



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2016 30 stp
Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi

Analyse av overvannsnett i Ås sentrum ved bruk av simuleringsprogrammet SWMM

Analysis of the stormwater network in the center of
Ås using the simulation program SWMM

Eirunn Dvergsnes
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avsluttende del av utdanningen min i Vann- og miljøteknikk, ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Oppgaven er skrevet ved Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi (IMT) våren 2016.

Masteroppgaven er skrevet etter forslag fra Ås kommune. Måleutstyr for avrenning til oppgaven ble klargjort og satt ut i månedsskifte juli/august 2015. Dette ble sjekket med jevne mellomrom utover høsten. Selve oppgaven har tatt form i løpet av i overkant av 4 måneder i begynnelsen av 2016. Oppgaven har gitt en smakebit på hvilke utfordringer som kan dukke opp i arbeidslivet. Underveis har utfordringene tidvis gitt mye frustrasjon, men også gitt mye motivasjon og glede i å se nye løsninger når virkeligheten ikke er helt som teorien.

Jeg vil takke Professor Oddvar Lindholm for støtte, veiledning og tilstedeværelse når det har vært nødvendig. Takk til Lars Buhler i Ås kommune som har stilt med forslag til oppgave, veiledning, tilgang til Hydra II og engasjement for overvannshåndtering.

Takk til Ås kommune som har stilt opp med måleutstyr, og gitt tilgang til ledningsnett og databasen sin. Og til Esmaeil Gasabei for hjelp med retting av feil fra Gemini.

Jeg vil også takke Kaya Brekke Nilsen for gode tilbakemeldinger på oppgaven underveis og korrekturlesning.

Takk til pappa, Terje Dvergsnes for gode spørsmål, tilbakemeldinger underveis og korrekturlesning.

Ås 15.05.2016

Eirunn Dvergsnes

Sammendrag

Jorden står ovenfor klimaendringer med økende temperaturer og en hyppigere forekomst av intense nedbørshendelser. For overvannssystemer i urbane strøk er den økte nedbørintensiteten en stor utfordring. Urbanisering har medført en stor andel tette flater, og lukking av naturlige bekkesystemer. Dette krever en raskere bortledning av regnvannet gjennom rør i bakken. Store deler av det norske overvannssystemet er ikke dimensjonert etter dagens norske standard. Denne ble revidert senest 2008 for å ta høyde for en hyppigere forekomst av intense nedbørshendelser. Den høye intensiteten på nedbørshendelser gir liten mulighet for infiltrasjon, og den krever mye kapasitet i rørene ettersom avrenningen skjer raskt. Dette skaper oversvømmelser og kan føre til skade på bebyggelse.

Omfanget av skader på bebyggelse og oversvømmelse kan reduseres ved hjelp av LOD tiltak (lokal overvannsdiskonering) uten utskiftning av hele rørsystemet. LOD går ut på lokal infiltrering og fordrøyning av vannet før det eventuelt blir ledet videre i rør.

IVF-kurver (intensitet, varighet, frekvens) er fremstilt av Meteorologisk institutt, som på grunnlag av målt nedbør ved en målestasjon har estimert hvor intense, hvor lange og hvor ofte nedbør av ulike størrelser vil inntreffe i området til målestasjonen. Varighetene kan eksempelvis være på 10-, 20-, 50- og 100-års gjentaksintervall.

Denne oppgaven er skrevet etter et forslag fra Ås kommune som ønsker å kartlegge kapasiteten til overvannsnett i Ås sentrum. Det ble laget en overvannsmodell i SWMM som ble kalibrert ved hjelp av 5 nedbørshendelser. Til kalibreringen ble det benyttet nedbørsdata fra NVE sin database Hydra II og avrenning ble målt i en kum ved hjelp av måleutstyr som benytter ultralyd. Gjennom følsomhetsanalysen til modellen ble det funnet at parameterne som gav størst utslag på den maksimale avrenningen var andel tette flater, både for boliger og veier. Til kalibreringen ble 2 av nedbørshendelsene benyttet under selve kalibreringen og 3 til etterprøving av modellen. Gjennom modellen ble det sett på antall kummer med oversvømmelser og hvor mange av dem som gav skade på bygninger ut fra dagens dimensjoneringskriterier, samt hvordan systemet ble påvirket under nedbørshendelser med 50 % klimatillegg. Det ble simulert tre ulike LOD tiltak for fire ulike gjentaksintervall, for å kartlegge påvirkningen mot antall oversvømmelser. Reduksjonen ble sett på som tilfredsstillende om effekten av tiltaket med et klimatillegg på 50 % ble redusert til dagens IVF-kurver uten tiltak.

Gjennom simuleringen ble det funnet at:

Dagens ledningsnett oppfyller ikke kriteriene til dagens dimensjoneringsstandard. LOD tiltakene som ble gjennomført var å frakoble direkte taknedløp, fordrøyning i alle delfeltene og bruk av Bio-Retention Cell. Sistnevnte hadde tilnærmet ingen effekt ved høye gjentaksintervaller. Tette flater frakoblet fra bygninger gav god reduksjon på de fleste gjentaksintervall. Fordrøyning var et tiltak som var tilfredsstillende for alle gjentaksintervall.

Abstract

The earth is facing rising temperatures and more frequent occurrence of intense precipitation events. For stormwater systems in urban areas the increased precipitation intensity is a major challenge. Urbanization has led to a large proportion of impervious surfaces, and closing of natural stream systems. This requires a faster drainage of rain water through the pipes in the ground. Large parts of the Norwegian stormwater system are not designed for today's Norwegian standard. This was revised up latest in 2008 in order to allow for more frequent occurrence of intense precipitation events. The high intensity of rainfall events gives little opportunity for infiltration and it requires a lot of capacity in the pipes since the runoff occurs quickly. This creates floods and can cause damage to buildings. The extent of damage to buildings and flooding can be reduced by using LID controls (low impact development) without replacing the entire piping system. LID concerns local infiltration and attenuation of the water before it possible being led further into pipes.

IVF curves (intensity, duration, frequency) being prepared by the Norwegian Meteorological Institute, which on the basis of measured precipitation at a weather station has estimated how intense, how long and how often precipitation of various sizes will occur in the area around the station. The duration can for example be in 10-, 20-, 50- and 100-year recurrence interval. This thesis is written based on a suggestion from Ås municipality who want to map the capacity of the stormwater network in the center of Ås. It was made a stormwater model in SWMM which was calibrated by using 5 precipitation events. For calibration rainfall from NVE's database Hydra II and runoff measured in a manhole by equipment using ultrasound were used. Through sensitivity analysis of the model, it was found that the parameter that gave the greatest impact on the maximum runoff was the proportion of impervious surfaces, both for housing and roads. For calibration 2 of the rainfall events was used for the calibration and 3 for verification of the model. The model looked closer into the number of manholes with floods and how many of those who did damage to buildings based on the current design criteria and how the system was affected during precipitation events with 50 % climate addition. It was simulated three different LID controls at four different return periods to chart the impact on the number of flooding. The reduction was seen as satisfying if the effect with the addition of 50 % for climate was reduced to the current IVF curves.

Through simulations, it was found that:

Today's pipe system does not meet the criteria to the current design standards. LID controls simulations were disconnection of rooftops, attenuation in all subfield and use of Bio-Retention Cell. The last one had no effect at high recurrence. Impervious surfaces disconnected from buildings gave good reduction on most recurrence. Attenuation was satisfying for all recurrences.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innholdsfortegnelse	VII
Figurliste.....	X
Tabelliste	XI
Formelliste.....	XII
Liste over forkortelser	XII
1. Innledning.....	1
1.1 Mål for oppgaven.....	1
1.2 Problemstilling.....	2
1.3 Fremgangsmåte, metode og struktur.....	2
2. Litteraturstudie	3
2.1 Klima	3
2.1.1 Det hydrologiske kretsløpet	5
2.1.2 Nedbør	6
2.2 Det urbane avløpssystemet	6
2.2.1 Avrenning	6
2.2.2 Avløpssystem i Norge	8
2.2.3 Tiltak for håndtering av overvann	8
2.2.4 Beregning av avrenning.....	10
2.2.5 Dimensjonering av avløpsnett	13
2.3 Nedbørsdata	13
2.3.1 Nedbørmåling.....	13
2.3.2 Hydra II	15
2.3.3 IVF-kurver.....	15
2.3.4 Konstruerte regn fra IVF-kurvene	16
2.4 Matematiske modeller	18
2.4.1 SWMM.....	18
2.4.2 Modelloppbygging i SWMM	19
3. Prosjektområdet.....	25
3.1 Nedbørfeltet	25
3.2 Nedbør	27
3.3 Avrenning	27
3.3.1 Isco 2110 Ultrasonic Flow Module	27
3.3.2 Flowlink	28
4. Metode.....	29
4.1 Beregne mengden overvann	29
4.1.1 Konsentrasjonstid og avrenningskoeffisient	29
4.1.2 Konstruksjon av regnhyetogram	30
4.1.3 Den rasjonelle formel	32
4.2 Måledata benyttet til kalibreringen	32

4.2.1	Nedbør.....	32
4.2.2	Avrenning.....	33
4.3	Oppbygging av modellen.....	34
4.3.1	Beregningsmetode med SWMM modell.....	35
4.3.2	Parametere.....	35
4.4	Kalibrering.....	36
4.4.1	Verifikasjon av modellen.....	36
4.4.2	Analyse av modellfølsomheten.....	37
4.4.3	Etterprøving.....	38
4.5	Simuleringer gjennomført i modellen.....	38
4.5.1	Simulering av dagens situasjon.....	39
4.6	Simulering av LOD tiltak.....	39
4.6.1	Avkobling av tak med direktetilkobling.....	40
4.6.2	Fordrøyning i nedslagsfeltene.....	40
4.6.3	Bio-Retention Cell.....	41
5.	Resultat.....	43
5.1	Kalibrering.....	43
5.1.1	Verifikasjon av modellen.....	43
5.1.2	Analyse av modellfølsomheten.....	43
5.1.3	Etterprøving.....	47
5.2	Simuleringer gjennomført i modellen.....	50
5.2.1	Regndata.....	50
5.2.2	Simulering av dagens situasjon.....	51
5.3	Simulering av LOD tiltak.....	53
5.3.1	Avkobling av tak med direktetilkobling.....	53
5.3.2	Fordrøyning i nedslagsfeltene.....	54
5.3.3	Bio-Retention Cell.....	55
6.	Diskusjon.....	57
6.1	Beregning av overvannsmengder.....	57
6.1.1	Konsentrasjonstid.....	57
6.1.2	Konstruksjon av regnhyetogram.....	57
6.1.3	Satt inn i den rasjonelle formel.....	57
6.2	Måledata benyttet til kalibreringen.....	58
6.2.1	Nedbør.....	58
6.2.2	Avrenning.....	58
6.3	Oppbygging av modellen.....	58
6.4	Kalibrering.....	58
6.4.1	Verifikasjon av modellen.....	58
6.4.2	Analyse av modellfølsomheten.....	59
6.4.3	Få regn å kalibrere mot.....	59
6.4.4	Etterprøving.....	59
6.5	Simuleringer gjennomført i modellen.....	60
6.5.1	Regndata.....	60

6.5.2	Simulering av dagens situasjon	60
6.6	Simulering av LOD tiltak	60
6.6.1	Avkobling av tak med direktetilkobling.....	60
6.6.2	Fordrøyning i nedslagsfeltene	60
6.6.3	Bio-Retention Cell.....	61
7.	Konklusjon	63
8.	Referanseliste/kildeliste.....	65
Vedlegg A	.....	69
	<i>IVF-kurve for Rustadskogen målestasjon</i>	69
Vedlegg B	.....	70
	<i>Parameterverdier for SWMM hentet fra manualen (Rossman 2015)</i>	70
Vedlegg C	.....	72
	<i>Regnhyetogram</i>	72
Vedlegg D	.....	75
	<i>Nedbørshendelser</i>	75
	Regn 1.....	75
	Regn 2.....	75
	Regn 3.....	76
	Regn 4.....	76
Vedlegg E	.....	77
	<i>Kalibrering og etterprøving</i>	77
	Regn 1.....	77
	Regn 2.....	78
	Regn 3.....	79
	Regn 4.....	79
	Regn 5.....	80
Vedlegg F	.....	81
	<i>Oversikt over oversvømmelser</i>	81

Figurliste

Figur 1: De globale vendekretsene for varmetransport. Hentet fra Met Office (Met Office 2016).	4
Figur 2: Illustrasjon av vannets kretsløp (NGU 2015).	5
Figur 3: Illustrerer hvordan avrenningen fra en gitt intensitet av nedbør utarter seg i et urbant område, et jordbruksområde og et naturområde (Lindholm 2014c).	7
Figur 4: Illustrasjon av «Treleddstrategien». Tallene som er oppgitt er ment som et eksempel og må tilpasses lokalt (Lindholm 2014c).	9
Figur 5: Eksempel på godt planlagt overvannshåndtering hentet fra veiledning av Oslo kommune.	10
Figur 6: Virkningen av Imhoff sats for delfelt med ulike former.	12
Figur 7: Viser hvor store variasjonene av nedbør kan være under korte avstander. Eksempelet viser Øvrevoll, Blindern og Vika i Oslo med avstander på fra 3,3 – 6,6 km (Lindholm 2014b).	14
Figur 8: Prinsipp for pluviometer med en beholder for kontroll av totalvolumet (Kitterød 2015).	15
Figur 9: Illustrerer volumet som forsvinner når kasseregn benyttes alene (Lindholm 2014b).	17
Figur 10: Konstruksjon av regnhyetogram (Lindholm 2014b).	17
Figur 11: Hortons infiltrasjonsmodell (Sælthun 2001).	20
Figur 12: Kartutsnitt som viser analyseområdet for oppgaven markert med en rød sirkel. Kartet er hentet fra Statens kartverk (Statens kartverk 2016).	25
Figur 13: Kartutsnittet viser med røde trekkanter hvor de tre utløpene i modellen er plassert. Den blå prikken er plasseringen til Rustadskogen målestasjon (Statens kartverk 2016).	26
Figur 14: Infiltrasjonsevnen i området, hentet fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU 2016).	26
Figur 15: Mål til rennen som var plassert i kummen.	27
Figur 16: Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.	31
Figur 17: Søylene viser nedbøren 3.-4. desember 2015 i 5 minutters intervaller.	33
Figur 18: Viser den målte avrenningen etter nedbøren 3.-4. desember 2015 i 1 minutt intervall.	33
Figur 19: Modellen av Ås sentrum tegnet inn i SWMM.	34
Figur 20: Gjentaksintervall på 20-år med og uten klimatillegg.	39
Figur 21: Fremstilling av Bio-Retention Cell.	41
Figur 22: Kummer med feil høyde ble rettet opp, figuren viser samme ledningsstrek før og etter feilen er rettet opp.	43
Figur 23: Resultat av følsomhetsanalysen som ble utført på 20-årsregnet med parameterne valgt i primærmodellen. Henholdsvis: bredde på delareal, tette flater for boliger og vei, helning på delfelt, ruhet permeable flater, ruhet rør og grop-magasin permeable flater.	44
Figur 24: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelsen 28.-29. november 2015.	46
Figur 25: Valgt sekundærmodell fremstilt mot avrenningen 28.11.2015-29.11.2015.	46
Figur 26: Etterprøving av nedbørshendelse 3 i intervall på 1 minutt.	49
Figur 27: Etterprøving av nedbørshendelse 4 i intervall på 1 minutt.	49
Figur 28: Etterprøving av nedbørshendelse 5 i intervall på 1 minutt.	50
Figur 29: Sammenlikning av intensiteter fra IVF-kurven.	51
Figur 30: Viser oversvømmelser i kum og kapasiteten til rør ved 10- og 20-års gjentaksintervall.	52
Figur 31: Viser effekten i avrenning når alle direktenedløp fra tak kobles av.	53
Figur 32: Viser effekten av en økt tilrenningstid på 7 minutter i alle delfelt.	54
Figur 33: Viser endinger i avrenning med bruk av Bio-Retention Cell i delområder med bebyggelse.	55
Figur 34: Regnhyetogram for 10-års gjentaksintervall.	72
Figur 35: 10-års gjentaksintervall med klimatillegg.	72
Figur 36: Regnhyetogram for 50-års gjentaksintervall.	73
Figur 37: 50-års gjentaksintervall med klimatillegg.	73

Figur 38: Regnhyetogram for 100-års gjentaksintervall	74
Figur 39: 100-års gjentaksintervall med klimatillegg	74
Figur 40: Søylene viser nedbøren 01.-03.september 2015 i 5 minutters intervaller.	75
Figur 41: Søylene viser nedbøren 28.-29.november 2015 i 5 minutters intervaller.	75
Figur 42: Søylene viser nedbøren 24.-25.november 2015 i 5 minutters intervaller.	76
Figur 43: Søylene viser nedbøren 8.-9. desember 2015 i 5 minutters intervaller.	76
Figur 44: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelse 1.	77
Figur 45: Valgt sekundærmodell for nedbør 1.....	77
Figur 46: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelse 2.	78
Figur 47: Valgt sekundærmodell for nedbør 2.....	78
Figur 48: Etterprøving av nedbørshendelse 3.	79
Figur 49: Etterprøving av nedbørshendelse 4.	79
Figur 50: Etterprøving av nedbørshendelse 5.	80

Tabelliste

Tabell 1: Avrenningsfaktor for ulike typer flater hentet fra Vassdragshåndboka (Sæterbø et al. 1998)..7	
Tabell 2: Forslag til tilrenningstider hentet fra Northern Virginia BMP Handbook (NVPDC & ESI 1992).	11
Tabell 3: Minimums dimensjonerende hyppigheter for felles- og separatsystemer (Lindholm et al. 2008).	13
Tabell 4: Utdrag fra IVF-kurven for Rustadskogen basert på 37 sesonger, gyldig 23.02.2016 (Meteorologisk Institutt 2016).....	16
Tabell 5: Resultat fra et 60 minutters regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.....	31
Tabell 6: Parameterverdier valgt til primærmodellen.	35
Tabell 7: Tabellen viser hvordan maksimal avrenning og volumet er fordelt i de tre utløpene til modellen når et 20-års regn simuleres.	37
Tabell 8: Oversikt over parameterne lagt inn i Bio-Retention Cell som LOD tiltak i SWMM.	42
Tabell 9: Viser alternativer til valg av sekundærmodellen etter følsomhetsanalysen.....	45
Tabell 10: Parameterne til primær- og sekundærmodellene.	47
Tabell 11: Tabell for utregning av hvor god kalibreringen er. Oppgitt med F-verdi fremstilt fra maksimal vannføring, tidspunkt for denne og volum av avrenningen.	47
Tabell 12: En oversikt over antall kummer med oversvømmelse og beregnede skader på bygninger. .	52
Tabell 13: Oversikt over antall oversvømmelser når hustak er frakoblet.....	53
Tabell 14: Tallene for utregning av fordrøyningsvolumet.	54
Tabell 15: Oversikt over antall oversvømmelser med fordrøyning i alle delfelt.	55
Tabell 16: Oversvømmelser med Bio-Retention Cell som tiltak.	56
Tabell 17: Hele IVF-kurven for Rustadskogen basert på 37 sesonger.	69
Tabell 18: Grop-magasin i mm for permeable og tette flater.....	70
Tabell 19: Ruhet for permeable flater.....	70
Tabell 20: Ruhet for rør.....	70
Tabell 21: Avtakingskonstant og tørketid.....	70
Tabell 22: Minimum infiltrasjon ved ulike jordstrukturer	71
Tabell 23: Maksimum infiltrasjonsrate ved ulik grad av jordfuktighet.....	71
Tabell 24: Oversikt over oversvømte kummer ved 10-års gjentaksintervall.....	81

Tabell 25: Oversikt over oversvømte kummer ved 20-års gjentakintervall.....	84
Tabell 26: Oversikt over oversvømte kummer ved 50-års gjentakintervall.....	87
Tabell 27: Oversikt over oversvømte kummer ved 100-års gjentakintervall.....	90

Formelliste

Formel 1: Den rasjonelle formel.....	10
Formel 2: Konsentrasjonstiden til vanndråper gjennom feltet.	11
Formel 3: Strømningstiden til nedslagsfeltet.	12
Formel 4: Hortons ligning.	20
Formel 5: Mannings formel for strømningshastighet.....	21
Formel 6: Kontinuitetsligningen til Saint Venant.	22
Formel 7: Momentbevaringsligningen til Saint Venant.	22
Formel 8: Maksimal avrenning i prosent.	36
Formel 9: F-verdien som benyttes for å se hvor optimal modellen er.....	38
Formel 10: Formel for den antatte regnintensiteten I.....	40
Formel 11: Beregning av innløpsvolum til magasinet.	40
Formel 12: Beregning av utløpsmengde til magasinet.....	41
Formel 13: Nødvendig størrelse på fordrøyningsvolumet.	41

Liste over forkortelser

- EPA** The US Environmental Protection Agency
- GIS** Geografiske informasjonssystemer
- IMT** Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi
- IVF** Intensitet, volum, frekvens
- LOD** Lokal overvannsdiskonering
- NMBU** Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
- NVE** Norges vassdrags- og energidirektorat
- SWMM** Storm water management model

1. Innledning

Overvann er vannet som renner av tette flater som eksempelvis tak og veier. Tidligere ble grøntarealer i byer benyttet til boligutbygging, plener ble asfaltert og naturlige bekkeløp ble lukket, men nå åpnes flere av dem igjen. Rørene i bakken var ikke dimensjonert for den økende andelen av tette flater som urbaniseringen skapte. Tette flater hindrer den naturlige infiltrasjonen i jorden.

Klimaendringer er noe som stadig får plass i medias søkelys. En del av endingene vi har sett i Norge de senere årene er et mildere og våtere vær. Nedbøren som faller er også gjerne mer intens enn tidligere. Kombinasjonen av tette flater og økende regnintensiteter er problematisk med tanke på oversvømmelser og skade på bebyggelse i urbane strøk.

Fellessystemer ledet overvann og avløp i samme rør mot renseanlegget. Etersom kraftige regnskyll tar opp store deler av kapasiteten i rørene har flere kommuner gått over til separatsystemer hvor avløp og overvann er skilt fra hverandre.

Ås kommune har et ønske om å kartlegge overvannshåndringen i kommunen. Denne oppgaven er skrevet i samarbeid med Ås kommune og vil se nærmere på overvannshåndringen i Ås sentrum. Ved hjelp av programvaren SWMM blir det kjørt simuleringer av nedbør ved ulike gjentakintervall fra IVF-kurven. Kommunen hadde på forhånd lastet inn informasjon om kummer og rør fra Gemini databasen. Det ble lagt inn nedslagsfelt manuelt og gjennomført en kalibrering utfra nedbørsdata fra NVE og avrenningsdata målt i en kum. Simuleringer ble kjørt med ulike gjentakintervall på nedbøren, det ble også lagt på et klimatillegg på 50 %. Det vil også bli sett på muligheter for fordrøyning og andre tiltak for å unngå de høyeste toppene av regnskyll. Dette for å unngå oversvømmelser, samt unngå kostbar oppgradering til større rør.

1.1 Mål for oppgaven

Oppgaven har som mål å benytte nedbør fra Rustadskogen målestasjon og avrenning fra en kum i Ås sentrum til å kalibrere en overvannsmodell i SWMM.

Ved bruk av modellen vil det så bli forsøkt å analysere nedbørfeltet med tanke på:

- Kapasiteten til dagens ledningsnett ved dagens- og fremtidige nedbørshendelser
- Omfanget av oversvømmelser og skade på bebyggelse.
- Virkningen av ulike LOD tiltak

1.2 Problemstilling

Problemstillingen for oppgaven er:

- Hvilke parametere i modellen er mest følsomme ved kalibrering av modellen?
- Hvordan er kapasiteten til ledningsnett i dag?
- Hvilken innvirkning kan ulike LOD tiltak ha med tanke på oversvømmelser?

1.3 Fremgangsmåte, metode og struktur

Oppgaven er delt inn i 7 hoveddeler. Den starter med en innledning med beskrivelse av oppgaven med målsetning og problemstilling. En litteraturstudie vil så ta for seg noen aktuelle tema for overvann og håndteringen av det. Prosjektområdet får en kort presentasjon før metoden gjennomgås. Resultater blir presentert før de diskuteres og det konkluderes ut fra problemstillingen til oppgaven.

2. Litteraturstudie

2.1 Klima

Klima og klimaendringer har vært mye omtalt i media de siste årene. Ordet klima kommer opprinnelig av det greske ordet etymologi som betyr helning. Klima forklarer altså hvordan jordens akse har en skråstilling i forhold til solinnstrålingen (Dannevig & Harstveit 2015). Det er denne skråstillingen som gjør at jorden har årstider grunnet variasjonene i solinnstrålingen gjennom året. I dagligtale blir ordet klima brukt om det gjennomsnittlige været med tanke på nedbør, temperatur og vind. Globalt er det særlig temperaturen som benyttes som mål for å beskrive utviklingen av klimaet (Kindem & Johnnessen 2008).

For å kunne beskrive hvordan været er og utvikler seg blir det sammenliknet med en referanseperiode som kalles normalperiode. En normalperiode er en tidsperiode som går over 30 år. Grunnet en internasjonal avtale benytter alle land den samme normalperioden som referanseramme når det refereres til de gjennomsnittlige meteorologiske og hydrologiske data som måles. Tidsrommet som i dag benyttes som normalperiode er 1961 til 1990 (Tollan 2002).

Flere steder i verden har de senere årene registrert en økende temperatur både i luft og i vann. Sirkulasjonsmønstrene for vind, vann og temperaturer på jorden er sammensatt, noe som gjør at endringene i temperaturen ikke bare påvirker lokalt, men hele kloden. Middelttemperaturen har på et globalt plan økt med 0,74 °C i løpet av de siste 100 årene. Det har også blitt en synlig økning av kraftig nedbør i mange områder (Kindem & Johnnessen 2008).

Klimatiske endringer over lange tidsrom, som istider er påvirket av jordens avstand til sola på sommer og vinterstid, samt endringer i jordens bane rundt sola. Regionalt vil det forekomme naturlige svingninger i klimaet i et tidsperspektiv på mindre enn 100 år. Den industrielle revolusjonen som startet ved slutten av 1700-tallet har ført med seg en kraftig økning i utslipp av klimagasser, mye grunnet en økt forbrenning av kull, olje og gass. Dette har bidratt til at avviket i klimavariasjonene er større enn det som normalt har utartet seg (Bjerknessenteret 2009).

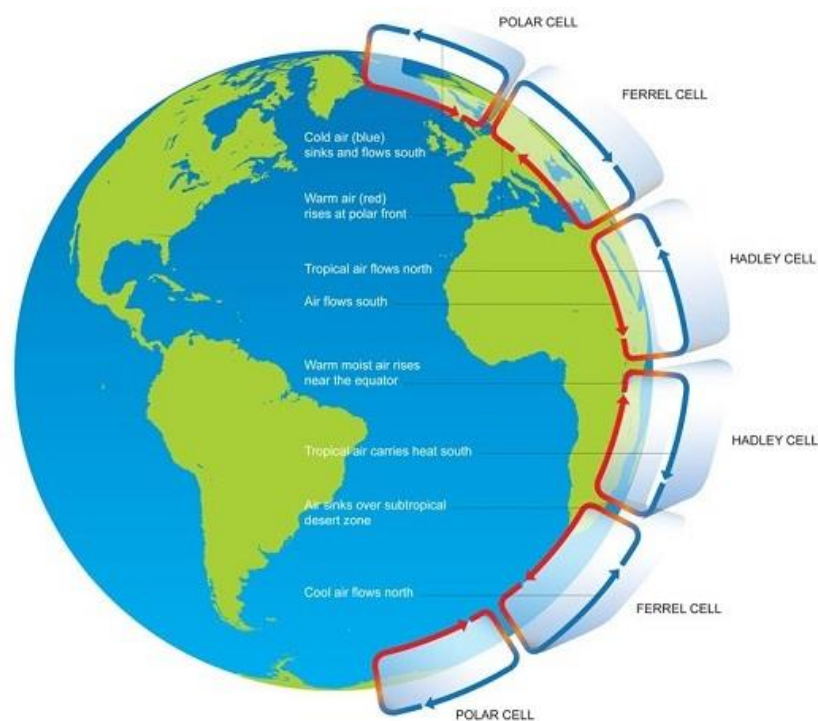
Solenergien jorden mottar gjennom solinnstrålingen er den største drivkraften til værsystemene på jorden. Samtidig som jordens rotasjon og topografi også har en påvirkning på luftstrømmene.

Når solstrålene treffer jordoverflaten vil noe av energien varme opp jordoverflaten og noe vil reflekteres tilbake som langbølge stråling. I atmosfæren finnes det gasser og partikler som igjen reflekterer store deler av denne langbølgede varmeutstrålingen. Atmosfæren er på denne måten med på å skape et drivhus for jorden. Uten dette drivhuset ville den gjennomsnittlige temperaturen på jordoverflaten vært -18 °C ikke +15 °C som den er i dag (Bjerknessenteret 2009a). Økningen i menneskeskapte klimagassutslipp har bidratt til å øke drivhuseffekten ytterligere. Gjennom økte temperaturer smelter mer havis og snø, flater som vanligvis ville reflektert energien fra sola. Når de hvite flatene forsvinner vil mer energi fra sola absorberes

og temperaturene på jorden vil stige mer. Temperaturøkningen har da en selvforsterkende og uheldig effekt på de globale klimaendringene (IPCC 2013).

Selv om Norge ligger plassert på de nordlige breddegrader er klimaet i Norge mildere enn andre land på samme breddegrader. En av forklaringene på dette er Golfstrømmen. Den transporterer varme fra området rundt ekvator og nordover. Uten Golfstrømmen ville store deler av Europa hatt en lavere temperatur og Norge ville vært 10-15 grader kjøligere (Bjerknessenteret 2009b).

Jordens storskala vindmønster er også viktig for varmetransporten fra ekvator mot polene. Når jordoverflaten varmes opp av solstrålene blir luften over bakken varm og stiger. Dette skjer i størst grad nær ekvator. De varme stigende luftmassene blir presset nord- og sørover i en celle som kalles Hadley celle til omtrent 30. breddegrad. Den nedkjølte luften synker på breddegraden, og transporteres på bakkenivå tilbake til ekvator (Universitet i Oslo 2011). Figur 1 viser vendekretsene for varmetransport på jorden. De to andre cellene mot nord og sør kalles Ferrel celle og polar celle (Met Office 2016).



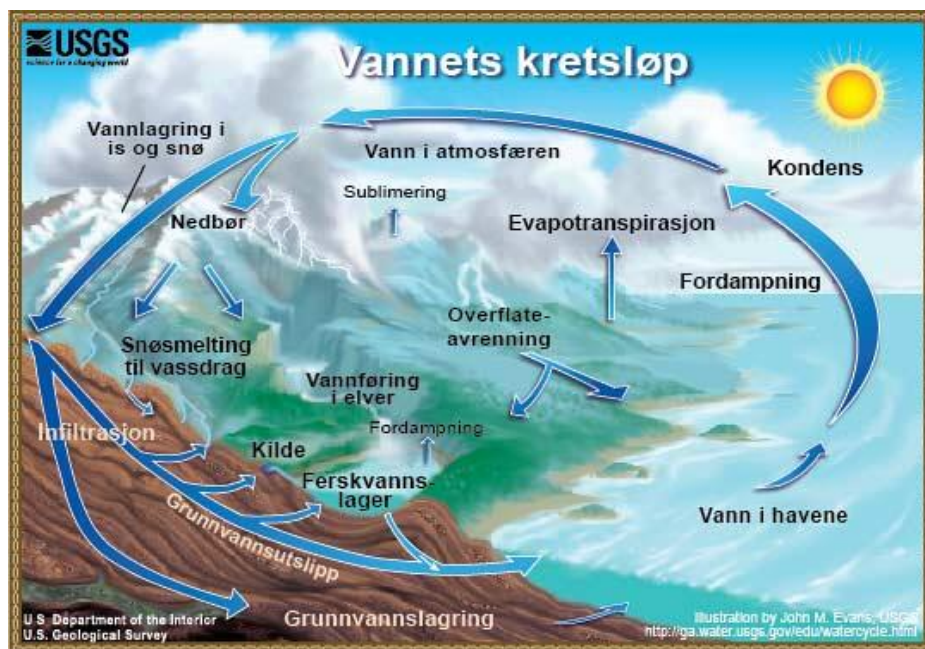
Figur 1: De globale vendekretsene for varmetransport. Hentet fra Met Office (Met Office 2016).

Norge ligger i overgangen mellom Ferrel- og polarcellen. Dette er med på å gi et ustabilisert vær når de to frontene med varme og kalde luftstrømmer møtes. Kollisjonen mellom frontene og lavtrykket som går fra vest mot øst på den nordlige halvkule er opphavet til mye av nedbøren i Norge (Met Office 2016).

2.1.1 Det hydrologiske kretsløpet

Det hydrologiske kretsløpet omhandler sirkulasjonen av vannet gjennom ulike prosesser på jorden. Hoveddrivkraften til dette er den samme som for værsystemene på jorden, nemlig solenergien. Når solstrålene treffer jordoverflaten varmes vannet opp. Vandrdråpene vil da endres fra væske til gassform, denne prosessen kalles fordampning. Fordampning forekommer på vannoverflater og gjennom de små poreåpningene på blader til planter, kalt stomata. (Kitterød 2015a).

Når vannet er i gassform vil den stige oppover i luftlagene sammen med den varme luften. Varm luft har en større evne til å holde på vannet enn kjølig luft. Hvor stor mengde vann som kan holdes tilbake i luften er avhengig av mettningsstrykket i luften. Mettningsstrykket synker i takt med temperaturen. Når temperaturen synker vil dampen som er i luften starte en dannelselse av vandrdåper, en kondensasjon. Atmosfæren inneholder små støvpartikler og andre partikler som dråpene fester seg til (Tollan 2002). Vandrdåpene er lette og kan derfor holde seg svevende en stund, men etterhvert som de slår seg sammen med andre dråper vil de til slutt bli så tunge at de feller ut. Når vannet faller til jordoverflaten i fast eller flytende form kalles det nedbør (Dannevig 2009). Nedbøren i form av is, snø eller regn som treffer bakken vil først bli liggende på overflaten. Noe av vannet vil så infiltrere ned i bakken og noe vil renne langs overflaten mot elver og bekker til det laveste punktet i området. Figur 2 nedenfor viser en illustrasjon av vannets kretsløp (NGU 2015).



Figur 2: Illustrasjon av vannets kretsløp (NGU 2015).

2.1.2 Nedbør

Nedbør kan deles inn i tre ulike typer utfra intensitet, varighet og nedslagsområde. De kalles frontnedbør, ortografisk nedbør og konvektiv nedbør.

Frontnedbøren oppstår i en overgangssone hvor to luftmasser med ulik temperatur og luftfuktighet møtes. Typisk for frontnedbør er den lave intensiteten og store utstrekningen av nedbørfeltet. Eksempel på overgangssoner for luftmassene er ved de ulike luftcellenes overganger som ved polarfrontene.

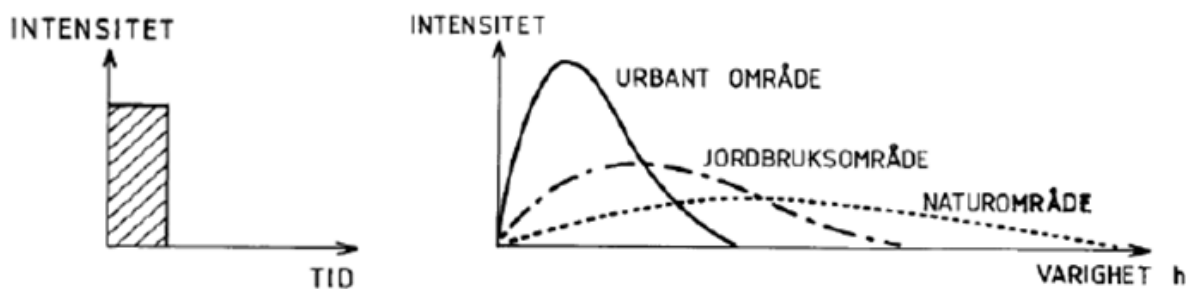
Ortografisk nedbør blir dannet når høyden i terrenget er årsaken til heving av luftmassene. Nedbøren faller gjerne over et lite område, på den siden av fjellet hvor luftmassene hever seg. På motsatt side av fjellet, som kalles lesiden vil det derimot oppstå lite nedbør. Et godt eksempel på dette er fjellene på Vestlandet som stenger for den varme, fuktige luften fra havet. Østlandet ligger da på lesiden, noe som forklarer hvorfor nedbørsmengden her er mindre (Kitterød 2015).

Konvektiv nedbør kommer i hovedsak av ustabile luftmasser som hever den fuktige luften. Den oppstår gjerne i varm luft, nær bakken en sommerdag. Kondensasjon av vann i planter og fra åpne vannspeil danner en sky av damp. Skyen får gjerne tilførsel av fuktighet fra sidene, noe som gjør at nedbørsmengden er større enn hva skyen egentlig hadde hatt av lagringskapasitet. Kjentegnet for konvektiv nedbør er høy intensitet fordelt over et lite område. Torden og hagl er ofte knyttet til denne nedbørstypen. Konvektiv nedbør er vanlig på Østlandet (Tollan 2002).

2.2 Det urbane avløpssystemet

2.2.1 Avrenning

Den andelen av nedbør eller snøsmelting som ikke fordamper, fanges opp av vegetasjon, fukter overflater eller infiltrerer i bakken kalles avrenning eller overvann. Avrenning oppstår altså når bakken mottar mer regn enn den har kapasitet til å fange opp. Vannet vil da danne dammer på overflaten før det dannes små bekker som faller mot det laveste punktet i terrenget. Dette har gjerne vært et bekkeløp tidligere. Mengden avrenning som oppstår er avhengig av overflaten vannet treffer. Tette flater uten mulighet for infiltrasjon kombinert med en lavere ruhet på overflaten vil øke volumet av avrenning og flomtoppen den skaper. Urbanisering fører med seg en større andel tette flater enn hva som tidligere var naturlig i det bestemte området (Leopold 1968). Gjennom urbanisering har vannet tradisjonelt sett blitt ledet bort i lukkede systemer under bakken for å unngå flom i gater og samtidig gi et bedre urbant miljø. Det har senere vist seg at denne praksisen har gitt en økende intensitet i avrenningen og fare for erosjon isteden. Den naturlige vannbalansen i området endres, noe som kan gi setninger på hus (Norsk Vann 2013). Figur 3 er en illustrasjon av hvordan avrenningen intensiveres av urbaniseringen sammenliknet med et naturområde. Den viser en tydelig lavere intensitet i naturområdet enn i det urbane området.



Figur 3: Illustrerer hvordan avrenningen fra en gitt intensitet av nedbør utarter seg i et urbant område, et jordbruksområde og et naturområde (Lindholm 2014c).

Når overvann, oversvømmelser og flom er i fokus er det nyttig å vite noe om sammenhengen mellom avrenningen og ulike typer overflater. Tabell 1 viser den erfarte avrenningen til ulike type flater i bebygde strøk ved hjelp av avrenningsfaktoren C eller ϕ . Faktoren er et tall mellom 0 og 1, hvor 0 indikerer at alt vannet vil infiltrere i bakken og 1 indikerer at alt vannet transporteres bort (Sæterbø et al. 1998).

Tabell 1: Avrenningsfaktor for ulike typer flater hentet fra Vassdragshåndboka (Sæterbø et al. 1998).

Flate type	Avrenningsfaktor (C eller ϕ)
Hustak og gatedekke	0,85 – 0,90
Industriområde, tett	0,70 – 0,90
Bymessig, sentral bykjerne	0,70 – 0,85
Betong, asfalt, bart fjell o l	0,60 – 0,90
Bymessig, tett forretningsbebyggelse	0,60 – 0,80
Boligstrøk, rekkehus, blokk	0,50 – 0,70
Boligstrøk, tette kvartaler	0,60 – 0,80
Industriområder, åpent	0,50 – 0,70
Boligstrøk i by, eneboliger	0,40 – 0,60
Forstadsstrøk	0,30 – 0,50
Brakkmark	0,20 – 0,30
Lekeplasser	0,20 – 0,40
Jernbanetomter	0,20 – 0,40
Skogområder	0,20 – 0,50
Parker, kirkegårder	0,10 – 0,30
Dyrka mark	0,05 – 0,25

Av nedbørstyper er den konvektive nedbøren mest kritisk med tanke på oversvømmelser i urbane strøk. Infiltrasjonsevnen er liten og rørene som ligger i bakken har ikke kapasitet til å ta unna alt vannet når det kommer store mengder under korte tidsrom (Tucci & Porto 2001). Flom som tidligere kom i våte årstider som på høsten grunnet mindre resterende infiltrasjonsvolum opptrer også i de tørre årstidene grunnet større andel tette flater (Tollan 2002). Urbanisering og økt bebyggelse endrer lokalklima og avløpsforhold. Høyere

temperaturer i bykjerner grunnet husoppvarming og trafikk kan øke fordampningen. Noe som kan gi økte mengder nedbør.

2.2.2 Avløpssystem i Norge

I Norge er avløpssystemet delt inn i fellessystemer og separatsystemer. Fellessystemene leder alt av avløp fra husholdning, industri og overvann i ett fellesrør til renseanlegget eller resipient. Store og intense nedbør har gitt store utfordringer til fellessystemene med tanke på kapasitet, dårligere renseseffekt av avløpet, samt direkte utslipp i resipienten. Fokuset på de negative effektene med fellessystemet har blitt belyst, og flere tettsteder og kommuner oppgraderer og installerer separatsystemer. Med separatsystem ledes avløp fra husholdning og industri i ett rør mot renseanlegget og overvannet i et eget rør mot en resipient. En svakhet med separatsystemet er muligheten for feilkoblinger, som dreneringsrør påkoblet spillvannsledningen og spillvann koblet til overvannsrøret (Norsk Vann 2013).

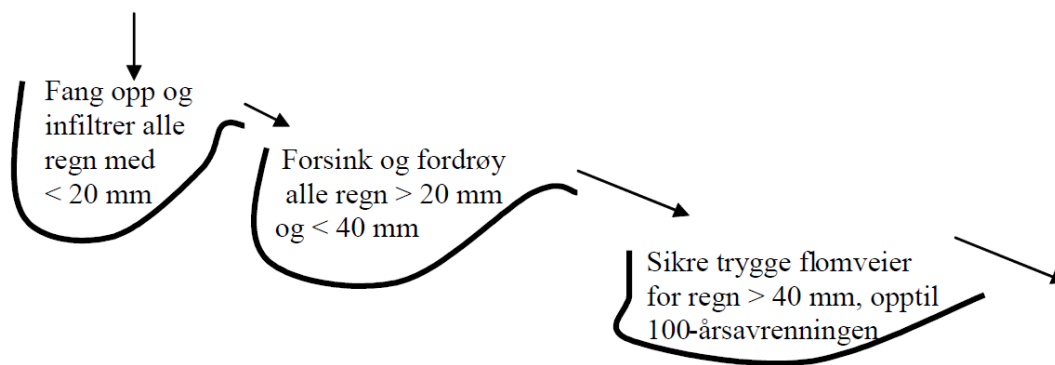
2.2.3 Tiltak for håndtering av overvann

Endringene i klimaet og en trend med mer intense regnbyger gir et økende behov for en god håndtering av overvannet i urbane strøk. Det er svært kostbart å øke ledningskapasiteten i bakken, det er derfor ønskelig se på muligheter for lokal overvannsdisponering (Norsk Vann 2013). Om lokal overvannsdisponering benyttes forkortelsen LOD, denne vil bli benyttet videre i oppgaven.

Luna B. Leopold skrev i sin bok om urban landplanlegging en liste over mulige tiltak for å redusere flommer og kompensere for økt urbanisering. Listen er vist nedenfor (Leopold 1968).

- Kutte ut innløp på gatenivå, altså ristene i gater
- Benytte grønne grøftekanter/nedsenkning hvor vann kan infiltrere naturlig og fjerne forurensninger fremfor asfalterte flater, takrenner og fortauskanter
- Undersøk dammer og inngjerdinger som er bygget i grøftene
- Benytte kjellere i store bygninger som lagringsvolum for vann fra tak og takrenner før det ledes ut i naturlige bekker eller grønne grøfter
- Benytte lagringsvolumer som kunstige dammer, fontener eller tanker utenfor kanaler
- Lage små reservoarer i kanalene slik som det er bygget for gårdsdammer

I dag blir gjerne håndteringen av overvann delt opp i tre ledd, også kalt tretrinnsstrategien. Den har som formål å håndtere overvannet på en god måte for å redusere skader vannet kan skape, samtidig som det kan være et blågrønt preg i bybildet. Figur 4 viser hovedprinsippet til strategien.



Figur 4: Illustrasjon av «Treleddstrategien». Tallene som er oppgitt er ment som et eksempel og må tilpasses lokalt (Lindholm 2014c).

Første trinn består i at nedbøren som faller i området skal infiltrere lokalt, gjennom grøntarealer, samt private tiltak for fordrøyning. Når vannmengdene overskrider infiltrasjonskapasiteten er målet å forsinke og fordrøye avrenningen videre. Dette kan gjøres gjennom eksempelvis grøntarealer, dammer og grøfter. Etter volumet til fordrøyningen er overskredet, er målet å lede vannet gjennom åpne og trygge flomveier. Kapasiteten til flomveiene bør tilsvare mengden vann som kommer med et 100-årsregn (Lindholm 2014c).

Et viktig og forholdsvis enkelt tiltak i privat fordrøyning av overvann er å koble takrenneutløpet vekk fra rør som går direkte ned i overvannssystemet. For å unngå fuktskader på huset bør ikke vannet infiltreres helt inntil husveggen. Vannet kan ledes i en renne av naturstein eller betong og føres ut på gress eller porøse flater. Som fordrøyning kan konstruerte dammer være utformet slik at de i tørrvær kan benyttes til eksempelvis lekeplasser (Norsk Vann 2013).

Når LOD tiltak blir med eller tatt hensyn til tidlig i en utbyggingsplan kan overvannet benyttes som et positivt element av naturressurs i nærmiljøet. Det vil også medføre reduksjon i unødige flomsituasjoner. Figur 5 er hentet fra Oslo kommune sin veiledning om overvannshåndtering for utbygger.



Gode overvannsløsninger krever både plass og planlegging. Illustrasjonene ovenfor viser eksempel hvor overvannshåndteringen er inkludert i reguleringsplanleggingen. Her er det avsatt plass til grønne arealer og fordroyning i terreng slik at vi kan ta vare på vannet på stedet når det regner. Samtidig opprettholder vi trafikkflyten og unngår skader på eiendommer og infrastruktur. Når alt dette er planlagt for, blir byggesaksbehandlingen enklere både for utbyggeren og de offentlige saksbehandlerne.

Figur 5: Eksempel på godt planlagt overvannshåndtering hentet fra veiledning av Oslo kommune.

Figuren viser at grøntarealer er ønskelig i bybildet. Ved å redusere andel tette flater og legge til rette for åpen og lokal håndtering av overvannet vil skader på eiendommer minske og trafikkbildet kan gå sin gang. Overvann fra svært trafikkerte veier og anleggsvirksomhet skal som en hovedregel sedimenteres før den ledes til en resipient (Vann- og avløpsetaten 2015).

For alle LOD tiltak er det viktig med gode sandfang og oljeutskillere før vannet ledes til overvannsmagasiner for å unngå gjentetting og redusert levetid grunnet finpartiklene vannet drar med seg. Noen av grunnene til oversvømmelser i byer i dag er at ledningsnett ble bygget og dimensjonert for mange år siden. Norsk standard har endret seg gjennom årene ettersom forutsetningene for dimensjoneringen er endret. Bybildet som tidligere inneholdt mye grøntarealer har gradvis endret seg til bykjerner med økt bebyggelse og økt andel asfalterte flater. Man visste eller forutså ikke hvilken virkning alle de tette flatene ville ha og ikke at regn skulle bli mer intenst med klimaforandringene (Norsk Vann 2013).

2.2.4 Beregning av avrenning

Når ledningsnett for overvann bygges eller oppgraderes, gjennomføres en beregning for å finne omtrentlig mengden vann som vil komme i systemet. Dette gjøres for å benytte rør med store nok dimensjoner, men likevel ikke større enn nødvendig for det blir kostbart.

For å beregne avrenningsmengden benyttes den rasjonelle formel.

$$Q = \varphi * I * A * Kf$$

Formel 1: Den rasjonelle formel.

Hvor:

Q : Avrenning i m^3/s eller l/s

φ : Avrenningskoeffisienten, tall mellom 0 og 1 hentet fra tabell/ funnet ved kart

I : Intensiteten til regnet hentet fra IVF – kurven i m/s eller $\frac{l}{s * ha}$

A : Arealet til nedslagsfeltet i m^2 eller ha

K_f :

Klimafaktor i tilfeller det er aktuelt, gjerne et påslag på 20 – 50 % utfra antall år det dimensjoneres for samt rettningslinjer

Størrelsen på et fordrøyningsvolum bør dimensjoneres etter regnvelop-metoden som er en grafisk fremstilling av volumberegninger. Avrenningskoeffisienten øker med økende regnintensitet og varighet (Vann- og avløpsetaten 2015).

I felt fra 20-50 hektar brukes den rasjonelle formel, for større områder bør avrenningen simuleres i eksempelvis SWMM eller MOUSE (Norsk Vann 2013).

Konsentrasjonstiden t_k , til et felt benyttes for å velge IVF-kurvens intensitet i intervaller.

Begrepet brukes om tiden en dråpe bruker fra ytterst i feltet til den når utløpet av feltet.

Konsentrasjonstiden til feltet er da tilrenningstid på overflater i feltet til sluk og strømningstiden i rørene vist i Formel 2 (Lindholm 2014c).

$$t_k = t_t + t_s$$

Formel 2: Konsentrasjonstiden til vanndråper gjennom feltet.

Hvor

t_k : Konsentrasjonstiden

t_t : Tilrenningstiden

t_s : Strømningstiden

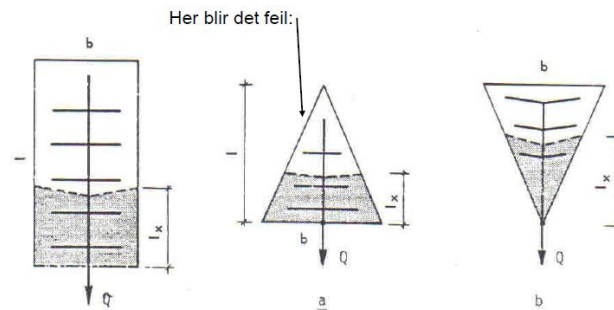
Tilrenningstiden kan regnes ut eller finnes ved hjelp av nomogram, men kan også baseres på målte verdier. Tabell 2 viser et forslag til tilrenningstid som er hentet fra Northern Virginia BMP Handbook.

Tabell 2: Forslag til tilrenningstider hentet fra Northern Virginia BMP Handbook (NVPDC & ESI 1992).

Avrenningstid fra nedbør treffer bakken til det når røret	
Sentrum- og industriområder	5 min
Leiligheter og tomannsboliger	5 - 10 min
Eneboliger og skoler	10 - 15 min

Imhoff stats sier at «Maksimal vannføring ut av et felt fåes ved å sette inn i den rasjonelle formel: regnintensiteten til et regn med regnvarighet lik konsentrasjonstiden til feltet». Figur 6

viser innvirkningen Imhoff sats har på delfelt med ulik form. For feltet til høyre og venstre stemmer utsagnet, men det blir feil for felt som er likt det i midten. Dette fordi arealet den lengste ledningen bidrar med er lite, noe som gjør at det dimensjonerende regnet vil bli mindre enn konsentrasjonstiden til feltet. Eksempelvis kan et regn med en varighet på 10 minutter da bli dimensjonerende for et nedbørfelt med 20 minutters konsentrasjonstid (Lindholm 2014c).



Figur 6: Virkningen av Imhoff sats for delfelt med ulike former.

Strømningstiden i rørene kan anslås ved å anta en hastighet på overvannet i rørene, vanligvis settes denne til 1,5 – 2 m/s. For å kategorisere flatene til de ulike faktorene av avrenningskoeffisienten brukes digitale kartverk, kart, flyfoto eller befaring i feltet hvor det blant annet blir sett på om takrenner er koblet direkte på overvannsnett. Et felt kan ha flere delfelt med ulike avrenningskoeffisienter (Norsk Vann 2013).

I sine retningslinjer om overvannshåndtering oppgir Bergen kommune følgende for beregning av maksimal avrenning:

- Vannhastigheten i rørene ønskes gjerne beregnet med Colebrooks formel.
- Beregningstid i ledningen, altså strømningstiden er vist i Formel 3.
- Arealet til nedbørfelt må bestemmes.
- Avrenningskoeffisient velges.

«Den største vannføring oppstår normalt for det regnskyll som har varighet lik hele feltets konsentrasjonstid», det er derfor vanlig å sette varigheten til regnskyll lik konsentrasjonstiden (Bergen kommune 2005).

$$t_s = \frac{l}{v}$$

Formel 3: Strømningstiden til nedslagsfeltet.

Hvor

l : Lengden på lengste rørstrekning

v : vannets hastighet i røret

2.2.5 Dimensjonering av avløpsnett

Ledningsnett i Norge ble bygget og dimensjonert for mange år siden. Norsk standard fra 1997 benyttet regnskyll med lavere returperiode enn hva som er oppgitt i Tabell 3. Tabellen viser oppdaterte dimensjonerende hyppigheter fra Norsk Vann sin rapport om Klimatilpasset overvannshåndtering fra 2008 (Lindholm et al. 2008). Siden dimensjoneringen av store deler av ledningsnett i bakken ble gjennomført før siste oppdatering, vil mange rørsystemer ikke være tilfredsstillende for dagens kriterier.

Tabell 3: Minimums dimensjonerende hyppigheter for felles- og separatsystemer (Lindholm et al. 2008).

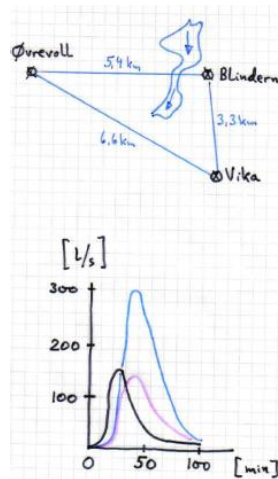
Dimensjonerende regnskyllhyppighet	Plassering	Dimensjonerende oversvømmelseshyppighet
1 i løpet av 5 år	Områder med lavt skadepotensiale	1 i løpet av 10 år
1 i løpet av 10 år	Boligområder	1 i løpet av 20 år
1 i løpet av 20 år	Bysenter/industriområder	1 i løpet av 30 år
1 i løpet av 30 år	Uderganger/områder med meget høyt skadepotensial	1 i løpet av 50 år

2.3 Nedbørsdata

Nedbøren som er benyttet i beregninger kan være virkelig målte data eller konstruerte data ut fra eksempelvis IVF-kurvene. Begge typene vil bli benyttet til gjennomkjøring i modellen.

2.3.1 Nedbørmåling

I Norge er det flere målestasjoner som ved hjelp av noen ulike metoder måler nedbøren som faller. Fellesnevneren for alle er at målt nedbør faller i ett punkt, altså en punktmåling. En stor andel av målestasjonene er plassert i tettbygde strøk (Tollan 2002). Figur 7 viser hvor store forskjeller selv små avstander kan ha på nedbørmålingene. Dette gjør at måledata fra fjellområder med få stasjoner er meget usikre. Målerne for nedbør plasseres vanligvis i en høyde på 2 meter over bakken. Det er egne internasjonale regler for plasseringen for å minimalisere måleusikkerhet knyttet til bygninger og vekster lokalisert rett rundt måleren. Nedbørmålinger brukes i klimaforskning og kommuner benytter målingene til dimensjonering av avløpssystemer (Meteorologisk Institutt 2010).



Figur 7: Viser hvor store variasjonene av nedbør kan være under korte avstander. Eksempelen viser Øvrevoll, Blindern og Vika i Oslo med avstander på fra 3,3 – 6,6 km (Lindholt 2014b).

Nedbørmengde måles i Norge av Det meteorologiske institutt. Målingene ser på den vannstanden som faller på en horisontal flate når all nedbøren bevares, altså at den ikke fordamper og renner bort (Sæterbø et al. 1998). Mengden nedbør som faller omtales gjerne i enheten millimeter. Når det faller 1 mm nedbør på en firkant som er 1 m * 1 m vil mengden nedbør som falt på området tilsvare 1 dm³ som er 1 liter. Sett fra et værmeldingsperspektiv vil dette regnes som litt nedbør om det er alt av nedbør som faller på 24 timer (Meteorologisk Institutt 2010a).

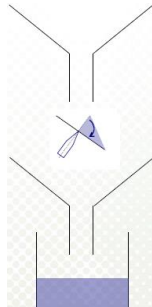
Det er to hovedkategorier av nedbørmålere, manuelle og automatiske.

En manuell måler blir sjekket 1-4 ganger i døgnet. Den består av et kar eller en bøtte som har en gitt diameter i toppen. Når den sjekkes blir innholdet fra beholderen ført over i et måleglass som viser målt vannmengde i mm. Ved nedbør i fast eller delvis fast form må innholdet varmes opp til smeltepunktet for å få riktig målt volum, dette er grunnet ulik tetthet mellom vannmolekylene i de ulike fasene. Målte verdier sendes til Meteorologisk Institutt (Meteorologisk Institutt 2010b).

Den vanligste typen av automatisk nedbørmåler benytter også bøtte prinsippet. Mengden vann oppsamlet i bøtta blir regnet ut av en vekt som måler kontinuerlig. Her er det vektøkningen som forteller hvor mye vann som falt. Frostvæske benyttes på vinterstid for å smelte snøen i beholderen. Bøtta må tømmes med jevne mellomrom når den er full (Meteorologisk Institutt 2009).

Pluviometer er en automatisk nedbørmåler som benytter et litt annet prinsipp enn bøtte-typen. Målere benytter seg av en vippe med en skål på hver side som rommer 0,1 eller 0,2 mm hver. En sylinder med en trakt leder vannet ned på vippeskålen som holdes oppe av en magnet, vist i Figur 8. Når den ene skålen er full slipper magneten, vippet tipper over til andre siden og magneten på denne siden fester seg. Vippet fra skålen blir registrert og antall vipp innenfor et tidsrom blir summert (Førland et al. 2015). Denne målemetoden egner seg godt i avsidesliggende strøk, men en viktig grunn til utbredt bruk av denne er muligheten til å måle intensiteten til nedbøren (Meteorologisk Institutt 2009). Plumatic er en norskprodusert pluviograf som ved vippeprinsippet registrerer 0,2 mm regn per vipp med en nøyaktighet på 1

minutters oppløsning. For en nedbørintensitet på 1mm/minutt må det da registreres 5 vipp. Omregnet er 1mm/min det samme som 166,7 l/s*ha (Norsk Vann 2013). Stadig flere målestasjoner er utstyrt med termostatstyrt elektrisk oppvarming, noe som gir mulighet for helårsregistrering fremfor målinger fra april til oktober (Førland et al. 2015).



Figur 8: Prinsipp for pluviometer med en beholder for kontroll av totalvolumet (Kitterød 2015).

Måleusikkerheter knyttet til pluviometeret er at noe ekstra vann kan forsvinne bort akkurat når vippen tipper under intense nedbør. Grunnet dette er det gjerne en beholder nedenfor vippen som et kontrollvolum.

2.3.2 Hydra II

Hydra II er en database som benyttes av NVE for måledata tilknyttet vann og vannføring. Den mottar måledata fra blant annet nedbør, lufttemperatur, vannstand, vannføring og vanntemperatur. I databasen vil målingene bli lagret, kontrollert, bearbeidet og analysert. Datasystemet mottar nedbørsdata fra ulike målestasjoner rundt i landet. Stasjonene er kategorisert etter vassdragsområde, hovednummer og punktnummer. Parametere som måles varierer ved de ulike stasjonene.

Informasjon fra Hydra II kan hentes ut fra ulike databaseenheter etter ulik tidsoppløsning og kvalitet til målingene. Når målinger for nedbør registreres automatisk vil informasjonen om målingen sendes til en database som heter Hytran. Hytran er databasen for ukontrollerte data. Fra Hytran blir det gjennomført en primærkontroll hvor klare målefeil blir luket ut. De kvalitetssikrede dataene fremstilles i en annen database, Hykval. For tidsoppløsninger høyere enn døgnverdier benyttes Hykval. Dersom døgnverdiene har god nok oppløsning for brukeren benyttes databasen Hydag (Norges vassdrags- og energidirektorat 2014).

2.3.3 IVF-kurver

Måledataene fra nedbørstasjonene som er samlet inn sendes til Meteorologisk Institutt, som benytter dem for å fremstille IVF-kurver. Dette er kurver som baserer seg på intensiteten, varigheten og frekvensen til nedbøren. Tabell 4 viser et utdrag av tabellen for den gyldige IVF-kurven til Rustadskogen per februar 2016 (Meteorologisk Institutt 2016). Tabellen vises i sin helhet i Vedlegg A.

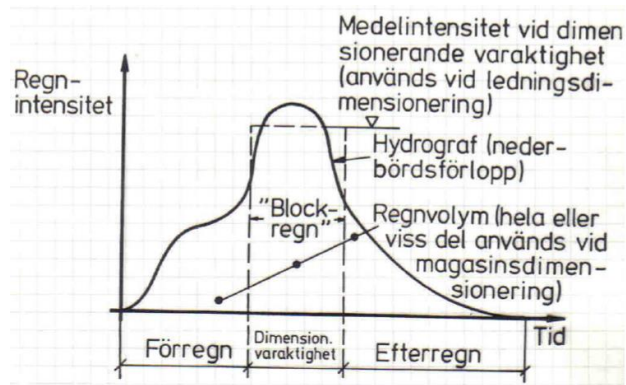
Tabell 4: Utdrag fra IVF-kurven for Rustadskogen basert på 37 sesonger, gyldig 23.02.2016 (Meteorologisk Institutt 2016).

Utdrag fra IVF-kurven for nedbør i l/s*ha for Rustadskogen basert på 37 sesonger.										
År	1 min.	2 min.	3 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	30 min.	45 min.	60 min.
2	292,4	253,1	226,8	189,5	138,7	111,8	94,8	69,8	51,7	41,1
5	358,8	320,2	287,2	243,9	186,8	150,6	126,3	94,8	71,0	56,5
10	402,7	364,7	327,3	279,9	218,7	176,2	147,1	111,3	83,7	66,7
20	444,8	407,3	365,6	314,4	249,2	200,8	167,2	127,2	95,9	76,4
25	458,2	420,8	377,8	325,3	258,9	208,6	173,5	132,3	99,8	79,5
50	499,4	462,5	415,3	359,1	288,7	232,7	193,1	147,8	111,7	89,0
100	540,3	503,8	452,6	392,6	318,4	256,5	212,5	163,2	123,6	98,5
200	581,1	545,1	489,7	426,0	347,9	280,3	231,9	178,5	135,4	108,0

Gjennom innlogging på eKlima er IVF-kurvene tilgjengelige for kommuner og andre interesserte. Tidligere ble IVF-kurvene beregnet med et krav om sammenhengende nedbør innenfor hele tidsrommet. Nå fremstilles kurvene også uten å stille krav til om nedbøren er sammenhengende eller ikke, noe som gjør det mulig å sammenlikne statistikken med målere som ikke har minutttoppløsninger. For å konstruere et teoretisk regnhydrogram for et nedbørfelt benyttes IVF-kurver. Kommuner er interessert i å vite gjentaksintervallet for nedbør som inntreffer ettersom dette er avgjørende i spørsmålet om hvem som må ta ansvaret for konsekvensene av hendelsen. Meteorologisk Institutt anbefaler å benytte nedbørmålere med 0,1 mm/vipp, dobbeltvippe for registrering av nedbørintensiteten (COWI 2010). Det er viktig å huske at IVF-kurvens konstruksjoner er basert på et utsnitt av regnmålinger og bare er representative for et lite område hvor nedbøren er målt. For større områder med flere pluviografer i samme nedslagsfelt kan Isohyet metoden og Thiessens metode brukes. Isohyetmetoden går ut på «å skalere intensitetslinjene mellom målerne». Denne metoden kan i deler av området gi mye høyere eller mye lavere verdier enn det som faktisk er målt. Thiessens metode deler inn feltet etter «vinkler» og bruker den midlere nedbørintensiteten (Lindholm 2014b).

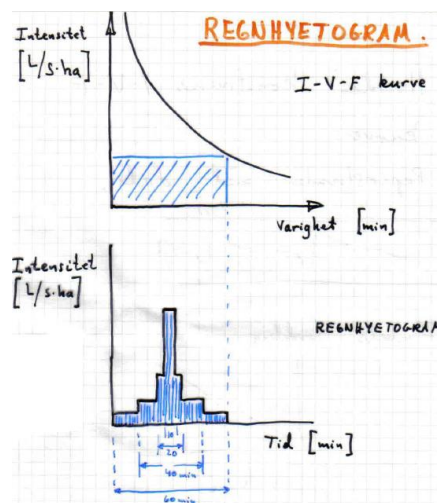
2.3.4 Konstruerte regn fra IVF-kurvene

Når nedbør fremstilles som en funksjon av tiden kalles det et hyetogram (Norsk Vann 2013). Et «kasseregnet» er et regn som tas direkte ut fra IVF-kurven med en regnvarighet lik konsentrasjonstiden til nedbørfeltet. Det er en forenkling av virkeligheten som gjør at det normale før og etterregnet som vises i Figur 9 forsvinner. Nedbørvolum beregnet med kun kasseregnet vil derfor føre til en undervurdering av den virkelige nedbørsituasjonen. For et 30-minutters regn fant Arnell (1982) at kun 50 % av totalt regnvolum lå i kasseregnet fra IVF-kurven (Lindholm 2014b).



Figur 9: Illustrerer volumet som forsvinner når kasseregn benyttes alene (Lindholm 2014b).

For å løse problemet med manglende volum fra før og etterregn kan IVF-kurven omdannes til et symmetrisk regnhyetogram. Regnhyetogramet kan benyttes for alle ledningsstørrelser og for dimensjonerende vannføringer i alle deler av avløpsledningsnett i en og samme beregning. Figur 10 viser hvordan «kasseregnet» fra IVF-kurven kan fremstilles som et regnhyetogram med samme varighet og volum (Norsk Vann 2013).



Figur 10: Konstruksjon av regnhyetogram (Lindholm 2014b).

Nedbøren som brukes må være representativ for området, og endringen i mengdene kan variere over år og kortere tidsrom. Det er derfor viktig å vurdere nøye hvilken målestasjon som blir mest representativ for området som skal benyttes. Manuelle metoder bruker bare kasseregn, f.eks 100-minutters regn på 200 l/s*ha eller 20-minutters regn på 140 l/s*ha . For å oppnå dimensjonerende vannføring flest mulig steder i det aktuelle området kan det brukes kasseregn fra IVF-kurver med varighet på 10 min, 15 min, 20 min, 30 min, 40 min og så videre helt til den maksimale konsentrasjonstiden for det relevante området er nådd. Når man da sorterer ut de regnene som gir høyeste vannføring i de punkter man er interessert i, får man bedre verdier enn hvis man bare bruker et kasseregn. For omregning mellom enhetene benyttes $l/(s * ha) = 60 * 10^{-4} \text{ mm/min}$ (Norsk Vann 2013).

2.4 Matematiske modeller

En modell vil alltid bare gi en tilnærming av virkeligheten. Matematiske modeller kan gjøre det mulig å simulere en situasjon, selv om den aldri vil bli 100 prosent korrekt. Modeller benyttes fordi det gir en innsikt i systemet, hvor følsomhetsanalyser kan gi informasjon om prioritering av datainnsamling, og det kan unngås store og kostbare feil i fullskala om de oppdages i modellen først (Lindholm 2014a).

Når et nytt anlegg er under designing er det mulig å finne og endre de fysiske detaljene i modellen slik at systemets ønskede forutsetninger blir møtt. Simuleringer av allerede eksisterende anlegg har faste fysiske parametere, det er likevel interessant å se hvordan systemet påvirkes av eksempelvis kraftig nedbør og ulike tiltak. Om systemet krever en oppgradering kan simuleringer være nyttig for å finne ut hvilke fysiske endringer som gir et ønsket utslag (Butler & Davies 2011).

Simuleringsverktøy som benyttes for avløpssimulering er Storm Water Managemet Model (SWMM) og MIKE URBAN. MIKE URBAN er et program fra det Danske Hydrauliske Institutt utviklet for overvann, programmet er bedre kjent under navnet MOUSE.

For å simulere en modells respons på spesifikke regn kreves det informasjon om avrenningsområdet, kummer, rør, innløp og utløp (Tucci & Porto 2001). Kalibrering går ut på å justere parametere i en modell slik at den kan gjenspeile virkeligheten på en best mulig måte. For beregninger i overvannsmodeller er maksimal avrenning (Q_{maks}) den viktigste parameteren, ettersom denne kan skape oversvømmelser i ledningsnett. Måleutstyr for nedbør og avrenning benyttes under kalibreringen av modellen. For avrenning vil et typisk målepunkt i systemet være en kum. Her plasseres eksempelvis måleutstyr som ved hjelp av dopplereffekten måler dybden og hastigheten på vannet, ved hjelp av ultralyd. Slikt måleutstyr er mye benyttet og gir data med en nøyaktighet på $\pm 10\%$ under ideelle forhold (Butler & Davies 2011).

Det er ønskelig at modellen blir kjørt med nedbørshendelser for å verifisere modellen, finne og eliminere feil, og undersøke om volum inn er lik volum ut. Verifikasjon av en avrenningsmodell betyr å vise ved hjelp av en kalibrert modell at den stemmer for flere uavhengige regn (Tucci & Porto 2001).

2.4.1 SWMM

Det mest kjente storskala modelleringsverktøyet for overvannshåndtering i USA er SWMM. Programmet som først ble tilgjengelig på 1970-tallet har flere ganger gjennomgått forbedringer av EPA som er The US Environmental Protection Agency. SWMM er et gratisprogram som kan lastes ned fra EPAs hjemmeside (Butler & Davies 2011). Versjon 5 av SWMM som benyttes i denne oppgaven bruker Windows som plattform. Modellen kan benyttes for dynamiske regnavrenninger hvor den kan simulere enkeltregn og flere regn over lengre tid med mengde og kvalitet. Det kan altså kjøres hydrologiske, hydrauliske og vannkvalitetsmodeller. I simuleringen blir vannet ledet fra avrenningsområdet ned i kummer,

gjennom rør, pumper ol. Avrenningsområdene som blir omtalt som nedbørfelt kan ha ulike avrenningsfaktorer, noe som gjør at modellen vil bli mer tilnærmet virkeligheten. SWMM kan modellere generert forurensning på overflater, en funksjon som ikke vil bli benyttet i denne oppgaven. Resultater fra simuleringene kan fremstilles som fargekoder i modellens nedbørfelt og transportsystemer, tidsserier i grafer og tabeller, profiler og statistiske frekvensanalyser (Rossman 2015).

2.4.2 Modelloppbygging i SWMM

For å bygge en modell av et overvannsystem i SWMM er det nødvendig med nedbørshendelser eller regn, nedslagsfelt, kummer, rør og utløp. Det kan velges ulike enheter, infiltrasjonsmodeller, strømningsmodeller og tidssteg. De viktigste parameterne vil forklares litt dypere ut fra brukermanualen til SWMM (Rossman 2015).

Regn

I SWMM blir nedbør lagt inn som regn i noe som kalles for «Gages». Til hvert nedbørfelt kan det velges hvilket «Gages» som skal benyttes. Ulike nedbørfelt kan kobles til ulike «Gages». En modell kan dermed benytte flere ulike «Gages» på samme tid. Nedbøren kan komme fra en ekstern fil som lastes inn eller bli definert av brukeren. De viktigste parameterne for regnet er:

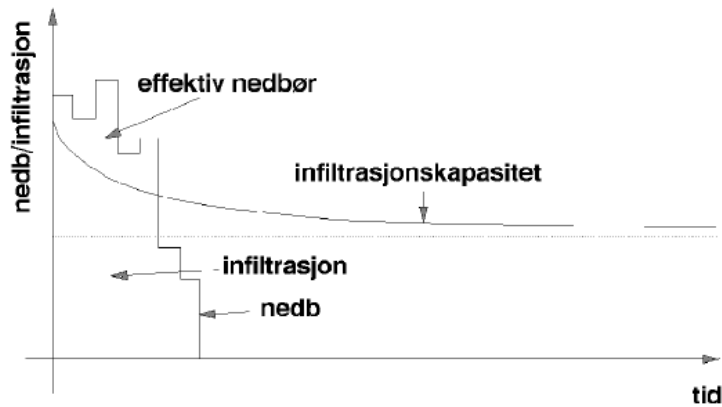
- Typen data nedbør kommer i, med hensyn på eksempelvis intensitet, volum eller akkumulert volum
- Tidsintervallet til den samlede dataen, eksempelvis hver time, 15-minutter osv.
- Kilden til nedbørsdataen, om det er input tidsserier eller fra en ekstern fil
- Navnet på nedbøren, datakilden som er brukt

Nedslagsfelt

Delfelt for avrenning i SWMM tegnes inn av brukeren. Området som skal studeres deles inn i et passende antall delfelt, hvor utløpspunktet også skal identifiseres. Utløpet kan være andre nedslagsfelt eller kummer i systemet. Delfelt kan ha ulik andel tette og permeable flater. Når et delfelt er tegnet inn og markert slik at informasjonen om delfeltet vises, kan det legges inn en «Tag» under egenskaper, som eksempelvis sier vei eller tomt. Denne funksjonen gjør det enklere å endre eksempelvis andel tette flater eller bredder for kun de spesifikke områdene med samme «Tag». Infiltrasjonsevnen til de ulike arealene i nedslagsfeltet kan forklares med tre ulike modeller. Horton infiltrasjon får mest omtale siden den blir benyttet videre.

Horton infiltrasjon

Denne metoden er basert på empiriske altså erfarte observasjoner som viser at infiltrasjonsevnen synker eksponentielt fra en innledende maksimal infiltrasjonshastighet til en viss minimumshastighet på infiltrasjonen over et langt nedbør. Figur 11 illustrerer den eksponentielle avtagende infiltrasjonskapasiteten (Sæltun 2001).



Figur 11: Hortons infiltrasjonsmodell (Sæthun 2001).

For denne metoden kreves parametere for både maksimum og minimums infiltrasjonsevne, en konstant som uttrykker hvor raskt infiltrasjonsevnen synker og tiden det tar fra jorden er helt tørr til den er helt mettet. Formel 4 viser Hortens ligning.

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

Formel 4: Hortons ligning.

Hvor

$f(t)$: Infiltrasjonskapasiteten per tidsenhet

f_c : Konstant infiltrasjonskapasiteten under mettet forhold

f_0 : Maksimal infiltrasjonsrate

k : Konstant som representerer reduksjon i jordinfiltrasjonen

Green-Ampt infiltrasjon

Metodens fremgangsmåte for infiltrasjon antar at en kraftig fuktig front finnes i jordsøylen som separerer fuktighetsinnholdet nedenfor fra den mettede jorden over. Inngangsparametere som kreves er det innledende underskuddet på fuktighet i jorden, den hydrauliske ledningsevnen til jorden og kappilærkreftene til den våte fronten. Gjenvinningsgraden av fuktighetsunderskudd i tørre perioder er empirisk relatert til den hydrauliske ledningsevnen (Rossman 2015).

Curve Number infiltrasjon

Metoden er adoptert fra NRCS (SES) Curve Number method for estimering av avrenning. Det antas at den totale infiltrasjonskapasiteten til jorden kan bli funnet ut fra jordens ordnede kurve nummer. Parameterne for denne metoden er kurvenummer og tiden det tar for å gjøre mettet jord helt tørr (Rossman 2015).

Kummer

Kummene eller «nodene» kan tegnes inn av brukeren eller lastes inn fra andre programmer som eksempelvis Gemini VA. Parametere som settes for kummer er:

- Dybden til kummen
- Høyde over havet
- Arealet på dammen på overflaten når kummen er oversvømt (valgfri/alternativ)
- Eksterne data på strømmingen inn (valgfri/alternativ)

Dam på overflaten

Normalt når kapasiteten til en kum blir overskredet vil volumet som overskrider kummen forsvinne ut av systemet. Et alternativ til at dette vannet forsvinner er at volumet lagres over kummen og gjeninnføres i systemet når kapasiteten er stor nok. For stabil og kinetisk strømming er vannet bare lagret som et overskuddsvolum. Ved dynamisk strømming som påvirkes av vanddybder blir dette volumet sett på som en dam over kummen med et konstant overflateareal. Mengden på dette arealet blir oppgitt som «Ponded Area». Under generelle alternativer må også «Allowed Ponding» krysses ut om dette benyttes.

Rør

Rør eller «Conduits» som det kalles i SWMM kan være rør eller kanaler som frakter vannet fra en kum til en annen kum eller et utløp. Rør kan tegnes inn manuelt eller lastes inn på samme måte som for kummer.

De fleste åpne kanalene kan bli representert som rektangulære, som et trapes eller en utforming definert av brukeren. Den mest vanlige formen på nye drenerings og avløpsrør er sirkulære, ellipser og buede rør. De kommer i standard dimensjoner.

Mannings formel Formel 5, benyttes for å uttrykke sammenhengen mellom strømningshastigheten (Q), tverrsnittet (A), hydraulisk radius (R) og helning (S) i rør.

$$Q = \frac{1,49}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

Formel 5: Mannings formel for strømningshastighet.

n er Mannings ruheffisient. Denne benyttes både for kanaler og rør (Rossman 2015).
Parametere satt for rør er:

- Navnet på innløps- og utløpsnode
- Forskjøvet høyde eller høyden over innløp og utløpsnode
- Lengde på rør
- Mannings ruhetstall
- Tverrsnitts geometri

Strømming i rør

Strømmingen av vannet i simuleringer i SWMM er styrt av ligningene for massebevaring og momentbevaring for gradvis variert og ustø flyt. Ligningene som er vist i Formel 6 og Formel

7 benyttes i ulik grad av kompleksitet for ulike strømminger. Ligningene til Saint Venant er i oppgaven hentet fra Storm hydrology and urban drainage (Tucci & Porto 2001).

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

Formel 6: Kontinuitetsligningen til Saint Venant.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA = gA(S_0 - S_f)$$

Formel 7: Momentbevaringsligningen til Saint Venant.

Hvor

Q er Avrenningen

A er Areal av nedslagsfeltet

q er Hastighets bidrag basert på avrenningen fra feltet delt på lengden

y er Dybde

g er Gravitasjonskonstanten

x er Lengde på røret

t er Tid

S_0 er Helning langs bunnen av røret

S_f er Friksjonshelning

Steady Flow routing

Den enkleste formen for strømnings-modellering er Steady Flow routing, den antyder at strømmingen er uniform og stabil innenfor hvert beregningstrinn. Den omformer enkelt forklart de hydrologiske dataene i innløpet til utløpets ende av røret uten noen forsinkelse eller endring i form. Denne modellen kan ikke ta for seg oppholdsrom i kanal, tilbakeslagsvanns effekter, inn- og utløpstap, motsatt strøm eller strømming under press. Den kan i grunnen bare brukes i primæranalyser med en lang kontinuerlig simulering (Rossman 2015).

Kinetisk Wave routing

Kinetisk bølge strømming løser kontinuitetsligningen sammen med en forenklet form av momentbevaringsligningen i hver ledning. Den sistnevnte krever at helningen av vannflaten er lik helningen av rørledningen. Maksimumstrømmingen er en full ledning, all strømming som er over dette blir enten borte fra systemet eller kan samles som en dam over kummene og bli ledet tilbake i systemet når det er ledig kapasitet. Kinetisk strømningsmodell tillater variasjon i strømming og areal, både romlig og tidsmessig. Dette kan resultere i svekkede og forsinkede utløpsmengder ettersom tilsig føres gjennom kanalen. Modelleringen kan ikke ta høyde for tilbakeslagsvann, inn- og utløpstap, motsatt strømming eller strømming under trykk. Den kan vanligvis vedlikeholde numerisk stabilitet ved moderat lange tidsintervall, 5-15 minutter. Hvis

de nevnte effektene ikke er forventet å være av betydning kan dette være en alternativ, nøyaktig og effektiv metode for routing, spesielt for langtidsløsninger (Rossman 2015).

Dynamisk Wave routing

Dynamisk strømning løser den komplette endimensjonale Saint Venant strømningslikning. Den produserer derfor i teorien den mest riktige løsningen. Med denne type routing er det mulig å representere strømning under trykk når en stengt ledning blir full, slik at strømningen kan overgå den normalt fulle verdien. Oversvømmelser oppstår når dybden til kummen er nådd, vannet kan forsvinne ut av systemet eller lagres i en dam på toppen og renne tilbake i systemet når det er ledig kapasitet. Dynamisk strømning kan ta hensyn til lagring i rør, tilbakeslagsvann, inn- og utløpstap, motsatt strømning og strømning under trykk. Fordi den kobler sammen løsningen både for vann nivå i kummer og strømning i rør kan den brukes i hvilket som helst generelt ledningsnett. Dette krever en større oppløsning, altså et mindre tidssteg for å oppnå en stabil modell (Rossman 2015). I modeller hvor det er interessant å se på oppstuvning må denne brukes (Lindholm 2014b).

Lokal overvannsdiskonteringskontroll

Tiltak for lokal overvannsdiskontering er et aktuelt tema. SWMM har en egen funksjon for enklere å beregne virkningsgraden av noen ulike LOD tiltak, ved å legge dette inn i de aktuelle delfeltene. Tiltakene er nevnt nedenfor.

Bio-Retention Cells

Dette er vegetasjon som vokser på en konstruert jordmiks plassert over en grusdrenerings seng. De kan holde på vann, infiltrere vannet og sørge for evaporasjon.

Rain gardens

Er konstruert på samme måte som Bio-Retention Cells som bare består av det øverste jordlaget, ikke grus under.

Grønne tak

Er en annen variant av Bio-Retention Cell som har jord på toppen av en matte av et spesielt dreneringsmaterial. Matten som er plassert mellom jorden og taket leder bort overflødig vann som ikke ble holdt tilbake i jorden på taket. Klimaet i Skandinavia kombinert med den konvektive nedbøren gjør at grønne tak er mest effektive om sommeren (Villarreal et al. 2004).

Infiltrasjonsgrøft

Infiltrasjonsgrøfter er smale grøfter fylt med grus som fanger opp avrenning fra hellingen rundt. De gir et oppholdsrom for vann og samtidig kan avrenning infiltrere i den naturlige jorden under.

Continuous Permeable Pavement systems

Dette er en gate hvor grus ligger nedenfor en porøs betong eller asfalmiks. Normalt vil alt vannet umiddelbart passere ned til jordlaget. Gjennom gruslaget får vannet et ekstra volum slik at det kan infiltrere i normal hastighet til jorden under.

Block paver systems

Består av ugjennomtrengelige gatestein plassert på sand eller fin grus med et gruslag under. Vannet fanges i åpningene mellom steinene og blir fanget i sanden og grusen før det infiltrerer videre nedover i naturlig jordlag.

Rain barrels

Beholdere som samler avrenningen fra taket under intense regn og kan enten slippe vannet videre eller bruke vannet i tørre perioder til eksempelvis vanning.

Rooftop disconnection

Vannet fra taket slippes ut på overflaten fremfor at det ledes inn i overvannssystemet. Tiltaket kan også modellere tak som er direkte tilkoblet overvannsnett som har overløp til overflaten.

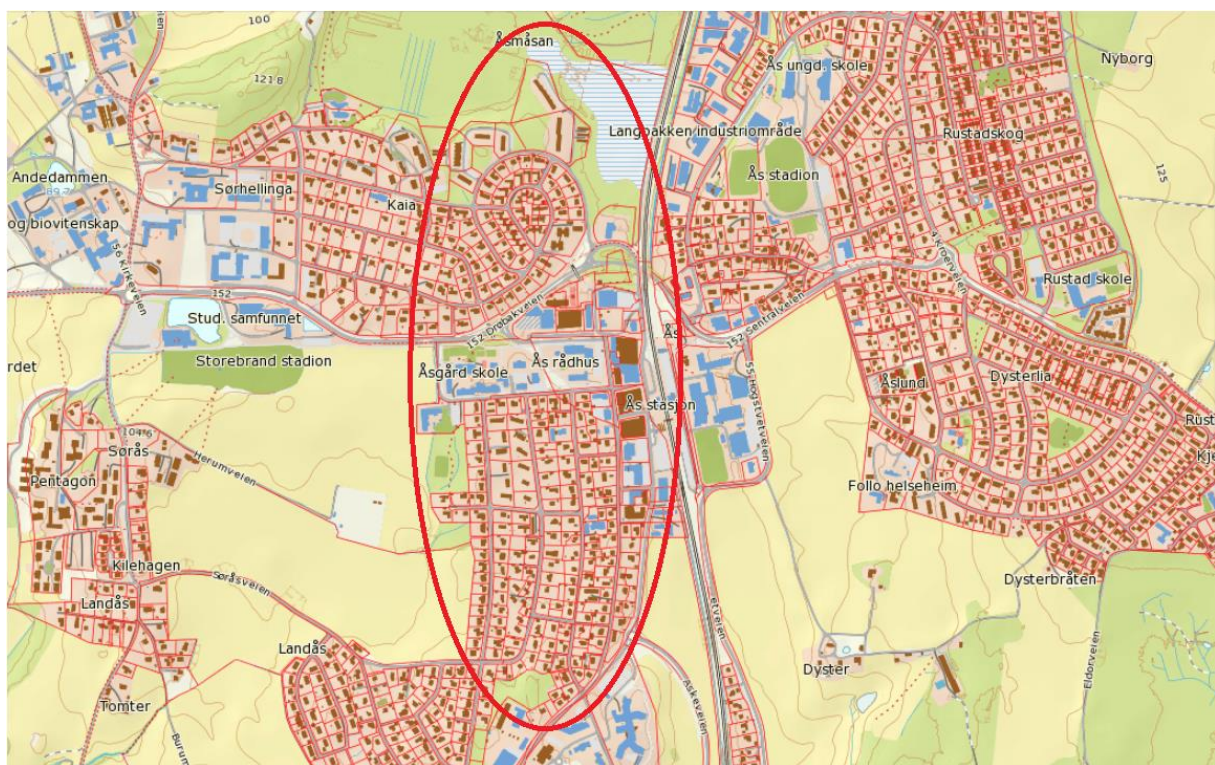
Vegetative Swales

Kanaler eller nedsenkede områder med helling langs sidene som er beplantet med gress eller annen vegetasjon. De sinker transporten av samlet avrenning og gir mer tid til infiltrasjon i de naturlige jordlagene under.

3. Prosjektområdet

3.1 Nedbørfeltet

Ås kommune ligger i Akershus fylke. Den grenser til Ski, Oppegård, Hobøl, Frogn og Vestby. Ved utgangen av 2015 hadde kommunen 18 922 innbyggere. Mange arbeidsplasser er knyttet opp mot Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Nord i kommunen ligger Tusenfryd, Norges største fornøylespark samt et handels- og næringsområde, ved Vinterbro og Nordby (Ås kommune 2016). Analyseområdet for modellen er Ås sentrum, på vestsiden av jernbanen. Området har en utstrekning på 58 hektar og er markert med en rød sirkel i Figur 12.



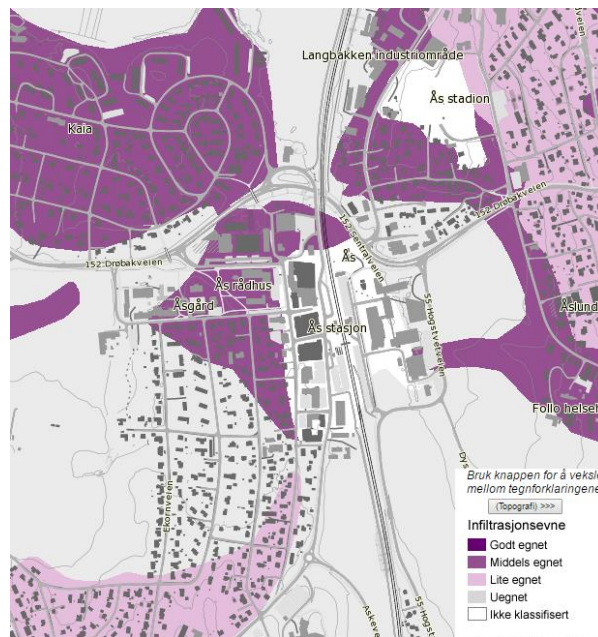
Figur 12: Kartutsnitt som viser analyseområdet for oppgaven markert med en rød sirkel. Kartet er hentet fra Statens kartverk (Statens kartverk 2016).

Store deler av feltet består av eneboliger, leiligheter, en barneskole og næringsområde. Området har et økende antall boliger grunnet fortetning. Ås kommune har et separatsystem for avløpet. Nedslagsfeltet har i dag tre ulike utløp, hvor det ene «utløpet» fortsetter i rør langs jernbanen. Figur 13 viser ved hjelp av røde trekkanter en oversikt over hvor utløpene er plassert i modellen. Den blå sirkelen til høyre i utsnittet indikerer Rustadskogen målestasjon hvor nedbørsmålingene er hentet fra. Utløpet hvor avrenningene måles er det som er plassert langs jernbanen.



Figur 13: Kartutsnittet viser med røde trekkanter hvor de tre utløpene i modellen er plassert. Den blå prikken er plasseringen til Rustadskog målestasjon (Statens kartverk 2016).

Infiltrasjonsevnen i området er ca 50 % godt egnet og 50 % uegnet, dette er vist i Figur 14, der godt egnet for infiltrasjon er marin strandavsetning, resten er tykk havavsetning (NGU 2016).



Figur 14: Infiltrasjonsevnen i området, hentet fra Norges Geologiske Undersøkelse (NGU 2016).

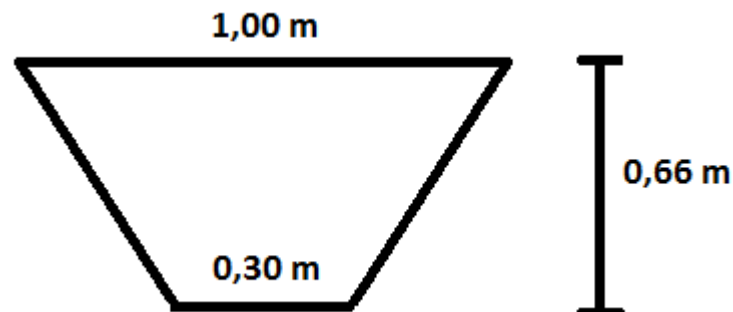
3.2 Nedbør

Nedbørsdata hentes ut fra urbanstasjonen på Rustad. Målestasjonen har vært i drift siden 1974. Ås kommune har ansvaret for driften av stasjonen.

Rustadskogen målestasjon har stasjonsnummer 5, hovednummer 17 og punktnummer 0. Den aktuelle parameteren er nedbøren. Målestasjonen benytter to ulike vippe-pluviometer. I 2013 ble det gjort en oppdatering av vippekarene slik at det i dag benyttes en Lambrecht måler og en Plumatic. Lambrecht måleren er et vippekar med oppvarmet glødetråd, noe som gir måledata for nedbør gjennom hele året. Hvert vipp som registreres inneholder 0,1 millimeter nedbør og gis i en tidsopløsning på minutter. Utstyret benytter vintertid under registreringen. Ås kommune som drifter stasjonen undersøker målerne jevnlig, per dagsdato hver 2. uke. Da fjernes rusket som har falt ned trakten og på vippen.

3.3 Avrenning

Avrenningen for området ble målt ved en kum ved det ene «utløpet» som går under jernbanen. Kummen har en fastmontert renne i bunnen, Figur 15.



Figur 15: Mål til rennen som var plassert i kummen.

Over rennen ble det montert en Isco 2110 Ultrasonic Flow Module og måledataene fra denne ble hentet ut gjennom et dataprogram som heter Flowlink.

3.3.1 Isco 2110 Ultrasonic Flow Module

Isco 2110 Ultrasonic Flow Modul er et måleapparat som ved hjelp av ultralyd måler volummengde, vannføring, vann-nivå, temperatur, strømstyrke til batteriet og signalstyrken til ultralydmåleren. Utstyret benytter en batterimodul med to lanterne batterier, noe som gjør den uavhengig fra en ekstern strømtilførsel. Modulene i Isco 2100 serien er utformet slik at flere moduler kan være koblet til batteriet på samme tid.

Måleutstyret ble via Flowlink matet med informasjon om renna og plassert ut i kummen i begynnelsen av august 2015.

3.3.2 Flowlink

Flowlink er et dataprogram som brukes til å hente ut måledata for eksempelvis avrenning og strømming i rør. Programmet kan lese av data fra utstyr i Isco-serien, men også fra andre måleinstrumenter.

Flowlink versjonen benyttet her var en gratisversjon, men det er også mulig å få tak i standard og profesjonelle versjoner. Innstillinger av utstyret kan bli endret når som helst når det er koblet til Flowlink, etter hva brukeren legger inn. En del hovedinnstillinger av utstyret ble gjennomført før det ble plassert ut og utstyret ble kalibrert ute i feltet. Hovedinnstillingene var informasjon om typen renne benyttet, mål på den, hvilke parametere som var ønsket målt og tidsintervallet til dem. Ute i feltet ble det lagt inn høyde fra sensor til bunnen av rennen. Kalibreringen ble gjennomført ved at vannhøyden i rennen ble målt og lagt inn i Flowlink. Utstyret fikk da beskjed om hvor mye vann som passerte under forutsetningene den målte på det tidspunktet.

Resultatene fra måleutstyret kan bli fremstilt i tabeller eller grafisk. Måledataene kan også eksporteres som PDF, CVS, HTML og IGD. Det ble her eksportert i CVS som kan åpnes og leses i Excell (Teledyne ISCO 2012).

4. Metode

4.1 Beregne mengden overvann

Det blir gjennomført en matematisk beregning for å finne mengden overvann som er i systemet. Den rasjonelle formel blir benyttet til dette. Formelen benytter parametere for areal, avrenningskoeffisient, konsentrasjonstid, nedbørintensitet og eventuelt klimafaktor i utregningen.

4.1.1 Konsentrasjonstid og avrenningskoeffisient

Konsentrasjonstiden t_k , blir beregnet utfra lengden til det lengste rørstrekket i modellen sammen med strømningshastigheten valgt utfra Tabell 2 gjennom formelen nedenfor.

$$t_k = t_t + t_s$$

Det lengste ledningsstrekket i modellen er på 1225 meter. Strømningshastigheten i røret settes vanligvis til 1,5-2 m/s, i dette tilfellet settes den til 2 m/s. Formelen strekning/tid gir da:

$$t_t = (1225 \text{ m/s}) / (2 \text{ m/s}) / (60 \text{ min/s}) = 10,2 \text{ minutter}$$

Strømningstiden er valgt til 10 minutter fra Tabell 2 ettersom området består av både eneboliger og leiligheter.

$$t_k = 10,2 \text{ min} + 10 \text{ min} = 20,2 \text{ min}$$

Konsentrasjonstiden t_k er i dette tilfellet 20,2 minutter. Videre benyttes konsentrasjonstiden for å hente ut regnintensiteten fra IVF-kurven.

Avrenningskoeffisienten er basert på andel tette flater i nedbørfeltet. Nedbørfeltet har et totalt areal på 58 hektar. Andelen tette flater blir funnet anslagsvis ved hjelp av digitalt kart med mulighet for måling av areal (Statens kartverk 2016). Andel hus med direktetilkobling ble funnet ved observasjoner i en representativ del av området og antatt lik i den resterende delen.

Andel tette flater som vei tegnet inn i GIS gav:

$$\begin{aligned} \text{Andel tette flater vei} &= 5877,42 + 4992,3 + 23558,63 + 13146,99 + 19866,04 \\ &= 67441,38 \text{ m}^2 = 6,74 \text{ hektar} \end{aligned}$$

Av totalt område utgjør dette: $(6,74/58) * 100 = 11,6 \%$.

For beregning av andel hustak ble det sett på et representativt delområde uten veier hvor hustak utgjorde $4\,650 \text{ m}^2$ og delområdet totalt var på $26\,562,8 \text{ m}^2$. Dette gir områder uten vei 17,5 % tette flater. Omtrent halvparten av hustakene var direkte påkoblet, noe som gir 8,75 %

tette flater som er tilkoblet.

Delfelt bolig ble funnet ved å trekke fra delfelt vei fra totalområdet $58 - 6,74 = 51,26 \text{ ha}$ og videre å multiplisere med andel tette flater fra hus $51,26 \text{ ha} * 8,75 \% = 4,49 \text{ ha}$.

Den totale andel av tette flater som er tilkoblet blir da: $\frac{6,74+4,49}{58} * 100 = 19,4 \%$.

ϕ er da beregnet til å være 0,194.

Helningen på nedslagsfeltet har et gjennomsnitt på 1,2 % (Statens kartverk 2016).

4.1.2 Konstruksjon av regnhyetogram

For å finne intensiteten trengs informasjon fra IVF-kurven.

IVF-kurven fra den lokale målestasjonen benyttes for å fremstille et konstruert regnhyetogram. I denne oppgaven benyttes IVF-kurven fra Rustadskogen målestasjon som er basert på 37 sesonger. Gjentakintervallet som benyttes er 20 år.

Konstruksjon av regnhyetogram er basert på følgende prinsipper hentet fra en forelesning til Lindholm (Lindholm 2014b):

- Regnhyetogram må være symmetrisk om sin midtakse
- Hyetogrammet skal altså ha $X/2$ minutter på hver side av midtlinjen, hvor regnvolumet innenfor de X mest intensive minuttene skal tilsvare volumet til et «kasseregnet» med varighet X .
- Det vil i de fleste tilfeller være å foretrekke regn som gir beregningssteg på 5 minutter, da kortere intervaller som 1 minutt vil gi en veldig høy spissverdi.

Tall fra Vedlegg A benyttes for å konstruere beregningssteg på 5 minutter.

$$I_{10} = 249,2 \frac{l}{s * ha} * 0,36 = 89,7 \text{ mm/time}$$

$$I_{20} - I_{10} = \left(167,2 \frac{l}{s * ha} * 20 - 249,2 \frac{l}{s * ha} * 10 \right) / 10 * 0,36 = 30,7 \text{ mm/time}$$

$$I_{30} - I_{20} = \left(127,2 \frac{l}{s * ha} * 30 - 167,2 \frac{l}{s * ha} * 20 \right) / 10 * 0,36 = 17,0 \text{ mm/time}$$

$$I_{40} - I_{30} = \left(106,3 \frac{l}{s * ha} * 40 - 127,2 \frac{l}{s * ha} * 30 \right) / 10 * 0,36 = 15,7 \text{ mm/time}$$

$$I_{50} - I_{40} = \left(89,4 \frac{l}{s * ha} * 50 - 106,3 \frac{l}{s * ha} * 40 \right) / 10 * 0,36 = 7,8 \text{ mm/time}$$

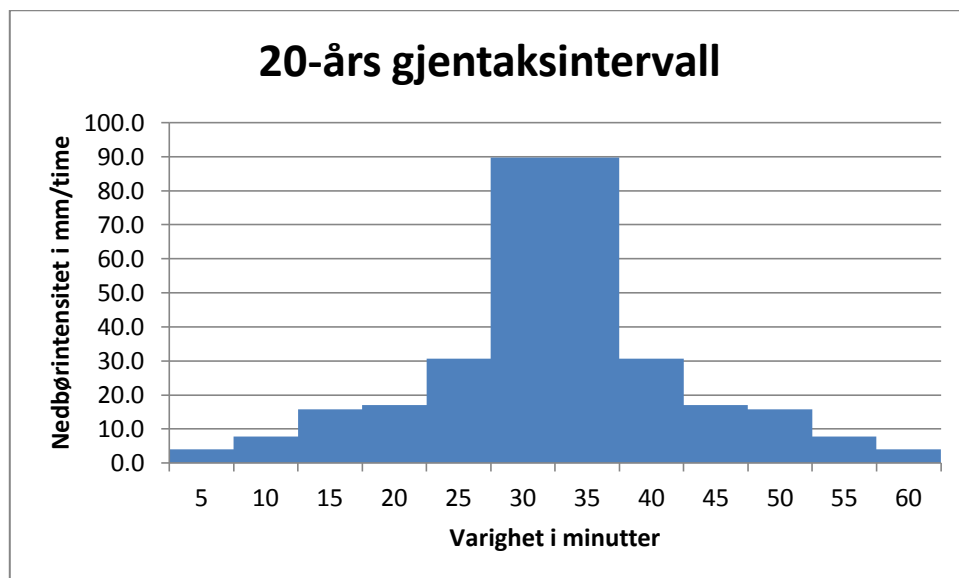
$$I_{60} - I_{50} = \left(76,4 \frac{l}{s * ha} * 60 - 89,4 \frac{l}{s * ha} * 50 \right) / 10 * 0,36 = 4,1 \text{ mm/time}$$

De konstruerte beregningstegene blir fordelt etter tidsforløpet som vist i Tabell 5.

Tabell 5: Resultat fra et 60 minutters regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.

Tidsforløpet (minutter)	Intensitet mm/time
5	4.1
10	7.8
15	15.7
20	17.0
25	30.7
30	89.7
35	89.7
40	30.7
45	17.0
50	15.7
55	7.8
60	4.1

Verdiene fra Tabell 5 blir i Figur 16 vist som symmetrisk regnhyetogram.



Figur 16: Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.

4.1.3 Den rasjonelle formel

Verdiene funnet i de tidligere leddene blir satt inn i den rasjonelle formel.

Det blir gjort en vanlig utregning samt en utregning med klimatillegg på 50 prosent etter anbefaling fra Lindholm.

$$Q = \varphi * I * A = 0,194 * 249,2 \frac{l}{s * ha} * 58 ha = 2 804 l/s$$

$$Q = \varphi * I * A * Kf = 0,194 * 249,2 \frac{l}{s * ha} * 58 ha * 1,5 = 4 206 l/s$$

4.2 Måledata benyttet til kalibreringen

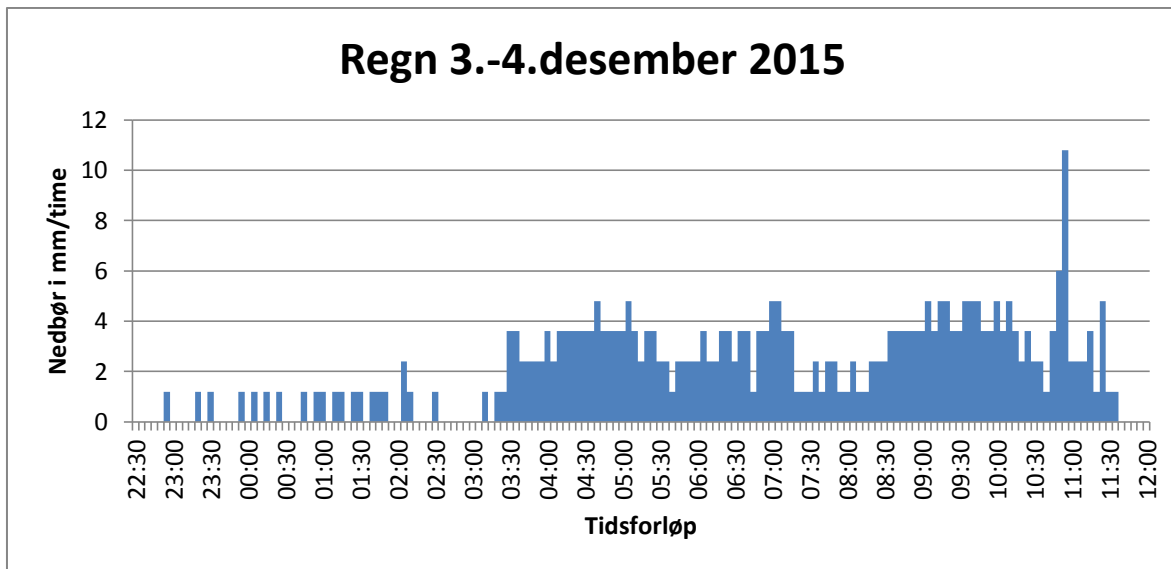
Til kalibrering av modellen benyttes nedbørsdata hentet fra målestasjonen på Rustad og avrenning målt i en kum nær hovedutløpet til modellen. For å kunne benytte nedbørshendelser til kalibrering må det være plussgrader, minusgrader og frost i bakken påvirker avrenningsmønsteret. Vannføring i overvannssystemet før nedbørshendelsen vil også gi en feil i avrenningsverdiene, det bør derfor benyttes måleserier hvor startverdien for avrenning er tilnærmet lik null. Det ble pukket ut fem regn som hadde både nedbør- og avrenningsdata.

4.2.1 Nedbør

Nedbørsdata er hentet ut fra NVE sin database i Hydra II, under Hykval grunnet ønske om høy tidsoppløsning.

Når informasjonen om nedbør hentes ut fra databasen er det vipp med oppløsning per minutt som kommer ut. Et vipp vil vises som 0,0001 m/min. Dette ble gjort om til mm/time ettersom dette er inngangsparameter til SWMM. Alle måledata fra nedbørshendelsene ble i SWMM benyttet med 1-minutts intervall.

Figur 17 viser en av nedbørshendelsene som ble hentet ut, denne er demonstrert i 5-minutters intervall. Intervaller på 1-minutt ble benyttet i simuleringene. Resterende nedbør er vist i Vedlegg D.

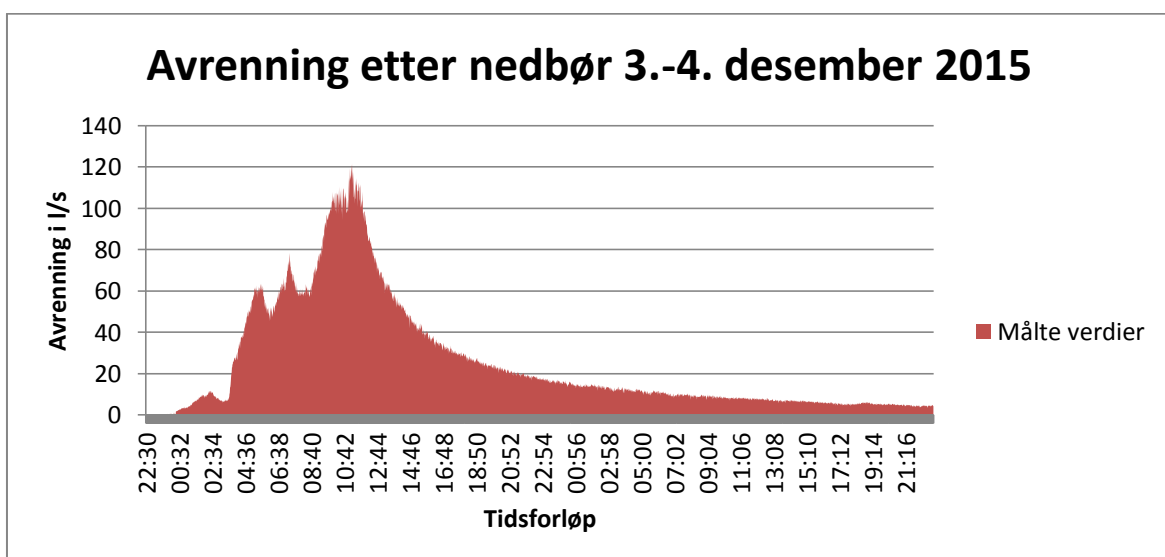


Figur 17: Søylene viser nedbøren 3.-4. desember 2015 i 5 minutters intervaller.

4.2.2 Avrenning

Aktuelle parametere for oppgaven er volum og avrenning. Dette ble uthentet fra Flowlink og eksportert til en CVS fil. Denne ble åpnet i Excell. Utstyret benytter sommerstid. Det ble gjort en forskyvning slik at avrenning og nedbør samstemte ettersom nedbør er vinterstid og avrenning er sommerstid. Avrenningen blir gjennom Flowlink er registrert som $[m^3/s]$ dette blir gjort om til $[l/s]$ siden SWMM benytter dette. Excell ble benyttet til å sammenstille data fra Hydra II, Flowlink og SWMM.

Figur 18 viser den målte avrenningen til nedbøren 3.-4. desember 2015. Resterende avrenninger er vist i Vedlegg E sammenstilt med avrenning fra simuleringene.



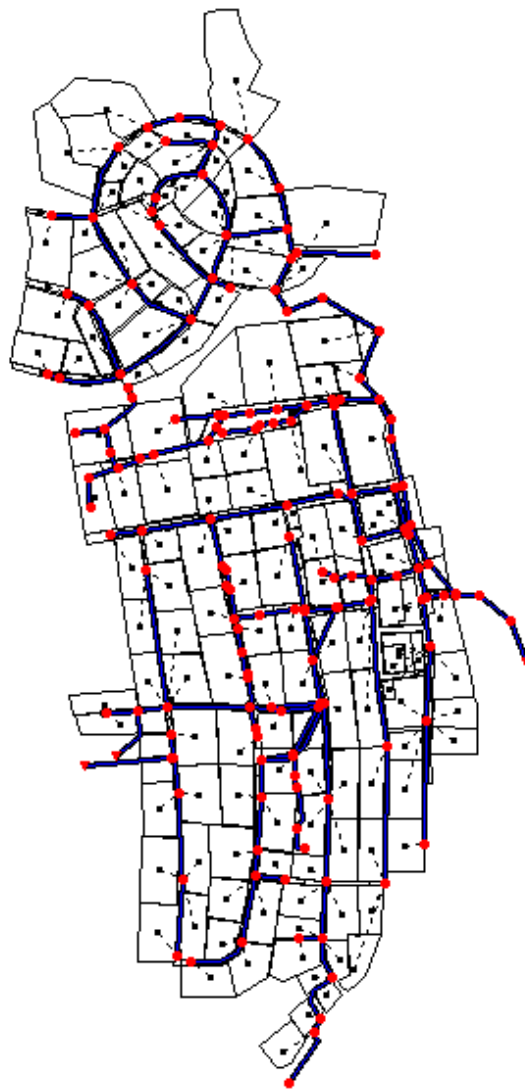
Figur 18: Viser den målte avrenningen etter nedbøren 3.-4. desember 2015 i 1 minuttts intervall.

4.3 Oppbygging av modellen

I forkant av oppgaven hadde kommunen importert informasjon om overvannsnettets fra Gemini VA til SWMM. Nedbørfeltene til modellen ble tegnet inn manuelt ved hjelp av GIS for oppdeling av ulike områder.

I modellen ble det tegnet inn 212 nedslagsfelt, hvor 75 felt er vei og 137 felt er boliger. Modellen har 160 rør og 153 kummer.

Noen kummer var uten høyde og det var kummer som kun hadde høyde på kumlukk eller bunn kum, det var også noen ledningsstrekke som hadde parallelle rør. Det ble gjort noen justeringer av dette på bakgrunn av samtaler med Esmaeil Gasabei i Ås kommune, samt gjort noen antagelser på de resterende høydene som manglet basert på terrenget og høyde på kummene rundt for å få mest mulig riktig høydeprofil for avrenningen. Rørdimensjonene på systemet er fra 0,11 - 1,3 m. Figur 19 viser hvordan modellen ble i SWMM.



Figur 19: Modellen av Ås sentrum tegnet inn i SWMM.

4.3.1 Beregningsmetode med SWMM modell

Som hovedinnstillinger i modellen ble det valgt dynamisk bølgerouting for å kunne se på oppstuvning. Strømningsenhetene ble satt til liter per sekund. Systemet tillater dam på overflaten og arealet her ble satt til 1000 m². Hortons infiltrasjonsmodell ble valgt. Første modellen ble bygget opp basert på antagelser gjort ut fra SWMM manualen, som blant annet gir tidskonstanten c på 4 l/t og en tørketid i jorden på 7 dager (Rossman 2015).

4.3.2 Parametere

Parametere til primærmodellen ble valgt ved hjelp av SWMM manualen, hvor noen tabeller for grunnlaget er vist i Vedlegg B. Andel tette flater, delareal, bredde og helning på delareal ble valgt utfra GIS og observasjon i feltet.

Primærverdiene som til slutt ble valgt er vist nedenfor i Tabell 6.

Tabell 6: Parameterverdier valgt til primærmodellen.

Paramenter	Primærmodell
Bredde på nedslagsfeltet	30
Helning på nedslagsfeltet	1.2
Andel tette flater bolig	8.8
Andel tette flater vei	50
Grop-magasin for tette flater	2
Grop-magasin for permeable flater	4
Mannings tall for tette flater	0.013
Mannings tall for permeable flater	0.24
Mannings tall for rør	0.015
Tette flater uten grop-magasin	0
Maksimum infiltrasjonsrate	75
Minimum infiltrasjonsrate	20

4.4 Kalibrering

Under kalibrering av modellen ble to nedbørshendelser benyttet for å justere parameterne og tre andre ble benyttet til etterprøvingen.

Absolutt gjennomsnittlig forskjell mellom målt og beregnet maksimal avrenning ble beregnet etter parameterjusteringer med

$$Q_{maks} = \frac{(Q_m - Q_b)}{Q_m} * 100\%$$

Formel 8: Maksimal avrenning i prosent.

Hvor:

Q_{maks} : Maksimal avrenning

Q_m : Maksimal målt avrenning

Q_b : Maksimal beregnet avrenning

Det var ønskelig å benytte modellen som gir lavest mulig Q_{maks} til etterprøving av modellen, da dette gav de mest nøyaktige anslag av avrenningstoppen. Ettersom ulikhetene i volum ble veldig stor mellom måling og simulering ble det besluttet at absolutt gjennomsnittlig forskjell i volum også måtte med i betraktningen.

For å øke kvaliteten på modellen ble kalibreringen gjennomført i følgende tre steg: Modellverifikasjon, analyse av modellfølsomhet og etterprøving.

4.4.1 Verifikasjon av modellen

Det konstruerte regnhyetogrammet fra beregnet mengde overvann kjøres i modellen. SWMM har en rapport-knapp som gir informasjon om feil som oppstår ved gjennomkjøringen, slik som oppstuvning i kummer og kontinuitetsfeil. Endringer ble gjort frem til alle følgefeil som høyde på kummer var rettet opp. Modellen er da verifisert og kan benyttes videre i neste trinn.

Under dette trinnet ble det undersøkt hvor mye vann som gikk til hvert av utløpene. Dette på grunnlag av en bemerkning i de importerte dataene fra kommunen om at et av utløpene muligens ikke var et utløp. Q_{maks} og volumet til de tre utløpene er illustrert i Tabell 7. U1 ble koblet fra og vannet ble koblet om til nærmeste knutepunkt. Den nye fordelingen av maksimal avrenning og volum er vist i andre del av tabellen. Utløpet som er benyttet i beregninger i oppgaven er U70.

Tabell 7: Tabellen viser hvordan maksimal avrenning og volumet er fordelt i de tre utløpene til modellen når et 20-års regn simuleres.

Fordeling fra ferdig verifisering			
	U1	U2	U70
Q _{maks} [l/s]	176.93	109.47	1940.98
Volum [m ³]	4251.24	230.6	910.38
Volum i prosent	78.8	4.3	16.9

Fordeling fra verifisering hvor utløp 1 er koblet fra			
	U1	U2	U70
Q _{maks} [l/s]	0	153.59	1941.69
Volum [m ³]	0	336.58	916.97
Volum i prosent	0	26.9	73.1

4.4.2 Analyse av modellfølsomheten

Følsomheten til modellen ble kartlagt gjennom å benytte verdiene til parameterne valgt i primærmodellen som nullpunkt. Analysen ser på responsen modellen gir når enkeltparametere endres. Verdiene til parameterne ble justert opp og ned prosentvis på 10, 20, 30, 40 og 50 prosent. Dette for å kartlegge utfallet det hadde på maksimal avrenning fra feltet. Resultatet av dette ble illustrert i et stjernediagram. Parameterne som ble vurdert var bredden på delareal, andel tette flater for bolig og vei, helningen på området, ruheten på permeable flater, ruheten i rør og grop-magasin på permeable flater.

4.4.3 Etterprøving

Til etterprøving av modellen ble tre tilfeldige nedbørshendelser benyttet. Hvor lik modellen er i forhold til virkeligheten kan uttrykkes gjennom en F-verdi. F-verdien er en verdi som baserer seg på maksimal avrenning, totalt volum for avrenningen og tidspunktet for den maksimale avrenningen. En optimal modell hvor beregnet og målte verdier er identiske vil gi en F-verdi på null. Lave F-verdier gir dermed en virkelighetsbasert modell. Den viktigste faktoren i vurderingen når oversvømmelser er i sentrum er den maksimale vannføringen. Utrekningene av F-verdien er gjort ved Formel 9.

$$F = V_1 \sum (Q_m - Q_b)^2 + V_2 \sum (V_m - V_b)^2 + V_3 \sum (T_m - T_b)^2$$

Formel 9: F-verdien som benyttes for å se hvor optimal modellen er.

V_1, V_2, V_3 er vekttall som til sammen er 1,0

m og b : Målt verdi og beregnet verdi

Q : Maksimal vannføring [l/s]

V : Volum [m^3]

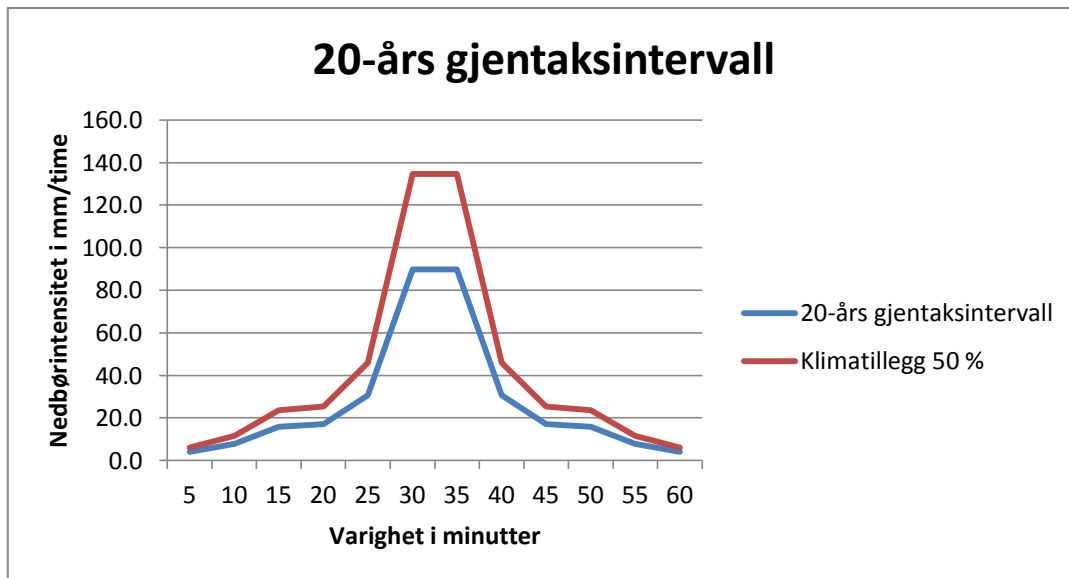
T : Tidspunkt for Q_{maks}

Når F-verdien regnes ut kan man gjøre forenklinger ved å droppe noen av leddene i beregningen, men Q_{maks} skal alltid med.

4.5 Simuleringer gjennomført i modellen

Simuleringer ble gjennomført for ulike gjentaksintervall fra IVF-kurvene til Rustadskogen målestasjon basert på 37 sesonger. Det ble konstruert regnhydrogram for 10-, 20-, 50- og 100-års gjentaksintervall på 60 minutter. For simulering av klimaendringer ble det lagt til en ekstra klimafaktor. Denne blir etter anbefalinger fra Lindholm satt til 1,5. Altså legges 50 % til på hvert av de ulike gjentaksintervallene.

For 20-års gjentaksintervall blir dette som vist i Figur 20.



Figur 20: Gjentaksintervall på 20-år med og uten klimatillegg.

Resterende IVF-kurver med og uten klimatillegg vises i Vedlegg C.

4.5.1 Simulering av dagens situasjon

For simulering av dagens situasjon benyttes regn på 10- og 20-års gjentaksintervall fra IVF-kurven. Rør i boligfelt skal dimensjoneres for 10- års regn og kunne tåle 20-års regn uten skader på hus som vist i Tabell 3. Oversvømmelser av kummer i SWMM regnes fra vannet går over topp av kum. Dette er uavhengig av om det er mulig lagringskapasitet over kummen. Volumet varier i størrelse, men alt som passerer topp ble registrert som oversvømmelse. Innstillingene er satt til en mulig lagring av vann på opp til 1000 m² gjennom allow ponding. Når det igjen er ledig kapasitet i ledningsnett vil vannet returnere til nettet. For å beregne skader på bygg antas det at et flomvolum på mer enn 6 m³ gir skade på bebyggelse, dette etter anbefaling fra Lindholm om å sette den et sted mellom 5 og 10 m³ (Lindholm 2016).

4.6 Simulering av LOD tiltak

Et av målene for oppgaven er å se nærmere på effekten til noen overvannstiltak, hvordan påvirkes maksimal avrenning og oversvømte kummer. Dette også med tanke på klimaeffekten. Det ble kjørt simuleringer med tre ulike LOD-tiltak for å kartlegge eventuelle mulige løsninger til utskiftning av ledningsnett. Av tiltak ble det valgt frakobling av takrenner, fordrøyning i delfeltene og bruk av Bio-Retention Cell, som er en egen funksjon i SWMM.

Simuleringene benytter samme forutsetninger for bruk av IVF-kurvene som i kalibreringssteget. Det benyttes gjentaksintervall på 10-, 20-, 50- og 100- år i den kalibrerte modellen, samt et klimatillegg på de samme intervallene.

4.6.1 Avkobling av tak med direktetilkobling

For å finne omtrentlig andel tette flater som kunne være tilkoblet systemet ble GIS benyttet for å finne areal på takflater. Observasjoner i feltet ble gjennomført for deler av området for å kunne anslå omtrent hvor stor andel av takarealer som er direkte tilkoblet ledningsnett. Det ble funnet at omkring halvparten av takflatene var koblet til og halvparten ble drenert på tomten. For å simulere avkoblingen av takflater ble hele andelen tette flater på delfelt med boliger fjernet.

4.6.2 Fordrøyning i nedslagsfeltene

SWMM som program har ikke per dagsdato en enkel funksjon for simulering av fordrøyningsvolum som eksempelvis åpne dammer spredd rundt i delfeltene. En måte å simulere dette på kan være å øke tilrenningstiden til delfeltene. Tilrenningstid er ikke en egen parameter i SWMM slik det er i MOUSE. Imidlertid kan en breddereduksjon av delfeltene i SWMM gi den ønskede økningen i tilrenningstiden.

For dette tiltaket er det viktig å finne ut hvor stort fordrøyningsvolum som kreves. Dette gjøres med regnvelopmetoden. Formlene som benyttes er hentet fra Va Miljøblad (Lindholm 2015), som beregner et magasinivolum.

VA Miljøblad antok følgende formel, Formel 10 for antatt regnintensitet.

$$I = I_0 / (t + 1,5)^{0,61}$$

Formel 10: Formel for den antatte regnintensiteten I.

Hvor

I : Regnintensiteten [$l/s * ha$]

I_0 : Regnintensiteten fra IVF kurven [$l/s * ha$]

t : Regnvaigheten [m]

I_0 vil være den samme intensiteten for alle tidsintervallene og er valgt ut fra konsentrasjonstiden til feltet og gjentakintervall på 20 år. Det er altså bare tiden som blir variabel.

Beregnet volum inn i magasinet blir funnet med Formel 11, hvor intensiteten er den som ble funnet i Formel 10.

$$V_{inn} = I_{z,tr} t_r A \varphi$$

Formel 11: Beregning av innløpsvolum til magasinet.

Hvor

$I_{z,tr}$: Intensiteten for kasseregn med gjentakintervall z og varighet t_r [$l/s * ha$]

t_r : Varighet [m]

A : Areal til nedslagsfeltet [ha]

φ : Avrenningskoeffisient

For utløpet velges en passende utløpsmengde. Her velges 70 % av maksimalavrenningen for kasseregningene i beregningen, som benyttet i Va Miljøblad.

$$V_{ut} = Q_{ut} t_r$$

Formel 12: Beregning av utløpsmengde til magasinet.

Hvor

V_{ut} : Volum ut av magasinet [m^3]

Q_{ut} : Vannføring ut av magasinet [l/s]

t_r : Varighet [m]

Når inn- og utløpsverdier er funnet beregnes nødvendig volum for de ulike regnvarighetene ved Formel 12.

$$V_{fordrøyning} = V_{inn} - V_{ut}$$

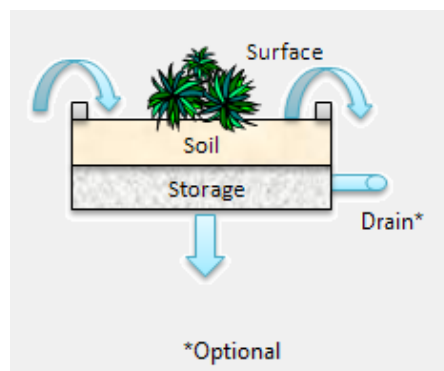
Formel 13: Nødvendig størrelse på fordrøyningsvolumet.

Maksimalt nødvendig fordrøyningsvolum blir valgt til største $V_{fordrøyning}$.

Bredden ble så redusert for alle delfelt til volumet som ble fordøyd var innenfor det beregnede fordrøyningsvolumet.

4.6.3 Bio-Retention Cell

Det tredje tiltaket som benyttes i oppgaven er en Bio-Retention Cell. Dette er en LOD funksjon som ligger inne i SWMM programmet. Figur 21 viser en fremstilling av hvordan vannet fordeles i en celle.



Figur 21: Fremstilling av Bio-Retention Cell.

De ulike parameterne i modellen ble lagt inn som fremstilt i Tabell 8. Parameterne er valgt på samme grunnlag som Birgitte Brennhovd (Brennhovd 2014) benyttet i sin masteroppgave med tanke på jord, overflate og lagringskapasitet. Dette var tall fra presentasjonen til Rob James om modellering i SWMM (James 2012). For delfeltene ble 10 % av arealet i hvert delområde med boliger benyttet til tiltaket. Bredden på arealene i sin helhet ved sekundærmodellen er 27 meter, benyttet bredde til tiltak ble derfor satt til 2,7 meter. Sekundærmodellen gav 12,4 % tette flater, noe som gjør at det kan være realistisk å få håndtert 50 % av dette i Bio-Retention Cell.

Tabell 8: Oversikt over parameterne lagt inn i Bio-Retention Cell som LOD tiltak i SWMM.

Parametere til Bio-Retention Cell							
Jord		Overflate		Lagringskapasitet		For delfelt bolig	
Tykkelse i mm	900	Lagringsdybde	100	Høyde i mm	450	Andel av området i %	10
Porøsitet	0.4	Andel som er vegetasjon	0.9	Tomt/jord	0.75	Bredde i m	2.7
Felt kapasitet	0.11	Ruhet overflate	0.3	Ledningsevne i mm/time	6	Andel ugjennomtrengelig område behandlet i %	50
Volum andel som visner	0.05	Helning overflate	0.25	Igjen-tettningsfaktor	0		
Ledningsevne i mm/time	25						
Ledningens helning	7.5						
Kapillær sugehøyde i mm	88.9						

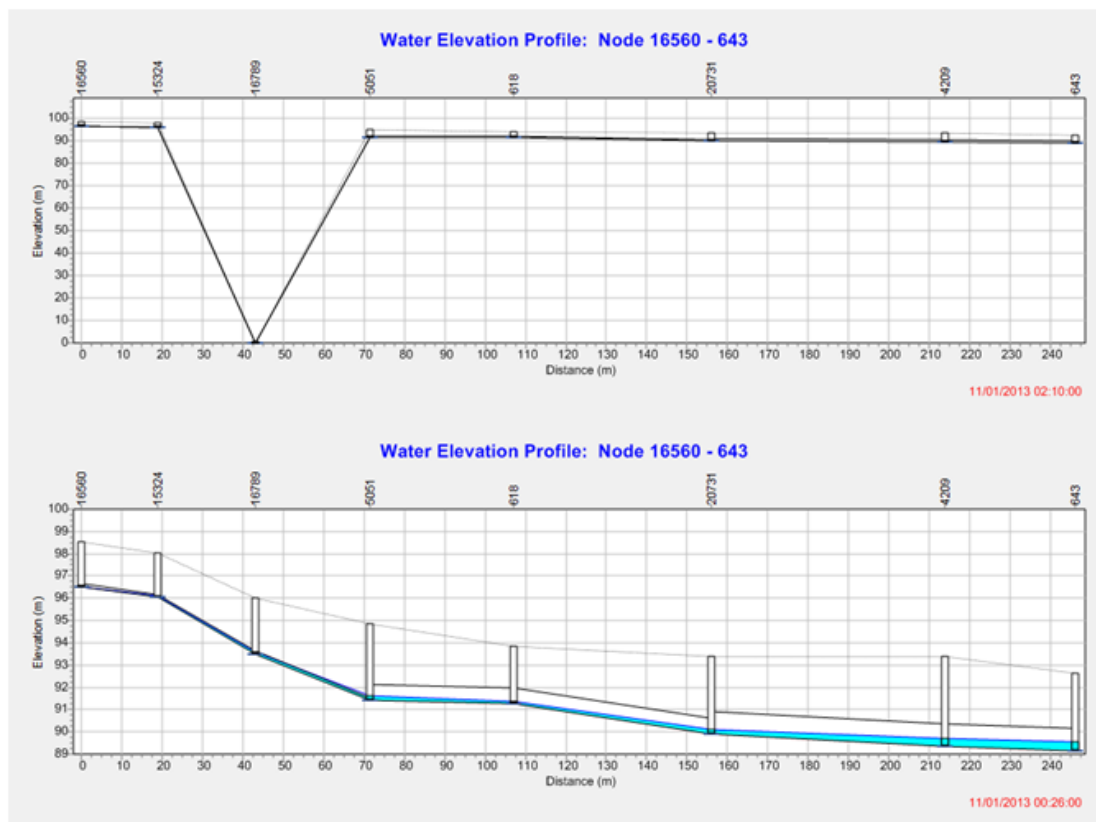
5. Resultat

5.1 Kalibrering

Viser her hvordan modellen ble kalibrert.

5.1.1 Verifikasjon av modellen

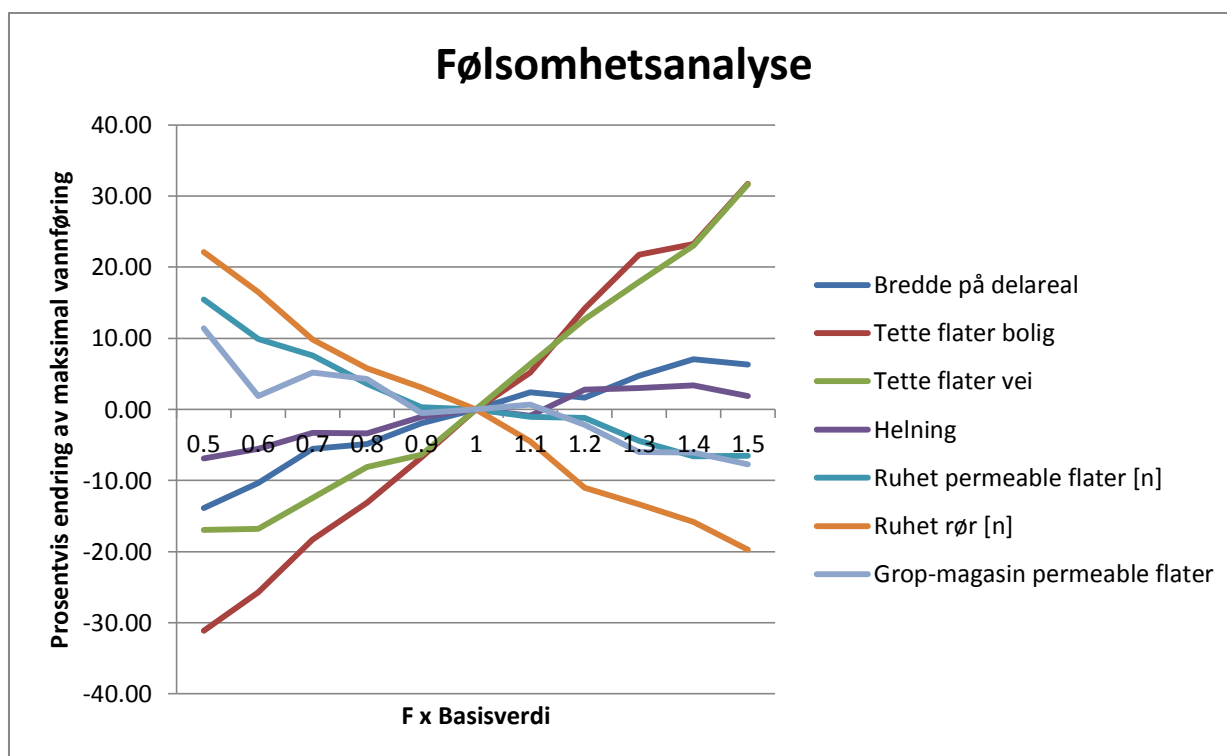
Hele modellen ble gjennomgått for å finne kontinuitetsfeil som kunne føre til oppstuvning. Enkelte kummer hadde en høyde på 0 meter, noe som ble rettet opp før analysen ble gjennomført. Eksempel på dette er vist i Figur 22.



Figur 22: Kummer med feil høyde ble rettet opp, figuren viser samme ledningsstrek før og etter feilen er rettet opp.

5.1.2 Analyse av modellfølsomheten

Figur 23 viser resultatet av følsomhetsanalysen som ble utført. Endringene er regnet ut fra prosentvis endring i Q_{maks} for de gitte parameterne.



Figur 23: Resultat av følsomhetsanalysen som ble utført på 20-årsregnet med parameterne valgt i primærmodellen. Henholdsvis: bredde på delareal, tette flater for boliger og vei, helning på delfeltet, ruhet permeable flater, ruhet rør og grop-magasin permeable flater.

Andel tette flater

Andel tette flater er den mest følsomme parameteren for modellen. For tette flater med boliger hvor andelen tette flater reduseres til 4,4 % eller økes til 13,2 % gir en variasjon i Q_{maks} på - 31,16 % til + 31,73 %. Tette flater av vei har ett litt mindre spenn fra - 16,93 % til + 31,65 %, dette når tette flater settes til 25 og 75 %.

Ruhet

Etter tette flater er ruheten på rør viktig. Analysen viser at endringene av denne gir et spenn mellom - 19,7 og + 22,11 % for ruhet på henholdsvis 0,0075 og 0,0225.

Ruhet for permeable flater endrer Q_{maks} fra 15,46 % på 0,12 til 6,49 % på 0,36.

Bredde på delareal

Bredden på delfeltene som også har en innvirkning på tilrenningstiden, gjør med en reduksjon til 15 meter at Q_{maks} reduseres med 13,9 %. En bredde på 45 meter gir en økning på 6,3 %.

Grop-tap

Størrelsen på grop-magasinet for permeable flater gir en endring på - 7,71 til + 11,44 %, når størrelsen varierer fra 2-6 mm.

Helning på delareal

En helning på 0,6 % vil redusere maksimal avrenning med 6,89 %. Når helningen økes til 1,8 % øker maksimal avrenning med 1,85 %.

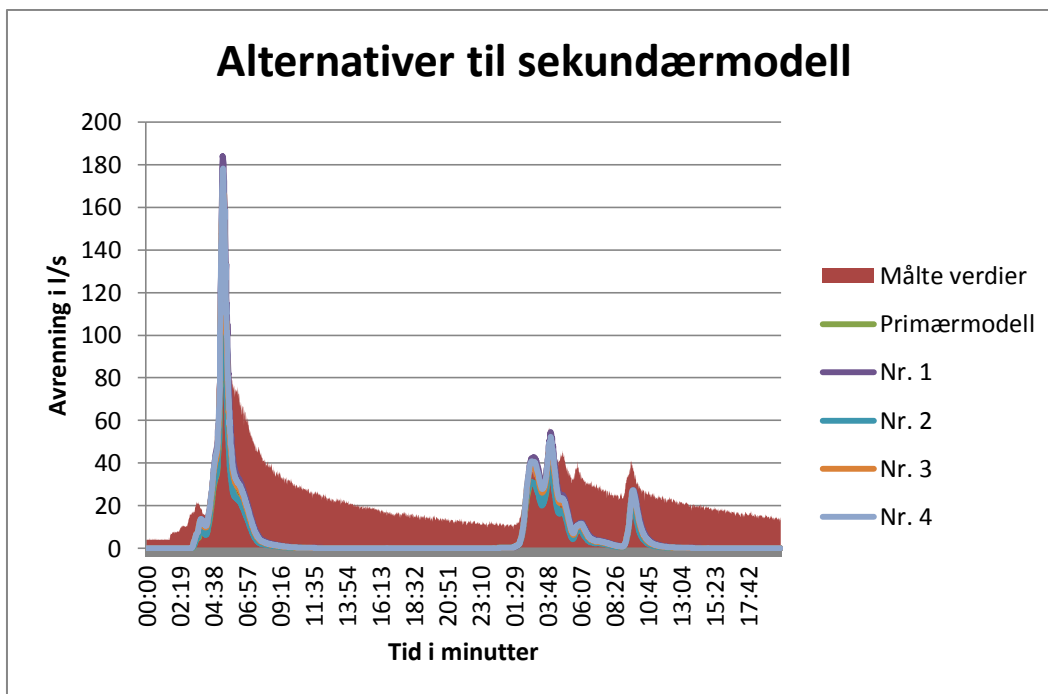
Alternativer til sekundærmodellen

Alternativer til nye parameterverdier er vist i Tabell 9.

Tabell 9: Viser alternativer til valg av sekundærmodellen etter følsomhetsanalysen.

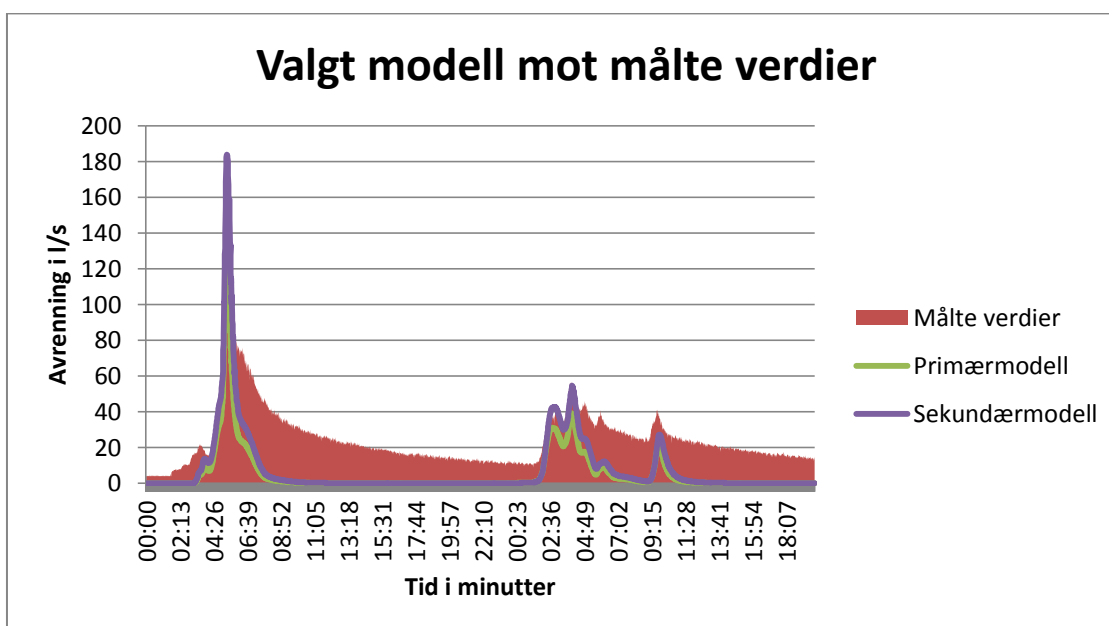
Paramenter	Primærmodell	Nr.1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
Bredde på nedslagsfeltet	30	27	30	31	31
Helning på nedslagsfeltet	1.2	0.27	0.6	1.2	0.6
Andel tette flater bolig	8.8	12.4	8.8	11	11.7
Andel tette flater vei	50	50	50	50	50
Grop-magasin for tette flater	2	1.8	2	1.8	1.8
Grop-magasin for permeable flater	4	3.6	6	4	3.6
Mannings tall for tette flater	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
Mannings tall for permeable flater	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Mannings tall for rør	0.015	0.017	0.012	0.017	0.017
Tette flater uten grop-magasin	0	0	0	0	0
Maksimum infiltrasjonsrate	75	75	75	75	75
Minimum infiltrasjonsrate	20	20	20	20	20

Figur 24 viser noen ulike alternativer til sekundærmodell, de samme som er gitt i modellen over. Maksimalt målt avrenning ved denne nedbørshendelsen var 159,65 l/s. Primærmodellen gav en verdi på 146,11 l/s. Det alternativet som er nærmest den målte verdien er alternativ 2 som gir en Q_{maks} på 159,15 l/s. Grafene viser at denne kurven er minst. Alternativet som er nærmest den målte når volum, maksimal avrenning og tidsforskyvning tas i betraktning er Nr.1.



Figur 24: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelsen 28.-29. november 2015.

Figur 25 viser sekundærmodellen mot de målte avrenningsverdiene. Denne viser en tidsforskyvning på 1 minutt for maksimal avrenning i forhold til målte verdier. Maksimal avrenning fra modellen gir 183,94 l/s og målte verdier gir 159,65 l/s, dette gir en differanse i toppene på 15,22 %.



Figur 25: Valgt sekundærmodell fremstilt mot avrenningen 28.11.2015-29.11.2015.

Tabell 10 viser parameterne som ble valgt til sekundærmodellen. Det ble gjort endringer i bredden og helningen til delfeltene, delfelt med boliger fikk en større andel tette flater, grop-magasin ble redusert og ruheten til rørene ble økt.

Tabell 10: Parameterne til primær- og sekundærmodellene.

Paramenter	Primærmodell	Sekundærmodell
Bredde på nedslagsfeltet	30	27
Helning på nedslagsfeltet	1.2	0.27
Andel tette flater bolig i prosent	8.8	12.4
Andel tette flater vei i prosent	50	50
Grop-magasin for tette flater	2	1.8
Grop-magasin for permeable flater	4	3.6
Mannings tall for tette flater	0.013	0.013
Mannings tall for permeable flater	0.24	0.24
Mannings tall for rør	0.015	0.017
Tette flater uten grop-magasin	0	0
Maksimum infiltrasjonsrate	75	75
Minimum infiltrasjonsrate	20	20

5.1.3 Etterprøving

Resultatet av sekundærmodellens simulering for tre testregn er fremstilt i Tabell 11 som viser korrelasjon mellom målte og simulerte verdier gitt ved F-verdien. Q_{maks} er oppgitt i [l/s], Volum i [m^3] og tid i minutter.

Tabell 11: Tabell for utregning av hvor god kalibreringen er. Oppgitt med F-verdi fremstilt fra maksimal vannføring, tidspunkt for denne og volum av avrenningen.

Tall til utregning av F-verdien				Tall til utregning av F-verdien			
Regndata	Nedbør 3	Nedbør 4	Nedbør 5	Regndata	Nedbør 3	Nedbør 4	Nedbør 5
Målte verdier				Målte verdier			
Q_{maks}	69.2	30.04	121.21	Q_{maks}	0	30.04	0
Volum	2483.76	648.38	3639	Volum	0	648.38	0
Tid	1192	1361	2109	Tid	0	1361	0
Simulerte verdier				Simulerte verdier			
Q_{maks}	43.49	31.33	64.99	Q_{maks}	0	31.33	0
Volum	1060.97	368.55	1250.45	Volum	0	368.55	0
Tid	1012	1372	2116	Tid	0	1372	0
F-verdien	787096.41			F-verdien	7843.91		

Verdiene brukt i Formel 9 side 38 for utregning av F-verdien var:

$$\sum (Q_m - Q_b)^2 = 3823,35$$

$$\sum (V_m - V_b)^2 = 7\,807\,807,32$$

$$\sum (T_m - T_b)^2 = 32\,570$$

$$V_1 = 0,8 \quad , \quad V_2 = 0,1 \quad \text{og} \quad V_3 = 0,1$$

F-verdien ble 787 096,42. Den maksimale avrenningen er den viktigste faktoren for oversvømmelser. Sekundærmodellen gir ved nedbør 3 et avvik på 37,2 %, nedbør 4 gir et avvik på 4,3 % og nedbør 5 gir et avvik på 46,4%. Nedbør 3 og 5 som falt da det var frost i bakken er trukket vekk ettersom de ikke oppfyller kravene til kalibreringen. Ny utregning av F-verdien gir:

$$\sum (Q_m - Q_b)^2 = 1,66$$

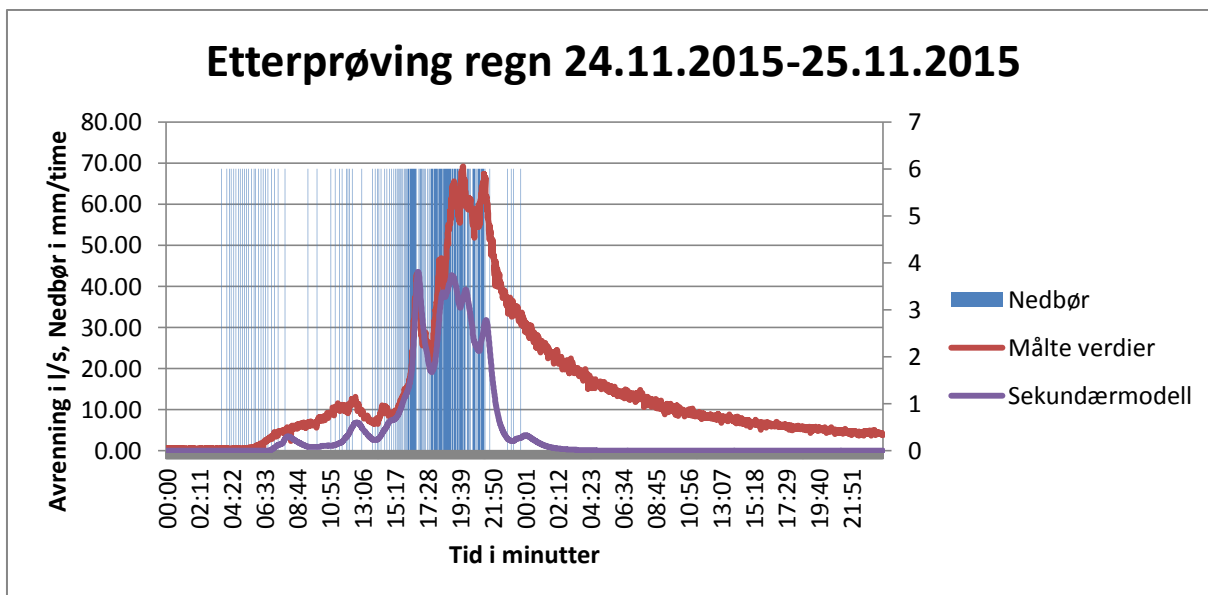
$$\sum (V_m - V_b)^2 = 78\,304,83$$

$$\sum (T_m - T_b)^2 = 121$$

$$V_1 = 0,8 \quad , \quad V_2 = 0,1 \quad \text{og} \quad V_3 = 0,1$$

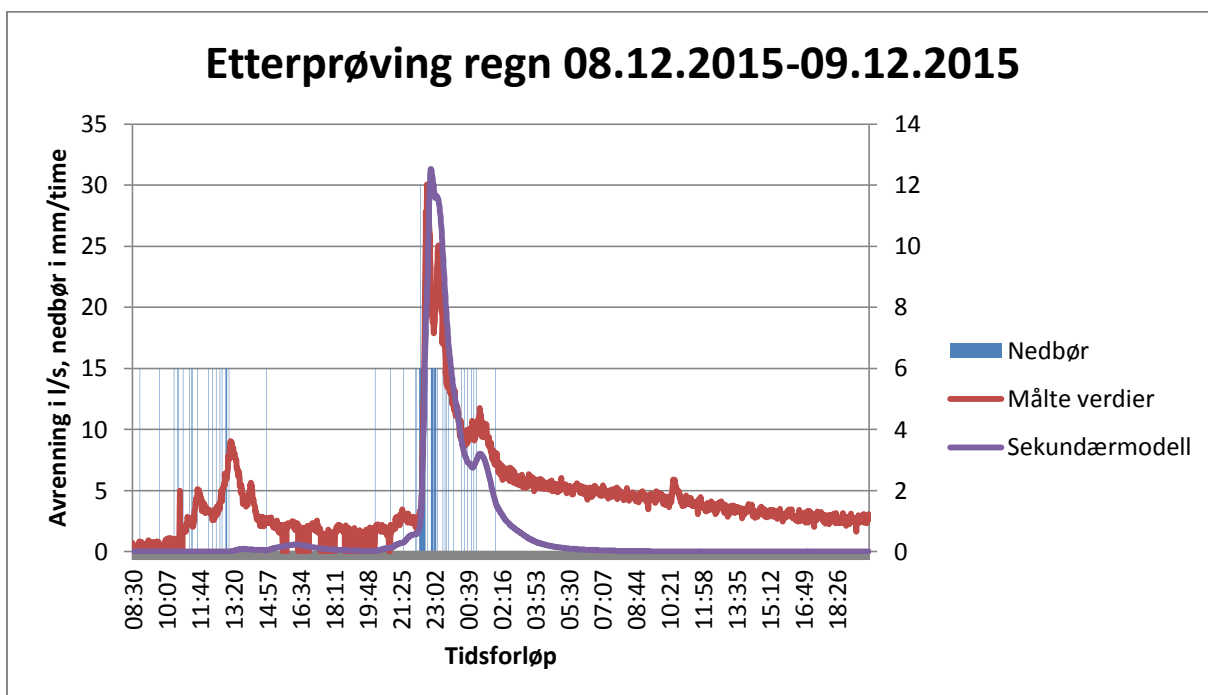
F-verdien er da 7 843,91.

Figur 26 viser at sekundærmodellen samsvarer lite med den målte maksimale avrenningen og mengden vann generelt. Maksimal simulert avrenning er på 43,49 l/s ved tiden 16:52. Den målte maksimale avrenningen er 69,2 l/s klokka 19:52.



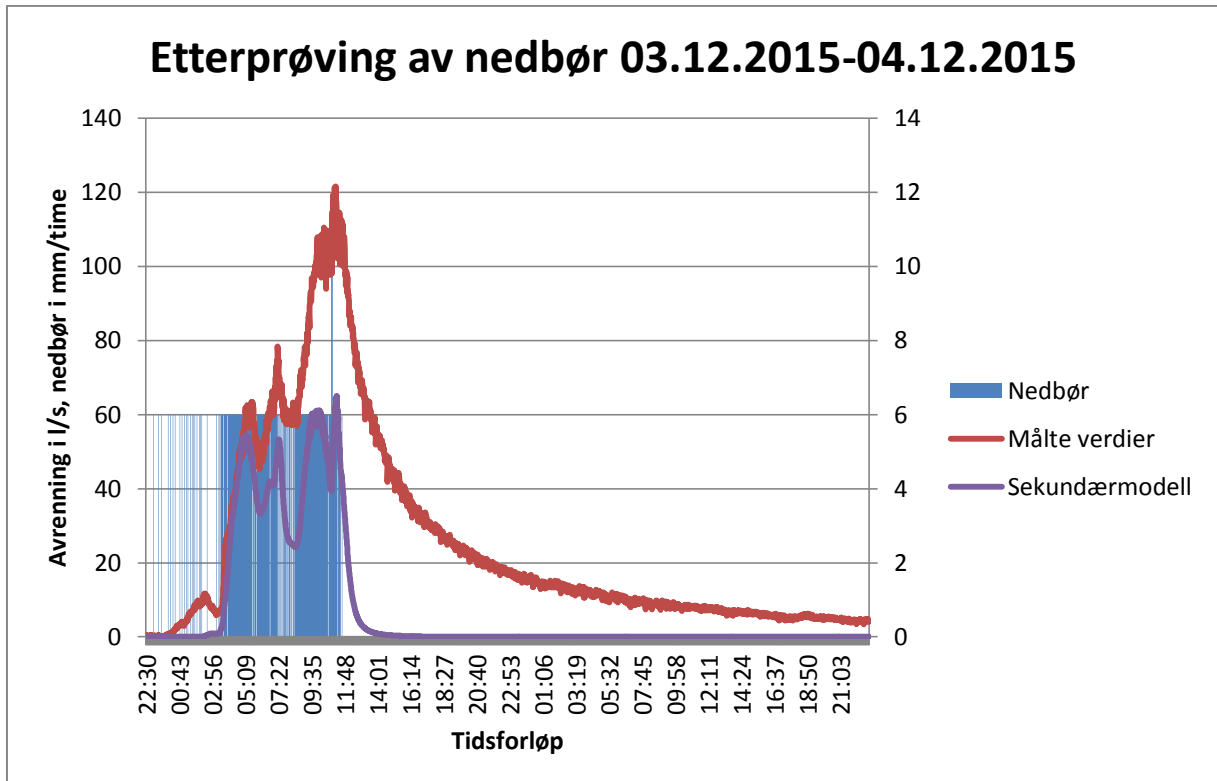
Figur 26: Etterprøving av nedbørshendelse 3 i intervall på 1 minutt.

Figur 27 viser et samsvar mellom målte og simulerte verdier. Maksimal avrenning har et avvik på 4,3 %, og en tidsforskyvning på denne toppen på 11 minutter. Simuleringen viser at modellen infiltrerer mer vann i starten av nedbøren enn virkeligheten. Kurven for de målte verdiene er i stor grad noe høyere enn den simulerte avrenningen. Maksimal simulert avrenning var på 31,33 klokka 22:52 og den målte hadde sin topp 22:41 på 30,04 l/s.



Figur 27: Etterprøving av nedbørshendelse 4 i intervall på 1 minutt.

Figur 28 har et større avvik i maksimal avrenning enn de to andre nedbørshendelsene, denne er på 46,4 %. Den simulerte kurven faller en del raskere enn den virkelige avrenningen, noe som gir et større avvik i volumet. Maksimal målt avrenning var på 121,21 l/s klokken 11:09, den maksimalt simulerte verdien var på 64,99 l/s ved tidspunktet 11:16.

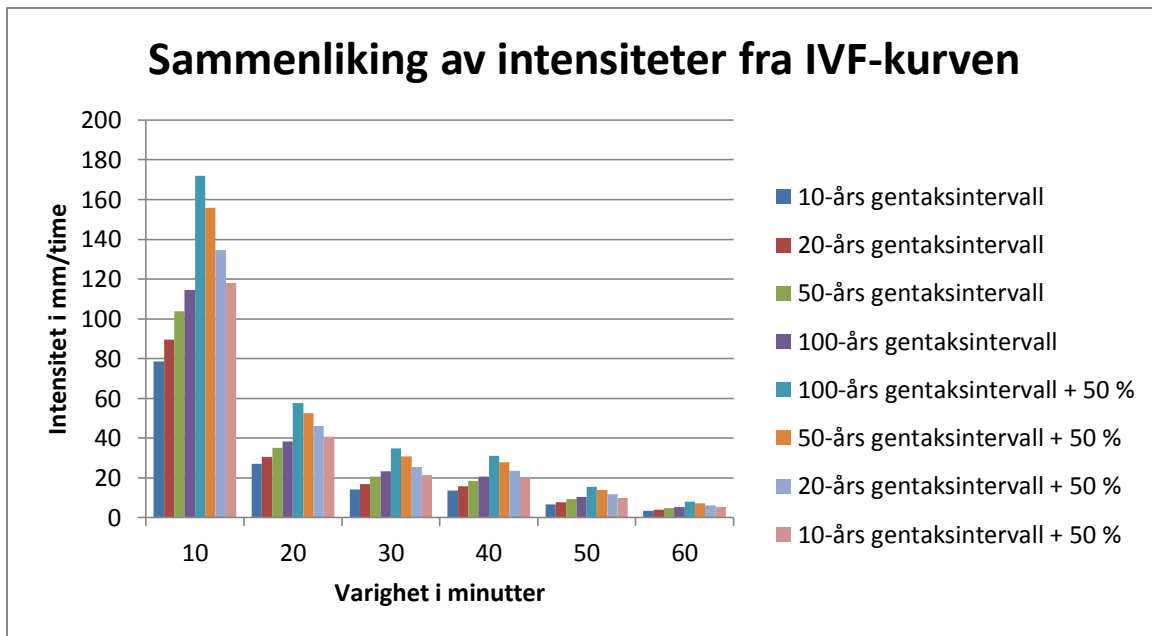


Figur 28: Etterprøving av nedbørshendelse 5 i intervall på 1 minutt.

5.2 Simuleringer gjennomført i modellen

5.2.1 Regndata

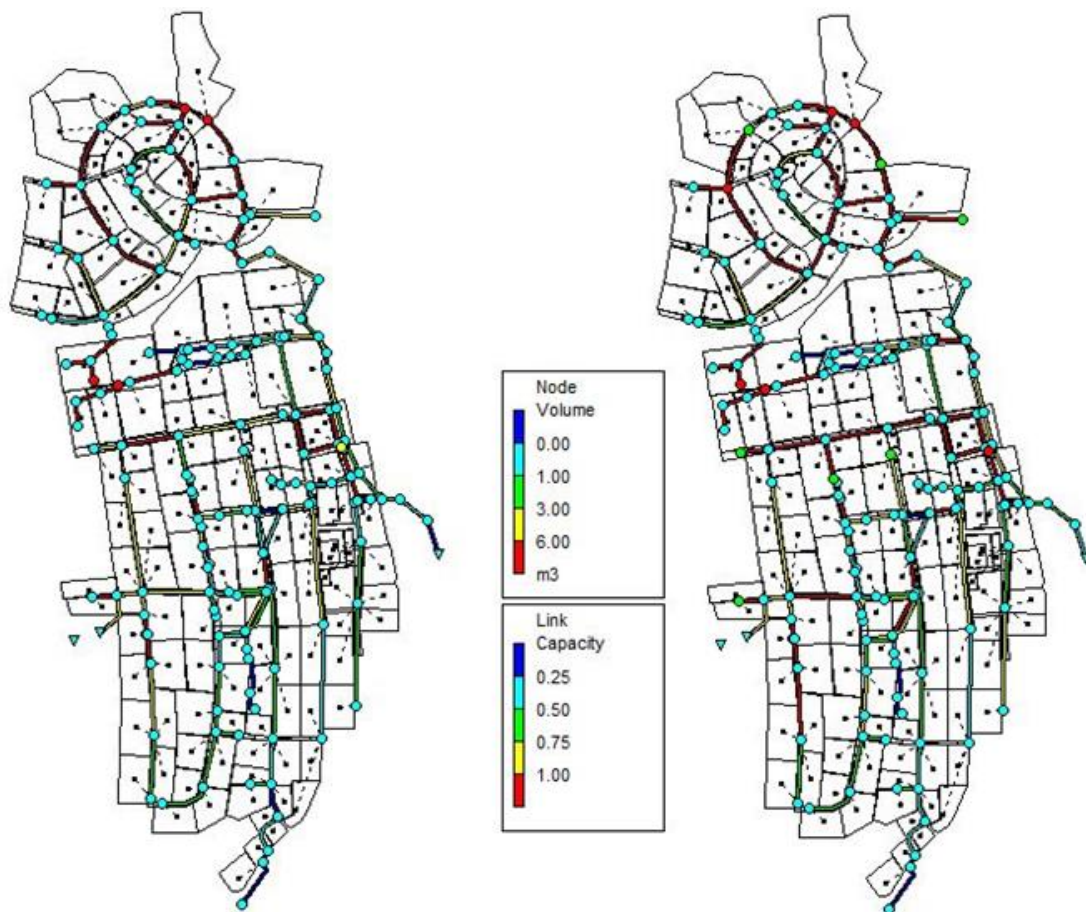
Figur 29 viser en sammenlikning av ulike intensiteter fra IVF-kurven sammen med klimatillegg. Den viser at intensiteten til et 10-årsregn med klimatillegg nesten har lik intensitet som et 100-årsregn. 100-års regnet har en intensitet på 114,6 mm/time og 10-års regn med klimatillegg er 118,1 mm/time ved en varighet på 10 minutter.



Figur 29: Sammenlikning av intensiteter fra IVF-kurven.

5.2.2 Simulering av dagens situasjon

Simuleringen viste på 10-års gjentaksintervall 34 kummer som hadde oversvømmelser hvor 4 av dem hadde et volum på over 6 m^3 som kan anses å gi skade på bygninger. Ved 20-års gjentaksintervall var det 49 kummer som hadde oversvømmelser og 6 av dem hadde et volum på over 6 m^3 . Figur 30 viser en oversikt over 10- og 20-års gjentaksintervall. 10-års intervall er til venstre og 20-års intervall til høyre. De røde kummene er viser hvor oversvømmelsene som førte til skader oppsto.



Figur 30: Viser oversvømmelser i kum og kapasiteten til rør ved 10- og 20-års gjentaksintervall.

Tabell 12 viser en oversikt over oversvømmelser og skader på alle de benyttede gjentaksintervallene.

Tabell 12: En oversikt over antall kummer med oversvømmelse og beregnede skader på bygninger.

Oversvømmelser og skade på bygninger				
Gjentaksintervall	Oversvømmelser med dagens IVF- kurve	Oversvømmelser med 50 % klimatillegg	Skader på bygninger ved dagens IVF (over 6 m ³)	Skader på bygninger ved dagens IVF + klima(over 6 m ³)
10	34	72	4	19
20	49	87	6	30
50	54	100	12	41
100	73	107	16	52

5.3 Simulering av LOD tiltak

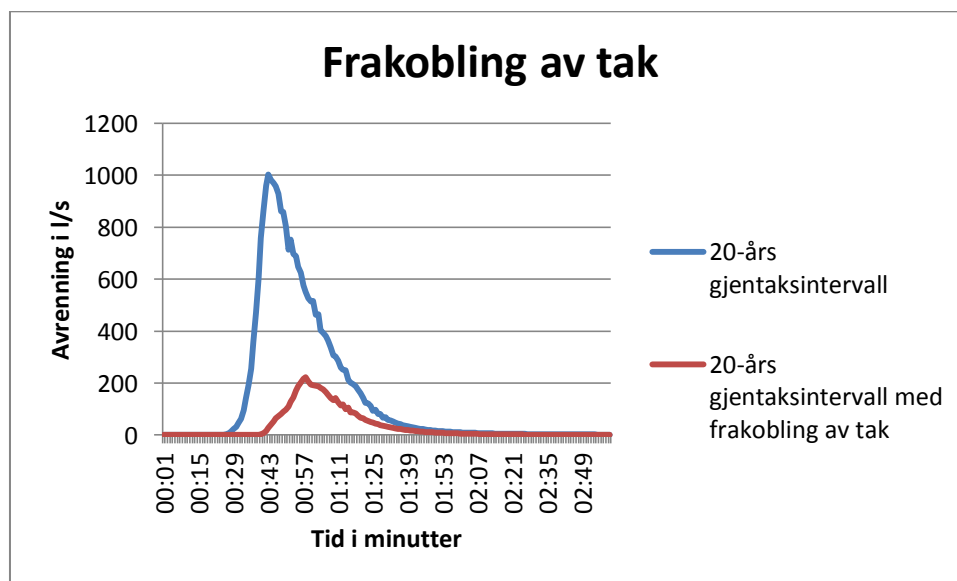
5.3.1 Avkobling av tak med direktetilkobling

Fra alle delfelt med boliger ble tette flater fra tak tatt bort. Resultatet av simuleringene er vist i Tabell 13. Det er først ved et gjentaksintervall på 50-år at oversvømmelser oppstår, da ved 4 kummer. Første skade på bygninger skjer ved 100-års gjentaksintervall. Totalt vil ikke mer enn 18 kummer føre til skader på bygninger ved et gjentaksintervall på 100-år med klimatillegg medregnet. Dette er bare 2 kummer mer enn hva som ble rammet på 100-års intervall uten klimatillegg i simulering av dagens IVF.

Tabell 13: Oversikt over antall oversvømmelser når hustak er frakoblet.

Oversvømmelser og skade på bygninger med frakoblet taknedløp				
Gjentaksintervall	Oversvømmelser med dagens IVF- kurve	Oversvømmelser med 50 % klimatillegg	Skader på bygninger ved dagens IVF (over 6 m ³)	Skader på bygninger ved dagens IVF + klima(over 6 m ³)
10	0	13	0	1
20	0	31	0	3
50	4	55	0	8
100	10	67	1	18

Figur 31 viser effekten av frakoblet direktenedløp. Maksimal avrenning reduseres fra 1001,86 l/s til 222,41 l/s. Det er en tidsforskyvning på 15 minutter for toppen. Total volumforskjell er på hele 61,2 %, en reduksjon fra 724,85 m³ til 281,41 m³.



Figur 31: Viser effekten i avrenning når alle direktenedløp fra tak kobles av.

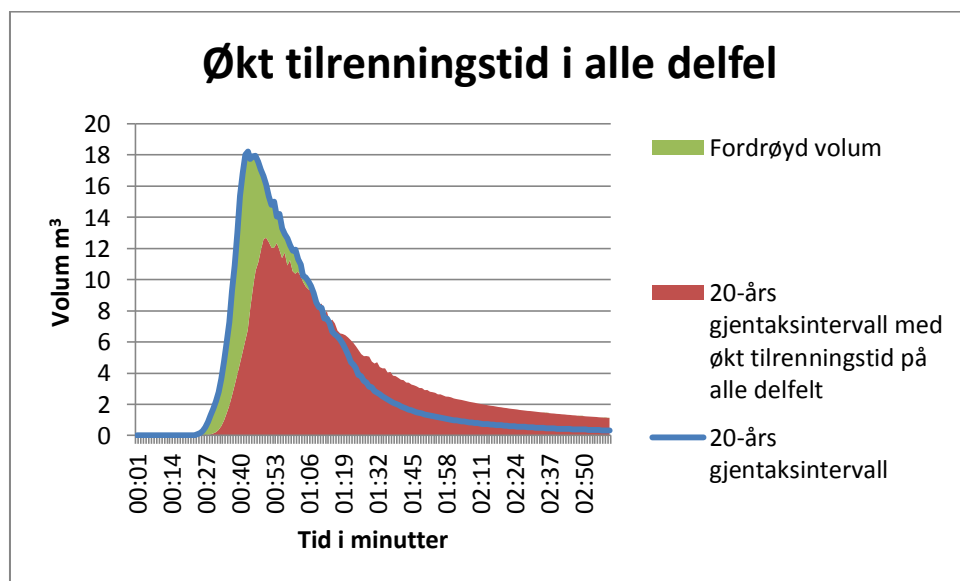
5.3.2 Fordrøyning i nedslagsfeltene

Intensiteten fra IVF-kurven ble satt til den samme for alle regnvarighetene og satt inn i Formel 10. Konsentrasjonstiden til feltet på 20,2 minutter og et gjentaksintervall på 20 år gir $I_0 = 167,2$. Tabell 14 viser tallene som ble benyttet for utregningene av fordrøyningsvolum. Den valgte utløpsmengden ble satt til $10,42 \text{ m}^3/\text{s}$ som var 70 % av den maksimale avrenning for kasseregnene. Den høyeste differansen i volum inn og ut er på 165 m^3 som da blir magasinvolumet.

Tabell 14: Tallene for utregning av fordrøyningsvolumet.

Magasinivolum							
Regnvarighet [min]	I [l/s*ha]	Regnvarighet [s]	A [ha]	φ	Volum inn [m ³]	Volum ut [m ³]	Differansen [m ³]
5	53.38	300	58	0.2035	189.0	52.1	136.9
10	37.69	600	58	0.2035	266.9	104.2	162.7
15	30.24	900	58	0.2035	321.2	156.2	165.0
20	25.73	1200	58	0.2035	364.4	208.3	156.1
30	20.38	1800	58	0.2035	433.0	312.5	120.6
45	16.07	2700	58	0.2035	512.2	468.7	43.5

En bredde på 2,1 meter ble benyttet for å oppnå et fordrøyd volum på 164 m^3 . Volumtoppen før fordrøyning var $18,22 \text{ m}^3$ etter økt tilrenningstid var denne $12,68 \text{ m}^3$. Totalvolum før fordrøyning er $724,85 \text{ m}^3$. Totalvolum med fordrøyning er $863,08 \text{ m}^3$. Forskyvningen av toppene er på 7 minutter, som vist i Figur 32.



Figur 32: Viser effekten av en økt tilrenningstid på 7 minutter i alle delfel.

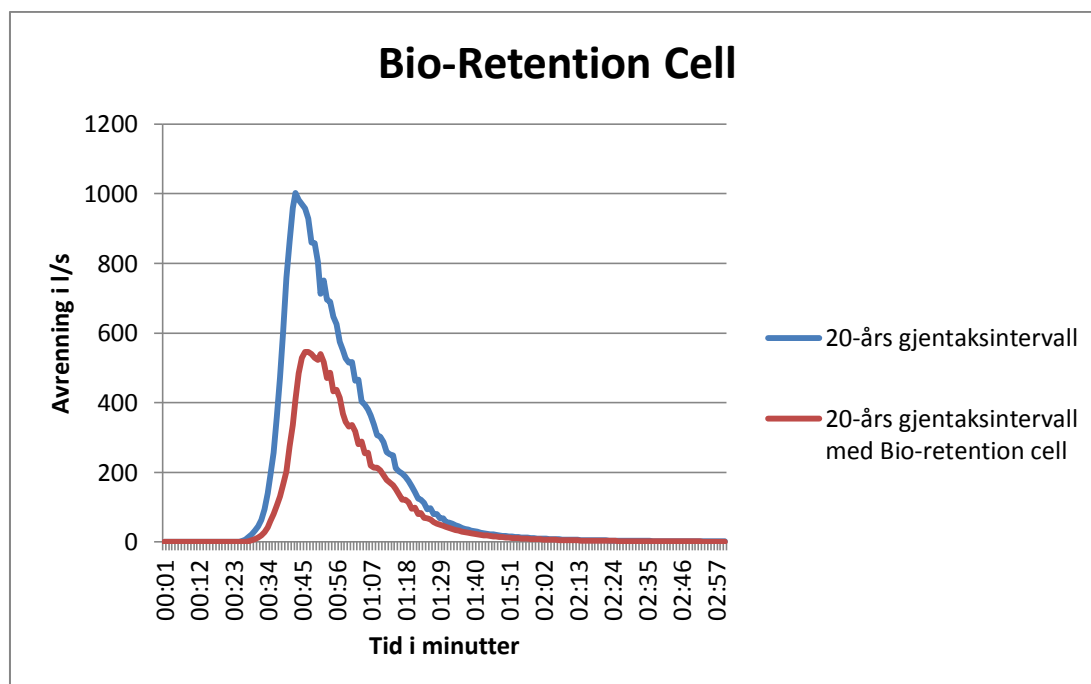
Tabell 15, som viser oversikten av tiltaket, har ved 10-års gjentaksintervall 3 oversvømmelser. De første oversvømmelsene som fører til skade på bebyggelse kommer ved 100-års gjentaksintervall. Totalt blir 67 kummer oversvømt hvor 14 av dem fører til skade på bebyggelse.

Tabell 15: Oversikt over antall oversvømmelser med fordrøyning i alle delfelt.

Oversvømmelser og skade på bygninger med fordrøyning				
Gjentaksintervall	Oversvømmelser med dagens IVF-kurve	Oversvømmelser med 50 % klimatillegg	Skader på bygninger ved dagens IVF (over 6 m ³)	Skader på bygninger ved dagens IVF + klima(over 6 m ³)
10	3	30	0	3
20	11	39	0	5
50	15	54	0	8
100	25	67	3	14

5.3.3 Bio-Retention Cell

Figur 33 viser effekten av Bio-Rerention Cell benyttet i hvert delfelt med bebyggelse. Maksimal avrenning reduseres fra 1001,86 l/s til 546,47 l/s og har en tidsforskyvning på 4 minutter. Total volumforskjell er på 29,4 %, med reduksjon fra 724,85 m³ til 511,99 m³.



Figur 33: Viser endinger i avrenning med bruk av Bio-Retention Cell i delområder med bebyggelse.

Tabell 16 viser 2 oversvømmelser på 10-års intervall. Totalt berøres 105 kummer av oversvømmelser ved 100-års gjentaksintervall med klima tillegg. De første skadene på hus vil oppstå ved 50-års gjentaksintervall og berører 2 kummer. Dette tallet vil øke opp mot 100-års intervall med klima og berøre 49 kummer.

Tabell 16: Oversvømmelser med Bio-Retention Cell som tiltak.

Oversvømmelser og skade på bygninger med Bio-Retention Cell				
Gjentaksintervall	Oversvømmelser med dagens IVF- kurve	Oversvømmelser med 50 % klimatillegg	Skader på bygninger ved dagens IVF (over 6 m ³)	Skader på bygninger ved dagens IVF + klima(over 6 m ³)
10	2	45	0	5
20	10	75	0	17
50	35	91	2	35
100	42	105	5	49

6. Diskusjon

6.1 Beregning av overvannsmengder

6.1.1 Konsentrasjonstid

Det ble gjort en antagelse om at strømmingstiden her stemte overens med tidligere erfaringer fra andre land. For å gjøre denne mer nøyaktig kunne nomogram vært benyttet.

For strømningshastigheten ønsker Bergen kommune å benytte Colebrooks formel, men til det trengs blant annet Reynolds tall. Det ble derfor benyttet en strømningshastighet i røret på 2 m/s, som er en vanlig verdi ifølge Vann- og avløpsboka. Dette var kanskje noe høyt grunnet liten helning i området. Om den hadde blitt satt til 1,5 m/s som er den laveste av vanlig anbefalte verdier fra Vann- og avløpsboka (Norsk Vann 2013) ville konsentrasjonstiden til feltet økt med 3,4 minutter. Konsentrasjonstiden ville da vært på 23,6 minutter. Grunnet intervaller i IVF-kurven som gir 20 eller 30 minutter å velge mellom ville samme verdier blitt valgt.

Andel tette flater blir beregnet hver for seg for boliger og veger. Det var blant annet fordi modellen senere skulle bli delt opp på denne måten. Dersom dette ikke hadde blitt gjort og Tabell 1, side 7 for avrenningskoeffisienten hadde blitt benyttet, ville den med eneboliger som alternativ vært på 0,5, altså mer enn dobbelt så høy som den benyttede. Dette ville medført en betydelig større avrenning gjennom den rasjonelle formelen.

6.1.2 Konstruksjon av regnhyetogram

Under konstruksjon av regnhyetogrammet ble IVF-kurven basert på 37 gjentakintervall benyttet. Det er ønskelig å benytte den siste kurven som er lagt ut ettersom den har et større datagrunnlag. Det var i begynnelsen av mai kommet en oppdatering basert på 38 sesonger, som gav noe høyere verdier enn dem som ble benyttet i oppgaven, men det ble for liten tid til å gjøre om på dette.

6.1.3 Satt inn i den rasjonelle formel

Den rasjonelle formelen gav en avrenning på: 2 804 l/s.

Primærmodellen gir: 963 l/s.

Sekundærmodellen gir: 1 002 l/s.

U2 viser 129,91 l/s i primærmodellen og 170,75 l/s i sekundærmodellen.

Den store ulikheten mellom den rasjonelle formelen og sekundærmodellen kan ha oppstått ettersom den rasjonelle formel er en forenkling som ikke bør benyttes på felter med et areal større enn 50 hektar. Sekundærmodellen er likevel noe nærmere den rasjonelle formel enn primærmodellen.

Noen årsaker til at den rasjonelle metode gir høyere avrenning kan være at den ikke tar i betraktning det naturlige fordøyningsvolumet i rørene som fyller seg opp og demper vannføringen. Formelen fanger ikke opp eventuelle ulikheter i delfeltene og grop-magasinet som ligger på overflater blir ikke trukket fra.

6.2 Måledata benyttet til kalibreringen

Det var en stor utfordring å finne mange regn hvor både nedbør og avrenning kunne benyttes.

6.2.1 Nedbør

Måledata fra eKlima var ikke mulig å benytte ettersom tidsoppløsningen her ikke var høy nok. Da nedbøren fra målestasjonen på Rustad skulle hentes ut var det en konverteringsfeil på måledataene for nedbør i perioden 15.09-18.11.2015, dette gjorde at det ikke var mulig å hente ut data fra dette tidsrommet. Feilmeldingen som kom opp sa «feil i konverteringsfaktor og oppløsningsverdi i Hytran for perioden». Oktober var i tillegg den tørreste oktober på mange år, noe som også gav færre nedbørshendelser å spille på.

To av nedbørshendelsene som ble benyttet kom da det hadde vært frost, noe som vil gi en lavere infiltrasjon til grunnen.

6.2.2 Avrenning

Måleutstyret for avrenning har bydd på litt utfordringer underveis. Først var det lagt inn noen småfeil i innstillingene som raskt ble rettet opp. Ved 3 ulike anledninger omkalibrerte utstyret seg selv og gjorde et hopp på 0,6 meter i vannstand. Det gikk i både positiv og negativ retning. Signalstyrken til utstyret var ujevn til tider, det ble spekulert i om jernbanen som går noen meter unna kunne ha noe med dette å gjøre. Måledataene ble sendt til undersøkelse ved Houm i Oslo for å forsøke å finne årsaken som førte til de plutselige sprangene i vannstanden, de fant ingen feil. Utstyret stabiliserte seg etter hvert og gav målinger som samsvarte mer med værbildet. Under tørrvær var det vannføring i kummen på mellom 1 og 4 l/s noe som tyder på lekkasjer eller feilkoblinger. Hvor mye utslag dette hadde under nedbør er vanskelig å si basert på de få nedbør- og avrenningsseriene som til slutt ble benyttet.

6.3 Oppbygging av modellen

Alle høyder på kummer med manglende høyder og dybder burde vært målt med GPS for å vite mer nøyaktig hvordan oppstuvningen utarter seg.

6.4 Kalibrering

6.4.1 Verifikasjon av modellen

Det ble besluttet å endre det usikre utløpet slik at hele modellen hadde mulighet til å ledes mot målekummen. En annen løsning kunne vært å endre høyden til utløpet som ble satt ut av

funksjon. Det ble i ettertid funnet at utløpet lå litt høyere i modellen enn kummen vannet skulle ha kommet fra, noe som gjør at vannet ikke ville forsvinne like raskt ut av systemet her. Som igjen forklarer hvorfor volumet i dette utløpet var så mye høyere enn ved de andre utløpene. Dette ble oppdaget etter det var gjort ferdig noen steg videre i modellen og kjørt flere av simuleringene. Siden endringene til utløpet hvor måleutstyret sto (U70) var på 0,04 % for maksimal avrenning og 0,72 % for volumet ble det besluttet å la modellen være slik den var med to utløp i bruk.

6.4.2 Analyse av modellfølsomheten

Følsomhetsanalysen viser at ruhet spiller en rolle for avrenningen, de anbefalte verdiene i brukermanualen bør overholdes. Andel tette flater for boliger er den faktoren som gir det aller største utslaget i analysen, her er det da interessant å sette inn et LOD tiltak som kan gi store endringer i maksimal avrenning. Ettersom SWMM ikke har en egen funksjon for å simulere økt tilrenningstid ble bredden på delarealet redusert for å simulere magasin i delfeltene som LOD tiltak. Helningen ble i den valgte modellen satt til 0,27 %, dette er ikke veldig mye og kanskje litt urealistisk vell liten til tross for at høydeforskjellene ikke er så store. Den gjennomsnittlige helningen som ble målt for ulike profiler i området var 1,2 % helning.

Maksimal tillatt differanse på Q_{maks} for at modellen kan benyttes er 15 %. For nedbørshendelsen 28.-29. november ser vi at modellen er litt i grenseland på om den kan benyttes, den var 15,22 %. Siden volumet her var større ble alternativet som gav den laveste F-verdien valgt. For nedbørshendelen 1.-3. september var differansen på toppene ved det valgte alternativet på 9,8 %, så dette er innenfor det tillatte differanseområdet for å unngå en ny kalibrering. Volummengden var parameteren med størst avvik, så det kunne vært interessant å vite hvor mye av volumet som egentlig stammet fra lekkasjer og feilkoblinger.

6.4.3 Få regn å kalibrere mot

Få regn å kalibrere mot gjorde det krevende å få en modell til å passe best mulig.

Under kalibreringen ble de to nedbørshendelsene med høyest maksimal avrenning benyttet. En av grunnene til dette var at her var det sikkert tørrvær i forkant av nedbøren.

Det er knyttet en usikkerhet til hvor god modellen egentlig er ettersom det bare er fem nedbørshendelser totalt å benytte til kalibrering og etterprøving totalt.

6.4.4 Etterprøving

Kalibrering av overvannssystemer benytter gjerne 10 regn til å lage en modell, altså til å endre parameterne slik at modellen blir mest mulig lik de virkelige målingene. Selve kalibreringen benytter 5-6 regn. Når kalibreringen er gjennomført verifiseres den ved å kjøre modellen på 4-

5 «ubrukte» regn. Regn som altså ikke er benyttet i kalibreringen. Mangel på regn med både målinger for nedbør og avrenning var grunnen til at så lavt datagrunnlag ble benyttet.

Når alle tre nedbørshendelsene til etterprøving blir sett på blir F-verdien såpass høy at det måtte ha blitt gjennomført en ny kalibrering. Dette ble ikke gjort fordi det under 2 av nedbørshendelsene var frost i bakken, noe som også gjenspeiler seg i avrenningsmønsteret til målingene. De er betydelig høyere enn de simulerte verdiene. Frost kan gjøre at avrenningen volummessig blir større og toppene kommer raskere.

For nedbørshendelse 4, 8.-9. desember infiltrerer modellen mer vann i starten av nedbøren enn målingene viser, dette kan komme av at ikke jorden er helt tørket etter igjen etter nedbørshendelsen noen dager i forkant. Den simulerte kurven faller også en del raskere enn den målte, noe som kan tyde på innlekking eller lekkasjer i rørene.

For utregning av den andre F-verdien blir avviket mye mindre. Det er fremdeles volumet som trekker opp verdien her.

6.5 Simuleringer gjennomført i modellen

6.5.1 Regndata

At intensiteten i et 100-års regn og et 10-års regn med klimatillegg er nesten like kan bli en stor utfordring for dagens urbane områder om endringene fortsetter i samme retning med intensitet økningen. Tiltak for håndteringen av intens nedbør bør igangsettes raskt i allerede eksisterende urbane områder og være med i utbyggingsplaner fra starten av.

6.5.2 Simulering av dagens situasjon

I oversikten over de mest berørte kummene er to av dem ved Åsgård skole. Noen av kummene i det området ble høydejustert i valideringen grunnet mangel på høyde.

6.6 Simulering av LOD tiltak

6.6.1 Avkobling av tak med direktetilkobling

Når tak kobles fra er det en stor nedgang i oversvømmelser sammenliknet med dagens situasjon. Totalt antall oversvømmelser er 67, dette tilsvarer mellom 50- og 100- års gjentaksintervall uten tiltak. Det er også en skadereduksjon på 65 % ved den mest intense nedbøren.

6.6.2 Fordrøyning i nedslagsfeltene

Som tiltak mot oversvømmelser er fordrøyning i nedslagsfeltene effektivt. Dette spesielt med tanke på skade på bebyggelse. Det er først ved 100-års gjentaksintervall at skader på bebyggelse oppstår, da ved 3 kummer. Til sammenlikning gav avkoblinger av takrenner i forrige tiltak skade ved 1 kum for samme gjentaksintervall.

Ved 100-års gjentaksintervall med klimatillegg var det 14 kummer som hadde nok

oversvømmelse til å skape skader på bebyggelse, det gir en 73 % reduksjon mot simuleringen uten tiltak. Antall oversvømte kummer ved 50- og 100- års intervall med klimatillegg har omtrent lik effekt som ved avkobling av takrenner. Men for mindre nedbørshendelser er avkobling av tak mer effektivt.

6.6.3 Bio-Retention Cell

Bio-Retention Cell er et tiltak som reduserer en stor andel av oversvømmelsene på de laveste gjentaksintervallene. På opptil 10-års intervall med klima er reduksjonen av oversvømmelser på mer enn 37,5 %. Over dette reduseres effekten og på 100-års intervall med klima er det bare 2 kummer som skiller tiltaket fra dagens situasjon med klima. Når det kommer til skade på bygninger oppstår dette først ved 50-års gjentaksintervall. Effekten er på mer enn 43 % frem til 20-års intervall med klima. Effekten avtar ved økt nedbør, og vil ved høyeste intervall bli på 5,8 %.

7. Konklusjon

De mest følsomme parameterne i modellen med tanke på kalibrering var andel tette flater, både for boligområder og vei. Etter dem i størrelse kommer ruhet på rørene, dette er en parameter som er vanskelig å gjøre noe med uten større tiltak.

Kapasiteten til dagens ledningsnett er ikke tilfredsstillende dimensjonert i forhold til dagens norske standard. Oversvømmelser og skader på bebyggelse ble gjennom simuleringene funnet til å opptre allerede på 10- og 20-års gjentaksintervall.

Det er bare tiltaket med fordrøyning som reduserte oversvømmelser og potensielle bygningsskader nok til å tilfredsstille dagens utgangsverdier fra IVF-kurven. Frakoblet taknedløp kommer like etter, men når ikke helt opp for 50 år med tanke på oversvømmelser og 100 år med tanke på skader, men på lave gjentaksintervall er derimot dette tiltaket best egnet. Bio-Retention Cell har noen reduksjoner på de lave gjentaksintervallene, men ikke nok til å komme under verdier for vanlige gjentaksintervall uten tiltak.

8. Referanseliste/kildeliste

- Bergen kommune. (2005). Retningslinjer for overvannshåndtering i Bergen kommune.
- Bjerknessenteret. (2009). Klimaendringer i fortiden.
- Bjerknessenteret. (2009a). Drivhuseffekt og jordas klima.
- Bjerknessenteret. (2009b). Golfstrømmen og vårt milde klima.
- Brennhovd, B. (2014). *Målt og modellert avrenning. Analyse av ledningsnett og urbanstasjon på Vestli i Oslo*. . Masteroppgave: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Butler, D. & Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. Third Edition utg.: Spon Press. 625 s.
- COWI. (2010). Bruk av nedbørdata Sluttrapport fra pilotprosjekt. 31 s.
- Dannevig, P. (2009). *Nedbør*: SNL. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/nedb%C3%B8r> (lest 13.01.2016).
- Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2015). *Klima*: SNL. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/klima> (lest 12.01.2016).
- Førland, E., Mamen, J., Dyrddal, A. V., Grinde, L. & Myrabø, S. (2015). Dimensjonerende korttidsnedbør. I: Norges vassdrags- og energidirektorat (red.), 134-2015.
- IPCC. (2013). Klima i endring - Store utfordringer, et mangfold av løsninger. I: FN's klimapanel (red.).
- James, R. (2012, 28.03.2012). *Modelling LIDs using PCSWMM and EPA SWMM5*. http://sustainabletechnologies.ca/wp/wp-content/uploads/2013/01/Rob-James_LID-Modeling-Mar-28-2012.pdf.
- Kindem, I. & Johnnessen, J. (2008). *Klimaet er i endring*: Bjerknessenteret. Tilgjengelig fra: <http://www2.bjerknes.uib.no/pages.asp?id=1462&kat=124&lang=1> (lest 14.01.2016).
- Kitterød, N.-O. (2015). *Precipitation*, Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Forelesning i VANN 200).
- Kitterød, N.-O. (2015a). *Evapotranspiration*, Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Forelesning i VANN200).
- Leopold, L. B. (1968). *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*, 18: USGS circ. 554.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. I: Norsk Vann (red.), 162/2008.
- Lindholm, O. (2014a, 03.09.2014). *Om matematiske modeller for beregning av urbane avløpssystemer*, Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (forelesning i THT300).
- Lindholm, O. (2014b). *Videregående emner om nedbørtil bruk i urbanhydrologien*, Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Forelesning i THT300).

- Lindholm, O. (2014c). *Overvann*, Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (Forelesning i THT261).
- Lindholm, O. (2015). Overvannsdammer Beregning av volum. I: Norsk Vann (red.). *VA Miljø blad*, 69.
- Lindholm, O. (2016). *Personlig meddelelse om oversvømmelser* (22.04.2016).
- Met Office. (2016). *Global circulation patterns*: Met Office. Tilgjengelig fra: <http://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/global-circulation-patterns> (lest 29.04.2016).
- Meteorologisk Institutt. (2009). *Automatiske nedbørmålere*. Tilgjengelig fra: https://metlex.met.no/wiki/Automatiske_nedb%C3%B8rm%C3%A5lere (lest 01.05.2016).
- Meteorologisk Institutt. (2010). *Nedbørmålere*: Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: <https://metlex.met.no/wiki/Nedb%C3%B8rm%C3%A5ler> (lest 19.01.2016).
- Meteorologisk Institutt. (2010a). *Nedbør*. Meteorologisk Institutt. Tilgjengelig fra: <https://metlex.met.no/wiki/Nedb%C3%B8r> (lest 01.05.2016).
- Meteorologisk Institutt. (2010b). *Manuelle nedbørmålere*. metlex. Tilgjengelig fra: https://metlex.met.no/wiki/Manuelle_nedb%C3%B8rm%C3%A5lere (lest 01.05.2016).
- Meteorologisk Institutt. (2016). *IVF-kurver for nedbør uten krav om sammenhengende nedbør for Rustadskogen*, 23.02.2016.
- NGU. (2015). *Et raskt sammendrag av vannets kretsløp*: USGS. Tilgjengelig fra: <http://water.usgs.gov/edu/watercyclenorwegian.html> (lest 14.01.2016).
- NGU. (2016). *Infiltrasjonsevne*: Norges Geologiske Undersøkelse,. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/?Box=260931:6620149:265242:6622859> (lest 01.03.2016).
- Norges vassdrags- og energidirektorat. (2014). *Hydra II*. Datasystem for hydrologiske data i NVE.
- Norsk Vann. (2013). *Vann- og Avløpsteknikk*: Norsk Vann. 703 s.
- NVPDC & ESI. (1992). *Northern Virginia BMP Handbook: A Guide to Planning and Designing Best Management Practices in Northern Virginia*. 302 s.
- Rossmann, L. A. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*: United States Environmental Protection Agency 285 s.
- Statens kartverk. (2016). *Ås sentrum*. http://www.norgeskart.no/?_ga=1.255972302.437168845.1460213913#13/263262/6621435.
- Sælthun, N. R. (2001). *THT300 - Hydroteknikk Hydrologiske modeller*.
- Sæterbø, E., Syvertsen, L. & Tesaker, E. (1998). *Vassdragshåndboka*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. 409 s.
- Teledyne ISCO. (2012). *Flowlink 5.1 Software Instruction Manual*: Teledyne Isco.
- Tollan, A. (2002). *Vannressurser*. Oslo: Universitetsforlaget.

Tucci, C. E. M. & Porto, R. L. (2001). Storm hydrology and urban drainage. I: Tucci, C. E. M. (red.). *Urban drainage in specific climate*. UNESCO, Paris. 69-102 s.

Universitet i Oslo. (2011). *Coriolis effekt*: UiO. Tilgjengelig fra:
<http://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/c/coriolis.html> (lest 29.04.2016).

Vann- og avløpsetaten. (2015). *Overvannshåndtering en veileder for utbygger*: Oslo kommune. 25 s.

Villarreal, E. L., Semadeni-Davies, A. & Bengtsson, L. (2004). Inner city stormwater control using a combination of best management practices. 20.

Ås kommune. (2016). *Fakta om Ås kommune*. Hjemmesiden til Ås kommune. Tilgjengelig fra:
<http://www.as.kommune.no/fakta-om-aas.352154.no.html> (lest 28.04.2016).

Vedlegg A

IVF-kurve for Rustadskogen målestasjon

Tabell 17: Hele IVF-kurven for Rustadskogen basert på 37 sesonger.

Returperioder(år): Nedbørintensitet(liter pr. sekund pr. hektar(10 000m ²))(l/s*ha)																
17870 ÅS - RUSTADSKOGEN																
Periode: 1974 - 2013																
Antall sesonger: 37																
År	1 min.	2 min.	3 min.	5 min.	10 min.	15 min.	20 min.	30 min.	45 min.	60 min.	90 min.	120 min.	180 min.	360 min.	720 min.	1440 min.
2	292,4	253,1	226,8	189,5	138,7	111,8	94,8	69,8	51,7	41,1	31,8	25,1	18,4	12,3	8,4	5,2
5	358,8	320,2	287,2	243,9	186,8	150,6	126,3	94,8	71,0	56,5	44,6	34,2	24,5	15,9	10,2	6,3
10	402,7	364,7	327,3	279,9	218,7	176,2	147,1	111,3	83,7	66,7	53,1	40,2	28,6	18,3	11,4	7,1
20	444,8	407,3	365,6	314,4	249,2	200,8	167,2	127,2	95,9	76,4	61,2	45,9	32,5	20,6	12,6	7,8
25	458,2	420,8	377,8	325,3	258,9	208,6	173,5	132,3	99,8	79,5	63,8	47,8	33,7	21,4	12,9	8,0
50	499,4	462,5	415,3	359,1	288,7	232,7	193,1	147,8	111,7	89,0	71,8	53,4	37,5	23,6	14,1	8,7
100	540,3	503,8	452,6	392,6	318,4	256,5	212,5	163,2	123,6	98,5	79,7	59,0	41,3	25,8	15,2	9,5
200	581,1	545,1	489,7	426,0	347,9	280,3	231,9	178,5	135,4	108,0	87,6	64,6	45,1	28,1	16,3	10,2

Vedlegg B

Parameterverdier for SWMM hentet fra manualen (Rossman 2015)

Tabell 18: Grop-magasin i mm for permeable og tette flater

Grop-magasin i mm for permeable og tette flater	
Tette flater	1.270 -2.54 mm
Plener	2.54 - 5.08 mm
Beitemark	5.08 mm
Skog	7.62 mm

Tabell 19: Ruhet for permeable flater

Ruhet permeable og tette flater	
Kort gress	0.15
Tett gress	0.24
Bermuda gress	0.41
Glatt asfalt	0.011
Glatt betong	0.012
Vanlig betong	0.013
Leire	0.015

Tabell 20: Ruhet for rør

Ruhet betongrør	
Glatt monolittisk betong	0.012 - 0.014
Ru monolittisk betong	0.015 - 0.017
Betong rør	0.011 - 0.015

Tabell 21: Avtakingskonstant og tørketid

Avtakings konstant, c	Tørketid [dager]	Maks infiltrasjonsvolum [mm]
[2-7]	[2-14]	0 hvis ikke brukt

Tabell 22: Minimum infiltrasjon ved ulike jordstrukturer

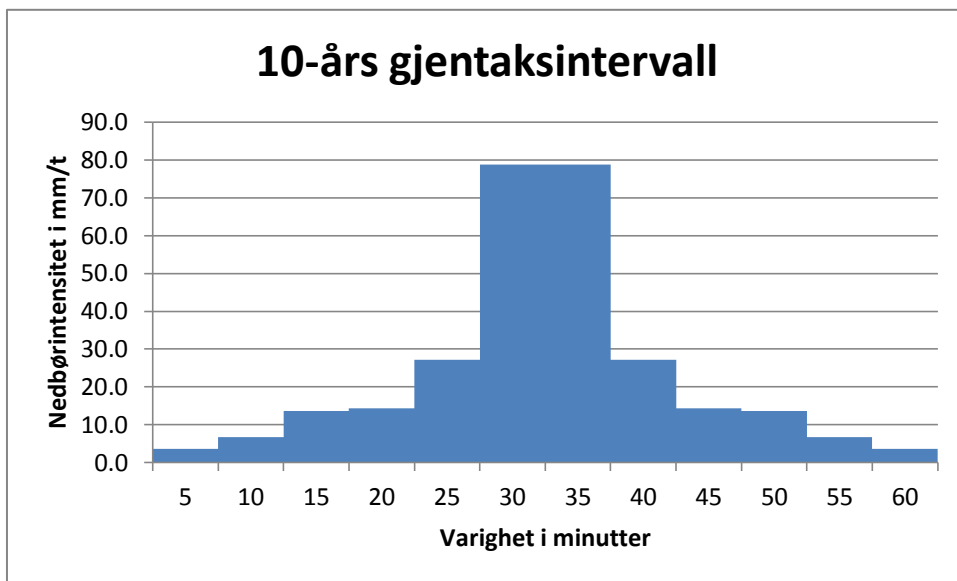
Jordtype	Minimum infiltrasjonsrate [mm/t] = Mettet hydraulisk ledningsevne, K
Sand	120.4
Siltig sand	30
Sandig leire	10.9
Lett leire	3.3
Sandig mellomleire	6.6
Mellomleire	1.5

Tabell 23: Maksimum infiltrasjonsrate ved ulik grad av jordfuktighet.

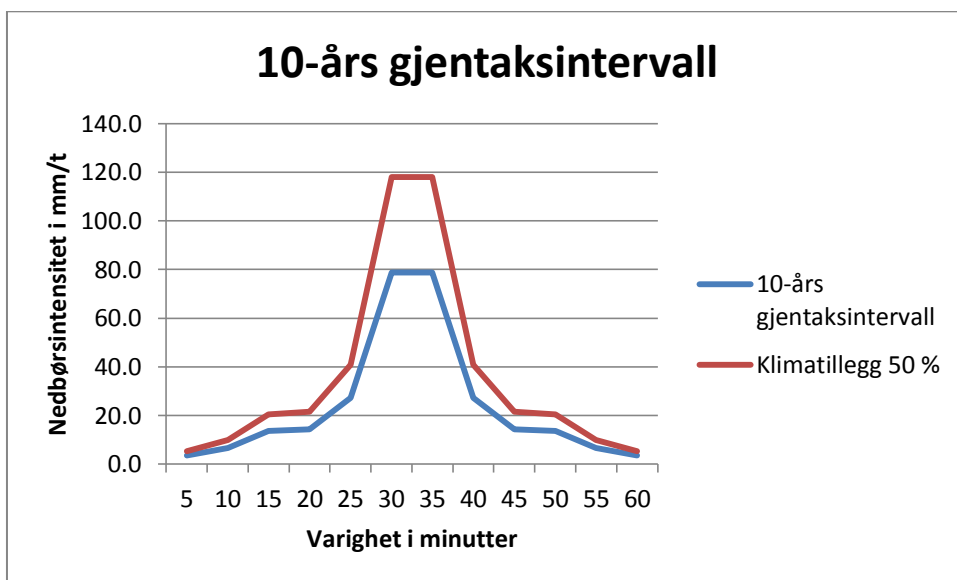
Jord fuktighet	Maks infiltrasjonsrate [mm/t]		
	Sandjord	Mellomleire	Leire
Tørr jord	127	76.2	25.4
Tørr jord med tett vegetasjon	254	152.4	50.8
Fuktig jord der jorden har drenert men ikke tørket ut	Tørr jord/3	Tørr jord/3	Tørr jord/3
Fuktig jord opp mot metning	Min infiltrasjon	Min infiltrasjon	Min infiltrasjon
Fuktig jord som nesten har tørket ut	Tørr jord/ [1.5-2.5]	Tørr jord/ [1.5-2.5]	Tørr jord/ [1.5-2.5]

Vedlegg C

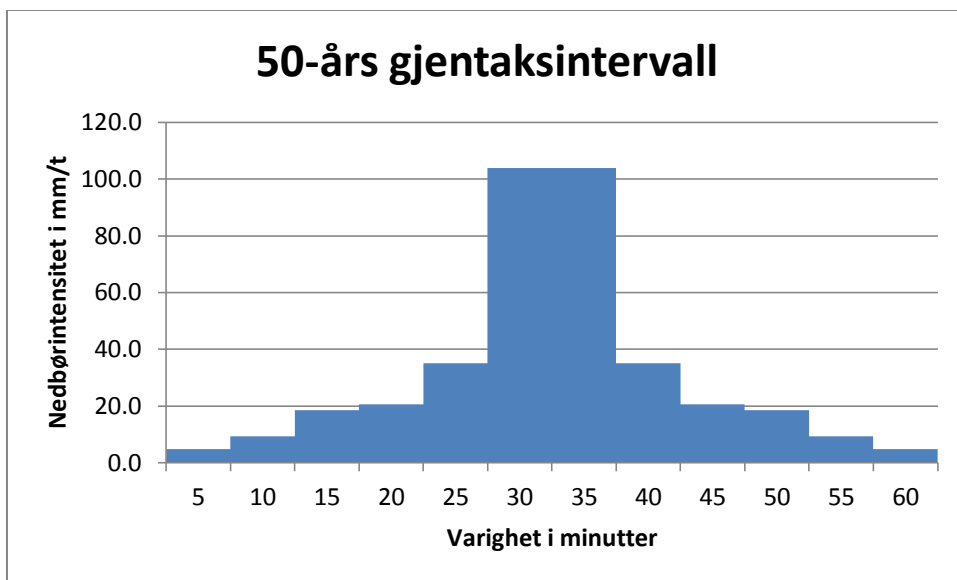
Regnhyetogram



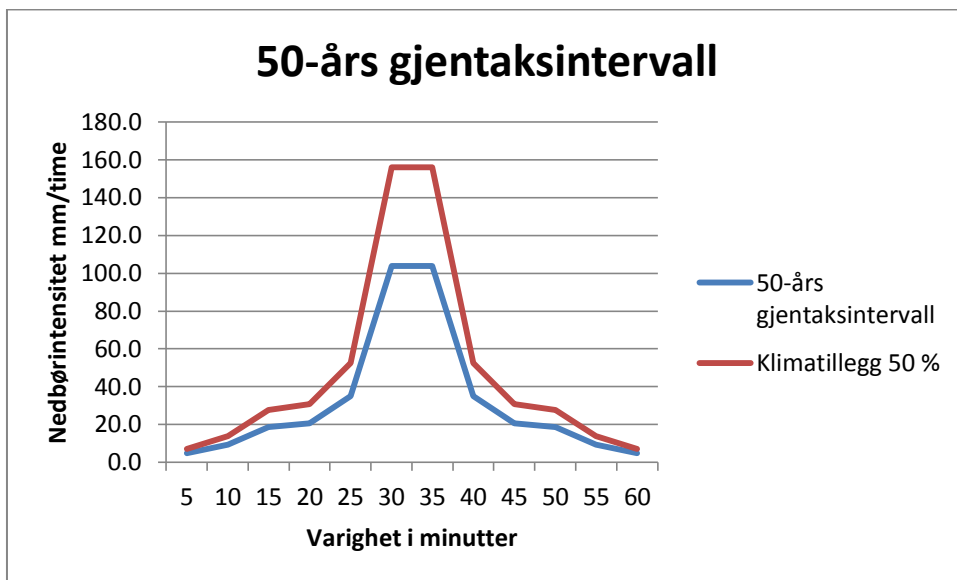
Figur 34: Regnhyetogram for 10-års gjentaksintervall



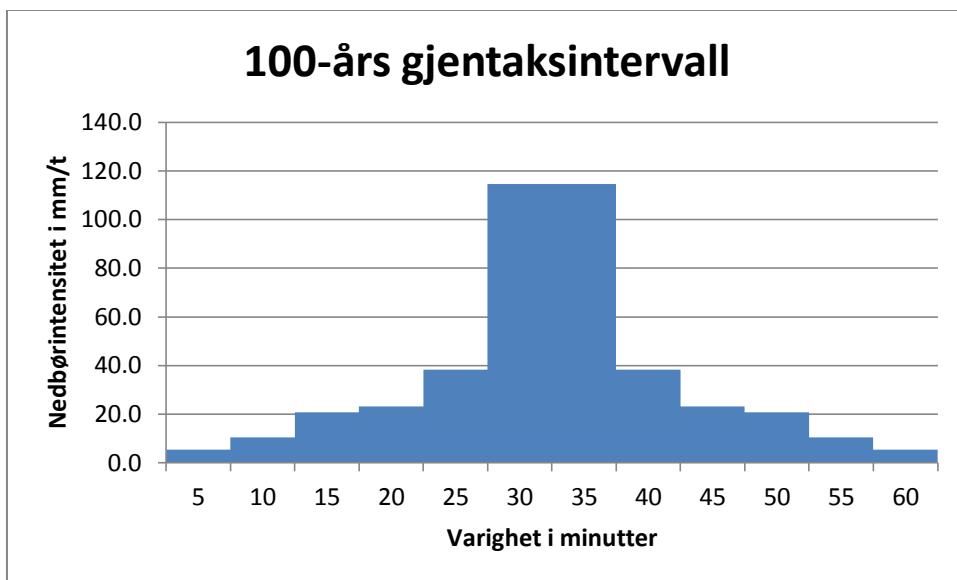
Figur 35: 10-års gjentaksintervall med klimatillegg



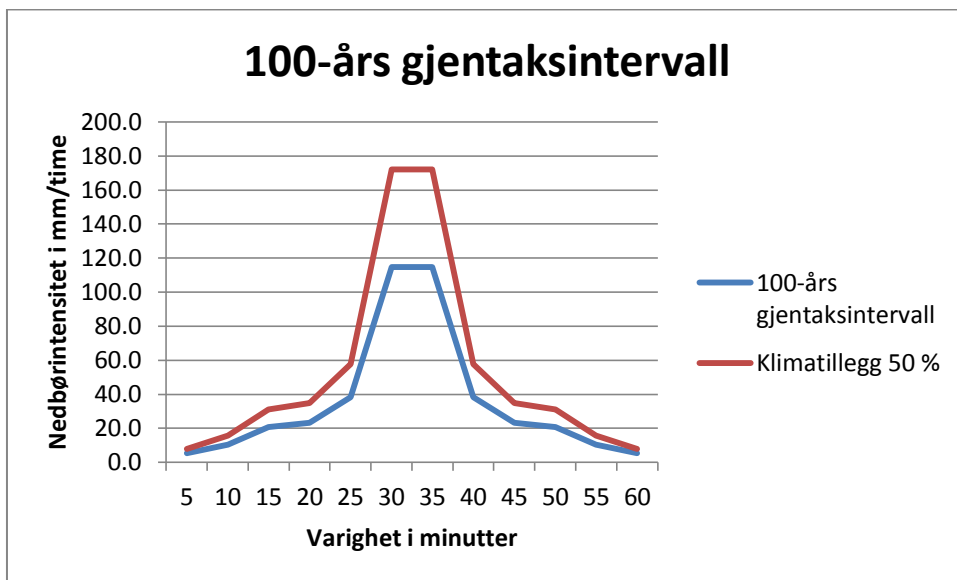
Figur 36: Regnhyetogram for 50-års gjentaksintervall



Figur 37: 50-års gjentaksintervall med klimatillegg



Figur 38: Regnhyetogram for 100-års gjentaksintervall

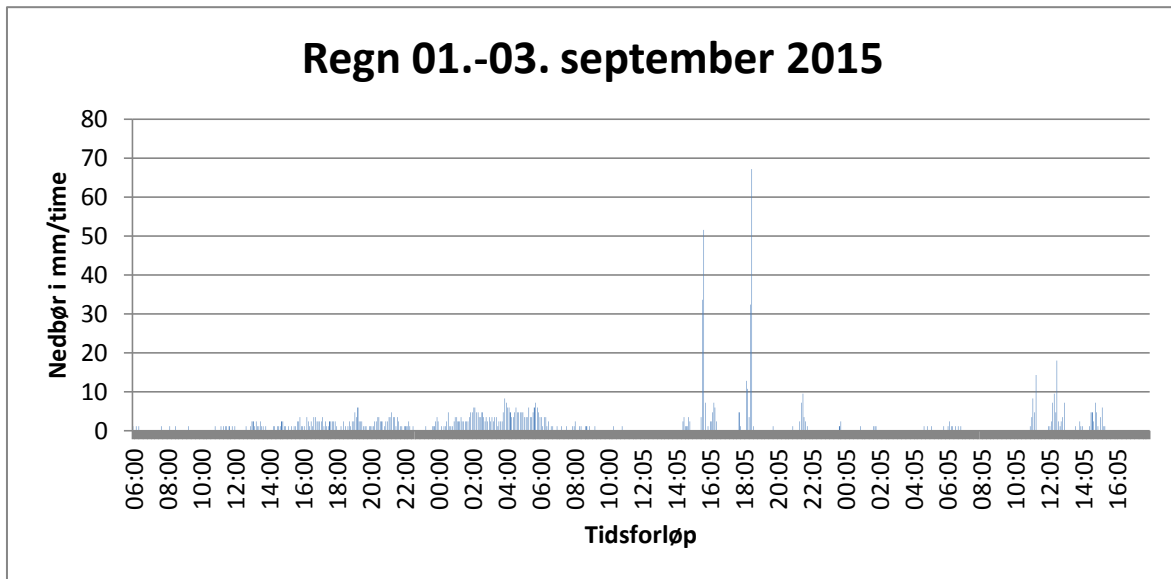


Figur 39: 100-års gjentaksintervall med klimatillegg

Vedlegg D

Nedbørshendelser

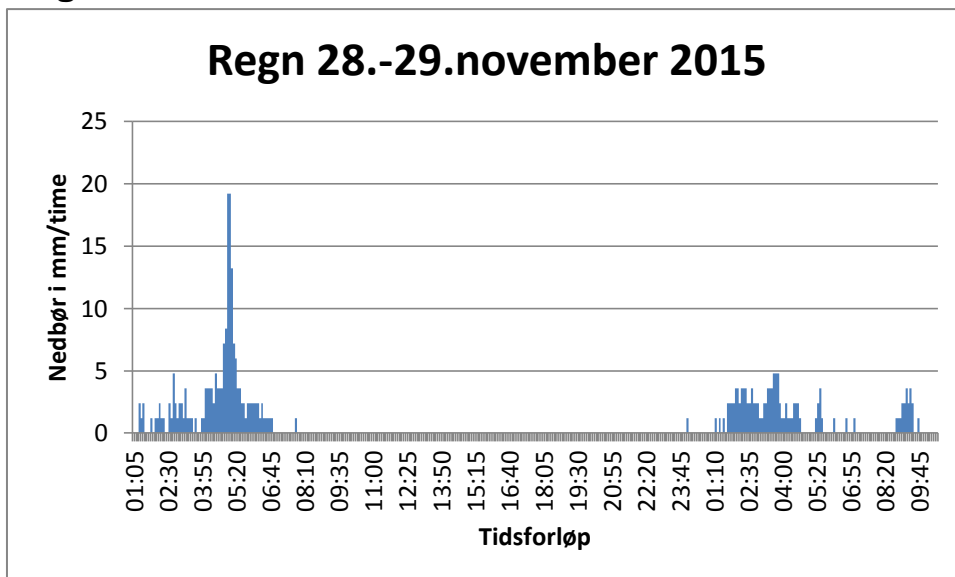
Regn 1



Figur 40: Søylen viser nedbøren 01.-03.september 2015 i 5 minutters intervaller.

Her var det tørrvær i forkant av nedbørshendelsen.

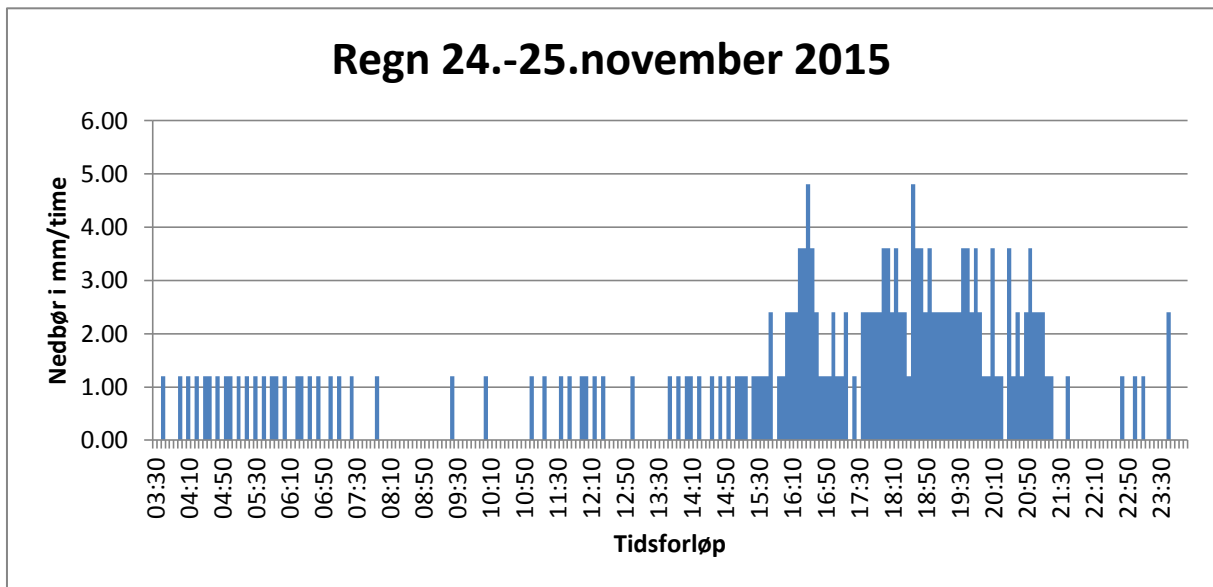
Regn 2



Figur 41: Søylen viser nedbøren 28.-29.november 2015 i 5 minutters intervaller.

Her var det tørrvær i forkant av nedbørshendelsen.

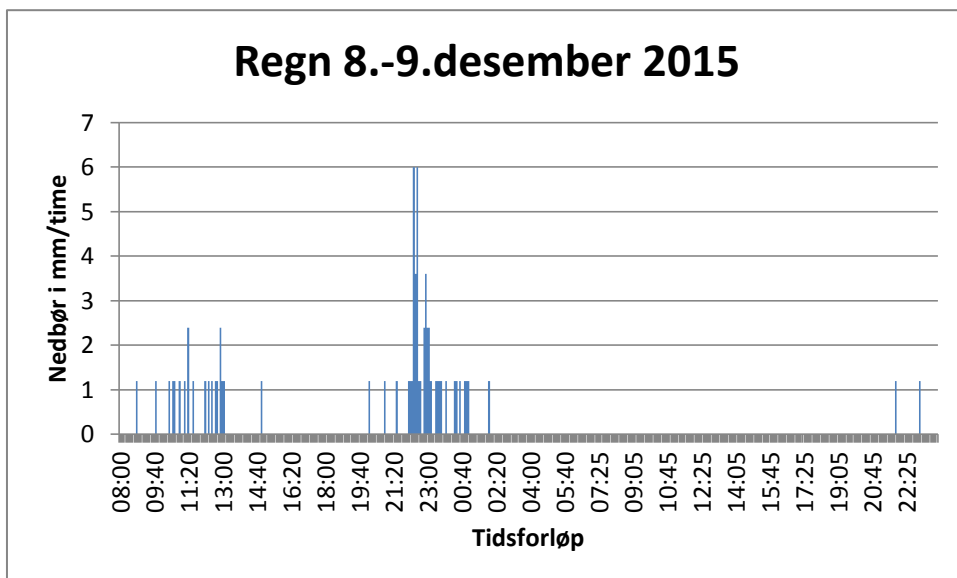
Regn 3



Figur 42: Søylen viser nedbøren 24.-25.november 2015 i 5 minutters intervaller.

Her var det tørrvær i forkant av nedbørshendelsen, men det var noe minusgrader.

Regn 4



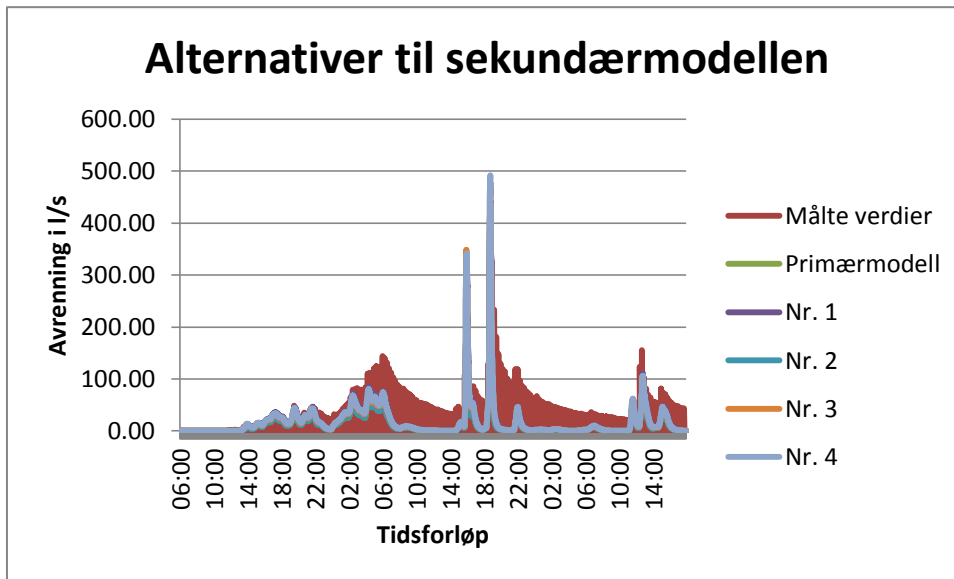
Figur 43: Søylen viser nedbøren 8.-9. desember 2015 i 5 minutters intervaller.

Her var det tørrvær i forkant av nedbørshendelsen.

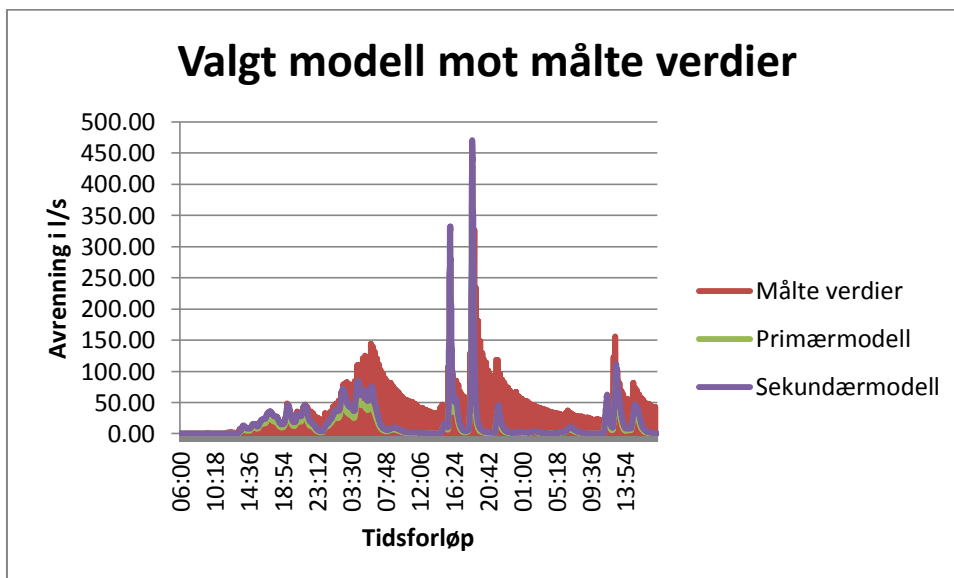
Vedlegg E

Kalibrering og etterprøving

Regn 1

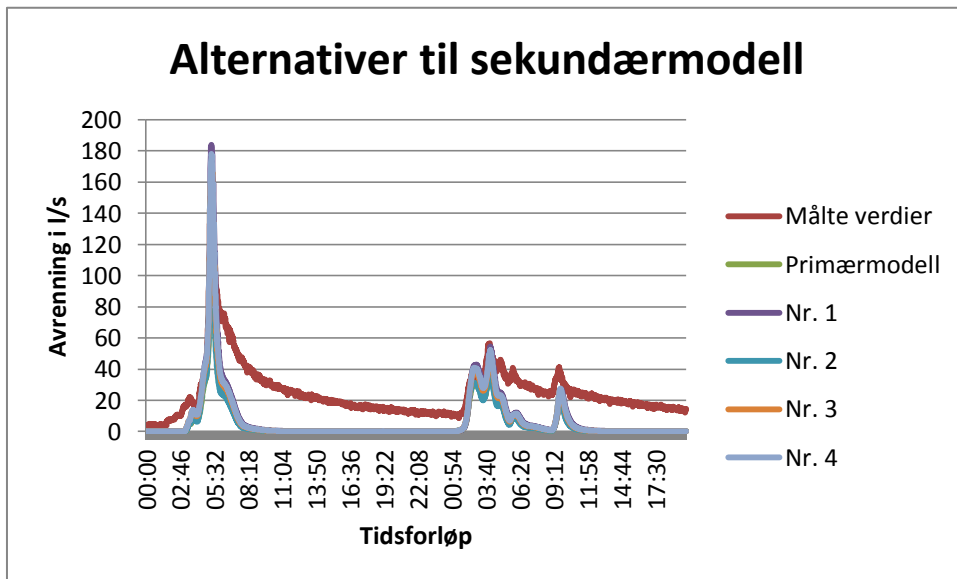


Figur 44: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelse 1.

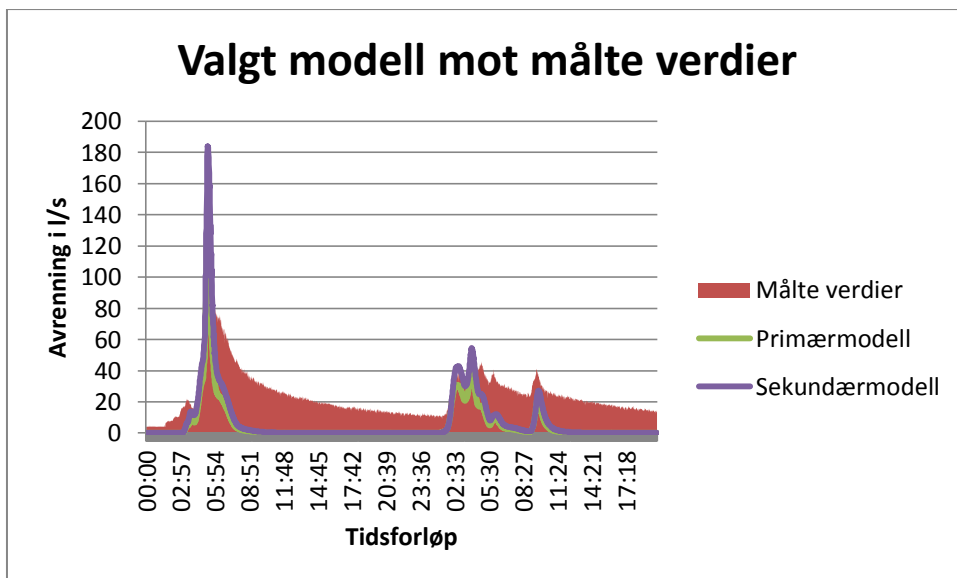


Figur 45: Valgt sekundærmodell for nedbør 1.

Regn 2

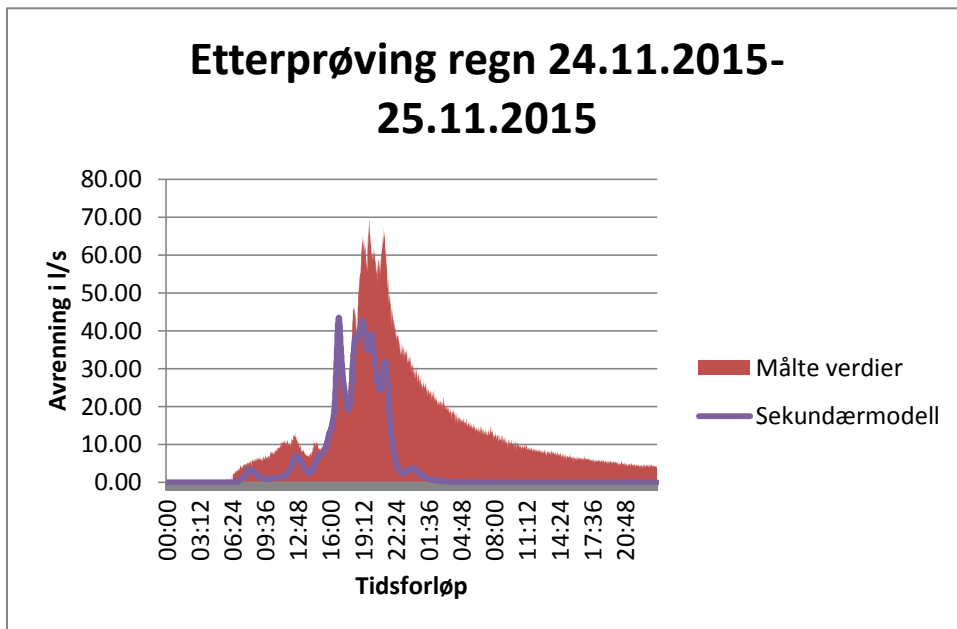


Figur 46: Alternativer til sekundærmodellen for nedbørshendelse 2.



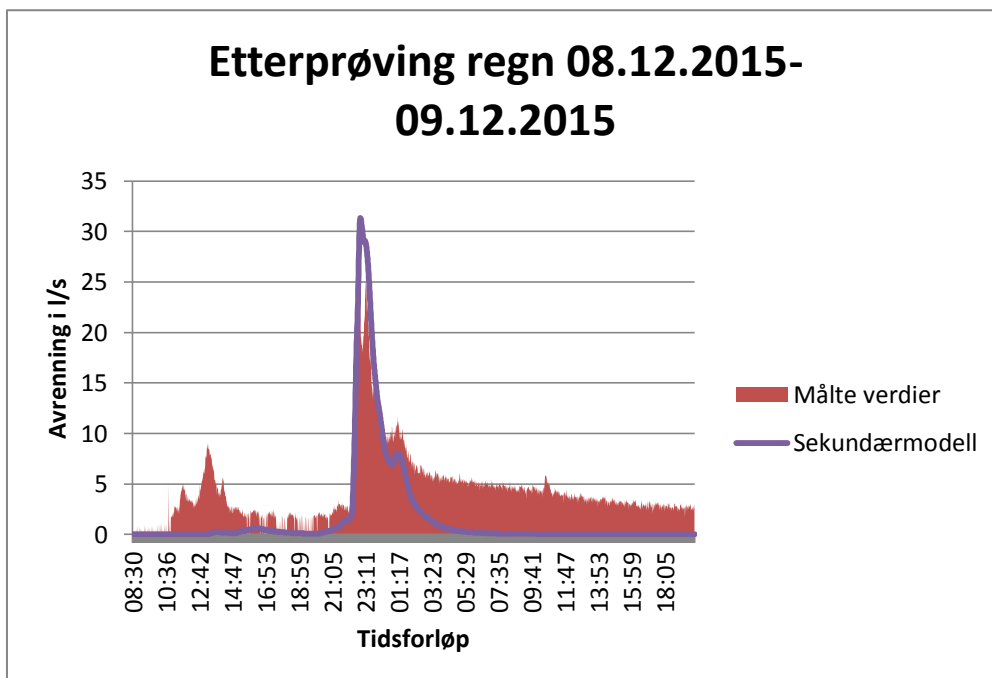
Figur 47: Valgt sekundærmodell for nedbør 2.

Regn 3



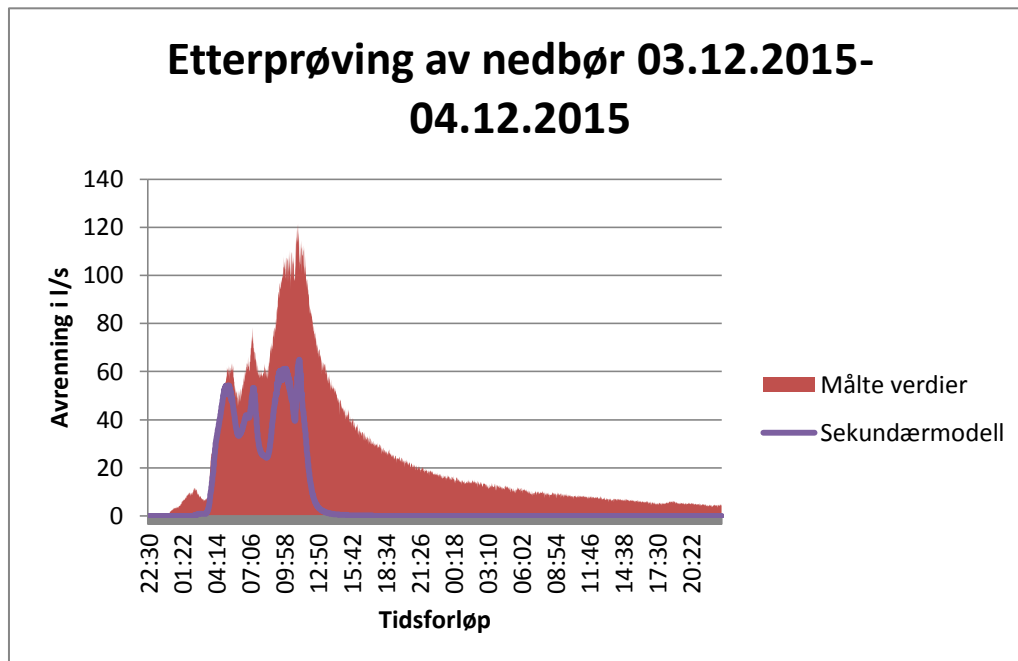
Figur 48: Etterprøving av nedbørshendelse 3.

Regn 4



Figur 49: Etterprøving av nedbørshendelse 4.

Regn 5



Figur 50: Etterprøving av nedbørshendelse 5.

Vedlegg F

Oversikt over oversvømmelser

Tabellene viser med en x hvilke kummer som opplever oversvømmelse og xx viser hvilke som forårsaker skade på bygninger.

Tabell 24: Oversikt over oversvømte kummer ved 10-års gjentaksintervall.

Node	Uten tiltak		Frakobling	Fordrøyning	Bio-Retention Cell
	10	10 + 50 %			
248		x			
250					
256	x	x			X
260		x			X
263					
267	x	xx	x	x	X
582					
583					
584					
585					
586					
587	x	x			X
588					
589	x	x			X
595					
596					
597					
602					
603					
607					
608		x			
609		x			
612					
618					
620					
624					
640					
643					
644					
645					
646					
1352					
1364	xx	xx		xx	X
1374		x	x	x	X
3553	x	x			X
4007					
4008					
4010					
4012					
4013	x	x		x	X
4016	x	x		x	X
4068					
4092	x	xx	x	x	Xx

4098		x				X
4100						
4202						
4207						
4209						
5042		x				
5044						
5051						
15267		x				
15268		x				
15269		x				
15270		x				
15271		x				
15289						
15293	x	x	x	x		X
15295		x	x			X
15297						
15303						
15322						
15324		x				
15334						
15336						
15343		x				
15347		x				
15351						
15353		x				
15358						
15362						
15365						
15366						
15368						
15371		x				
15374						
15375	x	x		x		
15377						
15379		xx				X
15382	x	x		x		X
15384	x	xx	x	x		X
15386	x	x		x		X
15388	x	x		x		
15392	x	x				X
15396						X
15400						
15401	x	xx		x		X
15415						
15422						
15559		xx				X
15575						
15576						
15577		x		x		X
15578	x	xx		x		X
15593						
15594						
15595		x				
15596	xx	xx		xx		X
16037		x				X

16040					
16043	x	x			X
16046					
16049		x			X
16053		x			
16055		x			
16057					
16060		xx			X
16064		x			X
16065					
16067	x	x		x	X
16070		x			X
16072	x	xx		x	X
16075	x	xx		x	xx
16078	x	x			x
16080	x	xx		x	x
16082	xx	xx	x	x	xx
16085	xx	xx	x	xx	xx
16086	x	xx	x	x	x
16090		x			
16093	x	xx		x	x
16100	x	x	x	x	x
16106		x			
16272					
16273					
16274					
16277					
16278					
16531					
16557		x			
16560		x		x	
16645					
16697		x			
16726					
16789		x		x	
17232					
17249					
17955	x	x		x	x
18144					
18264		x			
18270					
18271					
18711					
18713					
19313					
20729		x	x		
20730	x	xx	xx	x	xx
20731					
20960					
20968					
20971					
21912		x			
R15375	x	xx	x	x	x
R16117	x	x			x

Tabell 25: Oversikt over oversvømte kummer ved 20-års gjentaksintervall.

Node	Uten tiltak		Frakobling 20 + 50%	Fordrøyning 20 + 50 %	Bio-Retention Cell 20 + 50 %
	20	20 + 50 %			
248					
250					
256	x	x		x	x
260				x	x
263					
267	x	xx	x	x	xx
582					
583					
584					
585					
586		x			x
587	x	x	x	x	x
588					
589	x	x	x	x	x
595					
596					
597					
602		x			
603		x			
607					
608		x			x
609	x	x			x
612					
618					
620					
624		x			
640					
643					
644					
645					
646					
1352					
1364	xx	xx		xx	xx
1374	x	x			x
3553	x	x	x	x	x
4007					
4008		x			
4010		x			
4012					
4013	x	x		x	x
4016	x	x		x	x
4068					
4092	x	xx	xx	x	xx
4098		x			x
4100					
4202		x			
4207					
4209					
5042		x			
5044		x			
5051					
15267		xx			x
15268		x			x
15269		x			x
15270		x			x
15271		x			x
15289					
15293	x	x	x	x	x
15295	x	x	x		x
15297					
15303					

15322					
15324		x			x
15334					
15336					
15343		xx			x
15347		x			x
15351		x			
15353		x			x
15358					
15362					
15365					
15366					
15368					
15371		xx			x
15374		x			
15375	x	x		x	x
15377					x
15379	x	xx	x	x	xx
15382	x	xx	x	x	x
15384	x	xx	x	x	x
15386	x	x	x	x	x
15388	x	x	x		x
15392	x	xx	x	x	x
15396	x	x			x
15400					
15401	x	xx		x	xx
15415					
15422					
15559	x	xx			xx
15575					x
15576			x		
15577	x	x	x	x	x
15578	x	xx	x	x	xx
15593					
15594	x	x			x
15595	x	x		x	x
15596	xx	xx		xx	xx
16037		x			x
16040					
16043	x	x	x	x	x
16046					
16049	x	xx			x
16053		x			x
16055		x			x
16057	x	x			x
16060	x	xx			x
16064		x			x
16065		x			x
16067	x	xx	x		x
16070		x			x
16072	x	xx	x	x	xx
16075	xx	xx	x	x	xx
16078	x	x	x	x	x
16080	x	xx	x	x	xx
16082	xx	xx	x	xx	xx
16085	xx	xx	xx	xx	xx
16086	x	x	x	x	xx
16090	x	x		x	x
16093	x	xx	x	x	x
16100	x	x	x	x	x
16106		x			x
16272					
16273					
16274					
16277					
16278					

16531					
16557		x			
16560	x	x		x	x
16645					
16697		x			
16726					
16789	x	xx		x	x
17232					
17249					
17955	x	xx		x	x
18144					
18264		x			x
18270		x			
18271		x			
18711					
18713					
19313					
20729		xx	x		x
20730	xx	xx	xx	xx	xx
20731					
20960					
20968					
20971					
21912		xx			x
R15375	x	xx	x	x	xx
R16117	x	xx		x	x

Tabell 26: Oversikt over oversvømte kummer ved 50-års gjentaksintervall.

Node	Uten tiltak		Frakobling	Fordrøyning	Bio-Retention Cell
	50	50 + 50 %	50 + 50%	50 + 50 %	50 + 50 %
248		x	x		x
250		x			x
256	x	xx	x	x	x
260	x	x	x	x	
263		x			
267	xx	xx	xx	x	xx
582					
583					
584					
585					
586		x			x
587	x	x	x	x	x
588					x
589	x	x	x	x	x
595					
596		x			
597					
602		x			
603		x			
607					
608		x			x
609		x			x
612					
618					
620					
624		x			x
640					
643					
644					
645					
646					
1352					
1364	xx	xx	x	xx	xx
1374	x	x	x	x	x
3553	x	x	x	x	x
4007		x			
4008		x			
4010		x		x	
4012					
4013	x	x	x	x	x
4016	x	xx	x	x	x
4068		x			
4092	xx	xx	xx	x	xx
4098		x			
4100					
4202					x
4207					
4209					
5042		xx			x
5044		xx			x
5051					
15267		xx	x		xx
15268		x			x
15269		x			x
15270		x	x		x
15271		x	x		x
15289		x			x
15293	x	x	x	x	x
15295	x	x	x		x
15297					
15303					

15322					
15324		x		x	x
15334					
15336					
15343	x	xx	x	x	xx
15347		x			x
15351		x			x
15353		x			x
15358					
15362					
15365		x			x
15366					
15368					
15371		xx			xx
15374		x			
15375	x	x		x	x
15377					x
15379	xx	xx	xx	x	xx
15382	x	xx	x	x	xx
15384	x	xx	x	x	xx
15386	x	xx	x	x	xx
15388	x	x	x	x	x
15392	x	xx	x	x	xx
15396		x	x	x	x
15400		x			x
15401	xx	xx	x	xx	xx
15415					
15422					
15559	x	xx	x	x	xx
15575					
15576	x		x		
15577	x	xx	x	x	x
15578	x	xx	x	x	xx
15593					
15594		x		x	x
15595	x			x	x
15596	xx	xx	x	xx	xx
16037	x	xx	x	x	xx
16040		x		x	
16043	x	x	x	x	x
16046		x		x	
16049	x	xx	x	x	xx
16053	x	x	x		x
16055		x	x		x
16057					x
16060	x	xx	x	x	xx
16064	x	x	x		x
16065		x			x
16067	x	xx	x	x	xx
16070		x	x		x
16072	x	xx	x	x	xx
16075	xx	xx	xx	xx	xx
16078	x	xx	x	x	x
16080	xx	xx	x	x	xx
16082	xx	xx	x	xx	xx
16085	xx	xx	xx	xx	xx
16086	x	xx	x	x	xx
16090	x	x		x	x
16093	x	xx	x	x	xx
16100	x	xx	x	x	xx
16106	x	xx			x
16272					x
16273					x
16274					
16277		x			
16278					

16531					
16557		x			x
16560	x	xx		x	x
16645					
16697		x			x
16726					
16789	x	xx		x	xx
17232					
17249					
17955	x	xx	x	x	xx
18144					
18264	x	xx		x	xx
18270		x			x
18271		x			x
18711					
18713					
19313					
20729	x	xx	xx		xx
20730	xx	xx	xx	xx	xx
20731					
20960		x			x
20968					
20971		x			x
21912		xx	x		xx
R15375	xx	xx	xx	xx	xx
R16117	x	xx	x	x	xx

Tabell 27: Oversikt over oversvømte kummer ved 100-års gjentaksintervall.

Node	Uten tiltak		Frakobling	Fordrøyning	Bio-Retention Cell
	100	100 + 50 %			
248		x	x	x	x
250		x			x
256	x	xx	x	x	xx
260		x	x	x	x
263		x			x
267	xx	xx	xx	xx	xx
582					
583					
584					
585					
586	x	x	x		x
587	x	x		x	x
588					
589	x	xx			xx
595		x			x
596		x			x
597					
602		x			x
603		x			x
607					
608	x	x	x		x
609		x	x	x	x
612		x			x
618					
620					
624		x			x
640					
643					
644					
645					
646					
1352					
1364	xx	xx	xx	xx	xx
1374	x	x	x	x	x
3553	x	x	x	x	x
4007					
4008		x			x
4010		x	x	x	x
4012	x			x	
4013	x	x	x	x	x
4016	x	xx	x	x	xx
4068		x			x
4092	xx	x	xx	x	xx
4098			x		x
4100					
4202	x	x		x	x
4207					
4209					
5042		xx		x	xx
5044		xx			xx
5051					
15267	x	xx	x		xx
15268	x	x	x		x
15269	x	x			x
15270	x	xx	x		xx
15271	x	x	x		x
15289		x			x
15293	x	x	x	x	x
15295	x	x	x		x
15297					
15303					

15322		x			x
15324	x	xx		x	x
15334					
15336					
15343	x	xx	x	x	xx
15347	x	xx	x	x	xx
15351		x			x
15353	x	x		x	x
15358					
15362					
15365		x			x
15366					
15368		x			
15371	x	xx	x		xx
15374		x			x
15375	x	x		x	x
15377					
15379	xx	xx	xx	xx	xx
15382	x	xx	xx	x	xx
15384	x	xx	x	x	xx
15386	x	xx	x	x	xx
15388	x	x	x	x	x
15392	x	xx	x	x	xx
15396	x	x	x	x	x
15400		x	x		
15401	xx	xx	xx	xx	xx
15415					
15422					
15559	x	xx	xx	x	xx
15575					
15576	x		x		x
15577	x	xx	x	x	xx
15578	xx	xx	x	x	xx
15593					
15594	x	x		x	x
15595	x		x	x	x
15596	xx	xx	xx	xx	xx
16037	x	xx	x	x	xx
16040	x	x	x	x	
16043	x	xx	x	x	xx
16046		x			x
16049	x	xx	xx	x	xx
16053	x	xx	x	x	xx
16055	x	x	x	x	x
16057	x	x	x		
16060	x	xx	x	x	xx
16064	x	xx	x	x	xx
16065		x	x	x	x
16067	x	xx	x	x	xx
16070	x	x	x	x	x
16072	xx	xx	xx	xx	xx
16075	xx	xx	xx	xx	xx
16078	x	xx	x	x	x
16080	xx	xx	xx	xx	xx
16082	xx	xx	xx	xx	xx
16085	xx	xx	xx	xx	xx
16086	xx	xx	xx	xx	xx
16090	x	x		x	x
16093	xx	xx	x	xx	xx
16100	x	xx	x	x	xx
16106	x	xx		x	x
16272					x
16273		x			x
16274		x			x
16277		x			x
16278		x			x

16531					
16557		x	x	x	x
16560	x	xx		x	xx
16645					
16697		xx			xx
16726		x			x
16789	x	xx		x	xx
17232					
17249					
17955	x	xx	x	x	xx
18144					
18264	x	xx		x	xx
18270		x			
18271		xx			xx
18711					
18713					
19313					
20729	x	xx	xx	x	xx
20730	xx	xx	xx	xx	xx
20731					
20960		x			x
20968					
20971		x			x
21912	x	xx	x		xx
R15375	xx	xx	xx	xx	xx
R16117	x	xx	x	x	xx



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no