



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp

Fakultet for realfag og teknologi

Utvikling av utløpsløsninger for naturbaserte tiltak for overvann

Development of outlet solutions for nature-based
measures for stormwater runoff

Johanna Ulla

Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er avsluttende arbeidet på masterstudiet i Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven har et omfang på 30 studiepoeng og ble utarbeidet over et tidsrom på fem måneder.

En stor takk til hovedveileder Kim Haukeland Paus for nyttige innspill og god hjelp innen modelleringen. Videre rettes det en takk til veileder Vegard Nilsen for hjelp innen planlegging og gjennomføring av laboratorieforsøk. I tillegg ønsker jeg å takke Øyvind Hansen og resten av verkstedet ved NMBU for bygging av utstyr til forsøkene. Og en stor takk til Eivind Handegard for korrekturlesing. Avslutningsvis en stor takk til familie, samboer og venner for god støtte gjennom hele masterperioden.

Ås, Juni 2021

Johanna Ulla

Sammendrag

Klimaendringer fører til en økning i nedbørhendelser som forsterker behovet for lokal overvannshåndtering. Dette skal oppnås ved bruk av naturbaserte løsninger som skal redusere mengden avrenning på overflaten. For å ivareta naturbaserte prinsipper skal avrenningen oppføre seg i størst mulig grad som i naturen ved bruk av naturbaserte tiltak. Ett av hovedprinsippene innen lokal overvannshåndtering er fordrøyning. Ulike tiltak kan benyttes til dette formålet og et viktig funksjonselement i et fordrøyningsanlegg er mengderegulatoren. Denne plasseres ved utløpet og gir en hydraulisk kontroll på videreført vannføring ut av anlegget. I dagens praksis dimensjoneres normalt magasin med regulator for et nedbørtilfelle med et bestemt gjentaksintervall. Om maksimal videreført vannføring er basert på en natur-situasjon vil magasinet med regulator imitere denne situasjonen for dette gjentaksintervallet. Ved regnhendelser som derimot har et lavere gjentaksintervall vil utløpene kunne bryte med naturbaserte prinsipper ved å videreføre en for stor mengde med avrenning. Dette fordi utløp normalt designes for å redusere magasin størrelsen samt minimere risiko for gjentetting.

Målet med oppgaven er å finne en utløpsløsning som i størst mulig grad etterligner et naturlig forløp ved både ulike gjentaksintervall og ulik nedbørvarighet. Tre utløpsløsninger ble designet ved bruk av Natural Resources Conservation Services enhetshydrogram-metoden (NRCS). Løsningene ble testet på laboratoriet for å bestemme utløpskoeffisientene. Videre ble funksjonsevnen undersøkt ved bruk av tre ulike nedbør-avløpsmodeller: NRCS, modifiserte rasjonelle metoden (MRM) og Stormwater Management Model (SWMM). Til slutt sammenlignes utløpsløsningen som tilnærmer seg mest et naturlig forløp med virvelkammer som eksempel på utløpsløsning som er effektiv til å videreføre vannføringer ved lave trykkehøyder.

Utløpsløsning 2, som består av et rektangel og et sirkulært utløp ovenfor, ble løsningen som i størst grad etterligner avrenningsforløpet til en natur-situasjon. NRCS og MRM resultatene tyder på at løsningen oppnår et tilnærmet likt forløp som i naturen ved ulike nedbørhendelser. SWMM viste til en økning i forskjell mellom spissavrenningen ved lavere gjentaksintervall. Her ble det tatt hensyn til grunnens infiltrasjonskapasitet i motsetning til de andre nedbør-avløpsmodellene. Resultatene viser at utløpet er overdimensjonert, da spissavrenningen ved de fleste nedbørhendelsene er større enn i naturen. Sammenligning med et virvelkammer viste at utløpsløsningen tilnærmer seg mer et naturlig forløp. Den beste utløpsløsningen er tilnærmet vedlikeholdsfri og består av ingen bevegelige deler som krever jevnlig overvåking.

Summary

Climate change leads to an increase in precipitation events that expand the need for decentralized stormwater runoff management. This is achieved by use of nature-based solutions that reduce the amount of surface runoff. In order to preserve nature-based principals the goal is for runoff to behave as in nature in the best way possible by nature-based measures. One of the main principles within stormwater runoff management is retention. Different measures can be used for this purpose and an important element in every retention basin is the flow regulator. This is placed at the outlet and maintains hydraulic control of the continued flow. In current practice the reservoir with a regulator is dimensioned for a precipitation event with a certain return period. If the maximal continued flow is based on a nature-situation the reservoir with a regulator will imitate this situation for that return period. At precipitation events with shorter return periods the outlet will break with nature-based principles by releasing a too large amount of runoff. This is because the outlet normally is designed to reduce the reservoirs size and minimize the risk of clogging the outlet.

The goal of this study is to find an outlet solution that to the best possible extent imitates the flow of surface runoff in nature for different return periods and different rain durations. Three outlet solutions were designed based on the Natural Resources Conservation Services unit hydrograph method (NRCS). The solutions were tested in the laboratory to determine the outlet coefficient. Further the functionality was examined by use of three precipitation-runoff models: NRCS, modified rational method (MRM) and Stormwater Management Model (SWMM). Finally the outlet solution, which imitates the flow of surface run-off in nature the most, was compared to a vortex chamber as an example for an outlet solution which is effective at giving a continued flow at low pressureheads.

Outlet solution 2, which consists of a rectangular and circular outlet on top, proved to be the solution that imitates a natural flow the most. NRCS and MRM results suggest that the solution almost achieved a natural flow at different precipitation events. SWMM showed an increase in the difference between the maximal amount of runoff at shorter return periods. SWMM takes into account the soils infiltration capacity unlike the other precipitation-runoff models. The results showed that the outlet was designed too big since the maximal amount of runoff at most precipitation events was too large. Comparison with a vortex chamber indicated that the outlet solution approaches runoff in nature the most. The best solution is almost maintenance free and consists of no movable parts which require continued surveillance.

Innholdsfortegnelse

FORORD	I
SAMMENDRAG	II
SUMMARY	III
INNHALDSFORTEGNELSE	IV
FIGURLISTE	VI
TABELLISTE	VIII
1 INNLEDNING	1
1.1 PROBLEMSTILLING	3
1.2 STRUKTUR.....	3
2 BAKGRUNN	4
2.1 NEDBØR	4
2.2 NEDBØR-AVLØPSMODELLER	5
2.2.1 <i>Feltparametere</i>	5
2.2.2 <i>NRCS enhetshydrogram</i>	6
2.2.3 <i>Modifisert rasjonell formel</i>	7
2.2.4 <i>SWMM</i>	8
2.3 FORDRØYNING	9
2.4 MENGDEREGULATOR	10
2.4.1 <i>Utløpsplater</i>	11
2.4.2 <i>Virvelkammer</i>	14
2.4.3 <i>Overløp</i>	15
2.4.4 <i>Fysisk beskrivelse av strømmingen</i>	16
3 METODE	18
3.1 NEDBØR-AVLØPSMODELLER	18
3.1.1 <i>Inngangsdata</i>	18
3.1.2 <i>NRCS enhetshydrogram</i>	20
3.1.3 <i>Modifisert rasjonell metode</i>	21
3.1.4 <i>SWMM</i>	22
3.2 MAGASIN	24
3.3 UTLØPSGEOMETRIER.....	25
3.3.1 <i>Rektangulært utløp</i>	25
3.3.2 <i>Sirkulært utløp</i>	26
3.3.3 <i>Trekantet utløp</i>	27
3.3.4 <i>Trapesformet utløp</i>	29
3.4 FORSØK	30
3.4.1 <i>Utløpsløsninger</i>	30
3.4.2 <i>Oppsett</i>	31
3.4.3 <i>Målinger og databehandling</i>	32
3.5 VIRVELKAMMER	32
4 RESULTAT OG DISKUSJON	34
4.1 PLATEDESIGN	34
4.1.1 <i>Usikkerheter ved design av utløpsløsninger</i>	36
4.2 FORSØKSRESULTATER.....	38
4.2.1 <i>Utløpsløsning 1</i>	38
4.2.2 <i>Utløpsløsning 2</i>	39

4.2.3	<i>Utløpsløsning 3</i>	40
4.2.4	<i>Usikkerheter ved målingene og databehandling</i>	42
4.3	NEDBØR-AVLØPSMODELLER	43
4.3.1	<i>NRCS</i>	44
4.3.2	<i>MRM</i>	47
4.3.3	<i>SWMM</i>	49
4.3.4	<i>Sammenligning modelleringsresultater</i>	53
4.3.5	<i>Forskjeller mellom nedbør-avløpsmodellene</i>	55
4.4	PRAKTISK ANVENDBARHET AV RESULTATENE	56
4.4.1	<i>Virvelkammer</i>	57
4.5	VIDERE ARBEID.....	59
5	KONKLUSJON	61
	REFERANSER	63
	VEDLEGG	66

Figurliste

FIGUR 1: VANNFØRINGSKURVE UT AV ET MAGASIN SOM ER DIMENSJONERT FOR ET GJENTAKSINTERVALL PÅ 20 ÅR SAMT FORSKJELLEN MELLOM VIDEREFØRT AVRENNING I NATUREN VS. URBAN SITUASJON FOR 2 ÅRS REGNET	2
FIGUR 2: IVF-KURVE FOR OSLO BLINDERN PER JANUAR 2020 (DYRRDAL, 2020)	4
FIGUR 3: KONVERTERING AV NEDBØR HYETOGRAM TIL HYDROGRAM (ØDEGAARD ET AL., 2014)	5
FIGUR 4: HYDROGRAMMER FUNNET VED BRUK AV NRCS ENHETSHYDROGRAMMET (FANG ET AL., 2005).....	7
FIGUR 5: HYDROGRAM TIL EN REGNHENDELSE DER VARIGHETEN ER KORTERE ENN KONSENTRASJONSTIDEN (CLEVELAND ET AL., 2011).....	8
FIGUR 6: HYDROGRAM TIL EN REGNHENDELSE DER VARIGHETEN ER LIK KONSENTRASJONSTIDEN (CLEVELAND ET AL., 2011)	8
FIGUR 7: KARMODELL SOM BESTEMMER MENGDEN MED AVRENNING I SWMM (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY ET AL., 2015).....	9
FIGUR 8: UTLØPSPLATE (READER-HARRIS, 2015).....	11
FIGUR 9: VIRVELKAMMER (LINDHOLM AND AABY, 2007).....	14
FIGUR 10: VANNFØRINGSKURVE FOR STRUPELUKE OG VIRVELKAMMER (LINDHOLM AND AABY, 2007).....	15
FIGUR 11: V-FORMET OG REKTANGULÆRT TYNNPLATET OVERLØP (ELSTAD AND NORÉN, 2008)	15
FIGUR 12: BRED OVERLØPSTERSKEL (ENDRESEN, 2006).....	16
FIGUR 13: PROPORSJONALT OVERLØP (ENDRESEN, 2006).....	16
FIGUR 14: VOLUMSTRØM GJENNOM ET DYKKET UTLØP (MFT AS, 2015).....	16
FIGUR 15: MODELL	18
FIGUR 16: NRCS DIMENSJONSLØST ENHETSHYDROGRAM OG MASSEKURVE (NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE, 2007).....	20
FIGUR 17: SWMM MODELL	22
FIGUR 18: DELVIS FYLT REKTANGULÆRT UTLØP	25
FIGUR 19: TO REKTANGULÆRE UTLØP OVENFOR HVERANDRE	25
FIGUR 20: DELVIS FYLT SIRKULÆRT UTLØP	26
FIGUR 21: TO SIRKULÆRE UTLØP OVENFOR HVERANDRE	26
FIGUR 22: DELVIS FYLT TREKANTET UTLØP	28
FIGUR 23: TO TREKANTETE UTLØP OVENFOR HVERANDRE.....	28
FIGUR 24: DELVIS FYLT TRAPESFORMET UTLØP	29

FIGUR 25: TO TRAPESFORMET UTLØP OVENFOR HVERANDRE	29
FIGUR 26: UTLØPSPLATER.....	30
FIGUR 27: OPPSETT FORSØK.....	31
FIGUR 28: INNLØP, ENERGIDREPER OG UTLØPSPLAT	31
FIGUR 29: VANNFØRINGSKURVEN TIL ET VIRVELKAMMER SOM ER DIMENSJONERT FOR 200 L/S (MILJØ- OG FLUIDTEKNIKK AS, 2021).....	33
FIGUR 30: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ MÅLEDATA TIL PLATE 1	38
FIGUR 31: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ TEORETISK VANNFØRING TIL PLATE 1	39
FIGUR 32: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ MÅLEDATA TIL PLATE 2	39
FIGUR 33: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ TEORETISK VANNFØRING TIL PLATE 2	40
FIGUR 34: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ MÅLEDATA TIL PLATE 3	41
FIGUR 35: VANNFØRINGSKURVE BASERT PÅ TEORETISK VANNFØRING TIL PLATE 3	41
FIGUR 36: ILLUSTRASJON AV STØRRELSES- OG TIDSFORSKJELLEN MELLOM SPISSAVRENNINGEN VED EN NATUR OG URBAN SITUASJON MED FORDRØYNING VED BRUK AV UTLØPSLØSNING 2	43
FIGUR 37: GJENNOMSNIITTLIG SPISSAVRENNINGSFORHOLD BASERT PÅ GJENTAKSINTERVALL VED BRUK AV NRCS	45
FIGUR 38: GJENNOMSNIITTLIG TIDSFORSKJELL BASERT PÅ GJENTAKSINTERVALL VED BRUK AV NRCS	47
FIGUR 39: AVRENNINGSMØNSTER VED BRUK AV MRM.....	47
FIGUR 40: GJENNOMSNIITTLIG SPISSAVRENNINGSFORHOLD BASERT PÅ GJENTAKSINTERVALL VED BRUK AV MRM	49
FIGUR 41: GJENNOMSNIITTLIG SPISSAVRENNINGSFORHOLD BASERT PÅ GJENTAKSINTERVALL VED BRUK AV SWMM	51
FIGUR 42: GJENNOMSNIITTLIG TIDSFORSKJELL BASERT PÅ GJENTAKSINTERVALL VED BRUK AV SWMM.....	53
FIGUR 43: GJENNOMSNIITTLIG SPISSAVRENNINGSFORHOLD VED DIMENSJONERING FOR 20 ÅRS GJENTAKSINTERVALL.....	58
FIGUR 44: GJENNOMSNIITTLIG TIDSFORSKJELL VED DIMENSJONERING FOR 20 ÅRS GJENTAKSINTERVALL	58
FIGUR 45: GJENNOMSNIITTLIG SPISSAVRENNINGSFORHOLD VED DIMENSJONERING FOR 200 ÅRS GJENTAKSINTERVALL.....	59
FIGUR 46: GJENNOMSNIITTLIG TIDSFORSKJELL VED DIMENSJONERING FOR 200 ÅRS GJENTAKSINTERVALL	59

Tabelliste

TABELL 1: VEILEDENDE AVRENNINGSKOEFFISIENTER FOR NEDBØRFELT (STENIUS ET AL., 2015).....	6
TABELL 2: UTLØPSKOEFFISIENTER FOR SIRKULÆRE UTLØP (VLOTMAN, 1989)	12
TABELL 3: UTLØPSKOEFFISIENTER FOR REKTANGULÆRE UTLØP (VLOTMAN, 1989).....	13
TABELL 4: FELTPARAMETERE	19
TABELL 5: IVF-STATISTIKK FRA MÅLESTASJONEN VED OSLO BLINDERN BASERT PÅ DATA FRA 1968 TIL 2017 (NORSK KLIMASERVISENTER, 2017)	19
TABELL 6: PARAMETERE FOR NEDBØRFELTENE I SWMM	23
TABELL 7: MÅL OG UTLØPSKOEFFISIENTER TIL PLATE 1 I ORIGINAL OG NEDSKALERT STØRRELSE	34
TABELL 8: MÅL OG UTLØPSKOEFFISIENTER TIL PLATE 2 I ORIGINAL OG NEDSKALERT STØRRELSE	35
TABELL 9: MÅL OG UTLØPSKOEFFISIENTER TIL PLATE 3 I ORIGINAL OG NEDSKALERT STØRRELSE	35
TABELL 10: GYLDIGHETSOMRÅDE TIL NRCS VED ORIGINAL PLATE STØRRELSE	37
TABELL 11: GYLDIGHETSOMRÅDE TIL NRCS VED NEDSKALERTE PLATE STØRRELSE	37
TABELL 12: SPISSAVRENNINGSFORHOLD VED BRUK AV NRCS.....	44
TABELL 13: TIDSFORSKJELL MELLOM SPISSAVRENNINGENE VED BRUK AV NRCS	46
TABELL 14: SPISSAVRENNINGSFORHOLD VED BRUK AV MRM	48
TABELL 15: SPISSAVRENNINGSFORHOLD VED BRUK AV SWMM.....	50
TABELL 16: TIDSFORSKJELL MELLOM SPISSAVRENNINGENE VED BRUK AV SWMM	52
TABELL 17: MÅLEDATA FRA FØRSTE FORSØK MED PLATE 1	66
TABELL 18: MÅLEDATA FRA ANDRE FORSØK MED PLATE 1	66
TABELL 19: MÅLEDATA FRA FØRSTE FORSØK MED PLATE 2	67
TABELL 20: MÅLEDATA FRA ANDRE FORSØK MED PLATE 2	67
TABELL 21: MÅLEDATA FRA FØRSTE FORSØK MED PLATE 3	68
TABELL 22: MÅLEDATA FRA ANDRE FORSØK MED PLATE 3	68

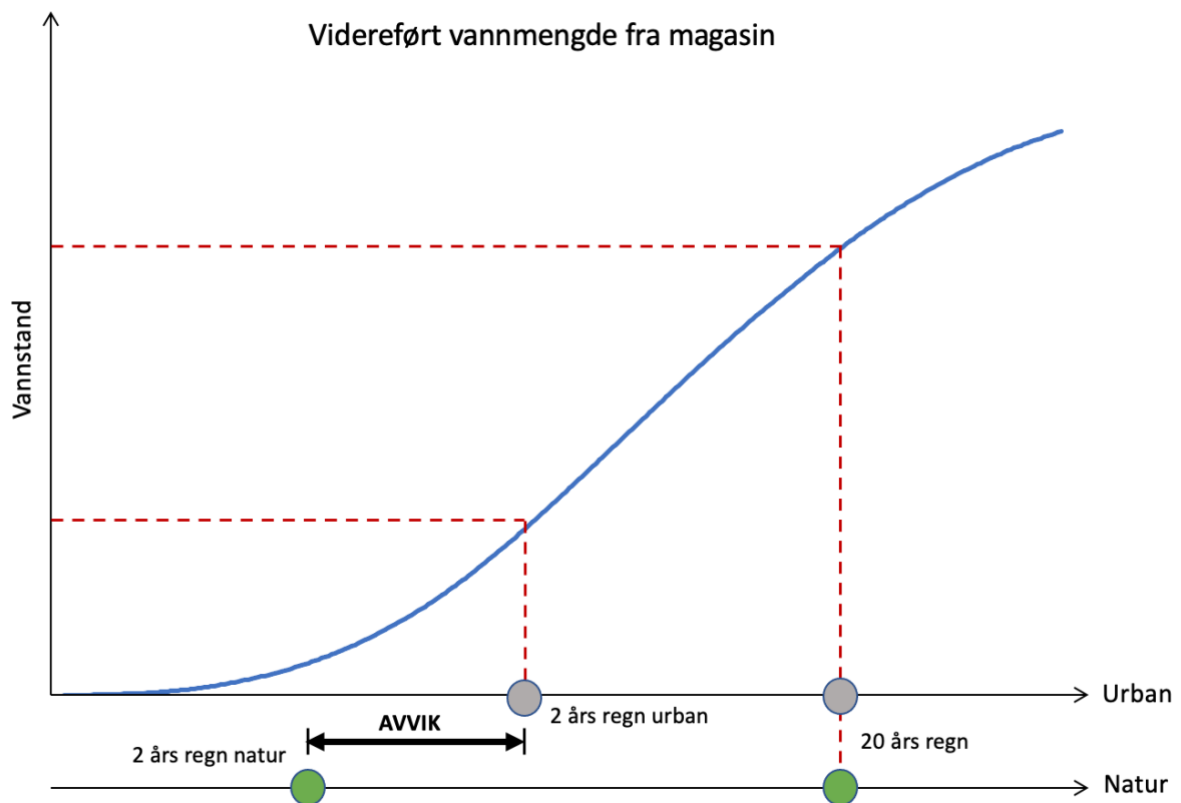
1 Innledning

Overvann anses som en stor utfordring fordi det kan føre til skader på infrastruktur, bygninger, miljø og helse. Miljødirektoratet definerer overvannshåndtering som lokal disponering, trygg bortledning og eventuelt behandling av overvann (Miljødirektoratet, 2020). Flere faktorer påvirker mengden overvann i ett område, deriblant nedbørintensiteten og varigheten. I følge NCCS rapporten Klima i Norge 2100, vil globaloppvarming føre til en økning i antall dager med nedbør samt en styrking av nedbørintensiteten (Hanssen-Bauer et al., 2015). Økningen vil ha størst påvirkning på mengden overvann i urbane felt som består av en stor andel tette flater. Forandringen resulterer i mer overvann som renner av hurtigere enn i naturlige felt. Dette baserer seg på at overvann i naturlige felt blir infiltrert i bakken eller fanges av naturlig vegetasjon (Lindholm, 2018). Dagens ledningsnett er ikke utrustet til å kunne håndtere en økende mengde overvann. Faktorer som alder og dimensjon til ledninger påvirker hvor mye overvann som kan håndteres (Lindholm, 2018). For å kontrollere økt mengde avrenning har det blitt større fokus på overvannshåndtering.

Håndtering av overvann skal oppnås ved bruk av naturbaserte løsninger som skal redusere mengden avrenning på overflaten ved å minske andelen tette flater og fordrøye overvannet. Med andre ord vil det si at ved bruk av overvannstiltak skal avrenningen oppføre seg i størst mulig grad som i naturen (Magnussen et al., 2017).

Ett av hovedprinsippene innen lokal overvannshåndtering er fordrøyning av avrenning før infiltrasjon, påslipp på ledningsnettet eller bortledning til resipient. Tiltak som kan benyttes er grønne tak, regnbed, dammer, magasiner, etc. (Lindholm, 2018). Et viktig funksjonselement i fordrøyningsanlegg er utløpet, da dette påvirker mengden av overvann som blir ledet videre. Utløpet fungerer som en mengderegulator med formål å gi en forutsigbar hydraulisk kontroll. Eksempler på utløpsløsninger omfatter strupeledning, strupeutløp og virvelkammer. Sistnevnte er mye brukt løsning i forbindelse med fordrøyningsmagasiner (MFT, 2012). Utløpene er dimensjonert for et bestemt gjentakintervall og fungerer optimalt for denne mengden av nedbør. Ved en regnhendelse som har lavere gjentakintervall enn systemet ble dimensjonert for vil imidlertid det kunne videreføres en større vannføring enn det som ville ha vært tilfelle i naturen. Dette er illustrert i figur 1 som viser vannføringskurven ut av et magasin. I dette tilfellet er utløpet dimensjonert for at et regn med 20 års gjentakintervall ikke skal gi en avrenning som

overgår det som kan forventes i en natur-situasjon. Ved et 2 års regn videreføres en større mengde overvann enn i naturen. Dermed blir vannføringen ut av fordrøyningsanlegget høyere enn det som kan forventes i en natur-situasjon ved et lavere gjentaksintervall. Ved bruk av naturbaserte metoder bør avrenningsmønsteret etterligne ett naturlig forløp for alle regnhendelser, ikke bare ved dimensjonerende gjentaksintervall.



Figur 1: Vannføringskurve ut av et magasin som er dimensjonert for et gjentaksintervall på 20 år samt forskjellen mellom videreført avrenning i naturen vs. urban situasjon for 2 års regnet

For å kunne ta stilling til avrenningsmønsteret i et felt benyttes det nedbør-avløpsmodeller. Det finnes flere metoder som kan brukes for å analysere hvordan avrenningen vil oppføre seg i ett felt. Det vil si at det ikke eksisterer et fasitsvar for hvordan forløpet bør se ut. Dermed er det hensiktsmessig å sammenligne resultatene fra ulike modeller.

1.1 Problemstilling

Formålet med denne oppgaven er å identifisere en utløpsløsning som i størst mulig grad etterligner det vi kan forvente i et naturlig forløp for avrenning uavhengig av regnvarighet og gjentaksintervall. Det vil si at utløpsformen skal påvirke vannstrømningen på en slik måte at avrenningen oppfører seg i størst grad som i et naturlig felt for flere scenarier.

Oppgavens tittel er:

‘Utvikling av utløpsløsninger for naturbaserte tiltak for overvann’

For besvarelse av problemstillingen benyttes følgende delmål:

1. Designe tre utløpsløsninger ved bruk av Natural Resources Conservation Services (NRCS) enhetshydrogram
2. Testing av løsningene på laboratoriet for bestemmelse av vannføringskurver og utløpskoeffisienter
3. Finne gyldighetsområdet til løsningene ved å modellere avrenningen ved ulike nedbørhendelser. Her sammenlignes det resultater fra tre ulike nedbør-avløpsmodeller:
 - a. NRCS enhetshydrogram
 - b. Modifisert rasjonell metode (MRM)
 - c. Stormwater Management Model (SWMM)

1.2 Struktur

Oppgaven er delt inn i seks hovedkapitler. Innledningen gir en introduksjon og presenterer problemstillingen. Bakgrunnskapitlet tar for seg temaer som er relevant for oppgaven. Metoden beskriver fremgangsmåten for funnene. Resultat og diskusjon fremgår i samme kapitel. Til slutt sammenfattes de viktigste resultatene i konklusjonen.

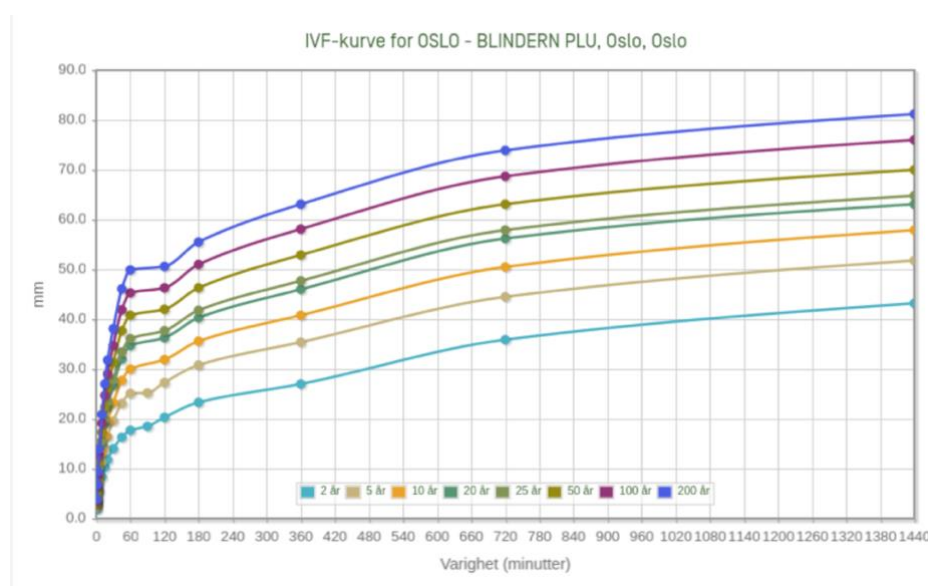
2 Bakgrunn

Dette kapittelet fokuserer på å gi den teoretiske kunnskapen om nedbør, nedbør-avløpsmodeller og mengderegulatorer som behøves for å forstå metoden.

2.1 Nedbør

Nedbør er vann som treffer jordoverflaten i flytende eller fast form. En bestemt nedbørsmengde i løpet av en tidsperiode omtales som intensitet. Frekvensen oppgir hvor ofte en nedbørhendelse med en bestemt intensitet og varighet opptrer (Ødegaard et al., 2014). Gjentakintervall blir ofte brukt som frekvens og er et mål for et gjennomsnittlig antall år for at en bestemt regnintensitet blir overskredet (Dyrrdal, 2020). Statistiske verdier fra Intensitets-Varighets-Frekvens kurver, heretter IVF-kurver, kan benyttes som dimensjonerende nedbør. Kasseregner er et konstruert regn ut ifra IVF-kurver som kan brukes i nedbør-avløpsmodeller som inngangsverdi for nedbøren (Bøyum et al., 1997).

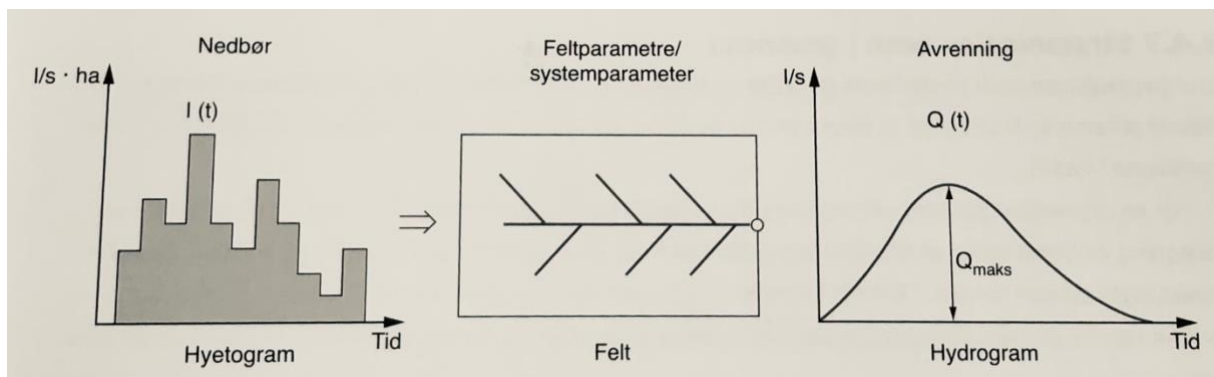
IVF-kurver viser sammenhengen mellom varigheten, intensiteten og frekvensen til en nedbørhendelse (Chin, 2013). Dataen baserer seg på målinger fra nedbørstasjoner og er representativ for et bestemt område. Figur 2 viser IVF kurven for målestasjonen ved Oslo Blindern. Her framstilles varigheten i minutter og intensiteten beskrives i millimeter vannhøyde. Frekvensen er gitt som gjentakintervall fra 2 til 200 år (Dyrrdal, 2020).



Figur 2: IVF-kurve for Oslo Blindern per januar 2020 (Dyrrdal, 2020)

2.2 Nedbør-avløpsmodeller

Nedbør-avløpsmodeller benyttes til å beskrive vannføringen som konsekvens av nedbør i et område. Dette er nyttig ved modellering av flomforløp og for å analysere avrenningsmønstre. Resultatene er avhengig av feltegenskapene, nedbørhendelsen og valg av beregningsmetode (Stenius et al., 2015). Disse blir ofte framstilt i form av hydrogrammer som illustrerer vannets forløp i et bestemt punkt over tid (Norsk Vann, 2021). Figur 3 viser hvordan nedbør hyetogrammer blir konvertert til avrenningshydrogram ved bruk av en nedbør-avløpsmodell med bestemte feltparametere (Ødegaard et al., 2014).



Figur 3: Konvertering av nedbør hyetogram til hydrogram (Ødegaard et al., 2014)

2.2.1 Feltparametere

Egenskapene til et nedbørsfelt kan beskrives ved bruk av feltparametere. Avrenningen i to nedbørsfelt som ligger nære hverandre kan oppføre seg ulikt basert på egenskapene til feltene (Sæterbø et al., 2010). De viktigste parameterne er konsentrasjonstiden, avrenningskoeffisienten, klimafaktor, feltets størrelse samt styrken og varigheten til regnhendelsen.

Ifølge Vassdragshåndboka er konsentrasjonstiden den tiden vannet trenger fra ytterst i feltet til utløpet. Konsentrasjonstiden varierer med feltegenskaper som urbaniseringsgraden, høydeforskjell og lengden til feltet (Sæterbø et al., 2010). Avrenningskoeffisienten beskriver andelen av nedbøren som renner av i form av overvann (Stenius et al., 2015). Størrelsen til koeffisienten varierer mellom 0 og 1. Null tilsvarer flater der all nedbøren blir infiltrert eller magasinert og 1 tilsvarer impermeable flater. Veiledende verdier for avrenningskoeffisienten i ulike nedbørsfelt er vist i tabell 1 (Stenius et al., 2015).

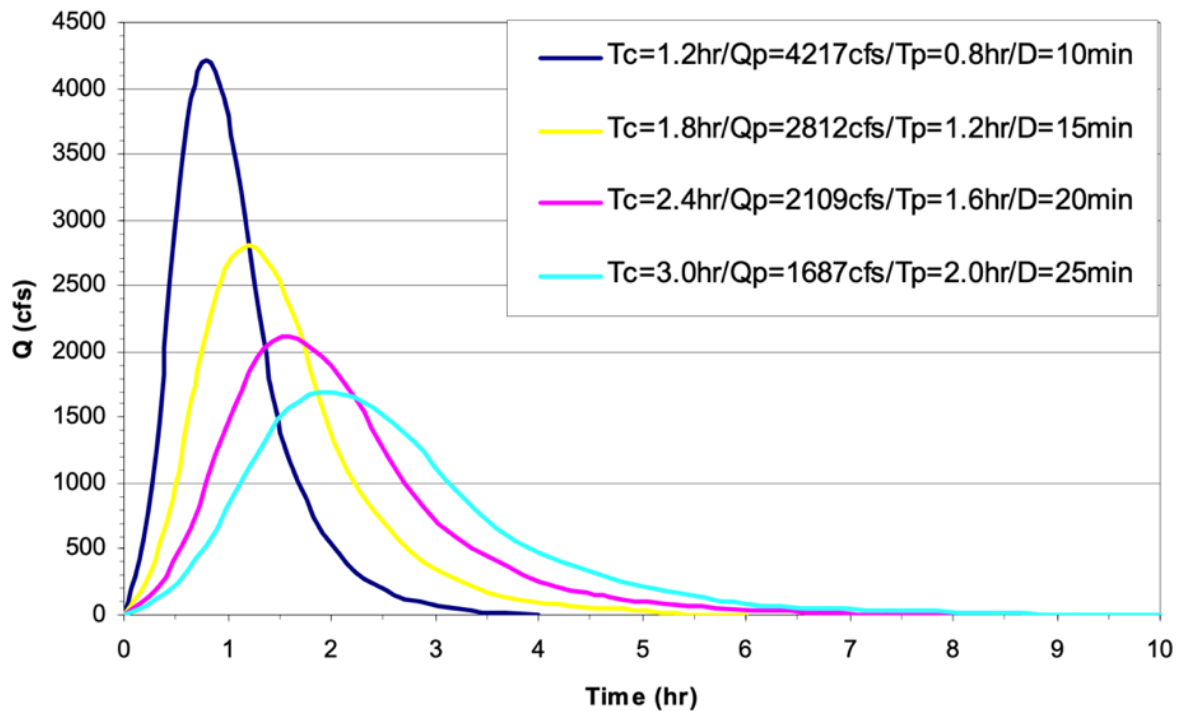
Tabell 1: Veiledende avrenningskoeffisienter for nedbørfelt (Stenius et al., 2015)

Overflatetype	Avrenningsfaktor, C
Betong, asfalt, bart fjell, frosset mark	0,6 – 0,9
Grusveger	0,3 – 0,7
Dyrket mark og parkområder	0,2 – 0,4
Skogsområder	0,2 – 0,5

I NCCS rapporten ‘Klimapåslag for korttidsnedbør’ blir klimafaktoren beskrevet som en faktor som må multipliseres med dagens dimensjonerende nedbørsverdier for å få et estimat på framtidig dimensjonerende nedbør (Dyrrdal and Førland, 2019). Klimafaktoren en sikkerhetsfaktor som skal benyttes ved dimensjonering av fordrøyningsanlegg (Vann- og avløpsetaten, 2017).

2.2.2 NRCS enhetshydrogram

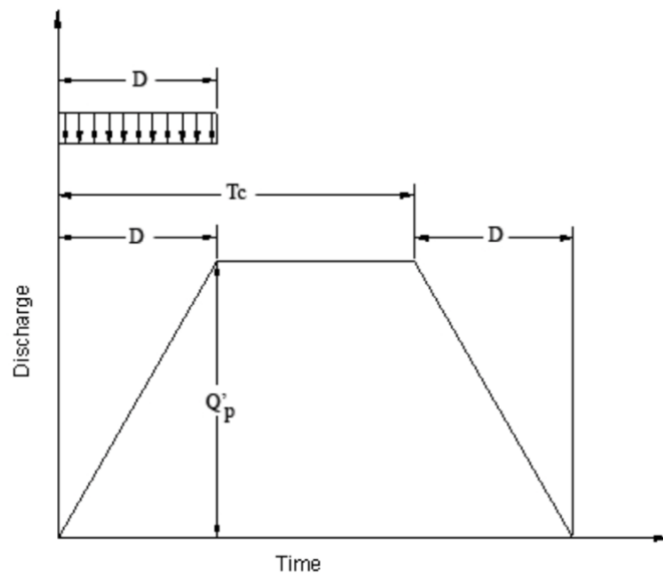
Det dimensjonsløse enhetshydrogrammet til NRCS baserer seg på en mengde avrenning fordelt likt over et felt for en bestemt nedbørhendelse (Natural Resources Conservation Service, 2007). Enhetsdiagrammet ble funnet ved å analysere formen til enhetsdiagrammer fra faktiske nedbørfelt av varierende størrelse og lokalitet (Fang et al., 2005). For små felt er enhetshydrogrammer anvendbar, men metoden er sjeldent brukt i Norge (Bøyum et al., 1997). Figur 4 viser hydrogrammer, som ble funnet ved bruk av NRCS enhetshydrogrammet, for fire felt med ulike konsentrasjonstider og regnhendelser. Den blå kurven representerer feltet med kortest konsentrasjonstid og regnhendelse. De resterende grafene har gradvis lengre konsentrasjonstider og regnvarigheter. Figuren viser i hvor stor grad valg av parameterne har innflytelse på utformingen til hydrogrammet.



Figur 4: Hydrogrammer funnet ved bruk av NRCS enhetshydrogrammet (Fang et al., 2005)

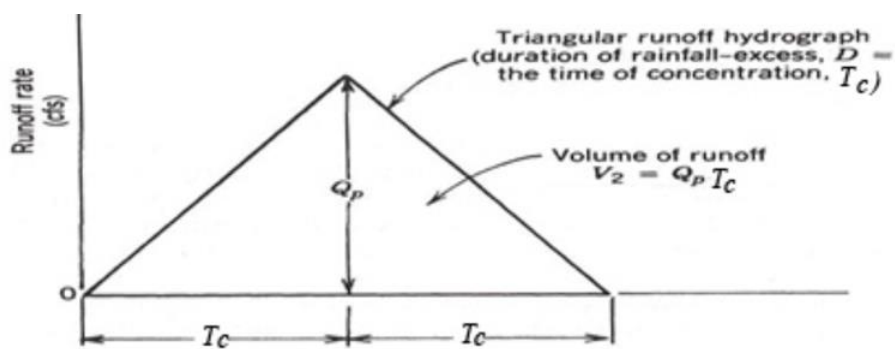
2.2.3 Modifisert rasjonell formel

Den modifiserte rasjonelle metoden, heretter MRM, kan benyttes til å generere hydrogrammer ved bruk av hyteogrammer og kasseregn (Cleveland et al., 2011). Den rasjonelle metoden er mye brukt i Norge og benytter en konstant intensitet som input. Ved bruk av den modifiserte varianten kan intensiteten variere over tid. MRM ble utviklet for å designe fordrøyningsanlegg i små nedbørsfelt. Hydrogrammet til en regnhendelse der varigheten er kortere enn konsentrasjonstiden er tegnet opp i figur 5 (Cleveland et al., 2011). Det resulterende hydrogrammet blir trapesformet når kasseregn benyttes som input. Det samme gjelder når konsentrasjonstiden til feltet er lavere enn regnvarigheten.



Figur 5: Hydrogram til en regnhendelse der varigheten er kortere enn konsentrasjonstiden (Cleveland et al., 2011)

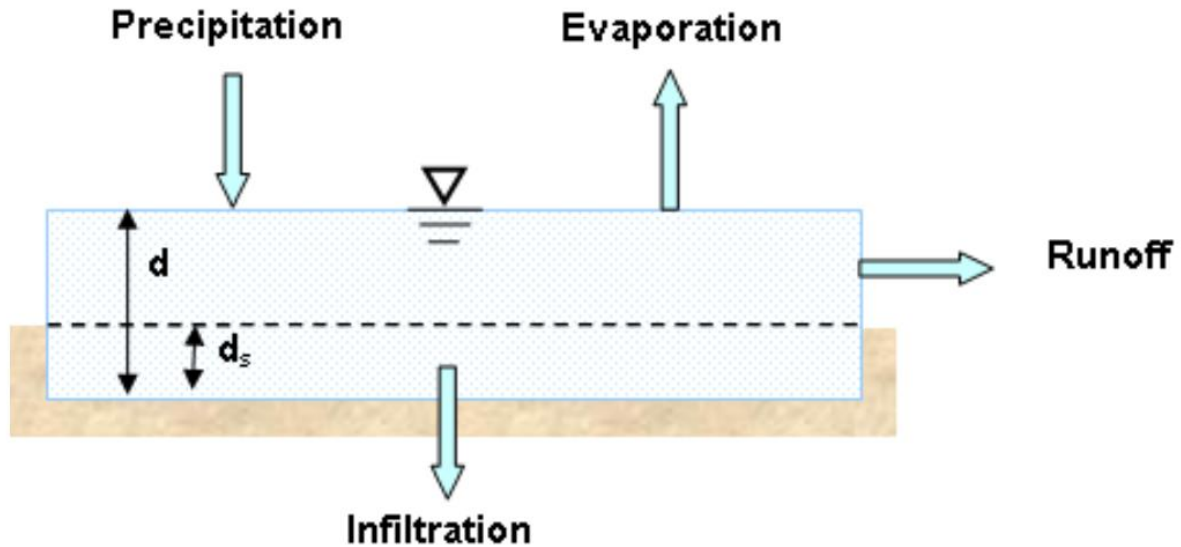
Når regnets varighet og konsentrasjonstiden har lik størrelse blir hydrogrammet trekant formet som vist i figur 6 (Cleveland et al., 2011).



Figur 6: Hydrogram til en regnhendelse der varigheten er lik konsentrasjonstiden (Cleveland et al., 2011)

2.2.4 SWMM

United States Environmental Protection Agency, kort EPA, har utviklet modelleringsverktøyet Storm Water Management Model, heretter SWMM (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2015). Programmet er en nedbør-avløsmoell for enkelthendelser eller langtidsprognoser. Avrenning beregnes ved bruk av en ikke-lineær karmodell som benytter nedbøren som input og tar hensyn til mengden av vann som blir infiltrert eller fordampet i nedbørsfeltet. Denne sammenhengen er illustrert i figur 7 (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2015).



Figur 7: Karmodell som bestemmer mengden med avrenning i SWMM (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2015)

For å bygge opp en modell kan det benyttes ulike elementer som er bygget inn i SWMM. Elementer som er viktig å ha kjentskap til er forklart nedenfor basert på informasjon fra brukermanualen til SWMM (U.S. Environmental Protection Agency et al., 2015).

Regn eller nedbør kan settes inn ved bruk av elementet 'Rain Gage'. Flere regn kan settes inn i modellen og knyttes til ulike nedbørsfelt. Ved bruk av dette kan nedbørsdata lastes inn fra en fil eller defineres ved bruk av parametere som regnintensiteten og tidsintervall. Nedbørsfelt kalles 'Subcatchment' og defineres ved bruk av hydrologiske parametere. Utløpspunktet 'Outfall' må defineres og kan kombineres med fordrøyning ved bruk av 'Storage Units' og utløpsledninger. SWMM gjør det mulig å definere hvert element ulikt, slik at flere nedbørsfelt kan analyseres samtidig

2.3 Fordrøyning

Fordrøyning innenfor overvannshåndtering betyr å bremse ned eller mellomlagre avrenningen for å oppnå en utjevning i vannføringen. Dette gjøres for å begrense maksimale mengden av overvann som blir sluppet på ledningsnettet på ett tidspunkt (Barlindhaug, 2018). Både åpne og lukkede løsninger kan benyttes samt en kombinasjon av disse. Med åpne løsninger menes tiltak som regnbed eller kanaler. I tillegg kan bestemte arealer mellomlagre vann på overflaten for korte perioder. Lukkede løsninger benyttes primært ved et større lagringsbehov og består av nedgravde magasiner (Vann- og avløpsetaten, 2017). Blant fordrøyningsmagasiner skilles det

mellom magasin med åpent volum f.eks. tankmagasin og lukket volum som steinmagasin. Først nevnte er en tradisjonell dokumentert løsning som håndterer best når legemer som grus eller sand blir tilført til magasinet. Lukkede løsninger som kan kombineres med infiltrasjon er en nyere metode som bidrar til å minske nødvendig fordrøyningsvolum (MFT, 2012).

Ved design av et fordrøyningsanlegg er det behov for å vite mengden av vann som skal bli forsinket. Denne mengden kan beskrives som fordrøyningsvolum i ett anlegg. Hydrologisk routing kan benyttes til å bestemme det nødvendige volumet. Denne metoden baserer seg på en kontinuitetslikning som beskriver endringen i et fordrøyningsvolum basert på forskjellen mellom strømmingen inn og ut over tid (Chin, 2013).

Beregning av nødvendig magasin størrelse kan gjennomføres ved bruk av regnvelopmetoden (Norsk Vann, 2012). Her beregnes magasin størrelsen for alle regnvarigheter der den varigheten som gir størst magasin størrelse blir dimensjonerende. Inngangsparameter i regnvelopmetoden er vanligvis midlere vannføring ut fra magasinet. I stedet for å beregne midlere vannføring i utløpet er det vanlig å multiplisere den maksimale vannføringen med en enhetsløs f-faktor som varierer mellom 0 og 1. F-faktoren er forholdstallet mellom midlere og maksimal vannføring ut av magasinet (MFT AS, 2015). En verdi på 1 vil teoretisk tilsvare at maksimal vannføring opptrer ved første vanndråpe ut av magasinet. Generelt vil en lavere f-faktor føre til en økning i dimensjonerende magasin størrelse.

2.4 Mengderegulator

En mengderegulator, ellers også kalt vannføringsregulator, begrenser vannmengden som blir transportert ut av et fordrøyningsanlegg eller regnvannsoverløp. Denne plasseres ved utløpet av magasinet og det finnes ulike løsninger på markedet. Ifølge VA-Miljøblad har alle typer regulatorer følgende felles funksjonskrav (MFT AS, 2015):

- Nøyaktighet
- Tilstoppingsrisiko
- By-pas
- Drift

Det kreves at regulatoren har god hydraulisk kontroll og har en nøyaktighet med et maksimalt avvik på 10% fra dimensjonerende videreført mengde. Potensiell tilstopping fra legemer som sand eller grus må tas hensyn til og for overvann anbefales det at utløpets diameter ikke bør være mindre en 65mm. I tillegg må regulatoren plasseres slik at det er mulighet for vedlikehold (MFT AS, 2015). I Norge er de mest brukte mengderegulatorene strupeledning, strupet utløp og virvelkammer (Lindholm and Aaby, 2007). Strupeledninger blir ikke benyttet i like stor grad lenger da løsningen ikke er nøyaktig nok i henhold til det ovennevnte kravet. I tillegg kan overløp benyttes som mengderegulator ved både åpne og lukkede fordrøyningsløsninger (Endresen, 2006).

2.4.1 Utløpsplater

Et utløp kan plasseres horisontalt ved bruk av et strupekammer eller vertikalt i et magasin. Som oftest benyttes et vertikalt utløp i bunnen av magasinet slik at minst mulig slam akkumuleres. Et strupet utløp er typisk sirkulært formet og kan monteres med en bevegelig luke, også kalt strupeluke (Lindholm and Aaby, 2007). Figur 8 viser et eksempel av en plate med et sirkulært utløp (Reader-Harris, 2015).



Figur 8: Utløpsplate (Reader-Harris, 2015)

Formen og plasseringen til utløpet påvirker hvordan strømmingen gjennom utløpet oppfører seg (Reader-Harris, 2015). I tillegg bidrar tykkelsen og ruheten til platen til endringer i strømningsforholdet. Hvert utløp har dermed spesifikke egenskaper som gir utslag i

utløpskoeffisienten. Typisk bestemmes koeffisienten eksperimentelt ved å måle strømmingen gjennom utløpet (Reader-Harris, 2015).

For noen geometrier har det blitt bestemt gjennomsnittlige utløpskoeffisienter som gjelder når platen er designet på en bestemt måte. Tabell 2 viser gjennomsnittlige utløpskoeffisienter for sirkulære skarpkantete utløp plassert på en glatt plate (Vlotman, 1989). Det vises verdier for ulike diametere der utløpet er åpent mot atmosfæren, her kalt 'free flow', eller fylt med vann, altså 'submerged flow'.

Tabell 2: Utløpskoeffisienter for sirkulære utløp (Vlotman, 1989)

Orifice diameter 'd' in metres	C_d free flow	C_d submerged flow
0.020	0.61	0.57
0.025	0.62	0.58
0.035	0.64	0.61
0.045	0.63	0.61
0.050	0.62	0.61
0.065	0.61	0.60
≥ 0.075	0.60	0.60

Utløpskoeffisienter for rektangulære utløp som er designet som en sluse er presenterer i tabell 3 (Vlotman, 1989). Det vil si at utløpet er plassert nederst ved undersiden av karet. Utløpskoeffisientene er beskrevet i sammenheng med forholdet mellom vannstanden i karet og høyden til utløpet. I tillegg viser tabellen de tilhørende kontraksjonskoeffisientene til hver måling.

Tabell 3: Utløpskoeffisienter for rektangulære utløp (Vlotman, 1989)

Ratio	Contraction coefficient	Discharge coefficient Eq. 8-6
$n = y_1/w$	δ	C_d
1.50	0.648	0.600
1.60	0.642	0.599
1.70	0.637	0.598
1.80	0.634	0.597
1.90	0.632	0.597
2.00	0.630	0.596
2.20	0.628	0.596
2.40	0.626	0.596
2.80	0.625	0.598
3.00	0.625	0.599
3.50	0.625	0.602
4.00	0.624	0.604
4.50	0.624	0.605
5.00	0.624	0.607

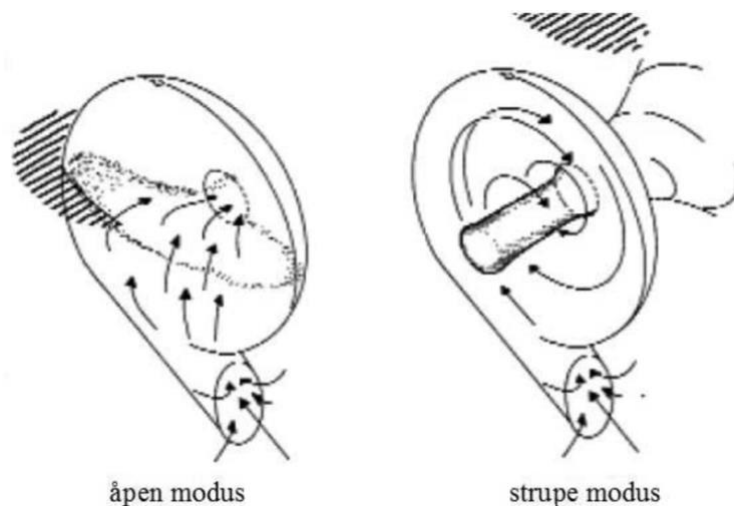
Nicholas og Bobai undersøkte utløpskoeffisienten til et sirkulært og et rektangulært utløp med samme tverrsnittsareal (Musa and Bobai, 2018). Utløpsplatene har begge ett tverrsnittsareal på $0,00015\text{m}^2$. Sirkelformede utløpet har en diameter på $0,0138\text{m}$ og rektangelet har lengden $0,015\text{m}$ og bredden $0,01\text{m}$. De resulterende utløpskoeffisientene er $0,62$ for sirkelen og $0,66$ for rektangelet (Musa and Bobai, 2018).

Paus gjennomførte hydrauliske forsøk på trekantede utløp med avrundede hjørner og fant at utløpskoeffisienten når utløpet er delvis fylt ligger på $0,77$. Ved dykket utløp lå utløpskoeffisienten på $0,55$ (Asplan Viak, 2016).

Abdelrahman, Amir og Mobasher testet seksten utløpsplater for å undersøke hvordan ulike geometrier påvirker utløpskoeffisienten (Abdelrahman et al., 2020). Formene som ble brukt er sirkel, likesidet trekant, kvadrat og rektangel. For hver geometrisk form ble det bygget fire plater med ulike arealtverrsnitt. Tykkelsen var likt for alle platene. Utløpskoeffisienten for sirkulære tverrsnittsarealene varierer mellom $0,535$ og $0,6$. Trekantenes resultat ligger mellom $0,533$ og $0,593$. Kvadratenes utløpskoeffisient er fra $0,533$ til $0,584$. Sist er rektangulære utløpsplatene som ligger mellom $0,510$ til $0,576$ (Abdelrahman et al., 2020).

2.4.2 Virvelkammer

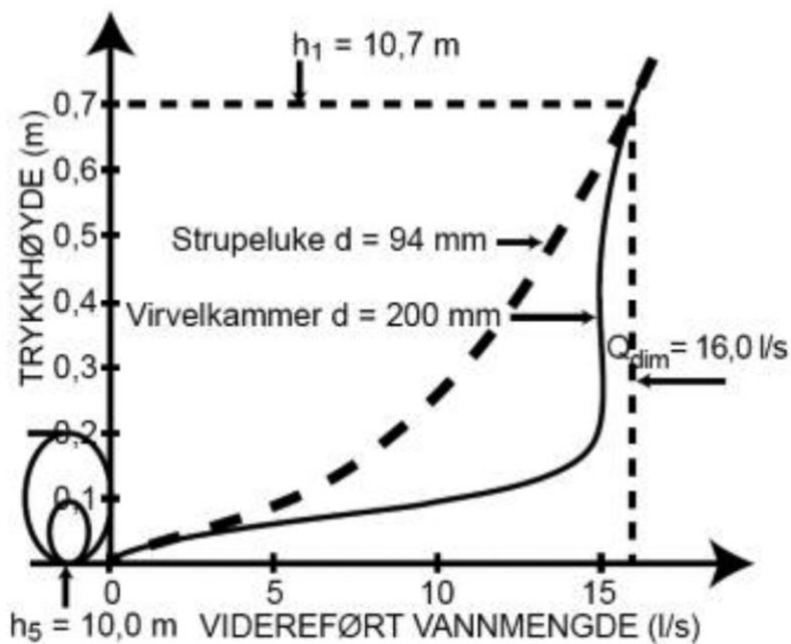
Et virvelkammer består av et sirkulært utløp og kammer, der vannet strømmer inn tangentialt til utløpet. Figur 9 viser to virvelkammer, et i åpen modus og et i strupe modus. Når utløpet er fritt, det vil si at ikke hele arealtverrsnittet er fylt med vann, er modusen åpen. Her strømmer vannet direkte ut av utløpet. Ved strupe modus er utløpet dykket, altså fullstendig fylt med vann, og det dannes en virvel i kammeret (Lindholm and Aaby, 2007).



Figur 9: Virvelkammer (Lindholm and Aaby, 2007)

Det finnes flere typer virvelkammer som er inndelt i to hovedgrupper, våtoppstilt og tørroppstilt. Ved de våtoppstilte virvelkammerne er innløpet åpent, mens de tørroppstilte er tilkoblet rør ved innløpet. For overvann benyttes det som oftest våtoppstilte innløp (MFT AS, 2015).

Vannføringskurven, det vil si vannføringen mot trykkehøyden, gjennom en strupeluke med en diameter på 94mm og et virvelkammer med en diameter på 200mm er illustrert i figur 10 (Lindholm and Aaby, 2007). Begge utløpene gir ønsket trykkehøyde ved den dimensjonerende vannføringen selv om utløpsstørrelsen er ulikt. Dette viser at utløpets diameter kan være større ved bruk av et virvelkammer. Økt utløpsstørrelsen er fordelaktig med tanke på mulig gjentetting av utløpet.

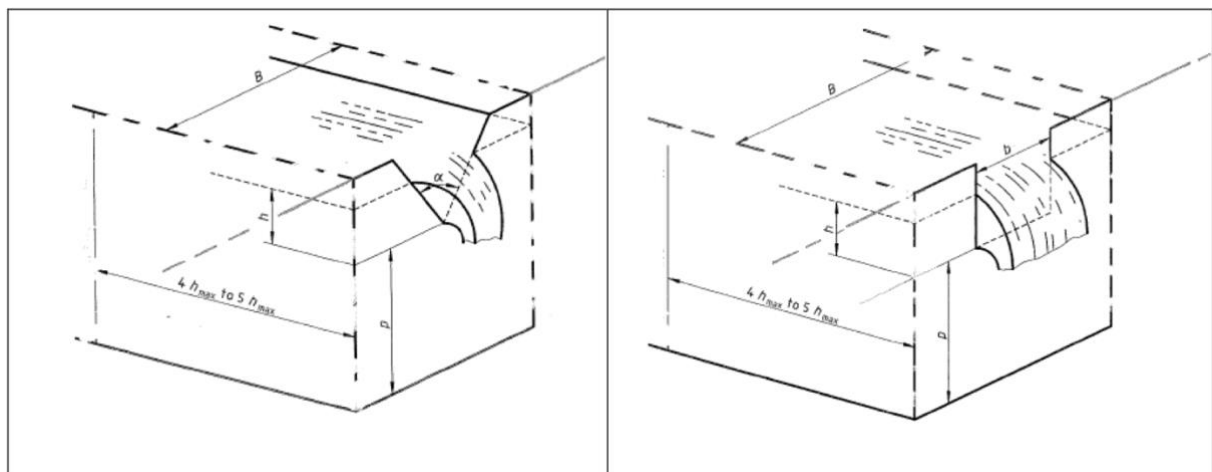


Figur 10: Vannføringskurve for strupeluke og virvelkammer (Lindholm and Aaby, 2007)

Virvelkammer blir anvendt både i fordrøyningsanlegg og renseanlegg på grunn av høy driftssikkerheten (Brombach, 2012).

2.4.3 Overløp

Overløp kan benyttes som mengderegulator i åpne og lukkede fordrøyningsløsninger (Endresen, 2006). Ulike utforminger benyttes og valg av løsning avhengig av ønsket videreført vannmengde og feltegenskapene. Figur 11 viser tegninger av et v-formet og rektangulært overløp (Elstad and Norén, 2008). Begge alternativene er bygget ved bruk av tynne plater.

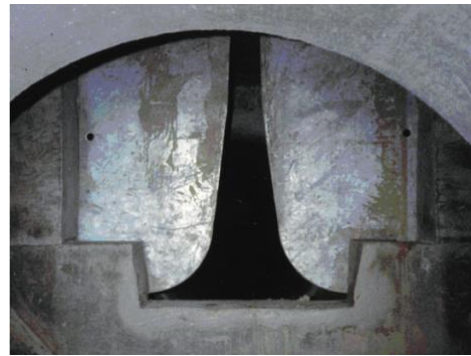


Figur 11: V-formet og rektangulært tynnplattet overløp (Elstad and Norén, 2008)

Andre løsninger kan være bredde terskler som vist i figur 12 (Endresen, 2006). Her er det plassert to overløp i parallell med en opphøyning i midten. Figur 13 illustrer et proporsjonalt overløp som består av en overløpsterskel med maksimal bredde i bunnen (Endresen, 2006). Vannstrømmen strupes inn ved økende vannstand da bredden til utløpet minker med høyden.



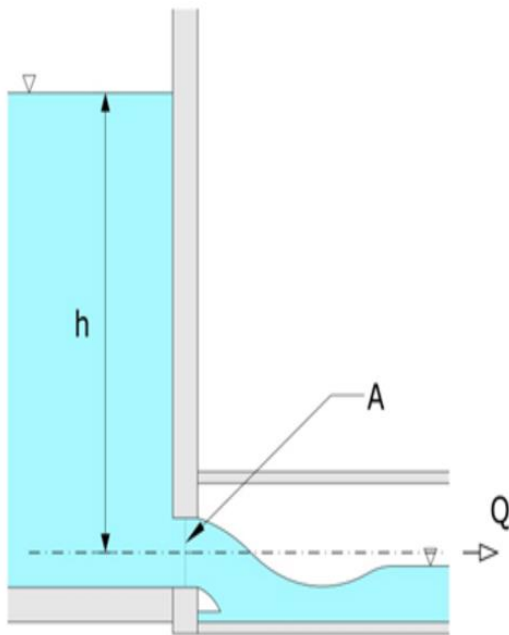
Figur 12: Bred overløpsterskel (Endresen, 2006)



Figur 13: Proporsjonalt overløp (Endresen, 2006)

2.4.4 Fysisk beskrivelse av strømmingen

Figur 14 viser en illustrasjon av volumstrømmen Q gjennom et dykket utløp (MFT AS, 2015). Når et utløp er dykket vil det si at hele arealverrsnittet er fylt med vann. Vannstanden h i karet måles fra midten av utløpet til vannoverflaten. Arealverrsnittet til utløpet betegnes med A .



Figur 14: Volumstrøm gjennom et dykket utløp (MFT AS, 2015)

Ved bruk av annotasjonene fra figur 14 kan strømmingen gjennom et dykket utløp beskrives som vist i formel 1 (MFT AS, 2015).

$$Q = C_D A \sqrt{2gh} \quad (1)$$

Der Q er vannføring [m^3/s] som funksjon av vannstanden h [m], C_D er utløpskoeffisienten [-], A er arealverrsnittet [m^2] til utløpet og g er gravitasjonsakselerasjonen [m/s^2].

Når et utløp er delvis fylt oppfører det seg som et overløp. Ved beregning av volumstrømmen må det bli tatt hensyn til at tverrsnittsarealet varierer med vannstanden. Avhengig av geometrien til utløpet vil bredden variere med høyden.

På differensialform kan volumstrømmen basert på endring i høyde og bredde beskrives som følgende.

$$dQ(h) = b(h) * V(h) * dh \quad (2)$$

Her er $dQ(h)$ endringen i volumstrømmen [m^3/s], $b(h)$ er bredden [m] og $V(h)$ er vannhastigheten [m^2/s]. Alle parameterne er avhengig vannstanden ved et tidspunkt, samt endringen i vannstanden dh [m].

Vannhastigheten basert på vannstanden definert som:

$$V(h) = C_o \sqrt{2gh} \quad (3)$$

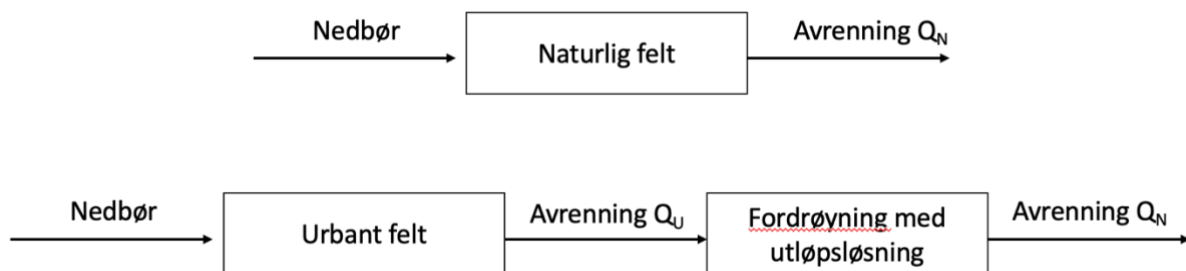
Der C_o er annotasjonen for avløskoeffisienten [-] når utløpet er delvis fylt.

Bredden basert på høyden er avhengig av utløpets geometri. Vannføringen gjennom et delvis fylt utløp kan bestemmes ved å integrere formel 2. Her måles vannstanden h fra bunnen av karet til vannoverflaten.

$$Q(h) = \int_0^h (C_o * b(h) * \sqrt{2gh}) dh \quad (4)$$

3 Metode

For å kunne teste utløpsløsninger for ulike nedbør-situasjoner er det nødvendig å gjennomføre nedbør-avløps-modellering i et nedbørfelt. Programmene som blir benyttet til modelleringen er Excel og SWMM. Grunnlaget for modellene er skissert i figur 15. Samme nedbørhendelse opptrer i to ulike felt, et naturlig og et urbant. Ved bruk av modelleringsverktøyene finnes det et hydrogram for avrenningen i hvert felt. Videre er målet å finne en utløpsløsning som tilnærmer mønsteret til det urbane hydrogrammet til det naturlige.



Figur 15: Modell

3.1 Nedbør-avløpsmodeller

Det benyttes tre modeller til å analyse avrenningen i feltene. Disse er NRCS enhetshydrogrammet, den modifiserte rasjonelle metoden og SWMM. Først presenteres felles feltparameterne som ble brukt til modelleringen. Etterfulgt av formelverket og beskrivelsen av hver metode.

3.1.1 Inngangsdata

Tabell 4 viser parameterne som ble benyttet til å bestemme hydrogrammene til det naturlige og urbane området. Begge feltene har samme nedbørsfelt størrelse, men ulike konsentrasjonstider og avrenningskoeffisienter. Arealet til magasinet er 5% av feltets totale størrelse. Tidsopløsningen benyttes ved beregning av fordrøyningsvolumet og vannstanden i magasinet. Regnvarigheten og gjentakintervall varierer basert på valg av regnhendelse. For

gjentaksintervall under 50 år ble det benyttet en klimafaktor på 1,4. For større gjentaksintervall ble det brukt 1,5.

Tabell 4: Feltparametere

Parameter	Enhet	Verdi	Beskrivelse
A_{felt}	ha	1	Nedbørsfelt
A_{mag}	m ²	500	Areal fordrøyningsmagasin
$t_{c,n}$	min	60	Konsentrasjonstid natur
$t_{c,u}$	min	20	Konsentrasjonstid urban
φ_n	-	0,4	Avrenningskoeffisient natur
φ_u	-	0,9	Avrenningskoeffisient urban
Δt	min	1	Tidsopløsning
t_r	min	10 - 360	Regnvarighet
T	år	2 - 200	Gjentaksintervall
K_f	-	1,4 – 1,5	Klimafaktor

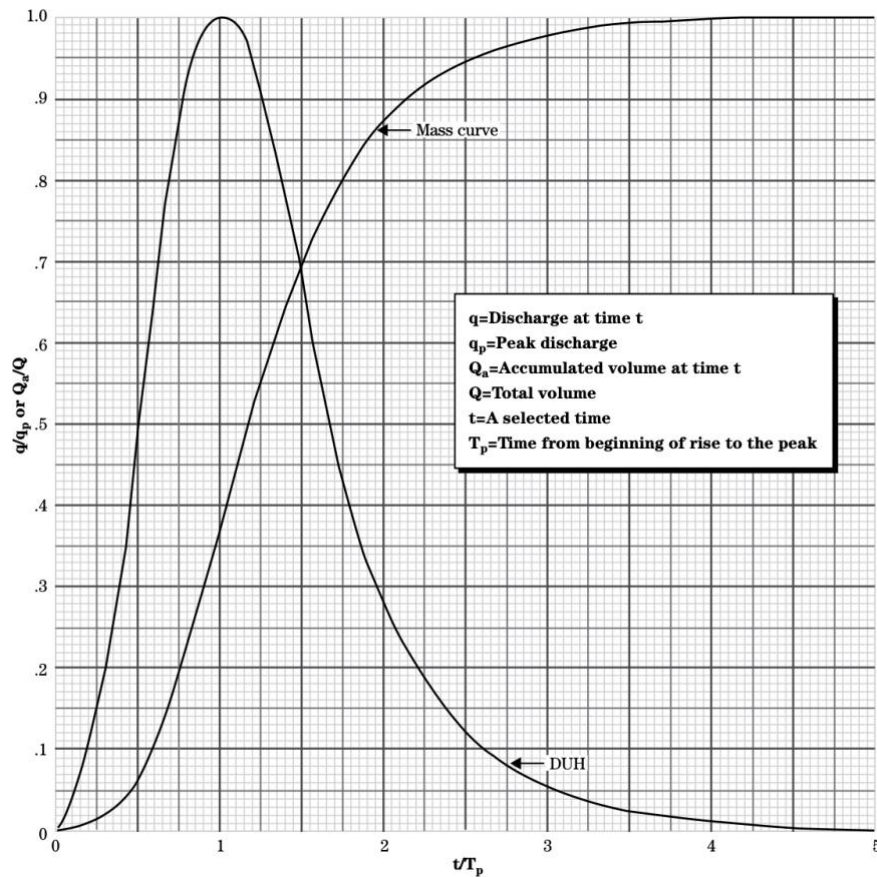
Intensiteten til hver regnhendelse ble funnet ved bruk av IVF-kurven til målestasjonen ved Oslo Blindern. Dataen baserer seg på målinger fra 1968 til 2017. Intensiteten for gjentaksintervall fra 2 til 200 år er oppsummert i tabell 5 (Norsk Klimaservicesenter, 2017). Her finnes verdier for regnvarigheter mellom 10 og 360 minutter. For regnvarigheten på 90 minutter fantes det ikke intensiteter for gjentaksintervall som er større enn 5 år. Verdiene i tabellen er estimert til å være gjennomsnittet av intensiteten til varigheten 60 og 120 minutter.

Tabell 5: IVF-statistikk fra målestasjonen ved Oslo Blindern basert på data fra 1968 til 2017 (Norsk Klimaservicesenter, 2017)

Nedbør (mm) - IVF statistikk Oslo Blindern										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	8,40	10,30	11,80	14,00	16,30	17,70	18,50	20,30	23,30	27,00
5	11,30	14,10	16,40	19,60	23,10	25,10	25,20	27,30	30,80	35,40
10	13,20	16,70	19,50	23,20	27,70	30,00	30,95	31,90	35,60	40,80
20	15,00	19,10	22,40	26,70	32,00	34,70	35,50	36,30	40,30	46,00
25	15,60	19,90	23,30	27,80	33,40	36,10	36,90	37,70	41,80	47,70
50	17,30	22,30	26,20	31,30	37,70	40,80	41,40	42,00	46,30	52,90
100	19,10	24,70	29,00	34,70	41,90	45,30	45,80	46,30	51,00	58,10
200	20,90	27,00	31,80	38,10	46,10	49,90	50,25	50,60	55,50	63,10

3.1.2 NRCS enhetshydrogram

Første metoden som benyttes til å analysere avrenningen til det naturlige og urbane feltet er NRCS metoden. Figur 16 viser NRCS sitt dimensjonsløse enhetshydrogram og massekurven til vannføringen (Natural Resources Conservation Service, 2007). Aksene er normalisert, der horisontal akse er forholdet mellom tiden og tidspunktet til maksimale vannføring. Vertikale akse viser den normaliserte avrenningsraten og mengden (Chin, 2013).



Figur 16: NRCS dimensjonsløst enhetshydrogram og massekurve (Natural Resources Conservation Service, 2007)

Dette dimensjonsløse enhetshydrogrammet kan utnyttes til å finne hydrogrammet i et felt ved en bestemt regnhendelse. Forholdstallene må multipliseres med maksimal avrenningen og dens tidspunkt for feltet man ønsker å undersøke (Chin, 2013).

Tidspunktet til den maksimale avrenningen avhenger av varigheten til regnhendelsen og tidsforskjellen mellom massesenteret til regnhendelsen og spissavrenningen. Formel 5 viser den matematiske sammenhengen mellom variablene (Chin, 2013).

$$T_p = \frac{1}{2}t_r + t_l \quad (5)$$

Der T_p er tidspunktet [min] når spissavrenningen opptrer, t_r er varigheten [min] til nedbørhendelsen og t_l er tidsforskjellen [min] fra massesenteret til nedbørhendelsen til spissavrenningen.

Tidsforskjellen defineres som følgene (Chin, 2013).

$$t_l = 0,6t_c \quad (6)$$

Her er t_c konsentrasjonstiden [min] til nedbørsfeltet.

Spissavrenningen for en bestemt nedbørshendelse finnes ved bruk av ligning 7 (Chin, 2013).

$$Q_p = 2,08 \frac{A \cdot h}{T_p} \quad (7)$$

Q_p er spissavrenningen [m^3/s], A er arealet til nedbørsfeltet [m^2] og h er intensiteten til nedbøren [cm].

Dermed kan hydrogrammet for avrenningen i et felt bestemmes når det er tilstrekkelig informasjon tilgjengelig om nedbørshendelsen.

NRCS anbefaler at varigheten til nedbøren er lavere enn følgende grenser for at enhetsdiagrammet er gyldig.

$$t_r \leq 2t_c \quad (8.a)$$

$$t_r \leq \frac{3}{10} T_p \quad (8.b)$$

3.1.3 Modifisert rasjonell metode

Den andre metoden som benyttes til å finne hydrogrammene til begge feltene ved ulike nedbørhendelser er den modifiserte rasjonelle metoden, kort MRM. Hydrogrammet finnes ved bruk av følgende uttrykk (Cleveland et al., 2011)

$$Q(t) = A \cdot \sum_0^t [\varphi \cdot I(t) \cdot u(t - \tau)] \quad (9)$$

Der Q er volumstrømmen [m^3/s] ved tidspunkt t [min], A er arealet [m^2] til nedbørsfeltet, φ er avrenningskoeffisienten [-] og I er nedbørintensiteten [$\frac{L}{s \cdot ha}$].

Både t og τ er tidsledd som kan varieres ved bruken av MRM. Funksjonen u er avhengig av begge tidsleddene og er den normaliserte varianten av kernel-funksjonen som er definert som vist i ligning 10.

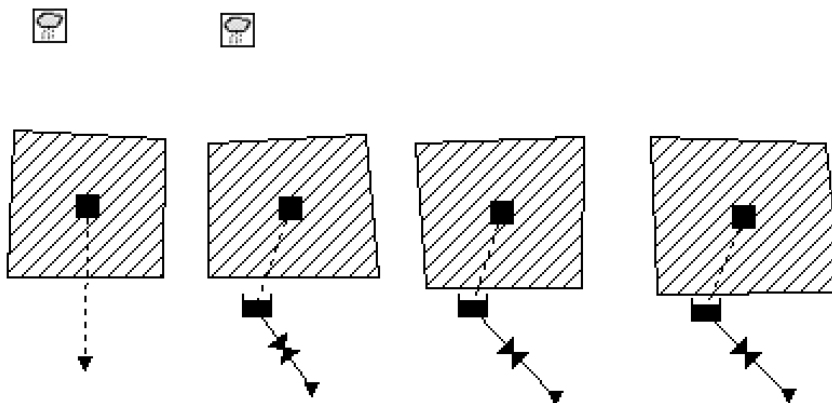
$$f(t) = 0 \quad \text{hvis} \quad t \leq 0 \quad (10.a)$$

$$f(t) = \frac{1}{t_c} \quad \text{hvis} \quad 0 < t \leq t_c \quad (10.b)$$

$$f(t) = 0 \quad \text{hvis} \quad t > t_c \quad (10.c)$$

3.1.4 SWMM

Figur 17 viser en skjematisk tegning av modellen som ble bygget opp i SWMM. Kvadratene med avbildning av regnskyer er regnhendelsene. De fire sjatterte arealene er de ulike nedbørfeltene som skal analyseres. Fra venstre er det naturlige feltet, urbant felt med plateløsning 1, 2 og til slutt 3. Hvert felt er koblet til ett eget utløp. De ulike utløpsløsningene er simulert ved bruk av et fordrøyningsanlegg og utløpsledning med karakteristikken til hver løsning.



Figur 17: SWMM modell

Regnene er delt inn i historisk og fremtidig regn, med forskjellen at det fremtidige regnet er multiplisert med en klimafaktor. Begge regnene simulerer en nedbørhendelse annen hver dag og bruker intensiteter fra IVF-kurven. Det benyttes varigheter fra 10 til 360 minutter og

gjentakintervall fra 2 til 200 år. Det naturlige feltet er koblet til det historiske regnet mens de urbane feltene håndterer fremtidige nedbøren.

Tabell 6 viser felles parameterne til nedbørfeltene, samt parameterne som differensierer de urbane feltene fra det naturlige. Verdier for manningstall og gropmagasinering er valgt ut ifra bruksmanualen fra SWMM.

Tabell 6: Parametere for nedbørfeltene i SWMM

Parameter	Enhet	Verdi	Beskrivelse
Felles			
A_{felt}	ha	1	Areal nedbørsfelt
w	m	100	Bredde nedbørsfelt
S	%	2	Helning nedbørsfelt
n_{imper}	-	0,01	Manningstall for tette flater
n_{per}	-	0,1	Manningstall for permeable flater
Natur			
$\%Imper_n$	%	0	Andel tette flater naturlig felt
$d_{imper,n}$	mm	0	Gropmagasinering ved andelen tette flater
$d_{per,n}$	mm	6,72	Gropmagasinering ved andelen permeable flater
$\%Zero_{imper,n}$	%	25	Andel tette flater uten gropmagasinering
Urban			
$\%Imper_u$	%	100	Andel tette flater urbant felt
$d_{imper,u}$	mm	1,5	Gropmagasinering ved andelen tette flater
$d_{per,u}$	mm	1,5	Gropmagasinering ved andelen permeable flater
$\%Zero_{imper,u}$	%	0	Andel tette flater uten gropmagasinering

3.2 Magasin

For bestemmelse av fordrøyningsvolumet blir det brukt hydrologisk routing. Denne metoden baserer seg på en kontinuitetsligning som beskriver endringen i et fordrøyningsvolum basert på forskjellen mellom strømmingen inn og ut over tid (Chin, 2013)

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - O(t) \quad (11)$$

Der S er magasinvolument [m³], I er mengden [m³/s] inn i magasinet og O er mengden [m³/s] ut av magasinet.

Dette uttrykket kan løses numerisk for fordrøyningsvolumet. Her erstattes bokstaven S med V for volum. I tillegg blir strømmingen inn og ut multiplisert med tiden for å uttrykke mengden i kubikkmeter.

$$V_{mag,1} = V_{mag,0} + (V_{inn,1} - V_{inn,0}) - (V_{ut,1} - V_{ut,0}) \quad (12)$$

Volumet inn og ut kan bestemmes ved å benytte sammenhengen mellom strømmingen og endring i volum over tid

$$V_1 = Q * \Delta t + V_0 \quad (13)$$

Vannstanden i fordrøyningsmagasinet finnes ved bruk av forholdet mellom volumet og arealet til magasinet

$$z = \frac{V_{mag}}{A_{mag}} \quad (14)$$

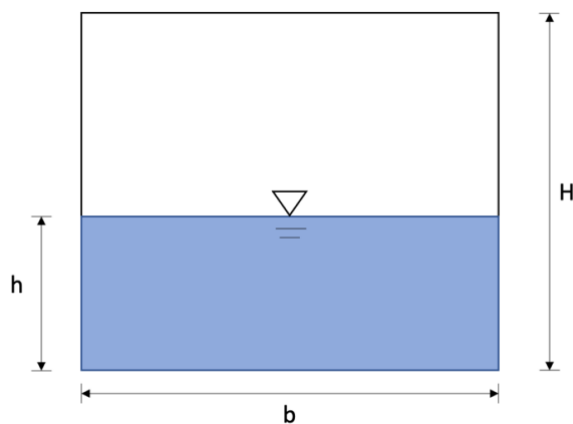
Der z er vannstanden [m] i magasinet.

3.3 Utløpsgeometrier

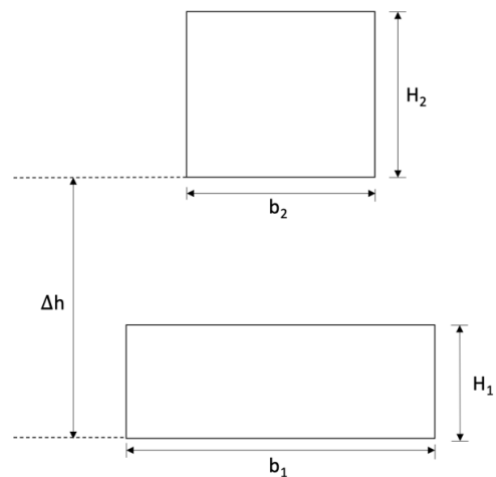
Basert på formen til utløpet beskrives volumstrømmen ut av magasinet ulikt. Følgende delkapitler presenterer ligninger for rektangulære, sirkulære, trekantede og trapesformede utløp.

3.3.1 Rektangulært utløp

Figur 18 viser en tegning av et rektangulært utløp med illustrasjon av vannstanden. Høyden og bredden til utløpet er markert. Ved siden av viser figur 19 en skisse av to rektangulære utløp som er plassert ovenfor hverandre. Hvert utløp har en spesifikk bredde og høyde og avstanden fra bunnen av karet til bunnen av andre utløpet er tegnet inn.



Figur 18: Delvis fylt rektangulært utløp



Figur 19: To rektangulære utløp ovenfor hverandre

For et rektangulært utløp vil bredden være konstant. Ved bruk av ligning 1 finnes et uttrykk for vannføringen gjennom et dykket rektangulært utløp. Videre benyttes formell 4 til å bestemme ligningen til et delvis fylt utløp. Formel 15a og b gjelder for det nedre rektangelet.

$$Q_1 = \frac{2}{3} C_o b_1 \sqrt{2gh^3} \quad \text{for } h < H_1 \quad (15.a)$$

$$Q_1 = C_D b_1 H_1 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_1}{2} \right)} \quad \text{for } h \geq H_1 \quad (15.b)$$

Her er Q volumstrømmen [m^3/s], C_o og C_D er utløpskoeffisientene for et delvis fylt og dykket utløp, b er bredden [m] til utløpet, H er høyden [m] til utløpet, g er gravitasjonsakselerasjonen [m/s^2] og h er vannstanden [m] i karet.

For det øvre utløpet benyttes samme fremgangsmåte til å finne et uttrykk for vannføringen. Her må det bli tatt hensyn til høydeforskjellen fra bunnen av karet til det øvre utløpet. Ligning 16 a, b og c viser henholdsvis vannføringen før vannstanden når det øvre utløpet, et delvis fylt også dykket utløp.

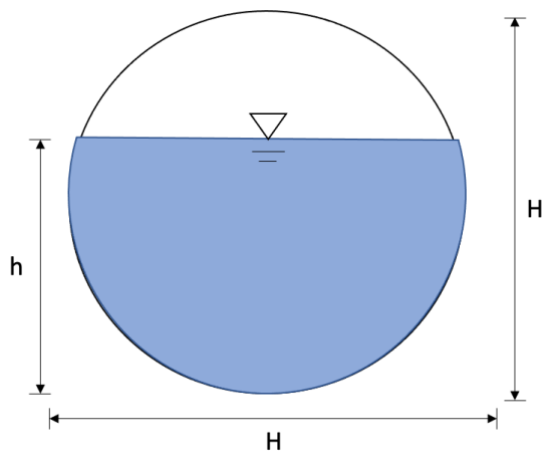
$$Q_2 = 0 \quad \text{for } h \leq \Delta h \quad (16.a)$$

$$Q_2 = \frac{2}{3} C_o b_2 \sqrt{2g} (h - \Delta h)^{\frac{3}{2}} \quad \text{for } \Delta h < h < (\Delta h + H_2) \quad (16.b)$$

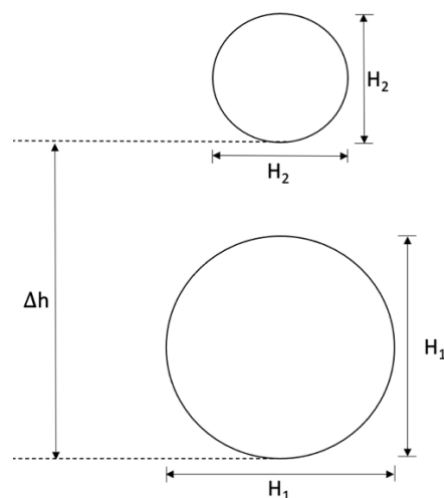
$$Q_2 = C_d b_2 H_2 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_2}{2} - \Delta h \right)} \quad \text{for } h \geq (\Delta h + H_2) \quad (16.c)$$

3.3.2 Sirkulært utløp

Figur 20 viser et sirkulært tverrsnitt som er delvis fylt med vann. Videre viser figur 21 en illustrasjon av to runde utløp ovenfor hverandre. For en sirkel er høyden og bredden like stor, dette er illustrert i figurene ved bruk av bokstaven H . Vannstanden er markert som h og høydeforskjellen fra bunnen av nedre til øvre utløp er Δh .



Figur 20: Delvis fylt sirkulært utløp



Figur 21: To sirkulære utløp ovenfor hverandre

Når et sirkulært utløp fylles med vann, vil bredden varierer med høyden. Dette kan matematisk beskrives som følgende.

$$b(h) = 2\sqrt{hH - h^2} \quad (17)$$

Ved å sette inn dette uttrykket i formel 4 kan vannføringen gjennom et delvis fylt sirkulært utløp beskrives. For et dykket utløp benyttes formel 1 og arealtvernsnittet til en sirkel til å finne volumstrømmen. Ligning 18a og b viser begge uttrykkene.

$$Q_1 = C_o \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(H_1^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{3}{2}h + H_1 \right) (H_1 - h)^{\frac{3}{2}} \right) \quad \text{for } h < H_1 \quad (18.a)$$

$$Q_1 = C_d \frac{\pi}{4} H_1^2 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_1}{2} \right)} \quad \text{for } h \geq H_1 \quad (18.b)$$

Vannføringen gjennom det øvre utløpet finnes ved bruk av ligning 1 og 4. Formel 19 a til c beskriver vannføringen gjennom et øvre sirkulært utløp.

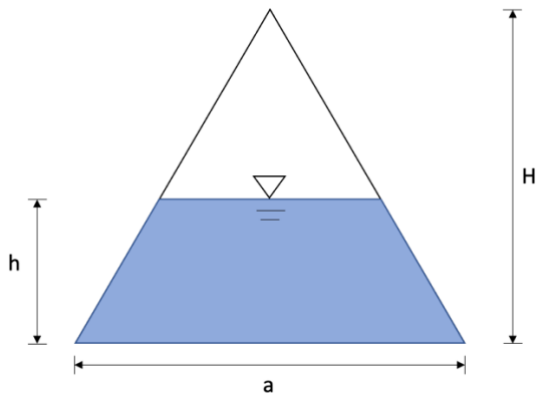
$$Q_2 = 0 \quad \text{for } h \leq \Delta h \quad (19.a)$$

$$Q_2 = C_o \frac{8}{15} \sqrt{2g} \left(H_2^{\frac{5}{2}} - \left(\frac{3}{2}(h - \Delta h) + H_2 \right) (H_2 - (h - \Delta h))^{\frac{3}{2}} \right) \quad \text{for } \Delta h < h < (\Delta h + H_2)$$

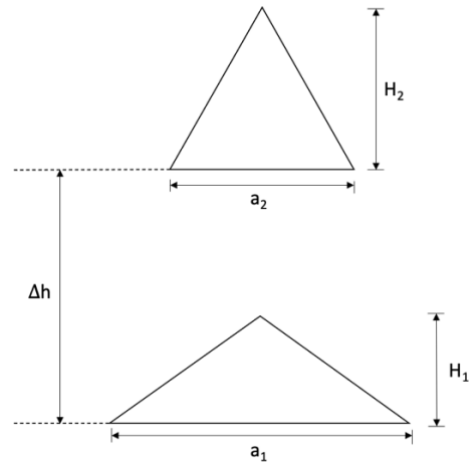
$$Q_2 = C_d \frac{\pi}{4} H_2^2 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_2}{2} - \Delta h \right)} \quad \text{for } h \geq (\Delta h + H_2) \quad (19.c)$$

3.3.3 Trekantet utløp

I venstre bildet (figur 22) ser man et delvis fylt trekantet utløp og på høyre siden (figur 23) er det to trekant formede utløp ovenfor hverandre. Bredden a til grunnflaten, høyden H til trekantene, vannstanden h og høydeforskjellen Δh er tegnet inn.



Figur 22: Delvis fylt trekantet utløp



Figur 23: To trekantete utløp ovenfor hverandre

Bredde-høyde funksjonen gjennom et trekantet utløp kan beskrives som:

$$b(h) = a \left(1 - \frac{h}{H}\right) \quad (20)$$

Der a er bredden [m] til grunnflaten.

Volumstrømmen gjennom utløpene bestemmes på samme måte som for resterende utløpene. Formel 21a og b beskriver vannføringen gjennom et delvis fylt og dykket nedre utløp.

$$Q_1 = C_o a_1 \sqrt{8g} \left(\frac{1}{3} h^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5H_1} h^{\frac{5}{2}} \right) \quad \text{for } h < H_1 \quad (21.a)$$

$$Q_1 = C_d \frac{1}{2} a_1 H_1 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_1}{2} \right)} \quad \text{for } h \geq H_1 \quad (21.b)$$

Vannføringen gjennom det øvre utløpet kan beskrives som vist i formel 22.

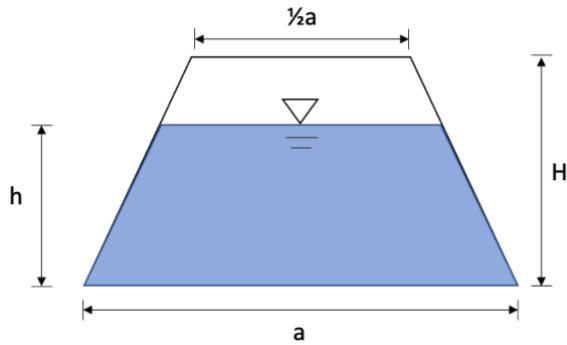
$$Q_2 = 0 \quad \text{for } h \leq \Delta h \quad (22.a)$$

$$Q_2 = C_o a_2 \sqrt{8g} \left(\frac{1}{3} (h - \Delta h)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5H_2} (h - \Delta h)^{\frac{5}{2}} \right) \quad \text{for } \Delta h < h < (\Delta h + H_2) \quad (22.b)$$

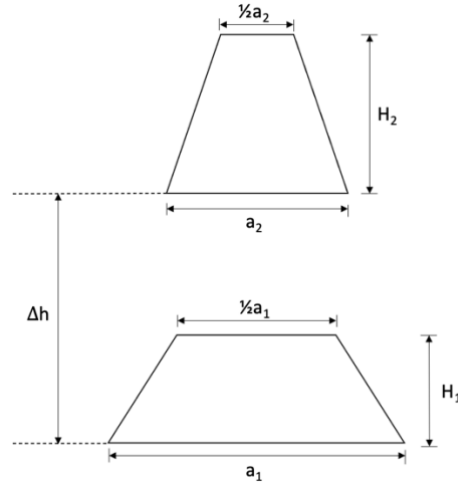
$$Q_2 = C_d \frac{1}{2} a_2 H_2 \sqrt{2g \left(h - \frac{H_2}{2} - \Delta h \right)} \quad \text{for } h \geq (\Delta h + H_2) \quad (22.c)$$

3.3.4 Trapesformet utløp

Et trapesformet utløp med en toppflate som er halvparten av lengden til grunnflaten er illustrert i figur 24. Ved to slike utløp ovenfor hverandre vil dette se ut som vist i figur 25.



Figur 24: Delvis fylt trapesformet utløp



Figur 25: To trapesformet utløp ovenfor hverandre

Når grunnflaten er a og toppflaten er halvparten av denne, kan bredden som funksjon av høyden beskrives som

$$b(h) = \frac{a}{2} \left(2 - \frac{h}{H} \right) \quad (23)$$

Vannføringen gjennom det nedre utløpet finnes som nevnt tidligere og er vist i formel 24.

$$Q_1 = C_o a_1 \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} h^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5H_1} h^{\frac{5}{2}} \right) \quad \text{for } h < H_1 \quad (24.a)$$

$$Q_1 = C_d \frac{3}{4} a_1 H_1 \sqrt{2g} \left(h - \frac{H_1}{2} \right) \quad \text{for } h \geq H_1 \quad (24.b)$$

For det øvre utløpet gjelder følgende uttrykk.

$$Q_2 = 0 \quad \text{for } h \leq \Delta h \quad (25.a)$$

$$Q_2 = C_o a_2 \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} (h - \Delta h)^{\frac{3}{2}} - \frac{1}{5H_2} (h - \Delta h)^{\frac{5}{2}} \right) \quad \text{for } \Delta h < h < (\Delta h + H_2) \quad (25.b)$$

$$Q_2 = C_d \frac{3}{4} a_2 H_2 \sqrt{2g} \left(h - \frac{H_2}{2} - \Delta h \right) \quad \text{for } h \geq (\Delta h + H_2) \quad (25.c)$$

3.4 Forsøk

For å finne løsningen som tilnærmer seg mest en natur-situasjon ved ulike nedbørhendelser ble det valgt tre utløpsløsninger som videre ble bygget og testet på laboratoriet. Følgende delkapitler beskriver valg av løsningene, oppsettet på laboratoriet, gjennomføring av forsøkene og metoden for databehandling.

3.4.1 Utløpsløsninger

Det ble designet utløpsløsninger basert på fire ulike geometrier og mulige kombinasjoner av disse. De ulike løsningene ble valgt basert på forholdet mellom spissavrenningen til det naturlige feltet og spissavrenningen til det urbane feltet etter fordrøyning. I tillegg ble det tatt hensyn til tidsforskjellen mellom spissavrenningen. Dermed ble det funnet tre løsninger som i snitt ga best resultat for ulike regnhendelser. Her ble NRCS metoden benyttet da modellen i Excel tillot å vise resultatene til flere nedbørhendelser samtidig. Det var nødvendig å nedskalere utløpene da det ikke er mulig å oppnå volumstrømmer på større enn omtrent to liter per sekund på laboratoriet. Nedbørsfeltet A_{felt} ble minsket til 0,01ha og konsentrasjonstidene til feltet ble nedskalert. For urbane feltet ble en konsentrasjonstid $t_{c,u}$ på 10 minutter benyttet og for det naturlige feltet ble $t_{c,n}$ valgt til 30 minutter. Videre ble målene multiplisert med en skaleringsfaktor for å finne størrelser som kunne bli benyttet på laboratoriet. Figur 26 viser de tre utløpsløsningene som ble bygget av verkstedet. Fra venstre vises løsningsalternativ 3, etterfulgt av plate 2 og til slutt plate 1.



Figur 26: Utløpsplater

3.4.2 Oppsett

Figur 27 viser oppsettet til forsøkene. Det hvite karet er et strømningskar med innebygd energidreper og en åpning med festemulighet til utløpsplatene, som vist i figuren på høyre side. I tillegg festes en vannslange ved innløpet på toppen av karet, se figur 28. Gjennom utløpene strømmer vannet inn i et svart målekar (figur 27).



Figur 27: Oppsett forsøk



Figur 28: Innløp, energidreper og utløpsplat

Til måling av vannstanden i strømningskaret ble det brukt en linjal. Målebegeret ble fylt til toppen, som tilsvarer 40 liter, og tiden ble målt ved bruk av en stoppeklokke. Lekkasje fra tetningen rundt utløpsplaten ble forsøkt å fange opp med et målebeger. Strømnings- og målekaret ble plassert best mulig i vater.

3.4.3 Målinger og databehandling

Det ble gjennomført to forsøk for hver utløpsløsning. Under forsøkene ble det tatt målinger av vannstanden i strømningskaret, volumet som strømte ut av utløpene og tiden til målekaret ble fylt. I tillegg ble lekkasjen målt i best mulig grad. Før start av målingene ble høydeforskjellen fra bunnen av strømningskaret til første utløp registrert. Første runden med forsøk ble gjennomført den 25.april. Den 28.april ble alle platene testet på nytt.

Målet med testing av utløpsplatene er å finne utløpskoeffisienten og bestemme vannføringkurven til utløpsplatene. For å finne en felles utløpskoeffisient for platen benyttes minste kvadraters metode som bruker målingsdata til å finne en teoretisk løsning som kan beskrive dataen med minst mulig avvik (Bjørnstad and Statistisk sentralbyrå, 2017). Avviket beskrives i dette tilfellet som

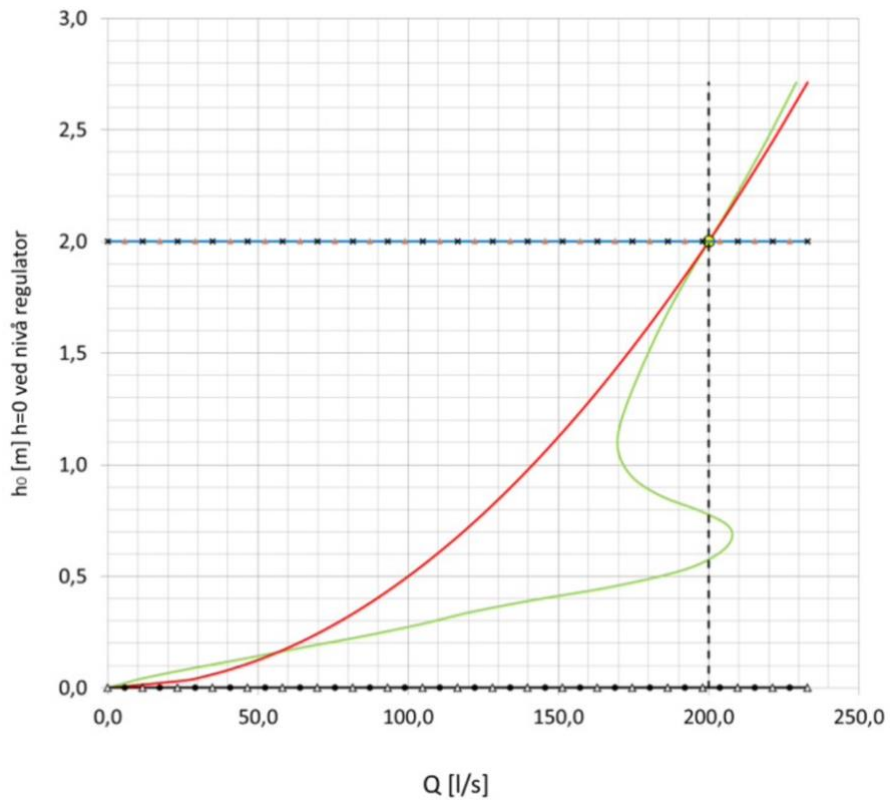
$$SSE = \sum(Q_{mod} - Q)^2 \quad (16)$$

Der SSE er avviket [-], Q_{mod} er den teoretiske vannføringen [m^3/s] og Q er observerte vannføringen [m^3/s].

Den teoretiske vannføringen er avhengig av utløpskoeffisienten og beregnes som summen av volumstrømmen gjennom utløpene. Ved bruk av 'Solver' i Excel kan utløpskoeffisienten med minste avviket mellom målingene og de teoretiske verdiene bestemmes. Vannføringskurven til platene kan plottes basert på målingene eller ekstrapoleres ved bruk av den teoretiske løsningen.

3.5 Virvelkammer

For sammenligning av funksjonsevnen til utløpsløsningen, som etterligner i størst mulig grad et naturlig avrenningsmønster, med en eksisterende løsning har et virvelkammer blitt dimensjonert for regn med henholdsvis 20 og 200 år gjentakintervall. Her har det blitt brukt vannføringskurven til et virvelkammer som er dimensjonert for maksimalt $200 \frac{L}{s}$ som vist i figur 29 (Miljø- og Fluidteknikk AS, 2021). Denne kurven ble nedskalert ved bruk av forholdstall og interpolering for å gi en maksimal avrenning som tilsvarer spissavrenningen ved nedbørhendelser med 20 og 200 års gjentakintervall i et naturlig felt. Varigheten med størst volumstrøm ble valgt som dimensjonsgrunnlag.



Figur 29: Vannføringskurven til et virvelkammer som er dimensjonert for 200 L/s (Miljø- og Fluidteknikk AS, 2021)

4 Resultat og diskusjon

I dette kapittelet blir resultatene presentert og diskutert. Første delkapittel beskriver de valgte utløpsløsningene. Videre blir resultatene fra forsøkene omtalt og videre anvendt i tre nedbør-avløpsmodeller. Til slutt sammenlignes løsningen som tilnærmer seg mest naturlig avrenning med et virvelkammer.

4.1 Platedesign

Første utløpsløsning består av et trapesformet utløp nederst og en trekant øverst. Tabell 7 gir en oversikt over målene og utløpskoeffisienter til plate 1 i original og nedskalert størrelse. De samme koeffisientene ble brukt ved begge størrelsene. I tillegg vises skaleringsfaktoren som ble anvendt for å nedskalere størrelsen til utløpene.

Tabell 7: Mål og utløpskoeffisienter til plate 1 i original og nedskalert størrelse

Plate 1				
Geometri	Parameter	Størrelse	Enhet	Beskrivelse
Original størrelse				
Trapez	H1	0,10	m	Høyde
	a1	0,42	m	Bredde grunnlinje
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,60	-	Utløpskoeffisient dykket
Trekant	H2	0,20	m	Høyde
	a2	0,20	m	Bredde grunnlinje
	Δh	0,18	m	Høydeforskjell
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,50	-	Utløpskoeffisient dykket
Nedskalert størrelse				
	S	0,130	-	Skaleringsfaktor
Trapez	H1	0,013	m	Høyde
	a1	0,055	m	Bredde grunnlinje
Trekant	H2	0,026	m	Høyde
	a2	0,026	m	Bredde grunnlinje
	Δh	0,023	m	Høydeforskjell

Andre platen består av et rektangulært utløp nederst og et sirkulært arealtverrsnitt øverst. Tabell 8 gjengir målene for utløpsløsning 2. For beskrivelse se tabell 7.

Tabell 8: Mål og utløpskoeffisienter til plate 2 i original og nedskalert størrelse

Plate 2				
Geometri	Parameter	Størrelse	Enhet	Beskrivelse
Original størrelse				
Rektangel	H ₁	0,08	m	Høyde
	a ₁	0,30	m	Bredde
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,60	-	Utløpskoeffisient dykket
Sirkel	H ₂	0,18	m	Høyde
	Δh	0,11	m	Høydeforskjell
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,60	-	Utløpskoeffisient dykket
Nedskalert størrelse				
	S	0,150	-	Skaleringsfaktor
Rektangel	H ₁	0,012	m	Høyde
	a ₁	0,045	m	Bredde
Sirkel	H ₂	0,026	m	Høyde
	Δh	0,017	m	Høydeforskjell

Den siste utløpsløsningen består av et trekantformet utløp nederst og et trapesformet utløp ovenfor. Målene til den tredje platen er framstilt i tabell 9. For beskrivelse se tabell 7.

Tabell 9: Mål og utløpskoeffisienter til plate 3 i original og nedskalert størrelse

Plate 3				
Geometri	Parameter	Størrelse	Enhet	Beskrivelse
Original størrelse				
Trekant	H ₁	0,20	m	Høyde
	a ₁	0,40	m	Bredde grunnlinje
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,50	-	Utløpskoeffisient dykket
Trapez	H ₂	0,12	m	Høyde
	a ₂	0,20	m	Bredde grunnlinje
	Δh	0,22	m	Høydeforskjell
	C _o	0,60	-	Utløpskoeffisient fritt
	C _d	0,60	-	Utløpskoeffisient dykket
Nedskalert størrelse				
	S	0,125	-	Skaleringsfaktor
Trekant	H ₁	0,025	m	Høyde
	a ₁	0,050	m	Bredde grunnlinje
Trapez	H ₂	0,015	m	Høyde
	a ₂	0,025	m	Bredde grunnlinje
	Δh	0,028	m	Høydeforskjell

4.1.1 Usikkerheter ved design av utløpsløsninger

For å designe utløpsløsningene måtte antagelser bli gjort om feltet, da ikke ett spesifikt nedbørfelt ble undersøkt. Variasjon i felt- og magasin størrelsen ville ha vært tidskrevende å modellere og måtte i så fall ha blitt ett eget delmål om å undersøke muligheten for bruk av utløpsløsningen ved ulike størrelser. Spesielt med tanke på magasin størrelsen ville det ha vært vanskelig å sammenligne resultatene av vannføringen gjennom utløpene, som er avhengig av vannstanden i magasinet. Nedbørsfeltets areal ble antatt til å være en hektar og magasin størrelsen tilsvarer 5% av feltstørrelsen. På samme måte som ved felt- og magasin størrelsen ble det antatt bestemte konsentrasjonstider for urbane og naturlige feltet. I virkeligheten er konsentrasjonstiden avhengig av feltparametere i ett område.

Utløpskoeffisientene er avhengig av platens utforming og plassering til utløpene. I tillegg må strømningsforholdet etter utløpene tas med i betraktning. I modellen er det antatt at alle utløpene har en fri stråle. For sirkulære utløp ble utløpskoeffisienten antatt å være 0,60 basert på en variasjon fra 0,535 til 0,64 i litteraturen (Abdelrahman et al., 2020; Musa and Bobai, 2018; Vlotman, 1989). Samme utløpskoeffisient brukes ved rektangulære utløp. Her viser samme kildene som nevnt ovenfor til forskjeller fra 0,51 opp til 0,66.

Av praktiske årsaker ble det valgt lavere verdier for utløpskoeffisienten til trekantete utløp enn det litteraturen viser. Det ble funnet begrenset med litteratur der det ble gjennomført forsøk for bestemmelse av utløpskoeffisienten for denne geometrien. Den ene kilden, Abdelrahman et al., 2020 regnet ut at utløpskoeffisienten ligger mellom 0,533 og 0,593. Resultatene baserer seg imidlertid kun på forsøk med dykkede utløp. Asplan Viak, 2016 derimot bestemte at utløpskoeffisienten for en trekant med avrundede hjørner ved ett delvis fylt utløp er 0,77 og for et dykket utløp er 0,55 (Asplan Viak, 2016). Utløpskoeffisienten til trekantete utløpet ble satt til 0,60 for et delvis fylt utløp og 0,50 for et dykket utløp. Dermed ble det brukt lavere verdier enn anbefalt i begge referansene. Dette valget ble gjort fordi det trekantete utløpet som blir brukt i modelleringen har skarpe kanter. I tillegg påpekte verkstedet at det ville være vanskelig å nøyaktig skjære ut utløpene med tanke på symmetri og skarpe hjørner. Spesielt ved et trekantet utløp kunne dem ikke garantere at utløpsformen ble nøyaktig etter målene. Derfor ble utløpskoeffisienten satt lavere enn anbefalt i litteraturen.

Det ble ikke funnet kilder for utløpskoeffisienten til trapesformede utløp. Derfor ble antagelser gjort basert på at et trapes i prinsipp er et delvis fylt trekantet utløp eller ett rektangel som blir smalere med høyden. Grunnet dette ble utløpskoeffisienten satt til 0,60.

NRCS metoden ble anvendt for å designe platene. Som nevnt i metodekapittelet har NRCS enhetshydrogrammet et bestemt gyldighetsområdet som er anbefalt å holde seg innenfor. Tabell 10 og 11 viser hvilke varigheter som befinner seg innenfor og utenfor anbefalingene. Den øvre tabellen betrakter modellen i original størrelse mens den nedre analyserer de nedskalerte platene. Sammenligningen viser at det er en større usikkerhet forbundet ved bruken av NRCS når platene er nedskalert. Dette er fordi konsentrasjonstiden ble halvert som fører til at gyldighetsområdet minsker. Det urbane nedbørsfeltet befinner seg i større grad utenfor anbefalingene. Dermed er det en større usikkerhet forbundet med de urbane resultatene enn de naturlige.

Tabell 10: Gyldighetsområde til NRCS ved original plate størrelse

		NRCS gyldighetsområde									
		Varighet (min)									
Konsentrasjonstid (min)		10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
Urban	20	OK	OK	OK	OK	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
Natur	60	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Nei	Nei

Tabell 11: Gyldighetsområde til NRCS ved nedskalerte plate størrelse

		NRCS gyldighetsområde									
		Varighet (min)									
Konsentrasjonstid (min)		10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
Urban	10	OK	OK	OK	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei	Nei
Natur	30	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Nei	Nei	Nei	Nei

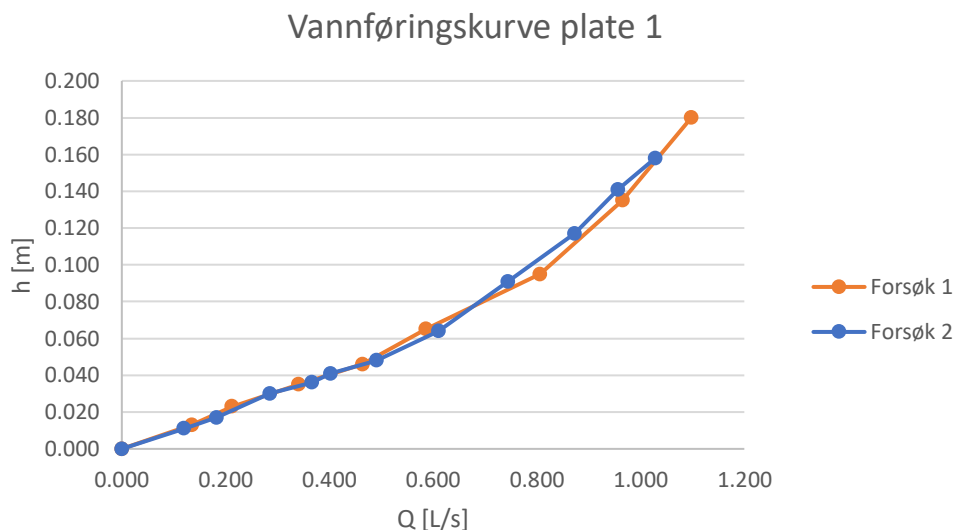
Nedskalering av platene ble oppnådd ved å multiplisere resultatene i original størrelse med en skaleringsfaktor. I tillegg ble konsentrasjonstiden halvert og felt størrelsen ble minket til 0,01 hekta. Arealet til magasinet var fortsatt 5% av størrelsen til nedbørsfeltet. Utenom dette ble det ikke tatt hensyn til flere faktorer. Dermed er det en stor usikkerhet forbundet med testing av de nedskalering platene og gyldigheten til resultatene ved skalering til originalstørrelse.

4.2 Forsøksresultater

Basert på måledata fra forsøkene ble det funnet vannføringskurver til utløpsplatene. I tillegg benyttes minste kvadraters metode til å bestemme utløpskoeffisienten som videre brukes til å beskrive en teoretisk sammenheng mellom målingene.

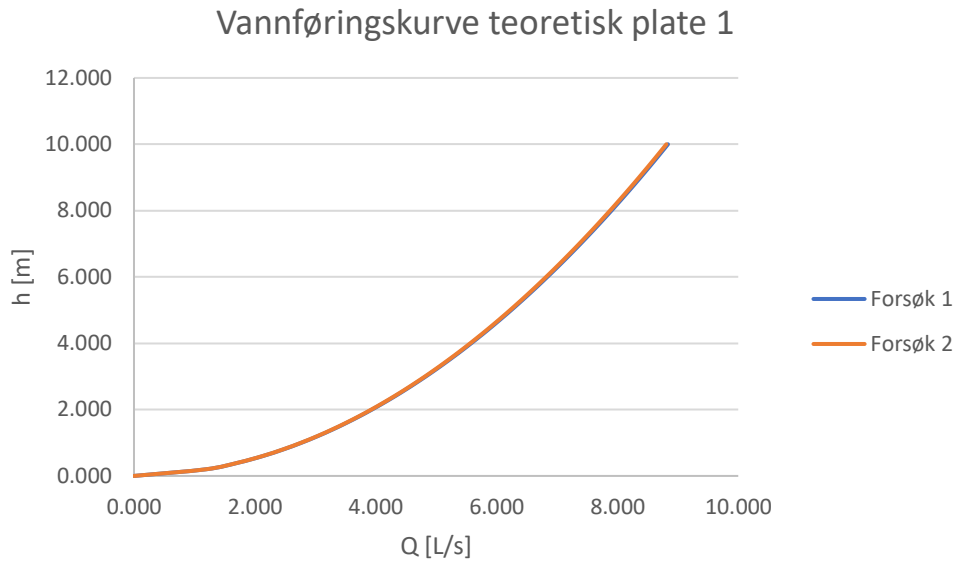
4.2.1 Utløpsløsning 1

Figur 30 viser vannføringskurven til den første utløpsplaten. Dataen baserer seg på målingene fra laboratoriet. Den oransje kurven presenterer data fra første forsøket, og den blå viser målingene fra andre forsøket. Det er større spredning mellom målepunktene ved første forsøket og til sammen ble det gjennomført åtte målinger. Andre runden ga elleve målepunkter med forholdsvis mindre intervaller. Målinger med en vannføring som er lavere enn 0,6 L/s har ett lavt avvik mellom kurvene. Ved høyere strømming vises det større forskjeller mellom kurvene.



Figur 30: Vannføringskurve basert på måledata til plate 1

For de første målingene ga minste kvadraters metode ett avvik SSE på 2% mellom de teoretiske og målte verdiene ved bruk av en felles utløpskoeffisient C_D på 0,725. Samme fremgangsmåte ved forsøk 2 resulterte i ett avvik SSE på 4% når utløpskoeffisienten C_D er 0,723. Vannføringskurvene som ble beregnet ved bruk av de ovennevnte felles utløpskoeffisientene og summen av volumstrømmen gjennom hvert av utløpene presenteres i figur 31. Kurvene overlapper hverandre som tyder på at resultatene stemmer godt overens.

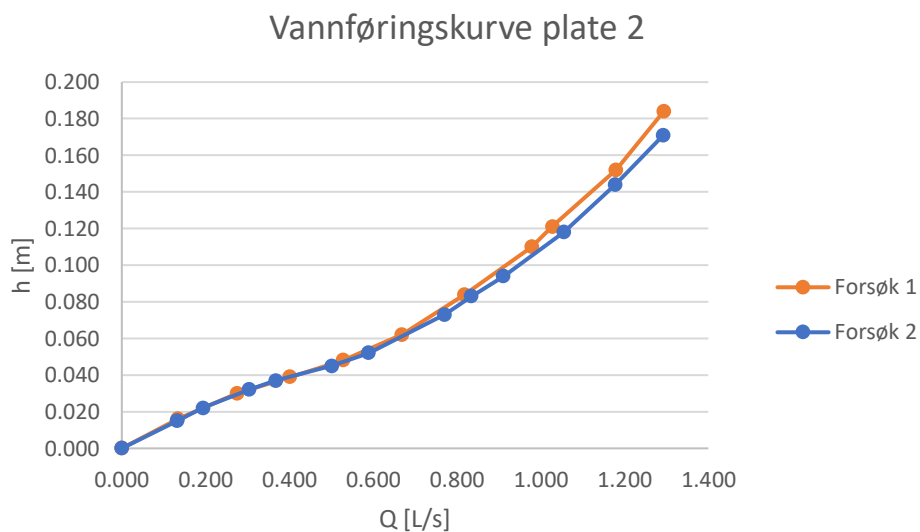


Figur 31: Vannføringskurve basert på teoretisk vannføring til plate 1

For videre bruk i modelleringen blir det benyttet gjennomsnittet av utløpskoeffisientene som ble funnet. Dette tilsvarer en verdi på 0,724 for utløpsplate 1.

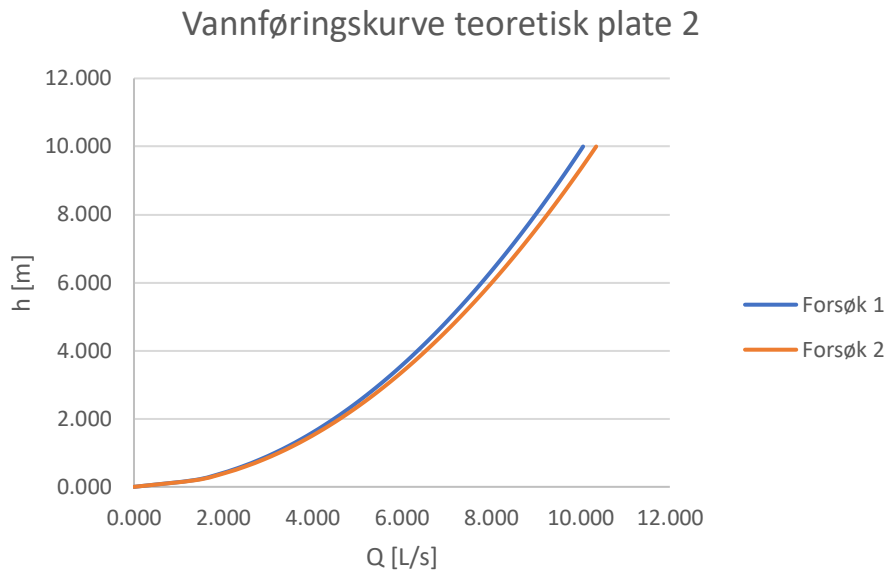
4.2.2 Utløpsløsning 2

Vannføringskurven basert på målingene til den andre utløpsplaten er illustrert i figur 32. Opp til omtrent 0,7 L/s stemmer målingen godt overens. Ved høyere vannføring er et større avvik synlig. Første forsøket ga ti målepunkter mens andre forsøket resulterte i tolv målinger.



Figur 32: Vannføringskurve basert på måledata til plate 2

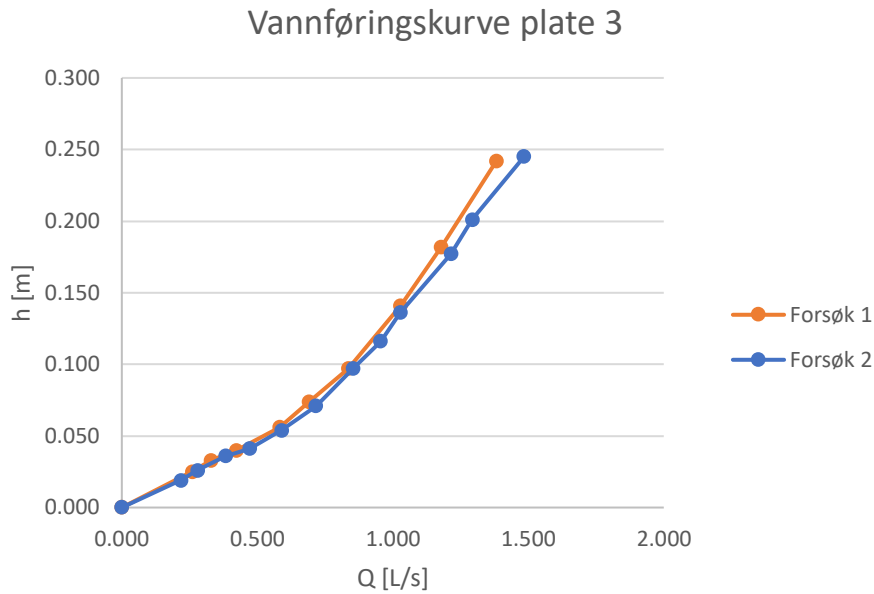
Minste kvadraters metode ga ett avvik SSE på 5% ved bruk av en felles utløpskoeffisient C_D på 0,671 for første forsøket. Det andre forsøket førte til ett avvik SSE på 9% når utløpskoeffisienten C_D var 0,691. De resulterende vannføringskurvene basert på den teoretiske beskrivelsen av volumstrømmen er vist i figur 33. Her vises forskjellen mellom utløpskoeffisientene tydeligere fra en volumstrøm på 6 L/s og oppover. Videre i nedbør-avløpsmodellene benyttes gjennomsnittlige utløpskoeffisientene på 0,681 for utløpsplate 2.



Figur 33: Vannføringskurve basert på teoretisk vannføring til plate 2

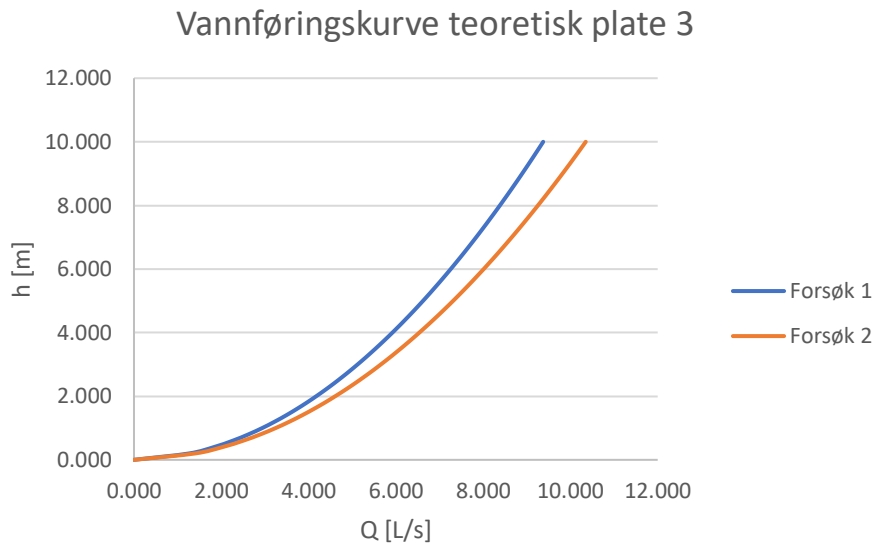
4.2.3 Utløpsløsning 3

Figur 34 presenterer måledataen i form av en vannføringskurve for den tredje utløpsplaten. Fra og med en vannføring fra 0,5 L/s observeres det et sprik mellom målingene. Forskjellen blir større ved økende vannføring. Forsøk 1 ga ni målinger mens forsøk 2 ga tolv målepunkter.



Figur 34: Vannføringskurve basert på måledata til plate 3

Første runde med målinger gir en felles utløpskoeffisient C_D på 0,742 ved ett avvik SSE på 3%. Utløpskoeffisienten C_D til andre forsøket ligger på 0,775 når avviket SSE er 8%. Teoretiske vannføringskurven er vist i figur 35. Kurvene avviker fra hverandre fra og med 2 L/s med en økende forskjell jo høyere volumstrømmen blir.



Figur 35: Vannføringskurve basert på teoretisk vannføring til plate 3

Gjennomsnittlige utløpskoeffisienten for utløpsplate 3 er 0,758.

4.2.4 Usikkerheter ved målingene og databehandling

Ved gjennomføring av forsøkene viste det seg å være vanskelig å oppnå nøyaktige målinger ved høye volumstrømmer. Det kan skyldes flere feilkilder som at vannet sprutet ut av målekaret igjen som var plassert etter utløpene. I tillegg måtte karet flyttes lenger unna utløpene etter hvert som vannstrålen ble kraftigere. Dette medførte at vannstanden i målekaret var ujevnt ettersom at mye vann ble tilført på kort tid.

Tetningen rundt platene var ikke fullstendig tett sånn at vann slapp ut på endene av platene. Det ble forsøkt å måle mest mulig av lekkasjen, men det var ikke mulig å fange alt. Spesielt ved utløpsløsning 1 var det en større lekkasjeandel ved første forsøket. Her ble det gjort en forenkling ved loggføring av lekkasje volumet og den målte mengden ble ganget med to. I snitt lå lekkasjen på 0,5L ved første og 0,25L ved andre forsøket når utløpsløsning 1 ble brukt. Ved bruk av de andre platene var lekkasjen mindre og lå i snitt mellom 0,05 til 0,15 L. Beregning av felles utløpskoeffisienten uten hensyn til oppsamlet lekkasjeandel resulterte i samme verdiene som nevnt i delkapitlene ovenfor.

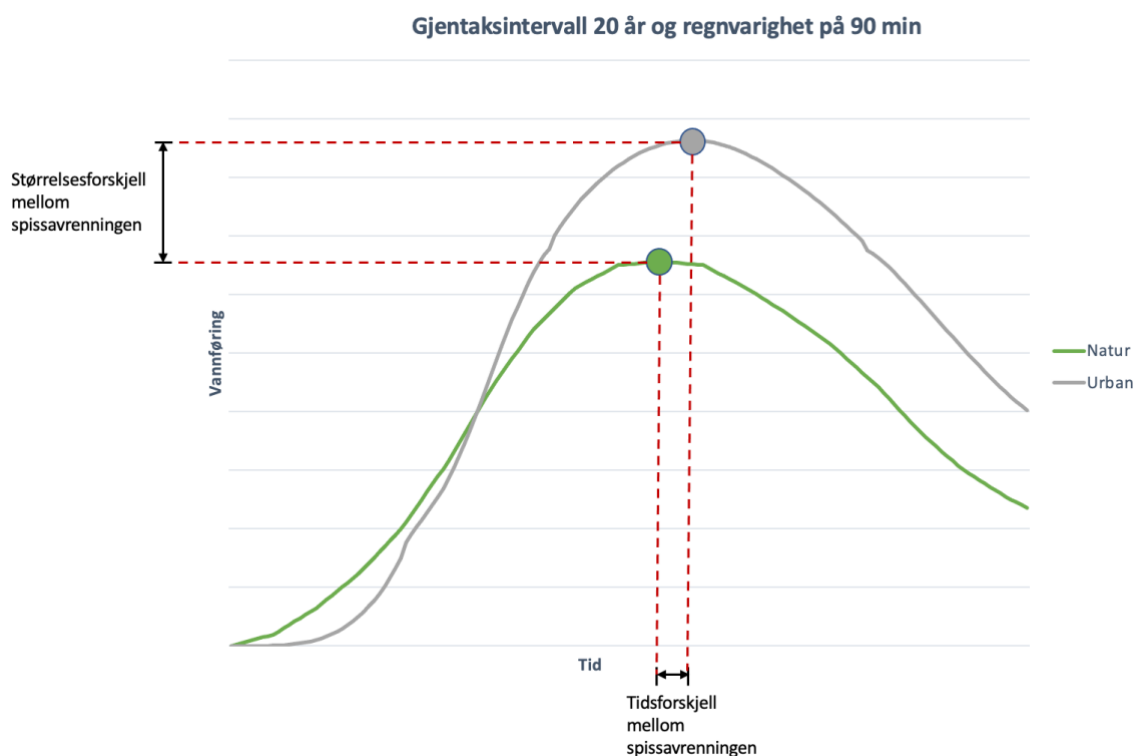
Forsøkene ble gjennomført utendørs på grunn av vannmengdene. Dette førte til at vannstrålen ble utsatt for vindkast som førte til tap av vann. Karene ble best mulig plassert i vater. Det var ikke mulig å gjennomføre målinger for ett delvis fylt nedre utløp, da det ikke oppsto en vannstråle. Vannet rant istedenfor rett ned langs platen. Ved plate 1 og 2 var utløpene plassert høyere opp på platen enn ved tredje utløpsløsningen. Dermed var det ikke mulig å gjennomføre målinger ved høyere vannstand på disse platene.

Ved behandling av måledataen ble vannstanden beregnet i forhold til det første utløpet. I tillegg ble volumstrømmen ut av strømningskaret og utløpskoeffisienten til hvert målepunkt funnet. Et alternativ for bestemmelse av felles utløpskoeffisienten kunne ha vært å ta gjennomsnittet av alle utløpskoeffisientene. Imidlertid er denne metoden er mindre nøyaktig enn minste kvadraters metoden, som finner en løsning med minst avvik fra observasjonene. For videre bruk i modellene ble gjennomsnittet av løsningene fra minste kvadraters metoden brukt.

4.3 Nedbør-avløpsmodeller

For modellering av avrenningen og analyse av funksjonsevnen til utløpsløsningene ble resultatene for utløpskoeffisientene fra forsøkene benyttet. NRCS enhetshydrogrammet, den modifiserte rasjonelle metoden og modelleringsprogrammet SWMM brukes til å simulere avrenningen i et naturlig og urbant felt med et fordrøyningsanlegg som benytter utløpsløsningene. Funksjonsevnen til utløpsløsningene betraktes ved å se på forholdet mellom spissavrenningen i naturen og urbane omgivelser etter fordrøyning. I tillegg bedømmes tidsforskyvningen mellom toppunktene ved NRCS og SWMM.

Størrelses- og tidsforskjellen mellom spissavrenningen i naturen og et urbant felt med fordrøyning er illustrert i figur 36. Her ble NRCS enhetshydrogrammet metoden anvendt med utløpsløsning 2. For et gjentaksintervall på 20 år og en regnvarighet på 90 minutter ble spissavrenningen i naturlige og urbane feltet henholdsvis $54,7 \frac{L}{s}$ og $72 \frac{L}{s}$. Spissavrenningsforholdet ble dermed 1,31 for denne situasjonen. Tidspunktet der spissavrenningen opptrer er 81 min i natur-situasjonen og 87 min i urbane feltet. Forholdstallet til tidsforskyvningen mellom toppunktene ble i dette tilfellet 1,07. På lik måte ble forholdstallene som er presentert i de følgende delkapitlene beregnet.



Figur 36: Illustrasjon av størrelses- og tidsforskjellen mellom spissavrenningen ved en natur og urban situasjon med fordrøyning ved bruk av utløpsløsning 2

4.3.1 NRCS

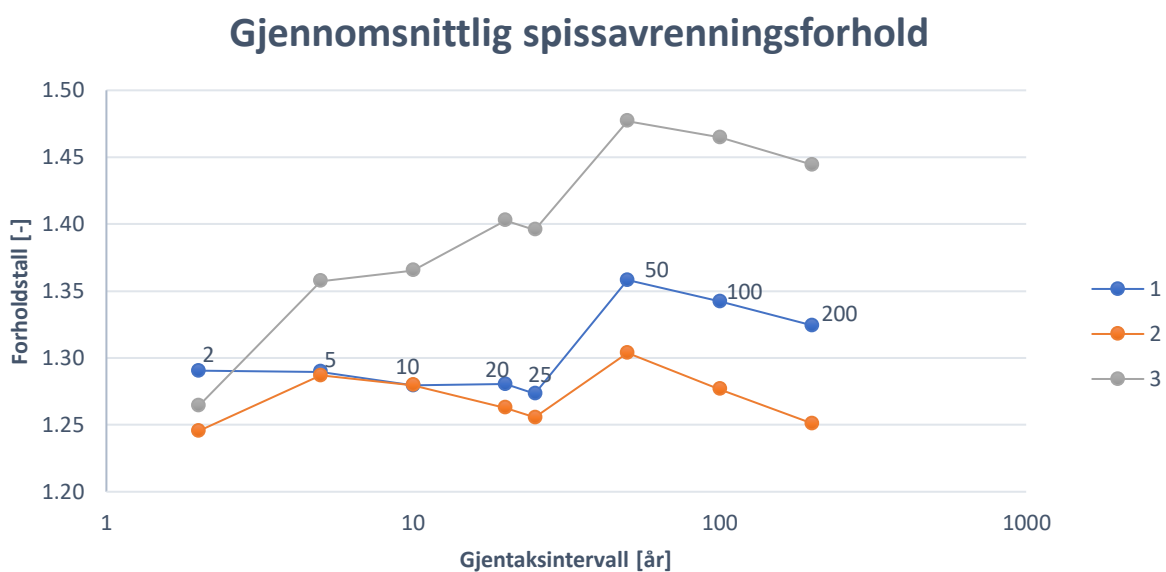
Tabell 12 viser spissavrenningsforholdet, det vil si maksimale avrenningen i urbane feltet etter fordrøyning delt på største avrenningen i naturen, ved bruk av utløpsløsningene. Øverst i tabellen gjengis forholdstallene til utløpsløsning 1. Gjennomsnittlig forskjell mellom den naturlige og urbane avrenningen etter fordrøyning med utløpsløsning 1 ligger på 1,30. Resultatene varierer fra 1,13 til 1,57. Videre vises i midten resultatene som ble funnet ved bruk av utløpsløsning 2. Her ligger spissavrenningsforholdet mellom 1,03 og 1,59 og gjennomsnittet er 1,27. Til slutt oppsummeres resultatene til utløpsløsning 3. Forholdstallene varierer fra 1,05 opp til 1,61. I snitt ligger forholdet på 1,40.

Tabell 12: Spissavrenningsforhold ved bruk av NRCS

Spissavrennings-forhold										
Utløpsløsning 1										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	1,20	1,17	1,17	1,20	1,25	1,28	1,32	1,36	1,43	1,52
5	1,13	1,17	1,19	1,23	1,26	1,30	1,36	1,38	1,41	1,47
10	1,15	1,18	1,19	1,20	1,22	1,26	1,35	1,39	1,42	1,45
20	1,16	1,17	1,16	1,22	1,25	1,29	1,31	1,38	1,43	1,44
25	1,16	1,16	1,14	1,22	1,24	1,28	1,29	1,37	1,43	1,44
50	1,23	1,26	1,25	1,26	1,28	1,32	1,42	1,49	1,50	1,57
100	1,21	1,24	1,23	1,23	1,25	1,29	1,39	1,47	1,55	1,57
200	1,24	1,22	1,20	1,20	1,22	1,26	1,37	1,44	1,52	1,57
Utløpsløsning 2										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	1,03	1,08	1,12	1,19	1,25	1,29	1,33	1,36	1,39	1,42
5	1,09	1,16	1,19	1,22	1,26	1,29	1,37	1,40	1,44	1,44
10	1,13	1,16	1,18	1,19	1,22	1,26	1,34	1,40	1,45	1,46
20	1,15	1,16	1,15	1,16	1,18	1,22	1,31	1,38	1,44	1,47
25	1,15	1,15	1,14	1,15	1,17	1,21	1,31	1,37	1,44	1,48
50	1,22	1,19	1,17	1,17	1,19	1,23	1,35	1,42	1,50	1,59
100	1,20	1,16	1,14	1,14	1,16	1,20	1,31	1,40	1,48	1,58
200	1,17	1,13	1,11	1,11	1,12	1,17	1,28	1,37	1,46	1,58
Utløpsløsning 3										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	1,10	1,05	1,00	1,29	1,32	1,36	1,50	1,21	1,34	1,47
5	1,24	1,22	1,26	1,31	1,36	1,39	1,42	1,45	1,49	1,43
10	1,20	1,26	1,29	1,33	1,40	1,43	1,45	1,46	1,48	1,35
20	1,22	1,28	1,33	1,35	1,38	1,41	1,48	1,47	1,49	1,61
25	1,23	1,28	1,33	1,35	1,37	1,40	1,47	1,47	1,49	1,55
50	1,35	1,40	1,40	1,40	1,42	1,45	1,54	1,59	1,60	1,60
100	1,39	1,38	1,37	1,37	1,38	1,42	1,52	1,57	1,63	1,61
200	1,39	1,36	1,34	1,34	1,35	1,39	1,49	1,55	1,61	1,61

Ved bruk av de tre løsningene er spissavrenningen i det urbane feltet større enn i naturen. Dette gjelder for alle nedbørhendelser. Utløpsløsning 1 og 2 gir jevnere resultat for spissavrenningen enn plate 3. I tillegg gir den siste løsningen større spissavrenning ved alle gjentaksintervall og varigheter.

Nedenfor viser figur 37 de gjennomsnittlige spissavrenningsforholdene basert på gjentakintervallene. Her er utløpsløsning 1 vist i blå, plate 2 er oransje og plate 3 er grå. De gjeldende gjentakintervallene for hvert punkt i samme høyde er indikert ved bruk av dataetiketter. Utløpsløsning 3 gir de største forholdstallene og avviker dermed mest fra spissavrenningen i naturen. Dette gjelder for alle gjentakintervall unntatt 2 år, der plate 1 (blå) ligger litt høyere. Fra 20 år og oppover viser de tre løsningene samme trend, der løsning 2 kommer nærmest spissavrenningen i ett naturlig felt. Plate 1 og 2 gir tilnærmet like forholdstall for gjentakintervall på 5 og 10 år. Alt i alt fremstår utløpsløsning 2 som det alternativet som tilnærmer seg mest til det ønskede forholdstallet på 1,00.



Figur 37: Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold basert på gjentakintervall ved bruk av NRCS

I tabell 13 gjengis resultatene for tidsforskjellen mellom avrenningen ved bruk av de ulike utløpsløsningene. Forholdstallene som presenteres er tidspunktet til spissavrenningen i det urbane feltet dividert på tidspunktet til maksimale avrenningen i det naturlige feltet. Når resultatene er lavere enn 1,00 opptrer spissavrenningen i urbane feltet før det naturlige. Omvendt vil det si at toppunktet er forsinket. Først vises forholdstallene til tidsforskjellen ved bruk av utløpsløsning 1. Her varierer verdiene fra 0,77 til 1,10 og i snitt ligger forskjellen på 0,96. Utløpsløsning 2 sine resultat er framstilt i midten. Forskyvning i spissavrenningen ligger mellom 0,78 og 1,13. I snitt er tidsforskjellen 0,97. Sist presenteres resultatene til plate 3 og gjennomsnittlig ligger tidsforskjellen på 0,94. Resultatene varierer mellom 0,75 og 1,15.

Tabell 13: Tidsforskjell mellom spissavrenningene ved bruk av NRCS

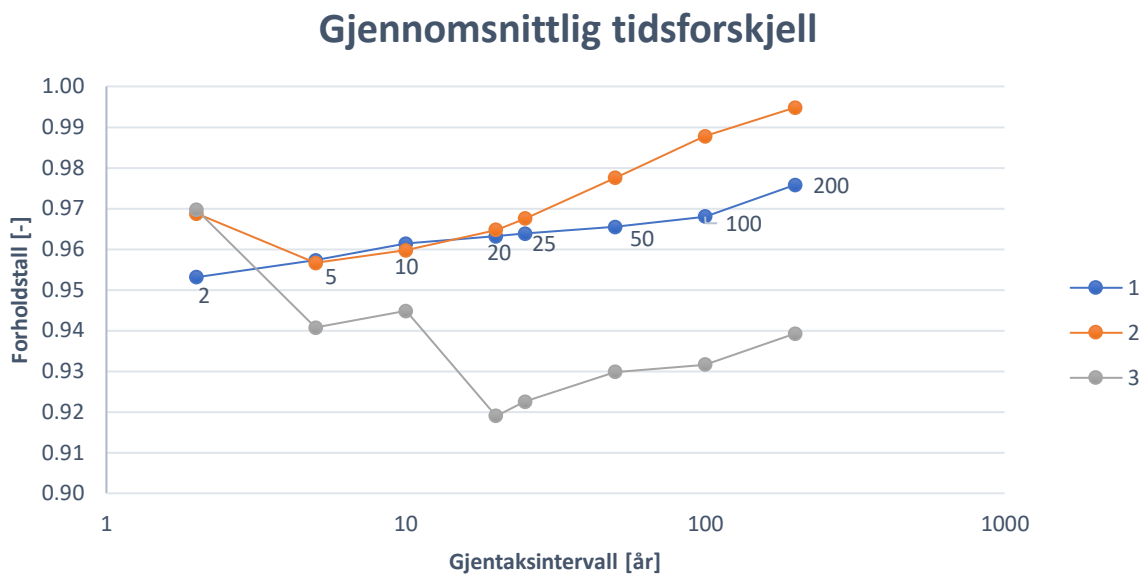
Tidsforskjell spissavrenning										
Utløpsløsning 1										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	0,77	0,81	0,85	0,90	0,96	1,00	1,07	1,08	1,08	1,01
5	0,78	0,82	0,84	0,90	0,96	0,99	1,06	1,07	1,10	1,05
10	0,78	0,81	0,84	0,90	0,97	1,01	1,06	1,08	1,09	1,07
20	0,77	0,82	0,86	0,89	0,96	1,00	1,07	1,08	1,09	1,09
25	0,78	0,82	0,86	0,90	0,96	1,00	1,07	1,08	1,09	1,07
50	0,78	0,81	0,85	0,91	0,98	1,01	1,07	1,07	1,10	1,06
100	0,78	0,82	0,86	0,92	0,98	1,02	1,07	1,08	1,07	1,06
200	0,78	0,82	0,87	0,93	0,99	1,03	1,09	1,09	1,09	1,06

Utløpsløsning 2										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	0,80	0,83	0,86	0,90	0,96	1,00	1,07	1,09	1,10	1,09
5	0,79	0,81	0,84	0,90	0,96	1,00	1,05	1,07	1,07	1,07
10	0,78	0,82	0,85	0,91	0,97	1,01	1,06	1,07	1,07	1,07
20	0,78	0,82	0,85	0,91	0,98	1,02	1,07	1,08	1,07	1,05
25	0,78	0,82	0,86	0,91	0,98	1,02	1,07	1,08	1,09	1,06
50	0,78	0,83	0,87	0,93	1,00	1,04	1,09	1,10	1,10	1,04
100	0,79	0,84	0,88	0,95	1,00	1,05	1,10	1,11	1,11	1,05
200	0,79	0,84	0,88	0,95	1,02	1,06	1,11	1,13	1,12	1,05

Utløpsløsning 3										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	0,79	0,85	0,89	0,88	0,94	0,98	1,02	1,14	1,13	1,07
5	0,76	0,80	0,83	0,88	0,93	0,98	1,04	1,05	1,05	1,09
10	0,77	0,80	0,83	0,87	0,93	0,97	1,02	1,05	1,06	1,15
20	0,76	0,79	0,81	0,87	0,93	0,97	1,01	1,05	1,06	0,94
25	0,77	0,79	0,81	0,87	0,93	0,98	1,01	1,05	1,05	0,98
50	0,75	0,79	0,82	0,88	0,94	0,98	1,02	1,03	1,04	1,03
100	0,75	0,79	0,82	0,88	0,95	0,99	1,04	1,04	1,02	1,03
200	0,75	0,80	0,83	0,89	0,96	1,00	1,05	1,05	1,04	1,03

Tidsforskjellen mellom toppunktene viser samme trend for alle løsningene. Ved regnvarigheter som er kortere enn 60 minutter opptrer spissavrenningen til det urbane feltet før det naturlige. Lengre varigheter gir en forsinkelse i toppunktet.

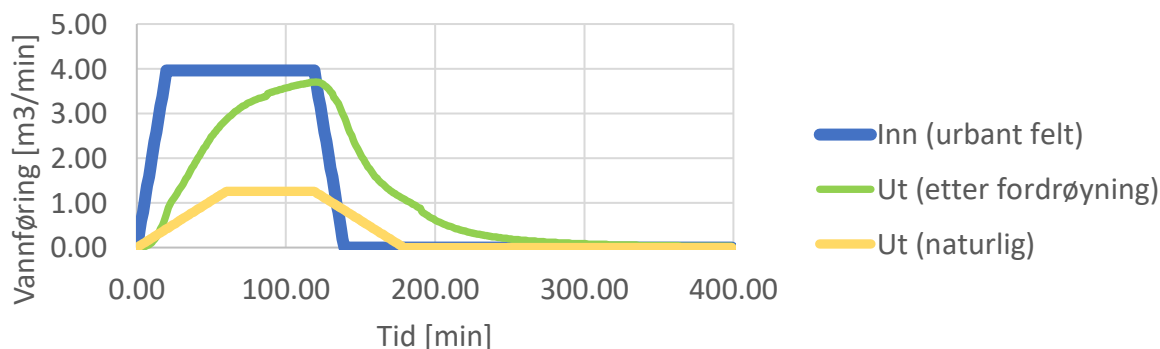
Den gjennomsnittlige tidsforskjellen mellom toppunktene basert på gjentaksintervall er presentert i figur 38. Det optimale forholdstallet som tilsvarer ingen tidsforskyvning mellom spissavrenningene er 1,00. Utløpsløsning 2 tilnærmer seg mest den ønskede verdien, mens plate 3 har største avviket. Plate 1 og 2 resulterer i tilnærmet like forholdstall ved gjentaksintervallene 5, 10 og 20 år. I snitt opptrer spissavrenningen til det urbane feltet før det naturlige.



Figur 38: Gjennomsnittlig tidsforskjell basert på gjentaksintervall ved bruk av NRCS

4.3.2 MRM

Betraktning av avrenningen som ble funnet ved bruk av den modifiserte rasjonelle metoden viste at det ikke er hensiktsmessig å sammenligne tidsforskjellen mellom toppunktene. Ved bruk av kasseregner generer metoden trapesformet avrenning. Unntaket er når konsentrasjonstiden er lik varigheten, da vil avrenningen være trekantformet. Figur 39 viser avrenningsmønsteret til urban avrenning uten og med fordrøyning, samt avrenning i et naturlig felt over tid. Den blå og gule grafen er funnet ved hjelp av MRM, mens den grønne kurven beregnes ved bruk av geometrien til utløpsløsningen. Eksempelet har ett gjentaksintervall på 25 år og en regnvarighet på 120 minutter. Figuren viser at det ikke finnes ett bestemt tidspunkt for spissavrenningen ved bruk av MRM.



Figur 39: Avrenningsmønster ved bruk av MRM

Dermed sammenlignes kun spissavrenningsforholdet ved ulike gjentaksintervall og varigheter. Tabell 14 viser resultatene for alle utløpsløsningene. Ovenfra og nedover vises utløpsløsning 1, 2 og 3. For plate 1 ligger forholdet i snitt på 3,02 og tallene varierer mellom 2,22 og 3,76. Utløpsløsning 2 har et gjennomsnittlig spissavrenningsforhold på 2,93 og resultatene endrer seg fra 2,07 til 3,67. Nederst presenteres forholdstallene ved bruk av utløpsløsning 3. Gjennomsnittet ligger på 3,24 og alle resultatene er mellom 2,46 og 4,34.

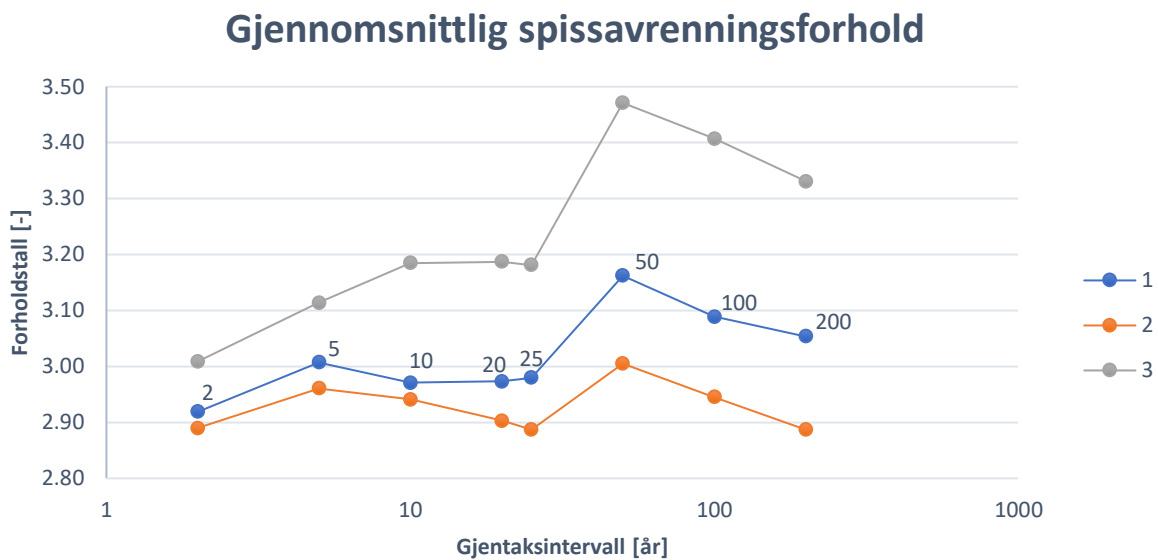
Tabell 14: Spissavrenningsforhold ved bruk av MRM

Spissavrennings-forhold										
Utløpsløsning 1										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	3,32	2,95	3,20	2,97	2,64	2,34	2,78	2,76	3,08	3,15
5	3,45	3,36	3,25	2,98	2,62	2,33	2,76	2,97	3,20	3,15
10	3,48	3,37	3,20	2,87	2,65	2,22	2,69	2,97	3,11	3,15
20	3,51	3,33	3,07	2,95	2,58	2,30	2,76	2,96	3,12	3,15
25	3,52	3,30	3,24	2,93	2,56	2,29	2,73	2,96	3,12	3,15
50	3,73	3,58	3,35	3,02	2,63	2,35	2,84	3,07	3,33	3,72
100	3,65	3,52	3,27	2,94	2,55	2,29	2,78	3,18	3,32	3,39
200	3,76	3,45	3,20	2,86	2,48	2,24	2,73	3,14	3,30	3,38
Utløpsløsning 2										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	3,06	3,07	3,05	2,91	2,62	2,33	2,71	2,92	3,08	3,15
5	3,26	3,31	3,19	2,94	2,59	2,31	2,77	2,98	3,11	3,15
10	3,39	3,33	3,16	2,86	2,50	2,24	2,68	2,98	3,12	3,15
20	3,46	3,28	3,08	2,77	2,42	2,17	2,62	2,96	3,12	3,15
25	3,46	3,26	3,05	2,74	2,39	2,15	2,60	2,95	3,12	3,15
50	3,67	3,36	3,11	2,79	2,43	2,19	2,68	3,09	3,35	3,38
100	3,61	3,27	3,02	2,70	2,35	2,13	2,62	3,05	3,32	3,38
200	3,54	3,18	2,94	2,62	2,28	2,07	2,56	3,01	3,30	3,37
Utløpsløsning 3										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	3,32	2,94	3,44	3,10	2,75	2,45	3,10	2,76	3,08	3,15
5	2,84	3,51	3,44	3,22	2,86	2,50	2,85	3,04	3,73	3,15
10	3,62	3,62	3,53	3,33	2,90	2,55	2,88	3,03	3,24	3,15
20	3,70	3,68	3,62	3,28	2,84	2,51	2,91	3,05	3,13	3,15
25	3,72	3,70	3,60	3,26	2,82	2,49	2,89	3,05	3,13	3,15
50	4,11	4,01	3,76	3,37	2,91	2,57	3,02	3,26	3,36	4,34
100	4,23	3,95	3,68	3,29	2,83	2,52	2,97	3,28	3,36	3,96
200	4,21	3,88	3,60	3,21	2,76	2,46	2,93	3,25	3,36	3,65

Sammenlignes resultatene til alle utløpsløsningene blir spissavrenningen til det urbane feltet er minst dobbelt så stor som toppunktet til den naturlige avrenningen for alle regnhendelsene. Den tredje utløpsplaten gir en spissavrenning som er mer enn fire ganger større ved bestemte nedbørhendelser enn det som kan forventes i naturen.

Ved betraktning av det gjennomsnittlige spissavrenningsforholdet basert på gjentaksintervall (figur 40) utpeker plate 3 seg fordi verdiene avviker fra trenden til de resterende løsningene. Denne løsningen resulterer i større spissavrenninger ved alle gjentaksintervall. Plate 1 og 2

oppfører seg tilnærmet likt, men løsning 2 gir spissavrenningen med minste forskjellen fra den naturen ved alle gjentaksintervall.



Figur 40: Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold basert på gjentaksintervall ved bruk av MRM

4.3.3 SWMM

Siste nedbør-avløpsmodell er programvaren SWMM. Tabell 15 og 16 viser forholdstallene for spissavrenningen og tidsforskjellen ved bruk av utløpsløsningene. Det er ikke inkludert forholdstall for nedbørhendelsen med gjentaksintervall på 2 år og varighet på 10 minutter, da det ikke oppstår noe avrenning i det naturlige feltet ved denne regnhendelsen.

I snitt er spissavrenningsforholdet 4,69 ved bruk av utløpsløsning 1 og forholdstallene ved de ulike nedbørhendelsene er vist øverst i tabell 15. Resultatene for denne platen varierer fra 0,83 til 213,84. Ved bruk av andre utløpsløsningen ble det funnet forholdstallene som er vist midt i tabellen. Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold ligger på 4,49 og tallene spenner fra 0,76 til 202,19. Siste utløpsløsningen har i snitt en spissavrenning som er 4,85 ganger større enn den naturlige avrenningen. Forholdstallene for toppunktene er presentert nederst i tabellen og ligger mellom 0,95 og 216,83.

Tabell 15: Spissavrenningsforhold ved bruk av SWMM

Spissavrennings-forhold										
Utløpsløsning 1										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	213,84	9,91	2,97	2,33	2,17	2,21	2,10	2,07	2,32
5	17,64	4,94	2,48	1,52	1,40	1,46	1,68	1,54	1,77	1,98
10	5,90	2,66	1,58	1,28	1,27	1,36	1,50	1,63	1,71	1,87
20	3,44	1,73	1,33	1,10	1,13	1,25	1,51	1,56	1,66	1,80
25	2,97	1,74	1,23	1,06	1,10	1,22	1,37	1,44	1,65	1,79
50	2,14	1,46	1,08	1,00	1,07	1,21	1,48	1,67	1,73	1,86
100	1,87	1,19	0,94	0,91	1,00	1,15	1,42	1,60	1,69	1,83
200	1,53	1,02	0,83	0,85	0,95	1,10	1,38	1,56	1,71	1,80

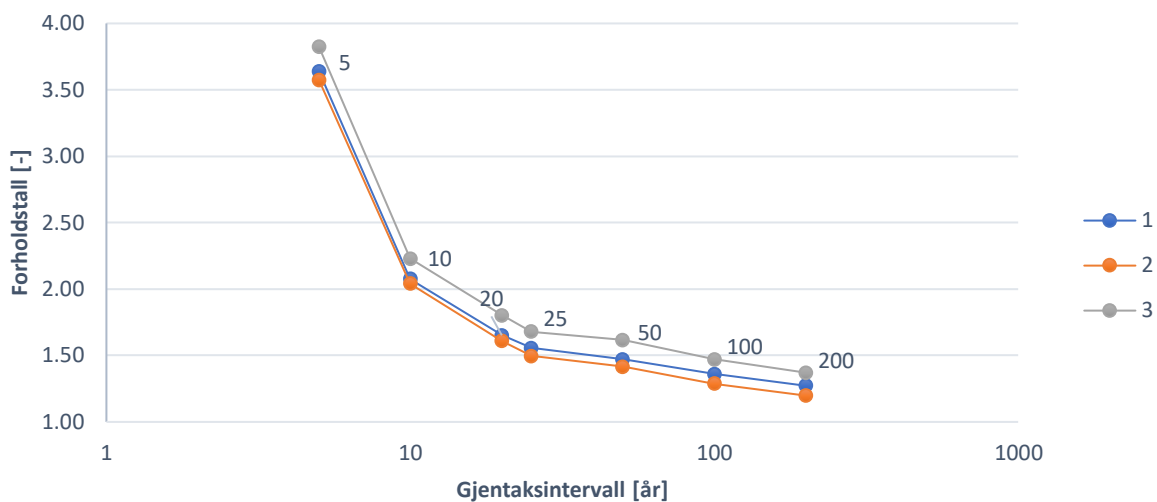
Utløpsløsning 2										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	202,19	9,63	2,96	2,35	2,20	2,27	2,14	2,06	2,32
5	17,08	4,85	2,45	1,50	1,41	1,46	1,68	1,56	1,80	1,98
10	5,79	2,63	1,62	1,19	1,18	1,27	1,50	1,63	1,72	1,87
20	3,38	1,82	1,24	1,02	1,05	1,16	1,40	1,56	1,67	1,81
25	2,92	1,62	1,13	0,97	1,02	1,13	1,28	1,44	1,65	1,79
50	2,26	1,34	0,99	0,91	0,98	1,12	1,39	1,58	1,73	1,87
100	1,74	1,09	0,86	0,83	0,92	1,06	1,34	1,53	1,69	1,83
200	1,40	0,93	0,76	0,77	0,87	1,01	1,29	1,49	1,66	1,80

Utløpsløsning 3										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	216,83	10,48	3,13	2,47	2,28	2,39	2,20	2,03	2,32
5	18,42	5,29	2,72	1,60	1,57	1,53	1,75	1,57	1,81	1,98
10	6,26	2,90	1,94	1,43	1,40	1,48	1,61	1,67	1,72	1,87
20	3,78	2,19	1,51	1,24	1,26	1,36	1,59	1,62	1,68	1,80
25	3,30	1,97	1,39	1,19	1,22	1,33	1,44	1,50	1,66	1,78
50	2,73	1,66	1,23	1,13	1,20	1,33	1,57	1,72	1,75	1,87
100	2,13	1,36	1,07	1,03	1,12	1,26	1,52	1,66	1,72	1,83
200	1,74	1,17	0,95	0,96	1,07	1,21	1,48	1,62	1,71	1,80

Resultatene for spissavrenningsforhold varier sterkt basert på nedbørhendelsen. Spesielt peker gjentaksintervallet på 2 år med en regnvarighet på 15 minutter seg ut med forholdstall på over 200 for alle utløpsløsningene. Kombinasjonen av lave gjentaksintervall og korte regnvarigheter resulterer i et større avvik fra naturlig avrenning. På andre siden gir gjentaksintervall som er større eller likt 50 år med varigheter mellom 20 og 60 minutter noen toppunkter som er lavere enn det ønskede forholdet på 1,00.

I figur 41 er de gjennomsnittlige spissavrenningsforholdene basert på gjentaksintervall for hver utløpsløsning plottet. Gjentaksintervall på 2 år ble ikke tatt med i betraktning da gjennomsnittene ble større enn 25. Dette førte til at forskjellen mellom punktene til de resterende gjentaksintervallene ble vanskelig å tyde. De tre platene viser samme trend der forholdstallene er relativ høye ved lave gjentaksintervall og synker med økning i antall år. I snitt oppnår ingen av platene en spissavrenning på samme størrelse som i naturen. Utløpsløsning 2 resulterer i de minste forholdstallene mens løsning 3 gir de største.

Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold



Figur 41: Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold basert på gjentaksintervall ved bruk av SWMM

Forholdet mellom tidspunktet til spissavrenningen for alle nedbørhendelser er oppsummert i tabell 16. Øverst vises resultatene for utløpsløsning 1 som i snitt har en tidsforsinkelse på 1,15. Tidsforskjellen ligger mellom 1,00 og 1,67. Ved bruk av andre utløpsløsningen oppstår det forholdstallene som er vist i midten. Tidsforskyvningen er i snitt 1,13 og varierer fra 1,00 til 1,67. Nederst presenteres resultatene for utløpsløsning 3. Her ligger tidsforskyvningen i snitt på 1,12 og resultatene spenner fra 1,00 til 1,67.

Tabell 16: Tidsforskjell mellom spissavrenningene ved bruk av SWMM

Tidsforskjell spissavrenning										
Utløpsløsning 1										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	1,43	1,26	1,14	1,07	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
5	1,67	1,36	1,21	1,10	1,09	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
10	1,67	1,36	1,47	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
20	1,56	1,93	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
25	1,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
50	2,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00	1,00
100	1,56	1,29	1,16	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
200	1,56	1,29	1,16	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00

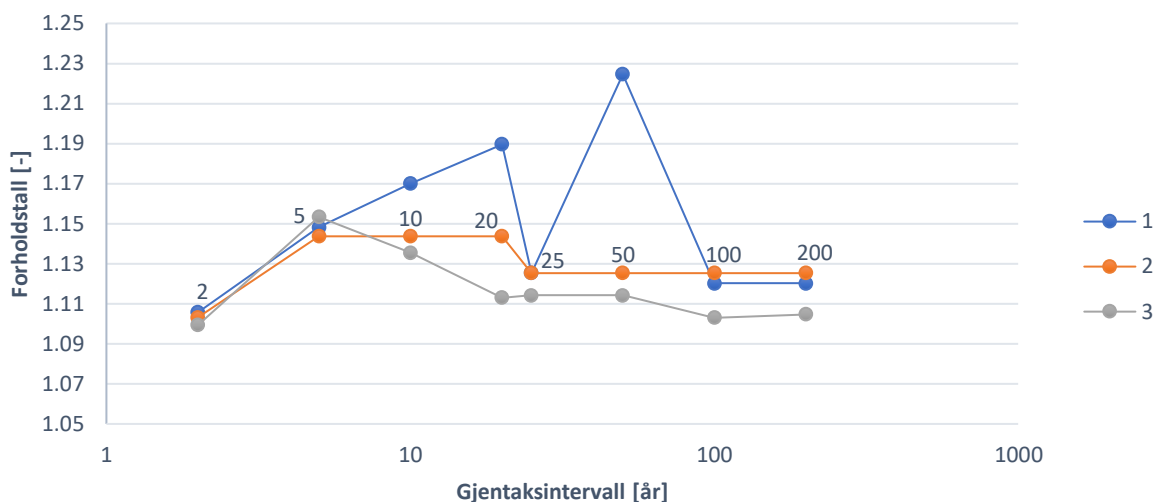
Utløpsløsning 2										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	1,43	1,26	1,14	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
5	1,67	1,36	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
10	1,67	1,36	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
20	1,67	1,36	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
25	1,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
50	1,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
100	1,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
200	1,56	1,29	1,21	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00

Utløpsløsning 3										
Gjentaksintervall (år)	Varighet (min)									
	10	15	20	30	45	60	90	120	180	360
2	-	1,43	1,26	1,10	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00	1,00
5	1,67	1,36	1,21	1,31	1,05	0,93	1,01	1,00	1,00	1,00
10	1,56	1,50	1,16	1,07	1,05	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
20	1,56	1,29	1,16	1,07	1,05	1,02	1,00	1,00	1,00	1,00
25	1,56	1,29	1,16	1,07	1,05	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
50	1,56	1,29	1,16	1,07	1,05	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
100	1,44	1,29	1,16	1,07	1,05	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00
200	1,44	1,29	1,16	1,07	1,05	1,03	1,01	1,00	1,00	1,00

Tidsforskjellen mellom spissavrenningene minker ved økende varighet. For varighetene 180 og 360 minutter eksisterer det ingen tidsforskyvning mellom toppunktene. Ved regn på 10 minutter er forskjellen størst, med unntak av noen få regnhendelser som gjentaksintervall på 20 år med en varighet på 15 minutter for utløpsløsning 1. Unntakene kan skyldes avstanden mellom utløpene på plateløsningene.

Figur 42 viser den gjennomsnittlige tidsforskjellen mellom spissavrenningene basert på gjentaksintervall for plateløsningene. For 2 og 5 år er tidsforskyvningen i snitt lik for alle løsninger. Ved plate 2 og 3 er det synlig at tidsforskjellen minker før den stabiliserer seg. I motsetning viser resultatene for løsning 1 at tidsforskjellen øker opp til 20 års regn før det minker til samme nivå som de resterende løsningene. Unntaket er gjentaksintervallet 50 år med største avviket og der tidsforskyvningen er størst.

Gjennomsnittlig tidsforskjell



Figur 42: Gjennomsnittlig tidsforskjell basert på gjentaksintervall ved bruk av SWMM

4.3.4 Sammenligning modelleringsresultater

Ved betraktning av forholdstallene for spissavrenningen gir NRCS enhetshydrogrammet resultatene som tilnærmer seg mest til naturen. På andre siden viser sammenligningen med de andre metodene at urbane spissavrenningen kun er likt toppunktet til den naturlige avrenningen ved bruken av SWMM. Programvaren generer resultatene med størst variasjon, men også de eneste resultatene der toppunktene har lik størrelse ved bestemte nedbørhendelser. Spesielt den modifiserte rasjonelle metoden gir spissavrenninger som er minst dobbelt størrelse i forhold til den naturlige avrenningen.

Fokuseres det på gjentaksintervallene viser NRCS og MRM resultatene at spissavrenningsforholdet øker ved gjentaksintervall som er større enn 25 år. Fra 2 til 25 års gjentaksintervall endres de gjennomsnittlige forholdstallene for utløpsløsning 1 og 2 kun med omtrent 0,10. Spissavrenningen til den tredje løsningen varierer sterkere ved de ulike gjentaksintervallene. Det observeres motsatt trend ved bruken av SWMM der minste forskjellen mellom toppunktene oppstår ved størst gjentaksintervall. Jo lavere gjentaksintervallet er jo større blir forskjellen mellom den urbane og naturlige spissavrenningen.

NRCS resulterer i avrenningen som tilnærmer seg mest en natur-situasjon ved korte varigheter med økende forskjell mellom spissavrenningene ved lengre regnhendelser. MRM viser at nedbørhendelser med en varighet mellom 45 og 90 minutter gir minst forskjell mellom

toppunktene. Ved bruken av SWMM oppnås tilnærmet lik spissavrenning som i naturen ved varigheter på 30, 45 og 60 minutter.

Tidsforskjellen mellom spissavrenningen viser at den urbane spissavrenningen opptrer for tidlig ved korte regnvarigheter ved bruk av NRCS. Regnvarigheter som er lenger enn 60 minutter fører til en tidsforsinkelse i forhold til den naturlige avrenningen. Ved bruk av SWMM opptrer den urbane spissavrenningen gjennomsnittlig etter toppunktet til den naturlige avrenningen. Verdiene funnet med SWMM varierer i større grad enn resultatene fra NRCS og tidsforskjellen minker ved lengre regnvarigheter.

Resultatene for den gjennomsnittlige tidsforskjellen ga ulike resultat basert på metode og utløpsløsning. NRCS resultatene viser at tidspunktet til spissavrenningen i urbane feltet nærmer seg den naturlige med økende gjentaksintervall ved bruk av utløpsløsning 1 og 2. Den tredje løsningen oppnår i snitt størst tidsforskjell mellom toppunktene ved et gjentaksintervall på 20 år. Derifra minker tidsforskyvningen både ved lavere og høyere frekvens. Ved bruk av SWMM oppnår utløpsløsningene en lavere tidsforskjell mellom spissavrenningen ved større gjentaksintervall. Unntaket er 2 års regnet som ligger i snitt nærmest det ønskede forholdstallet på 1,00. For utløpsløsning 1 utpeker seg gjentaksintervallet på 50 år ved å gi et større forholdstall enn forventet. Dette kan skyldes avstanden mellom utløpene på platene.

Tas spissavrenningsforholdet som veiledende verdier for best mulig løsning tyder resultatene på at utløpsløsning 2 fører til mest mulig naturlig avrenning. Dette kan skyldes at den felles utløpskoeffisienten fra forsøkene varierer mindre fra de antatte verdiene enn ved de andre løsningene. Både for utløpsplate 1 og 3 viste forsøkene at utløpskoeffisientene var mye høyere enn antatt. Spesielt for trekantformete utløp ble utløpskoeffisienten underestimert sammenlignet med de resterende geometriene. NRCS resultatene for tidsforskyvningen mellom spissavrenningen forsterker teorien om at utløpsløsning 2 vil gi størst samsvar med et naturlig forløp for avrenning. I motsetning viser SWMM at minste forskjellen mellom toppunktene oppnås ved bruk av utløpsløsning 3.

Alt i alt viser resultatene at alle utløpsløsningene fordrøyer avrenningen i varierende grad basert på regnhendelse. Resultatene fra NRCS og MRM tyder på at utløpene er for store da spissavrenningen i urbane feltet alltid er større enn den naturlige. SWMM viser et mer variert bildet da modellen tar hensyn til infiltrasjon som har en sterk påvirkning på resultatene. Dette

gjelder spesielt for korte regnvarigheter og lave gjentakintervall. Tas varigheter over 60 minutter som veiledende verdier er plateløsningene for store.

4.3.5 Forskjeller mellom nedbør-avløpsmodellene

NRCS enhetshydrogrammet ble valgt for å analysere et mest mulig virkelighetsnært avrenningsmønster. I tillegg behøver metoden lite informasjon om nedbørsfeltet, kun feltarealet og konsentrasjonstiden, som input. Ved NRCS enhetshydrogrammet må det tas hensyn til at flere regnvarigheter er utenfor det anbefalte gyldighetsområdet til metoden. Dermed er det en større usikkerhet forbundet med resultatene som befinner seg utenfor anbefalingene. I utgangspunktet ble den modifiserte rasjonelle metoden valgt for å kunne benytte hyetogrammer som nedbør input i modelleringen. Siden kasseregn ble brukt både i NRCS og SWMM var det mer hensiktsmessig å benytte kasseregn. Sammenlignet med den vanlige rasjonelle metoden, konstruerer den modifiserte versjonen et hydrogram mens original versjonen kun fokuserer på spissavrenningen. Modellen behøver feltstørrelse, konsentrasjonstid og avrenningskoeffisient som input for nedbørsfeltet. I tillegg er MRM en brukervennlig metode som er en utvidelse av den godt kjente rasjonelle metoden.

Sist ble modelleringsprogrammet SWMM valgt, for å kunne sammenligne resultater fra tre metoder. Modellen krever mer informasjon om nedbørsfeltet enn de ovenfor nevnte metodene. Her må antagelser bli gjort om bredde, helning, manningstall, gropmagasinering og andelen tette flater i hvert felt. Parameterne ble valgt basert på SWMM brukermanualen og i forhold til de andre metodene må flere antagelser om feltet bli gjort. Dette innebærer en økt usikkerhet i resultatene, da endring av de valgte parameterne kan føre til større forskjeller i avrenningsforholdene. På andre siden generer programmet mer virkelighetsnære resultater, da det blir tatt hensyn til naturlige prosesser som infiltrasjon og fordampning. I utgangspunkt er det vanskelig å generalisere avrenning i naturen, da avrenningsmønsteret er sterkt avhengig av feltegenskapene som terreng, jordegenskaper, etc.

Da utløpsløsningene ble dimensjonert ved bruk av NRCS enhetshydrogrammet var det forventet at metoden ville resultere i forholdstallene som gir minst avvik fra spissavrenningen i naturen. SWMM tar hensyn til infiltrasjon og dette kan være med på å forklare variasjonen i forholdstallene. Spesielt ved korte nedbørhendelser har infiltrasjon en stor betydning. Spissavrenningen i det urbane feltet som ble funnet ved bruk av MRM var høyere enn forventet.

Delvis kan dette forklares med at all nedbøren blir konvertert til avrenning. I motsetning til NRCS er ikke MRM designet basert på avrenningsmønsteret til faktiske felt.

4.4 Praktisk anvendbarhet av resultatene

Hvis utløpsløsningene skal anvendes ved et fordrøyningsanlegg som er dimensjonert for 20 års regn tyder metodene på ulike resultat. For NRCS og MRM vil utløpsløsning 1 og 2 resultere i en spissavrenning som avviker fra den naturlige i like stor grad for hvert gjentakintervall som er kortere enn 20 år. Det vil si at forskjellen varierer i mengde avrenning, men forholdet mellom toppunktene vil være likt. Ved å vedlikeholde samme forhold mellom toppunktene for alle gjentakintervall vil avrenningsmønsteret tilnærme seg ett naturlig forløp.

Dette gjelder ikke i like stor grad for utløpsløsning 3 der forskjellen ved 20 års regn er større enn for de andre løsningene. Forskjellen mellom toppunktene vil minske ved lavere gjentakintervall. Resultatene ved bruk av SWMM viser til en økning i forskjell mellom spissavrenningene ved lavere gjentakintervall. Utløpsløsningene vil ikke tilnærme seg avrenningen til et naturlig forløp ved lavere gjentakintervall.

Her må det tas med i betraktning at bare SWMM tar hensyn til infiltrasjon i grunnen. I resultatene er dette spesielt merkbart ved nedbørshendelsen med ett gjentakintervall på 2 år og en varighet på 15 minutter der forholdstallet for alle plateløsningene er over 200. Dette skyldes at det kun oppstår en liten mengde med avrenning i det naturlige feltet fordi store mengder av nedbøren blir infiltrert. Virkningen av infiltrasjon er mest synlig ved lave gjentakintervall og korte varigheter. For å minske forskjellen mellom spissavrenningen i urbant og naturlig felt ved de ovenfornevnte regnhendelsene kan fordrøyningsmagasinet kombineres med andre overvannstiltak som er infiltrasjonsbasert. Det kan for eksempel etableres regnbed og andelen permeable flater kan økes for å minske mengden med avrenning. Et lukket fordrøyningsmagasin med infiltrasjon kan være en mulig løsning som i tillegg bidrar til å minske nødvendig fordrøyningsvolum. I tillegg tyder resultatene på at utløpene er overdimensjonerte. Ved å minske tverrsnittsarealet til utløpene vil andelen overvann som blir fordrøyd øke.

Når det gjelder funksjonskravene til mengderegulatorer så er utløpsløsningene designet tilnærmet vedlikeholdsfritt uten noen bevegelige deler som behøver å bli overvåket. I tillegg er

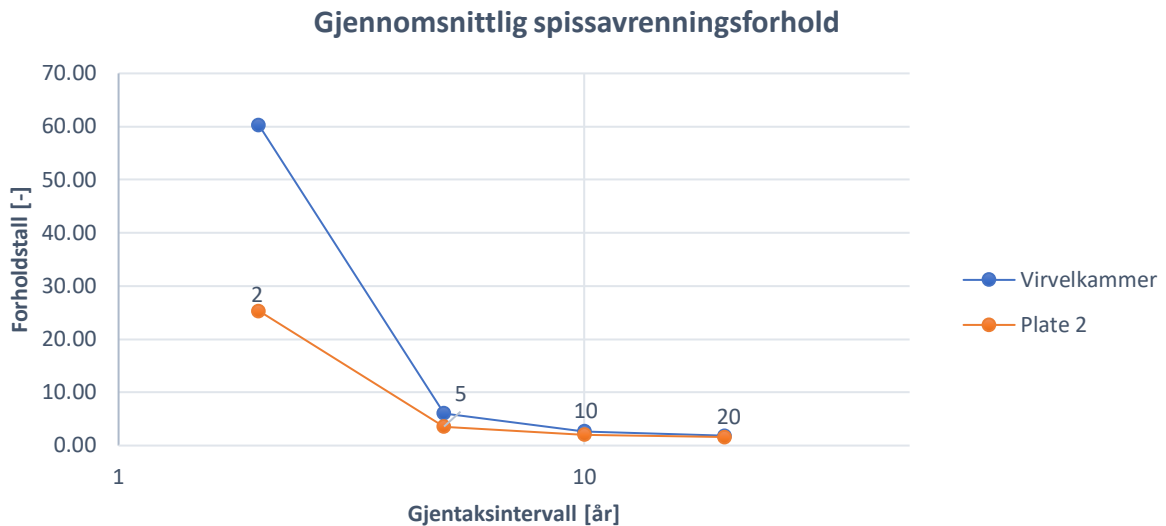
diameteren, bredden og høyden til alle geometriene større enn 65mm. Dette er anbefalte minste størrelsen med tanke på tilstopningsrisiko (MFT AS, 2015).

Beregninger ved bruk av SWMM viste at f-faktoren til utløpsløsningene er tilnærmet like. Utløpsløsning 1, 2 og 3 har henholdsvis f-faktor på 0,58, 0,59 og 0,57. Sammenlignet med et virvelkammer, der beregningene resulterte i 0,79, er f-faktoren relativ lav. Ved bruk av verdier for midlere og maksimal vannføring fra Aaby og Lindholm, 2007, ble f-faktoren 0,83 for et virvelkammer. Størrelsesforskjellen mellom naturbaserte utløpsløsningene og virvelkammeret kan forklares med at utløpsløsningene ikke er designet for å oppnå maksimal strømming, men etterligne ett naturlig avrenningsmønster.

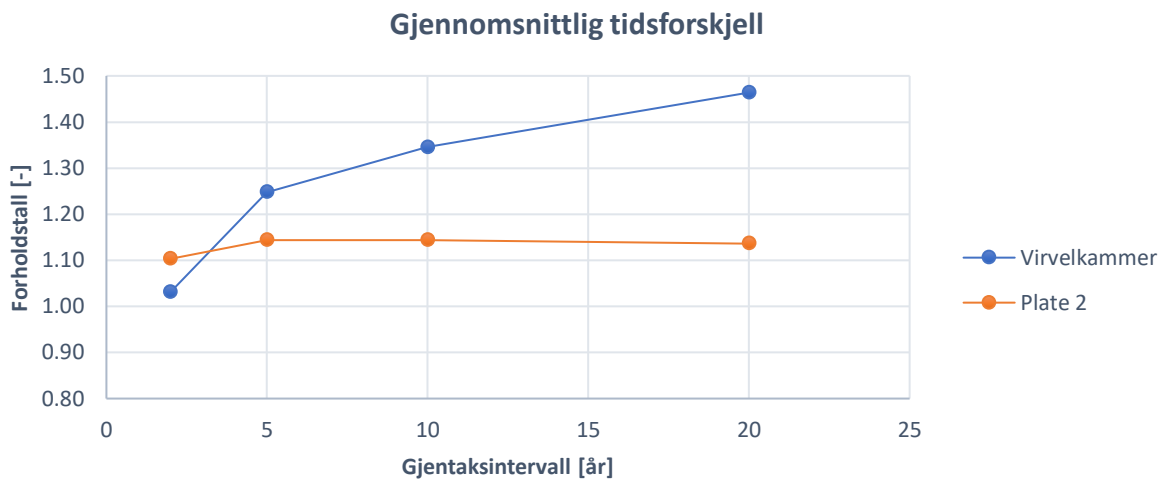
Effekten av en reduksjon i f-faktoren på magasinvolument har blitt vurdert ved bruk av en eksempel-beregning med regnvelopmetoden. I eksempelet ble magasinet dimensjonert for å håndtere nedbør fra Blindern med 20 års gjentakintervall og en klimafaktor på 1,4. Feltstørrelsen som ble anvendt er 1 ha med en midlere avrenningskoeffisient på 0,9. Maksimalt påslipp til ledningsnettet ble satt til $10 \frac{L}{s}$. Ved bruk av en f-faktor på 0,79 ble nødvendig magasin størrelse 456 m³. Med naturbasert utløp som har en f-faktor på 0,58 øker magasin størrelsen til 468 m³. Prosentvis tilsvarer dette en økning på 2,6% som er en marginal økning i magasin størrelse.

4.4.1 Virvelkammer

Virvelkammer er den mest brukte mengderegulatoren. Ved bruk av SWMM og vannføringskurven til et virvelkammer fra MFT AS ble spissavrenningsforholdet og tidsforskjellen mellom spissavrenningen modellert. Her sammenlignes virvelkammeret med utløpsløsning 2 som tilnærmer seg mest naturlig avrenning i forhold til de resterende løsningene. For virvelkammeret ble magasin størrelsen endret til 100m². Figur 43 og 44 viser resultatene ved dimensjonering for 20 års regn. Gjennomsnittlig spissavrenning og tidsforskjell ble funnet ved å ta snittet av alle varighetene for ett gjentakintervall. Her ble det kun tatt med i betraktning gjentakintervallene som er kortere enn 20 år. Ved spissavrenningsforholdet og tidsforskjellen tilnærmes utløpsløsning 2 mer det ønskede forholdstallet på 1,00. Med unntak av tidsforskjellen ved gjentakintervallet på 2 år, der virvelkammeret resulterer i den minste avstanden mellom toppunktene.

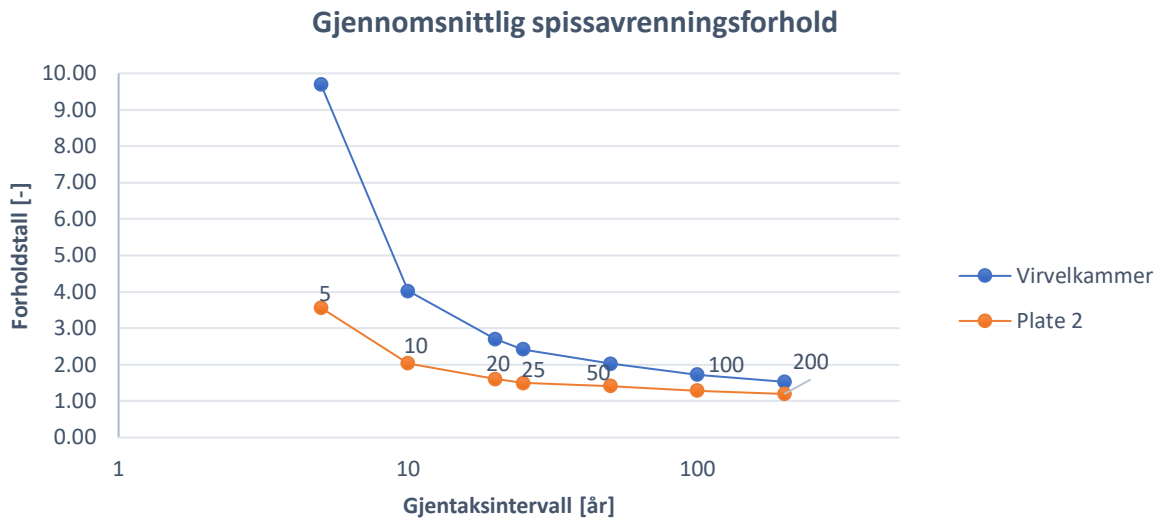


Figur 43: Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold ved dimensjonering for 20 års gjentaksintervall

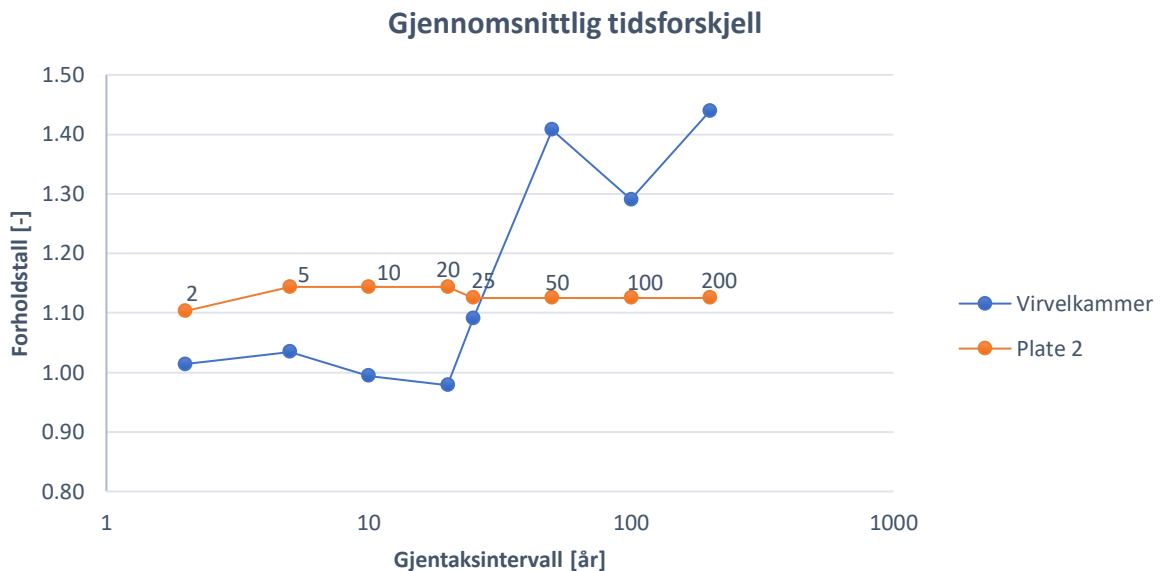


Figur 44: Gjennomsnittlig tidsforskjell ved dimensjonering for 20 års gjentaksintervall

Ved dimensjonering for 200 års gjentaksintervall er forskjellen mellom spissavrenningsforholdene (figur 45) til mengderegulatorene mer synlig. Figur 45 inkluderer ikke forholdene for 2 års gjentaksintervall, da størrelsesforskjellen fra de resterende forholdstallene førte til at figuren ble vanskelig å tyde. Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold for virvelkammeret ble 86,20 og for utløpsløsning 2 ble forholdstallet 25,35 ved 2 års regn. Gjennomsnittlig tidsforskjell (figur 46) ved dimensjonering for 200 års regn viser at tidsforskyvningen mellom toppunktene varierer mer ved bruk av virvelkammer. Opp til 25 års gjentaksintervall stemmer virvelkammeret bedre overens med naturlige forløpet. Fra 50 år og oppover er tidsforskjellen større enn ved bruk av utløpsløsning 2.



Figur 45: Gjennomsnittlig spissavrenningsforhold ved dimensjonering for 200 års gjentaksintervall



Figur 46: Gjennomsnittlig tidsforskjell ved dimensjonering for 200 års gjentaksintervall

4.5 Videre arbeid

De valgte utløpsløsningene ble kun testet med to forsøk på laboratoriet. I utgangspunktet var det planlagt å forbedre løsningene basert på forsøksresultatene før nye plateløsninger skulle bli designet. Dette var ikke mulig å gjennomføre på grunn av begrenset tilgang til campus under COVID-19 restriksjonene.

Ved videre arbeid bør resultatene fra denne oppgaven benyttes til å utbedre platene og gjennomføre nye forsøk for bestemmelse av utløpskoeffisienten som er både avhengig av plasseringen og dimensjonen til utløpene og vil dermed endres ved omskalering av platene. I tillegg kan det være nyttig å gjennomføre flere målinger med høyere vannstand i strømningskaret for å bestemme en mer nøyaktig vannføringskurve.

Høydeforskjellen mellom platene bør undersøkes nærmere for å finne et estimat eller forhold for hva som er mest praktisk. Det kan også vurderes å strupe utløpene ved bruk av bevegelige luker. Ved øvre utløpet vil dette være lønnsomt når vannstanden så vidt passerer åpningen for å unngå svingninger eller ujevnheter i strømmingen.

Utløp med en større bredde i bunnen enn ett sirkulært utløp tilpasset seg bedre ett naturlig forløp ved korte regnvarigheter når utløpene ble dimensjonert med NRCS metoden. I motsetning viste SWMM at det er behov for mer fordrøyning ved korte regnvarigheter. Siden SWMM tar hensyn til infiltrasjon, i motsetning til NRCS, kan det være hensiktsmessig å undersøke om det er lønnsomt med økt bredde i nedre utløp ved bruk av andre metoder som inkluderer infiltrasjon.

Flere antagelser ble brukt for nedbørsfeltet. Det bør undersøkes hvordan variasjon i feltarealet, magasin størrelsen, konsentrasjonstiden, etc. påvirker funksjonsgraden til utløpsløsningene. Ved nedskalering av platene ble målene multiplisert med et skalerings tall, men resterende faktorer ved skalering ble sett bort ifra. Derfor anbefales det å teste plateløsningene også i stor skala. Utløpsløsningene bør undersøkes i sammenheng med et virkelig felt med spesifikke feltparametere. Spesielt med tanke på infiltrasjon som har en stor innvirkning på avrenningsmønstre ved korte regnvarigheter.

5 Konklusjon

Målet med oppgaven var å finne en utløpsløsning for fordrøyningsanlegg som påvirker strømmingen på en slik måte at avrenningen etterligner forløpet i et naturlig felt. Dette ble forsøkt ved å designe tre utløpsløsninger som består av to utløp med ulike geometrier.

Utløpsløsningene ble designet ved bruk av NRCS enhetshydrogrammet. Avrenningsmønsteret i naturen ble etterlignet ved bruk av et fordrøyningsanlegg som benytter utløpsløsningene i et urbant felt. Den første løsningen besto av et trapesformet og trekantet utløp. Det andre alternativet tok for seg et rektangel med et sirkulært utløp ovenfor. Siste utløpsløsningen benytter samme geometriene som første løsningen, men plasseringen er omvendt og størrelsen på utløpene varierer.

Ved bruk av forsøk ble utløpskoeffisienten og vannføringskurven til hver utløpsløsning bestemt. I snitt er felles koeffisienten 0,724 for første løsningen, 0,681 for andre platen og siste alternativet er 0,758.

Utløpskoeffisientene fra forsøkene ble videre benyttet i tre nedbør-avløpsmodeller for å analysere funksjonsevnen til utløpsløsningene. Her ble størrelsesforskjellen, samt tidsforskjellen mellom spissavrenningen i to felt betraktet. Resultater fra NRCS, den modifiserte rasjonelle formel og SWMM ble sammenlignet.

De første to metodene som ble nevnt ovenfor resulterte i at utløpsløsning 1 og 2 tilnærmer seg et naturlig avrenningsmønster ved å vedlikeholde tilnærmet samme forhold mellom spissavrenningene ved alle nedbørhendelser. Utløpsløsning 3 fører til et større avvik fra spissavrenningen i naturen og forholdstallene varierer sterkere for ulike hendelser. Utløpene generer en for høy spissavrenning som tyder på at dimensjonene er for store.

Resultatene ved bruk av SWMM viser til en økning i forskjell mellom spissavrenningen ved lavere gjentaksintervall. Dette skyldes at SWMM tar hensyn til infiltrasjon i motsetning til de andre metodene. Utløpsløsningene vil tilnærme seg avrenningen til et naturlig forløp ved større gjentaksintervall.

Med tanke på tidsforskyvningen mellom toppunktene var det kun mulig å bruke NRCS og SWMM. Første metoden viste at urbane spissavrenningen opptrer før den naturlige ved korte varigheter og senere ved lengre varigheter. Ved bruken av SWMM er den urbane

spissavrenningen forsinket ved korte varigheter og tidsforskjellen minker ved økende regnvarighet.

Basert på modelleringen viste utløpsløsning 2 størst potensial for tilnærming av et naturlig avrenningsforløp. Sammenligning med et virvelkammer forsterker denne antagelsen. Utløpsløsning 2 fører til en mindre forskjell mellom spissavrenningen i naturen og et urbant felt i forhold til et virvelkammer. I tillegg oppnår løsningen en jevnere tidsforskjell mellom toppunktene.

Utløpsløsningene er designet tilnærmet vedlikeholdsfritt og med et lavt behov for overvåkning, da løsningene ikke inneholder bevegelige deler. Tilstoppingsrisikoen er lav fordi dimensjonene ivaretar minste kravet i størrelse på utløpene. F-faktoren ligger mellom 0,57 og 0,59 for de naturbaserte utløpsløsningene. Dette medføre en økning i nødvendig magasin størrelse. Ved bruk av et representativt eksempel ble det funnet at økning i størrelsesordre vil kunne ligge på 2,6%.

Ved videre arbeid på løsningene anbefales det å minke størrelsen til utløpene, gjennomføre nye forsøk for å finne utløpskoeffisienten og undersøke løsningenes funksjonsevne i sammenheng med infiltrasjon og realistiske felt.

Referanser

- Abdelrahman, A.M., Abdelal, M.A., Mobasher, A.M., 2020. Investigating the effect of orifice area on the discharge coefficient for different orifice shapes [WWW Document]. Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM). URL <http://www.azharcermjournal.com/CERMF2004/P20-04-04.pdf> (accessed 5.14.21).
- Asplan Viak, 2016. Hydraulisk vurdering av fordrøyning av overvann på tak.
- Barlindhaug, J., 2018. Fordrøyning [WWW Document]. Store norske leksikon. URL <https://snl.no/fordrøyning> (accessed 4.13.21).
- Bjørnstad, J., Statistisk sentralbyrå, 2017. Minste kvadraters metode [WWW Document]. Store norske leksikon. URL https://snl.no/minste_kvadraters_metode (accessed 5.11.21).
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R., Markhus, E., 1997. Anvendt Urbanhydrologi [WWW Document]. NVE Publikasjon - Hydrologisk avdeling. URL http://publikasjoner.nve.no/publikasjon/1997/publikasjon1997_10.pdf (accessed 3.11.21).
- Brombach, H., 2012. Wirbeldrossel, Wirbelventile und Wirbelabschneider - von der Grundlagenforschung zu Industrieprodukten (Vortex throttle, vortex valve and vortex cutter - from basic research to industrial production) [WWW Document]. Wasser Wirtschaft. URL https://www.researchgate.net/profile/Hansjoerg-Brombach-2/publication/293312067_Vortex_Throttles_Vortex_Valves_and_Vortex_Separators_-_from_basic_Research_to_Commercial_Utilization/links/5bb776ec4585159e8d86fedb/Vortex-Throttles-Vortex-Valves-and-Vortex-Separators-from-basic-Research-to-Commercial-Utilization.pdf (accessed 5.14.21).
- Chin, D.A., 2013. Water-Resources Engineering, 3rd ed. Pearson.
- Cleveland, T.G., Thompson, D.B., Fang, X., 2011. Use of Rational and Modified Rational Method for Hydraulic Design [WWW Document]. Texas Tech University. URL https://www.depts.ttu.edu/techmrtweb/reports/complete_reports/0-6070-1.pdf (accessed 4.13.21).
- Dyrrdal, A.V., 2020. Dimensjonerende nedbør [WWW Document]. Store norske leksikon. URL https://snl.no/dimensjonerende_nedb%C3%B8r (accessed 4.7.21).
- Dyrrdal, A.V., Førland, E.J., 2019. Klimapåslag for korttidsnedbør: Anbefalte verdier for Norge [WWW Document]. NCCS rapport. URL https://klimaservicesenter.no/kss/rapporter/rapporter-og-publikasjoner_2 (accessed 4.13.21).
- Elstad, I.K., Norén, K.E., 2008. Minstevannføring ved små vannkraftverk [WWW Document]. NVE. URL https://publikasjoner.nve.no/rapport/2008/rapport2008_06.pdf (accessed 5.16.21).
- Endresen, S., 2006. Innløp- og utløpsarrangement ved overvannsdammer [WWW Document]. VA Miljø Blad Nr.70. URL https://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2014/11/Blad-70_23-10-13.pdf (accessed 5.9.21).

- Fang, X., Prakash, K., Cleveland, T., Thompson, D., Pradhan, P., 2005. Revisit of NRCS Unit Hydrograph Procedures [WWW Document]. URL https://www.researchgate.net/publication/253038310_Revisit_of_NRCS_Unit_Hydrograph_Procedures (accessed 3.11.21).
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E.J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J.E.Ø., Sandven, S., Sandø, A.B., Sorteberg, A., Ådlandsvik, B., 2015. Klima i Norge 2100, Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning [WWW Document]. NCCS rapport. URL https://cms.met.no/site/2/klimaservicesenteret/rapporter-og-publikasjoner/_attachment/6616?_ts=14ff3d4eeb8 (accessed 3.24.21).
- Lindholm, O., 2018. Håndtering av overvann LOD [WWW Document]. VA Miljø Blad Nr.125. URL <https://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2018/06/Blad-125-31.05.18.pdf> (accessed 3.24.21).
- Lindholm, O., Aaby, L., 2007. Mengderegulering i avløpsteknikken. Hva er best tilgjengelig teknologi? [WWW Document]. Vann. URL <https://mft.no/wp-content/uploads/Vann-2007-2.pdf> (accessed 4.14.21).
- Magnussen, K., Wifstad, K., Rangnes Seeberg, A., Stålhammar, K., Bakken, S.E., Banach, A., Hagen, D., Rusch, G., Aarrestad, P.A., Løset, F., Sandsbråten, K., 2017. Naturbaserte løsninger for klimatilpasning [WWW Document]. Menon economics, NINA, Sweco. URL <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m830/m830.pdf> (accessed 3.25.21).
- MFT, 2012. Fordrøyning av overvann [WWW Document]. VA Miljø Blad Nr.104. URL <https://www.va-blad.no/wp-content/uploads/2012/11/Blad-104.pdf> (accessed 3.24.21).
- MFT AS, 2015. Mengderegulering i avløpsteknikken [WWW Document]. VA Miljø Blad Nr.116. URL https://www.tonsberg.kommune.no/_f/p1/if6638220-616a-41d4-b83f-83096561f9e7/va-miljoblad-nr-116-mengderegulering-i-avlopsteknikken.pdf (accessed 4.13.21).
- Miljø- og Fluidteknikk AS, 2021. Mer om mengderegulering [WWW Document]. Nettside til MFT AS. URL <https://mft.no/mer-om-mengderegulering/> (accessed 5.27.21).
- Miljødirektoratet, 2020. Overvann [WWW Document]. URL <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/vann-hav-og-kyst/overvann/> (accessed 4.5.21).
- Musa, N.A., Bobai, S.B., 2018. Determination of Orifice Coefficients for Flow Through Circular and Rectangular Orifices [WWW Document]. Technology & Education (JOSTE). URL https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiLp-XOnMnwAhWr-ioKHSEnBkAQFjABegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fwww.atbuftejoste.com%2Findex.php%2Fjoste%2Farticle%2Fdownload%2F500%2Fpdf_328&usg=AOvVaw327s63S7inTiSJ4SiEVDEk (accessed 5.14.21).
- Natural Resources Conservation Service, 2007. Hydrographs [WWW Document]. National Engineering Handbook. URL

- <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17755.wba>
(accessed 3.25.21).
- Norsk Klimaservicesenter, 2017. Nedbørintensitet (IVF-verdier) [WWW Document]. Norsk Klimaservicesenter. URL <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb> (accessed 4.12.21).
- Norsk Vann, 2021. Hydrogram [WWW Document]. VA ordbok. URL <https://kurs.norskvann.no/mod/glossary/view.php> (accessed 4.6.21).
- Norsk Vann, 2012. Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem.
- Ødegaard, H., Thorolfsson, S.T., Lindholm, O., Østerhus, S.W., Sægrov, S., Mosevoll, G., Heistad, A., 2014. Vann- og avløpsteknikk, 2nd ed. Norsk Vann.
- Reader-Harris, M., 2015. Experimental Fluid Mechanics Orifice Plates and Venturi Tubes. Springer International Publishing.
- Sæterbø, E., Holmqvist, E., Asvall, R.P., Hoseth, K.A., Tesakr, E., Fergus, T., Lyche, E., Bargel, T., Jenssen, L., Kristiansen, G., 2010. Vassdragshåndboka. Tapir.
- Stenius, S., Glad, P.A., Wang, T.K., Væringstad, T., 2015. Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt [WWW Document]. NVE. URL https://publikasjoner.nve.no/veileder/2015/veileder2015_07.pdf (accessed 4.7.21).
- U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Scientist Emeritus, Rossman, L.A., 2015. Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1.
- Vann- og avløpsetaten, 2017. Overvannshåndtering: En veileder for utbygger [WWW Document]. URL <https://secure.styret.com/s3assets-public/show/31945> (accessed 4.13.21).
- Vlotman, W.F., 1989. Discharge measurement structures. International Institute for Land Reclamation and Improvement.

Vedlegg

I vedlegget presenteres måledataen fra forsøkene som ble gjennomført på laboratoriet. Målingene danner grunnlaget for vannføringskurvene og utløpskoeffisientene som blir presentert i resultatene. Tabell 17 viser måledataen fra første forsøket med plate 1 og tabell 18 viser dataen for andre forsøket.

Tabell 17: Måledata fra første forsøk med plate 1

Forsøk 1 med plate 1 den 25.04						
Høydeforskjell bunn til første utløp =					29	cm
Målinger						
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand	
n	t	t	V	V_L	h	
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]	
0	00:00:00	0,00	0	0,00	0,00	
1	05:01:50	302,00	40	0,74	30,3	
2	03:10:41	191,00	40	0,52	31,3	
3	01:59:14	119,00	40	0,44	32,5	
4	01:27:17	87,00	40	0,39	33,6	
5	01:09:00	69,00	40	0,41	35,5	
6	00:50:25	50,00	40	0,3	38,5	
7	00:42:25	42,00	40	0,52	42,5	
8	00:37:19	37,00	40	0,62	47,0	

Tabell 18: Måledata fra andre forsøk med plate 1

Forsøk 2 med plate 1 den 28.04						
Høydeforskjell bunn til første utløp =					29	cm
Målinger						
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand	
n	t	t	V	V_L	h	
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]	
0	00:00:00	0,00	0	0,00	0,00	
1	05:40:00	340,00	40	0,75	30,1	
2	03:41:00	221,00	40	0,32	30,7	
3	02:22:00	141,00	40	0,23	32,0	
4	01:50:00	110,00	40	0,21	32,6	
5	01:40:00	100,00	40	0,25	33,1	
6	01:22:00	82,00	40	0,24	33,8	
7	01:06:00	66,00	40	0,25	35,4	
8	00:54:00	54,00	40	0,19	38,1	
9	00:46:00	46,00	40	0,15	40,7	
10	00:42:00	42,00	40	0,18	43,1	
11	00:39:00	39,00	40	0,10	44,8	

Tabell 19 og 20 viser måledata for forsøkene med plate 2. Den første tabellen gjengir resultatene for første forsøket og nedenfor vises dataen for andre forsøket.

Tabell 19: Måledata fra første forsøk med plate 2

Forsøk 1 med plate 2 den 25.04					
Høydeforskjell bunn til første utløp =				28,6	cm
Målinger					
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand
n	t	t	V	V_L	h
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]
0	00:00:00	0	0,0	0,00	0,00
1	05:03:03	303	40,0	0,29	30,2
2	02:26:13	146	40,0	0,18	31,6
3	01:40:13	100	40,0	0,12	32,5
4	01:15:52	76	40,0	0,10	33,4
5	01:00:13	60	40,0	0,10	34,8
6	00:49:04	49	40,0	0,09	37,0
7	00:41:15	41	40,0	0,10	39,6
8	00:39:22	39	40,0	0,09	40,7
9	00:34:09	34	40,0	0,10	43,8
10	00:30:46	31	40,0	0,10	47,0

Tabell 20: Måledata fra andre forsøk med plate 2

Forsøk 2 med plate 2 den 28.04					
Høydeforskjell bunn til første utløp =				28,6	cm
Målinger					
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand
n	t	t	V	V_L	h
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]
0	00:00:00	0	0,0	0,00	0,00
1	05:05:00	305	40,0	0,05	30,1
2	03:27:00	207	40,0	0,05	30,8
3	02:12:00	132	40,0	0,04	31,8
4	01:49:00	109	40,0	0,05	32,3
5	01:20:00	80	40,0	0,04	33,1
6	01:08:00	68	40,0	0,05	33,8
7	00:52:00	52	40,0	0,05	35,9
8	00:48:00	48	40,0	0,06	36,9
9	00:44:00	44	40,0	0,06	38,0
10	00:38:00	38	40,0	0,07	40,4
11	00:34:00	34	40,0	0,06	43,0
12	00:31:00	31	40,0	0,07	45,7

Nedenfor presenteres måledata for første forsøket med plate 3, se tabell 21. Under i tabell 22 finnes resultatene for andre forsøket med siste platen.

Tabell 21: Måledata fra første forsøk med plate 3

Forsøk 1 med plate 3 den 25.04					
Høydeforskjell bunn til første utløp = 13,8 cm					
Målinger					
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand
n	t	t	V	V_L	h
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]
0	00:00:00	0	0	0,00	0,00
1	02:35:21	155	40	0,30	16,3
2	02:02:07	122	40	0,23	17,1
3	01:35:34	95	40	0,18	17,8
4	01:09:40	69	40	0,14	19,4
5	00:58:19	58	40	0,11	21,2
6	00:48:57	48	40	0,12	23,5
7	00:39:10	39	40	0,10	27,9
8	00:34:00	34	40	0,10	32,0
9	00:29:04	29	40	0,09	38,0

Tabell 22: Måledata fra andre forsøk med plate 3

Forsøk 2 med plate 3 den 28.04					
Høydeforskjell bunn til første utløp = 13,8 cm					
Målinger					
Målingnr.	Tid	Tid	Volum	Lekkasje	Vannstand
n	t	t	V	V_L	h
-	[min]	[s]	[L]	[L]	[cm]
0	00:00:00	0	0	0,00	0,00
1	03:05:00	185	40	0,25	15,7
2	02:24:00	144	40	0,20	16,4
3	01:45:00	105	40	0,17	17,4
4	01:25:00	85	40	0,12	17,9
5	01:08:00	68	40	0,12	19,2
6	00:56:00	56	40	0,10	20,9
7	00:47:00	47	40	0,09	23,5
8	00:42:00	42	40	0,09	25,4
9	00:39:00	39	40	0,08	27,4
10	00:33:00	33	40	0,08	31,5
11	00:31:00	31	40	0,08	33,9
12	00:27:00	27	40	0,08	38,3



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway