den som inntraff 14.08.2008.

### 7 Konklusjon

- Analyse og endringer gjort i den opprinnelige modellen viste at endringene gjort hadde relativt små utslag for maksimalvannføring i Holmenkulverten, og det er konkludert med at den opprinnelige modellen var tilfredsstillende bygd opp. Selv om modellendringene ikke gav store utslag har de gjort modellen til en mer presis beskrivelse av virkeligheten.
- En åpning av nedre del av Holmenkulverten vil kunne øke kapasiteten noe i de nedre delene av Veumbekken og dermed redusere faren for oversvømmelse av nærliggende områder og tilbakeslag av vann til kjellere.
- For å ytterligere redusere faren for oppstuvning ved kulvertens innløp og i ledningsnett tilknyttet kulverten vil det være nødvendig å utvide den eksisterende kulverten eller se på metoder for å føre avledet vann rundt kulverten og til den åpne kanalen.
- Ved stormflo i kombinasjon med nedbørshendelser lik hendelsen fra 14.08.2008 vil det oppstå store problemer med oppstuvning i kulverten. En åpen kanal vil bidra til redusere disse problemene.
- En bekkeåpning vil i tillegg til å øke vannføringskapasiteten bidra positivt til bymiljøet som en blå-grønn tunge gjennom Holmegata. Men det forutsettes at det utføres tiltak for å bedre Vannkvaliteten i Veumbekken.

## 8 anbefalinger til videre arbeid

Modellresultatene bygger på en usikker beskrivelse av Holmenkulverten, og modellen er heller ikke kalibrert mot virkelige hendelser. Dersom man ønsker mer pålitelige vannføringsverdier fra modellen vil det være nødvendig å gjøre nedbør- og vannføringsmålinger ved ulike regnhendelser for så å kalibrere modellen. Modellen mangler også nedre deler av nedbørfeltet som omfatter områder av Fredrikstad sentrum. For å gjøre modellen bedre kan det være en fordel å legge inn dette nedbørfeltet samt de ledningene som har utløp eller overløp til kulvert/kanal.

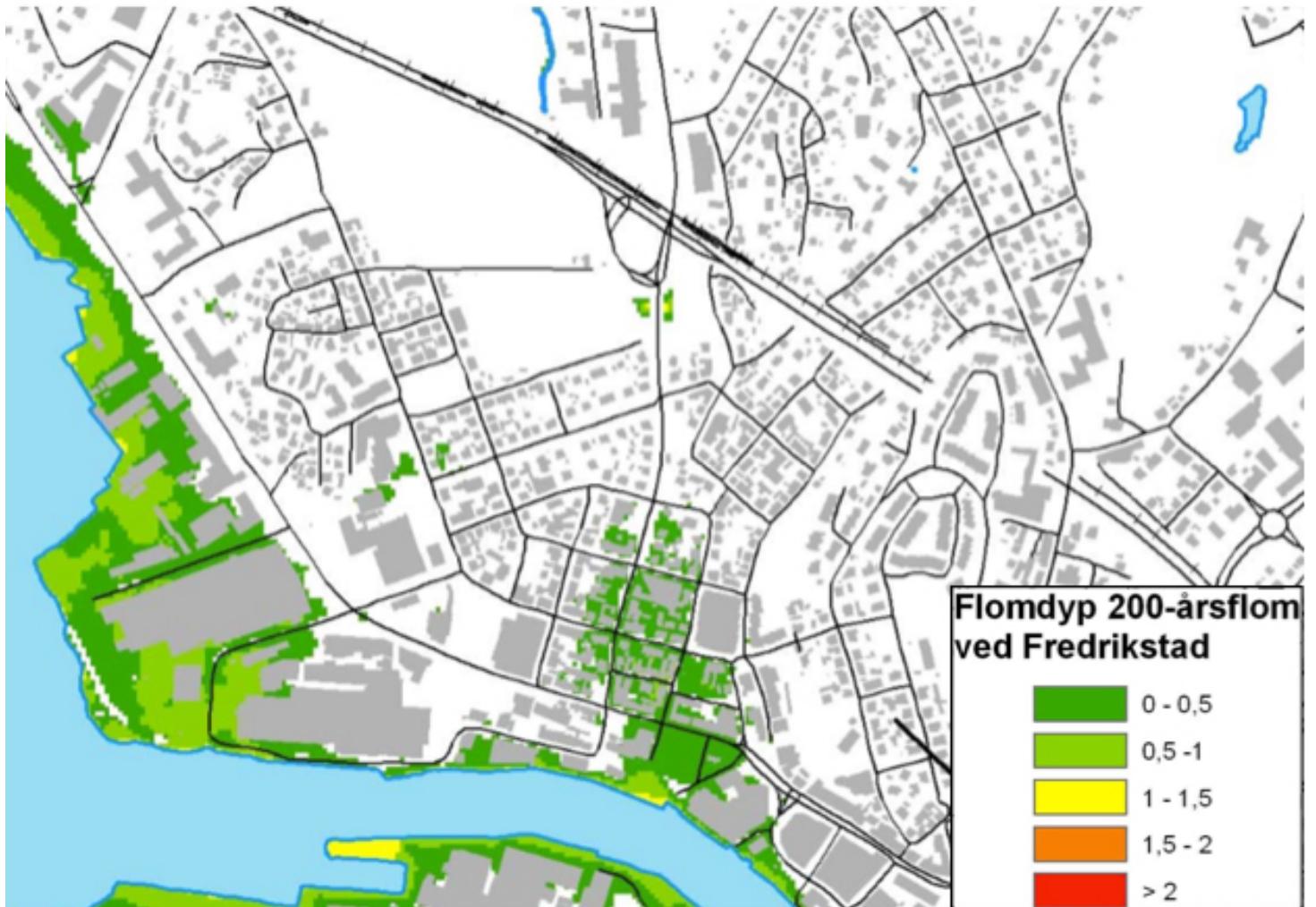
En forutsetning for kulvertåpningen vil være at vannkvaliteten i Veumbekken forbedres da bekken i stor grad er preget av avrenning fra jordbruk og urbane flater samt at bekken er resipient for fellesavløpsledninger. I tillegg til å separere spillvann og overvann bør det utføres tiltak for å redusere forurensningen fra jordbruk i Veumdalen.

En åpen kanal vil kunne ha mye større kapasitet enn den eksisterende kulverten, men den resterende delen av kulverten etter en eventuell åpning vil være en flaskehals. Vann fra Veumbekken vil i noen tilfeller kunne stuve opp ved kulvertens innløp. Dette vannet vil renne til Holmegata, og det kan derfor være en fordel å se på enkle tiltak for å raskt føre vannet tilbake til kanalen. Evt. Bør det vurderes å åpne hele Holmenkulverten, eller utvide den resterende delen for å ytterligere redusere faren for oppstuvning ved kulvertens innløp.

# 9 Bibliografi

- Fredrikstad blad. (2009). *Vurderer å gjenåpne Veumbekken*. Tilgjengelig fra: <http://www.fb.no/nyheter/vurderer-a-gjenapne-veumbekken/s/2-2.952-1.1804740>.
- Fredrikstad Kommune. (2007). *Overvannsrammeplan*: Fredrikstad Kommune.
- Fredrikstad Kommune. (2015). *Ny overvannsledning Bjørndalen - Oredalen*.
- Fredrikstad kommune, C. (2008). *Hovedplan VA 2008-2028*.
- Haqi, J. (2015). Modellering av nedslagsfeltet- Veumdalen i Fredrikstad med programmet SWMM.
- Helge Skaaraas et. al. (2015). *Overvann i byer og tettsteder*.
- Hesselberg, E. (1989). *Veumbekken - Hydrologisk Vurdering*
- I. Hanssen-Bauer, E.J. Førland, I. Haddeland & H. Hisdal, S. M., A. Nesje, J.E.Ø. Nilsen, S. Sandven, A.B. Sandø, A. Sorteberg, B. Ådlandsvik. (2015). *KLIMA I NORGE 2100*.
- Kristiansand Kommune. (2014). *Dimensjonering av overvannsmengder*.
- Lindholm, O. (2009). *Flomskader og utslipp etter klimaendringer*: UMB.
- Lindholm, O. (2014). *Overvann - THT261*.
- Miljødirektoratet. (2015). *Globale klimaendringer - hva skjer?* Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/klimaendringer-globalt/>.
- Naserzadeh, A. R. (2016). *Flomsonekart: Delprosjekt Fredrikstad og Sarpsborg*.
- Norconsult. (2015a). *Forslag til detaljregulering Veumbekken - Holmen Fredrikstad Kommune*.
- Norconsult. (2015b). *Veumbekken - Vurdering av reguleringsplan for planlagt gjenåpning - Flo og flomforhold*.
- Rossmann, L. A. (2010). *Storm water management model User`s manual Version 5*.
- Statsbygg. (2014). *Åpne overvannsløsninger – erfaringer og anbefalinger*.
- Systems Engineering Guide. (2016). *Verification and Validation of Simulation Models*. Tilgjengelig fra: <https://www.mitre.org/publications/systems-engineering-guide/se-lifecycle-building-blocks/other-se-lifecycle-building-blocks-articles/verification-and-validation-of-simulation-models>.
- Wikipedia. (2016a). *Hydrologi*.
- Wikipedia. (2016b). *Vannets kretslop*.
- Ødegaard, H. (2012). *Vann- og avløpsteknikk*.

## Vedlegg A



Figur A - 1 Flomdyp ved 200-årsflom i Glomma, vannstand 1,8 m.(Naserzadeh 2016)

## Lavvannskart

Vassdragsnr.: 002.2A  
Kommune: Fredrikstad  
Fylke: Østfold  
Vassdrag: SEUTELVA

Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90) 13.0 l/s/km<sup>2</sup>  
Alminnelig lavvannføring 0.7 l/s/km<sup>2</sup>  
5-persentil (hele året) 0.8 l/s/km<sup>2</sup>  
5-persentil (1/5-30/9) 0.5 l/s/km<sup>2</sup>  
5-persentil (1/10-30/4) 1.6 l/s/km<sup>2</sup>  
Base flow 5.6 l/s/km<sup>2</sup>  
BFI 0.4

Klima

Klimaregion Ost  
Årsnedbør 841 mm  
Sommernedbør 375 mm  
Vinternedbør 466 mm  
Årstemperatur 5.9 °C  
Sommertemperatur 13.5 °C  
Vintertemperatur 0.5 °C  
Temperatur Juli 16.2 °C  
Temperatur August 15.2 °C

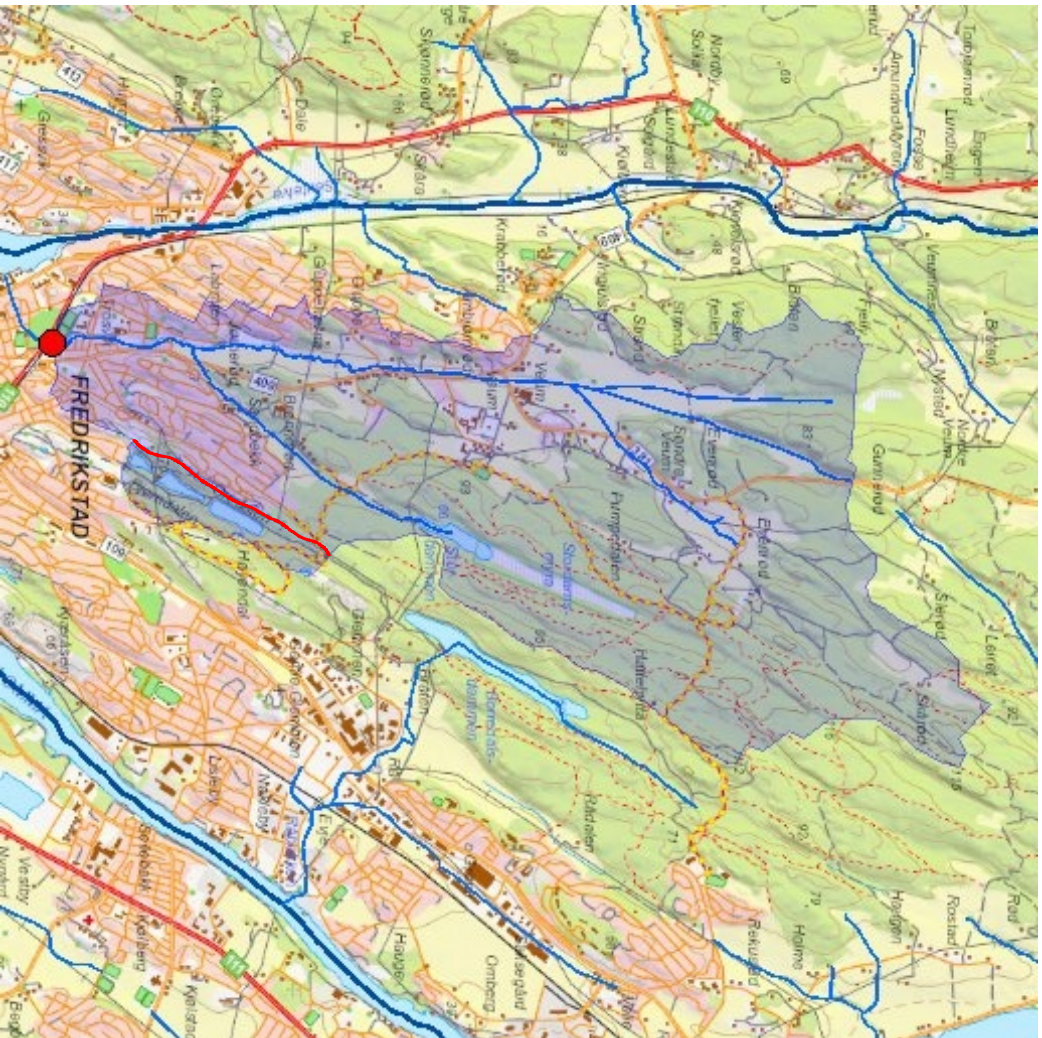
Feltparametere

Areal (A) 12.9 km<sup>2</sup>  
Effektiv sjø (S<sub>eff</sub>) 0.0 %  
Elvelengde (E<sub>L</sub>) 6.2 km  
Elvegradient (E<sub>G</sub>) 5.6 m/km  
Elvegradient<sub>1085</sub> (G<sub>1085</sub>) 6.2 m/km  
Fellengde(F<sub>L</sub>) 7.3 km  
H<sub>min</sub> 5 moh.  
H<sub>10</sub> 24 moh.  
H<sub>20</sub> 35 moh.  
H<sub>30</sub> 40 moh.  
H<sub>40</sub> 45 moh.  
H<sub>50</sub> 53 moh.  
H<sub>60</sub> 59 moh.  
H<sub>70</sub> 66 moh.  
H<sub>80</sub> 77 moh.  
H<sub>90</sub> 87 moh.  
H<sub>max</sub> 115 moh.  
Bre 0.0 %  
Dyrket mark 17.4 %  
Myr 0.7 %  
Sjø 0.9 %  
Skog 63.7 %  
Snaufjell 0.0 %  
Urban 12.4 %

De estimerte lavvannsindeksene i denne regionen er usikre. Spesielt gjelder dette 5-persentil (vinter) når sjøprosenten er høy. Indekser som ikke er beregnet skyldes manglende parameter(e).

Det er generelt stor usikkerhet i beregninger av lavvannsindeks. Resultatene bør verifiseres mot egne observasjoner eller sammenlignbare målestasjoner.

I nedbørfelt med høy breprosent eller stor innsjøprosent vil tørrværsavrenning (baseflow) ha store bidrag fra disse lagringsmagasinene.



Norges  
vassdrags- og  
energidirektorat

Kartbakgrunn: Statens Kartverk  
Kartdatum: EUREF89 WGS84  
Projeksjon: UTM 33N

N V E



Nedbørfeltgrenser, feltparametere og vannføringsindekser er automatisk generert og kan inneholde feil. Resultatene må kvalitetssikres.

Figur A - 2 Nedbørfelt for Teumbekken ved kulvertinnløp. Området angrenset av rød linje tilsvarer det nye delfeltet. (nevina.nve.no)





## Vedlegg B

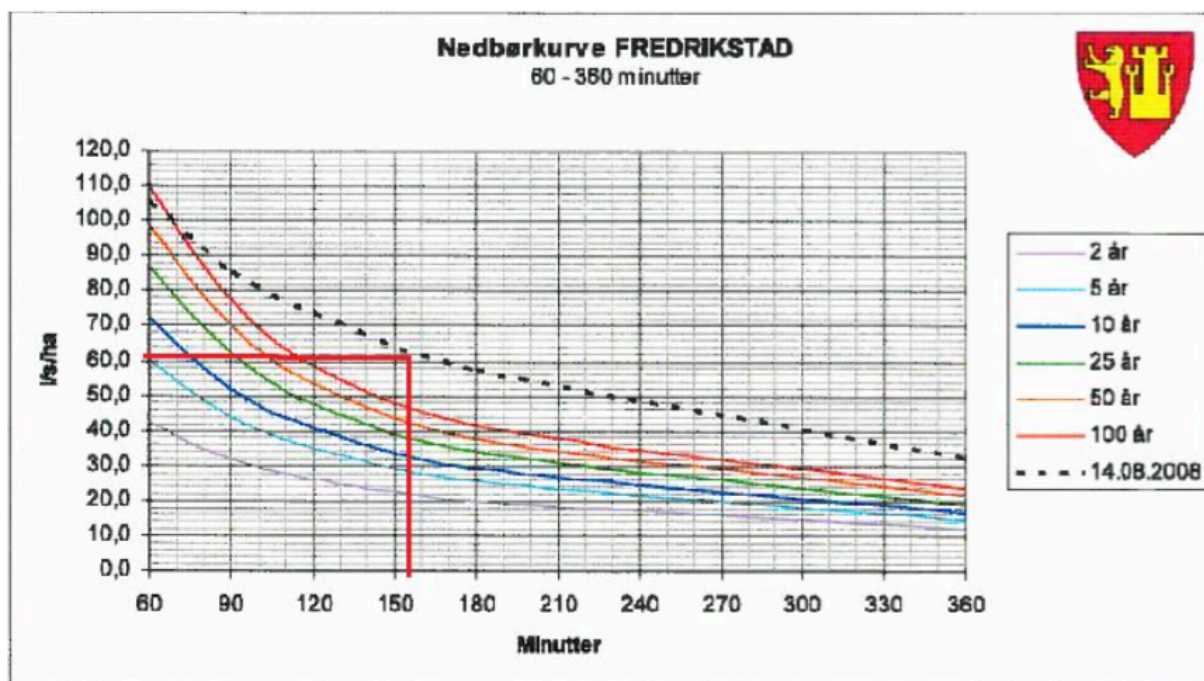
### B – 1 Maksimalvannføring med den rasjonelle metode

A = 1233 ha

$\varphi = 0,55$

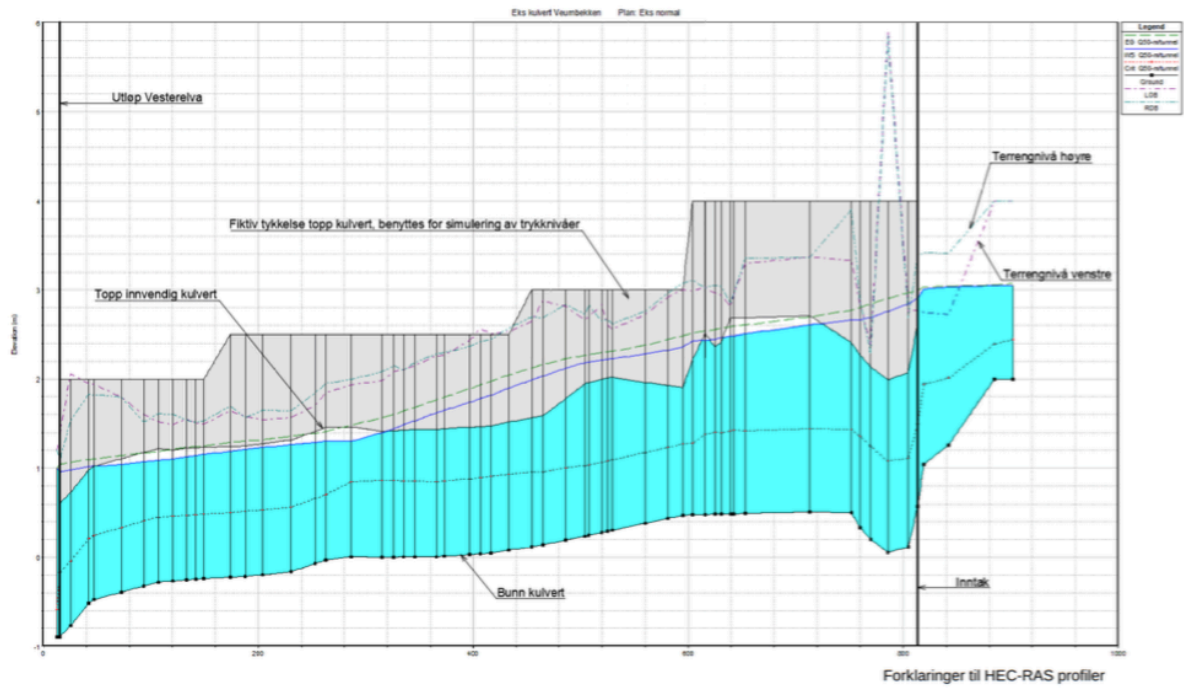
$t_k = 155 \text{ min} \rightarrow i = 60 \text{ l/s/ha}$  (fra IVF-kurven nedenfor)

$Q = \varphi * A * i = 1233 \text{ ha} * 0,55 * 60 \text{ l/s/ha} = \boxed{40,689 \text{ m}^3/\text{s}}$



Figur B - 1 IVF-kurve for Fredrikstad. Med markering for avrenning ved konsentrasjonstiden  $t_k = 155 \text{ min}$ . (Haqi 2015)

B – 2 HEC-RAS profil av Holmenkulverten

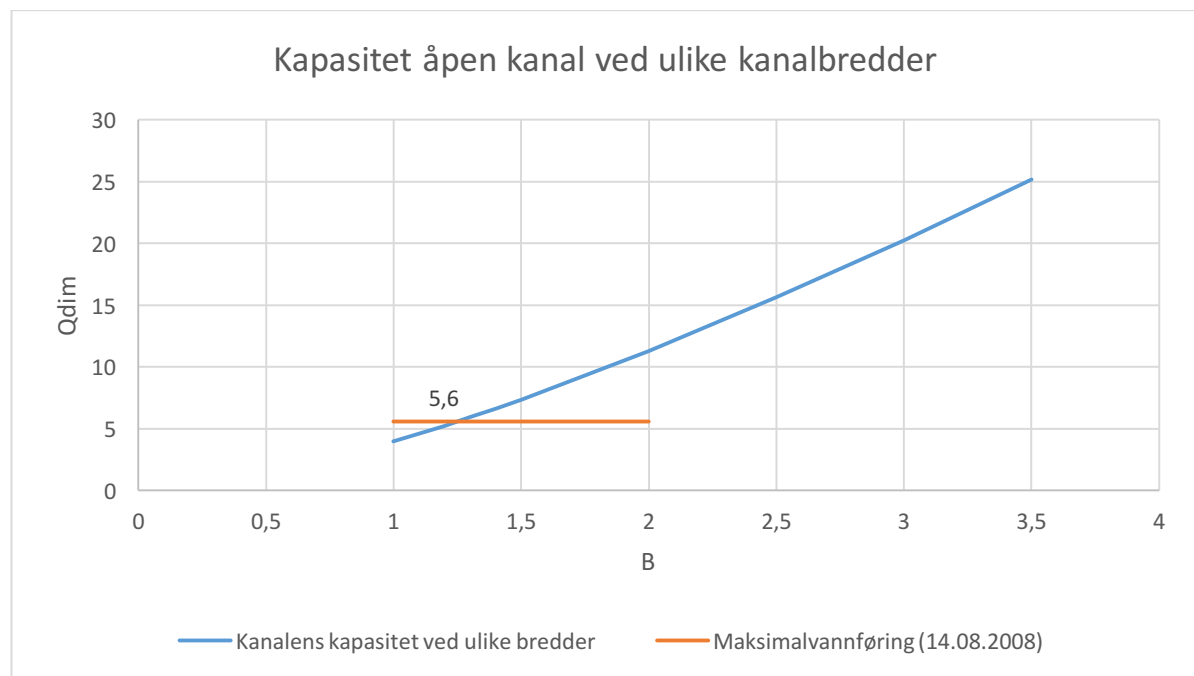


Figur B - 2 HEC-RAS profil av Holmenkulverten slik den ligger i dag. (Norconsult 2015b)

## B – 3 Kanalens kapasitet beregnet med Mannings formel

Tabell B - 1 Kapasitetsberegninger i åpen kanal ved varierende bredder ved Mannings formel.

Q [m <sup>3</sup> /2]	b [m]	A [m <sup>2</sup> ]	R [m]	I	M	h [m]
3,957554277	1	2,4	0,413793103	0,002857143	55,55555556	2,4
4,586330452	1,1	2,64	0,447457627	0,002857143	55,55555556	2,4
4,911309452	1,15	2,76	0,463865546	0,002857143	55,55555556	2,4
5,243003151	1,2	2,88	0,48	0,002857143	55,55555556	2,4
5,925585097	1,3	3,12	0,51147541	0,002857143	55,55555556	2,4
6,632304778	1,4	3,36	0,541935484	0,002857143	55,55555556	2,4
6,99421322	1,45	3,48	0,5568	0,002857143	55,55555556	2,4
7,36157274	1,5	3,6	0,571428571	0,002857143	55,55555556	2,4
11,30029011	2	4,8	0,705882353	0,002857143	55,55555556	2,4
15,63376753	2,5	6	0,821917808	0,002857143	55,55555556	2,4
20,26988252	3	7,2	0,923076923	0,002857143	55,55555556	2,4
25,14433888	3,5	8,4	1,012048193	0,002857143	55,55555556	2,4
30,21044202	4	9,6	1,090909091	0,002857143	55,55555556	2,4
35,43325906	4,5	10,8	1,161290323	0,002857143	55,55555556	2,4
40,78603607	5	12	1,224489796	0,002857143	55,55555556	2,4
51,80223001	6	14,4	1,333333333	0,002857143	55,55555556	2,4
57,43573384	6,5	15,6	1,380530973	0,002857143	55,55555556	2,4



Figur B - 3 Kurve som viser kanelens kapasitet ved ulike bredder, beregnet med Mannings formel.



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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway