

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



## Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet som avsluttende del av utdannelsen innen Vann- og miljøteknikk. Masteroppgaven er skrevet ved Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB) under fakultetet Institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT).

Masteroppgaven er skrevet våren 2013 i samarbeid med ExFlood prosjektet tilknyttet Skuterudfeltet i Ås kommune. Oppgaven baserer seg på medstudenters prosjektoppgave fra THT 300 og Oddvar Lindholms ExFlood IMT-Delrapport nr. 2, 2012.

Gjennomføringen av oppgaven har vært utfordrende og tidvis krevende, men den har også gitt meg verdifull kunnskap og inspirasjon. Kunnskap jeg har tilegnet meg gjennom utdannelsen har vært til god nytte, samtidig som prosessen har gitt meg innsikt og forståelse innen fagområdet.

Med dette vil jeg takke Oddvar Lindholm for sitt engasjement og inspirasjon som hovedveileder for oppgaven i sin helhet. Jeg vil takke Trond Vestjord for all hjelp jeg har fått med programvaren SWMM og Eydis Dalen for introduksjon og oppfølging av programvaren Hydra II for nedlasting av avrenning- og nedbørsdata.

Jeg vil også takke Hans Petter Bjørgen, Nils Langeland og Pia Krogvig Segerberg for tilbakemelding på struktur og redigering. Takk til min samboer Kristine Sand og Christian Petersen for inspirasjon når man trenger det mest. Til slutt vil jeg takke alle de flotte menneskene på fløy V for utveksling av ideer og kunnskap.

Ås 15.05.2013

---

Lars Buhler

## Sammendrag

Prognoser fra forskning verden rundt viser varierende resultater med hensyn på hvordan klimaet vil endre seg de neste 100 årene. Forskningsresultatene er så usikre at det er svært viktig å oppdatere prognosene for framtidig klimautvikling fortløpende. Mye av forskningen viser at nedbørintensiteten vil øke dramatisk de neste 100 årene i Norge. De siste årene er det registrert økte flomskader som følge av økt nedbør, og klimascenarioene viser også at hyppigheten vil øke framover. Andre bidragsytende faktorer for flom og ødeleggelse er den økte fortettingen i byer og andre urbane områder som resulterer i økte andeler av tette flater. Dette fører til at regnvann får mindre infiltrasjonsflate og avrenningen fra tette flater vil øke i volum. Her blir det viktig å styrke arbeidet lokalt med behandling av den økende mengden overvann for å redusere konsekvensene av flom og skader til et akseptabelt nivå. Forskning viser at tiltak basert på LOD (Lokal Overvanns Disponering) gir store positive virkninger på avløpsnett, flomreduksjoner, bygningsskader og infrastruktur, og også eventuell forurensning grunnet urensset vann som kommer fra overløp ut i resipienten.

Ved å bruke estimerte regn framskrivninger kan simuleringsverktøy forklare eventuelle forandringer i framtidens flomsituasjoner. I oppgaven ble det utviklet en lokal matematisk overvannsmodell for Rustadskogen boligfelt i Ås Kommune for bruk i simulerings programmet Storm Water Management Model (SWMM) utviklet av U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Programmet ble brukt til å simulere overvannet for å beskrive virkningen av et antatt klimatillegg på 50 % på dagens overvannssystem. Ut fra simulerings-resultatene med klimatillegg ble det gjort tiltak for å redusere eventuelle bygningsskader. Målsettingen er at tiltakene skal resultere i det samme potensielle skade resultatet fra simuleringene med 50% klimatillegg som skadepotensialet fra dagens utvalgte gjentaksintervall basert på IVF-kurver uten klimatillegg. Den matematiske avløpsmodellen er kalibrert med 9 forskjellige virkelige regn-hendelser hentet ned fra NVE sin database Hydra II. Det ble gjort følsomhetsanalyser med fire av de ni regnskyllene med etterfølgende etterprøving med de resterende fem regnskyllene.

Simuleringen av overvannsnett til Rustadskogen baserer seg på 4 forskjellige gjentaksintervall og et Monsterregn. Det ble lagt til et klimatillegg på 50 % på hvert av de fire gjentaksintervallene som representerer antatt klimautvikling. De tre tiltakene som er simulert er Frakopling av bygningsarealer, Fordrøyning av bygningsarealer og Fordrøyning av vei- og bygningsarealer. Resultatene fra de to første tiltakene, frakopling- og fordrøyning av bygningsarealer, viste seg å ha minimal effekt på reduksjon av skadenivået basert på dagens gjentaksintervall. Kombinasjons-tiltaket, fordrøyning av vei- og bygningsarealer, viste seg å gi en tilfredsstillende reduksjon i antall skader i forhold til dagens skadenivå. Når det gjelder Monsterregnet var det ingen av tiltakene som kunne redusere skadeomfanget til et tilfredsstillende nivå. Den største reduksjonen kom altså fra kombinasjonstiltaket som ga en reduksjon på 28 % fra utgangsverdien på 132 potensielle bygningsskader.

## Abstract

The forecasts from research worldwide, show varying results on how climate change will develop in the future. How this change will be, is still so uncertain that it will be important to update the climate forecasts continuously so as to be able to estimate future developments. Much of the research on regional climate in Norway shows that the intensity of rainfall in the future, will increase dramatically over the next decade. In the last few years, there has been recorded an increased flooding due to increased precipitation, and climate scenarios show that the frequency will increase with time. Another contributing factor for floods and destruction is the increased densification of cities and other urban areas, resulting in an increased percentage of impervious surfaces. This, again, leads to a decrease in surfaces available for infiltration of rainwater, and the consequent drainage from these impervious surfaces will increase in volume. It will be important to strengthen the endeavors of processing the increasing amount of storm-water and to reduce the consequences of flooding and damage to an acceptable level. Research shows that measures based on low impact development (LID) provide major positive impact on the sewer system, flood reduction and the amount of damage to buildings and infrastructure. It also helps to prevent contamination due to polluted water coming from the overflow into the recipient.

Using the estimated rainfall projections, simulation-tools can predict the possible changes in future flooding scenarios. In this thesis, a local storm-water mathematical drainage-model was developed for the Rustadskogen housing estate in Ås Municipality, to be used in the simulation-tool Storm Water Management Model (SWMM) developed by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). The SWMM tool was used to simulate the surface water to describe the impact of an assumed climate increase of 50% on the current storm-water system. Based on the simulation results, including climate increase, measures were made to reduce structural damages. The purpose was to arrive at appropriate measurements that would give the same potential damage-results from the simulations including the 50% climate increase, as the damage-potential from the current IVF without any additional climate increase.

The mathematical drainage model was calibrated with nine different real-rain events obtained from NVE's database Hydra II. Sensitivity-analyses were performed, including four of the nine rainfalls and subsequent verification with the remaining five rainfalls.

The simulation of the storm-water network to Rustadskogen is based on four different repeat-periods and a Monster-rain scenario. A climate addition of 50% was added to each of the four recurrence-intervals representing climate change. The three preventive actions simulated are: Disconnection of building areas from the drainage system, Retention of building areas and Retention of both road and building area in one single action. The results from the first two measures, disconnection and retention of building areas, proved to have minimal effect on the reduction of damages based on the current recurrence intervals. The combined

measures, retention of both road and building areas, proved to provide a satisfactory reduction in the amount of damage, compared to the current level. As for the Monster-rain, none of the preventative actions proved sufficient to reduce damages to a satisfactory level. The largest reduction in the level of damage, as given above, came from the combined preventative action Retention of road and building area, which gave a reduction of 28% from the default value of 132 potential building damages.

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag .....	II
Abstract .....	III
Innholdsfortegnelse .....	V
Figurligste .....	VIII
Tabelliste .....	X
Liste over forkortelser .....	XI
1. Innledning .....	1
1.1 Problemstilling .....	1
1.2 Målsetting, fremgangsmåte og struktur .....	2
2. Klima .....	4
2.1 Det globale Klimasystemet.....	4
2.1.1 Klimaforandringer.....	5
2.1.2 Observerte globale klimaendringer .....	6
2.1.3 Framskrivninger av globalt klima .....	7
2.2 Klimaet i Norge.....	9
2.2.1 Observerte klimaendringer i Norge .....	9
2.2.2 Nedskalering av klimamodeller.....	10
2.2.3 Framskrivninger av klimaet i Norge .....	10
2.2.4 Usikkerheter ved klimaframskrivninger .....	12
3. Det urbane avløpssystemet.....	13
3.1 Urbanisering.....	13
3.2 Overvann.....	16
3.3 Framtidens påvirkning på det urbane avløpssystemet.....	16
3.4 Framtidens overvannshåndtering .....	16
3.5 Tiltak i avløpssystemet .....	17
3.5.1 Klimafaktor ( $K_f$ ).....	18
3.5.2 Lokal bestemmelse for $\Lambda_s$ .....	19
3.5.3 Manuell beregning av avrenning .....	19
4. Regndata.....	20
4.1 Virkelig regndata .....	20
4.1.1 Hydra II .....	20
4.2 Konstruert regn .....	21

4.3 Dimensjonerende gjentaksintervall.....	22
4.4 Usikkerhet i regndata .....	22
5. Matematiske modeller .....	23
5.1 Tid-areal kurve .....	24
5.2 Modellmiljø .....	24
5.3 SWMM .....	24
5.3.1 Regn.....	25
5.3.2 Delfelt ( <i>subcatchment</i> ).....	25
5.3.3 Rør .....	26
5.3.4 The Saint-Venant Equations.....	27
5.3.5 Dynamisk bølge-routing .....	28
5.3.6 Overflate avrenning .....	28
5.3.7 Infiltrasjon.....	28
5.3.8 Oppstuvning .....	29
5.4 Usikkerhet i modeller.....	30
6. Prosjektområdet.....	32
6.1 Avløpssystemet .....	34
7. Kalibrering av Avløpsmodellen.....	34
7.1 Modelloppbygging .....	34
7.2 Regndata .....	36
7.3 Kalibrering .....	36
7.4 Verifikasjon .....	37
7.5 Følsomhetsanalyse .....	37
7.6 Resultat av følsomhetsanalyse .....	38
7.7 Modellvalidering/etterprøving.....	42
7.8 Resultat av etterprøving.....	42
8. Simuleringer i avløpsmodellen.....	45
8.1 Forutsetninger og valg .....	45
8.2 Regndata .....	45
8.2.1 Metode.....	46
8.2.2 Monsterregnet.....	48
8.2.3 Klimafaktor.....	50
8.3 Simulering av dagens situasjon.....	51
8.4 Simulering av klimatilpasnings tiltak.....	51

8.4.1 Resultater.....	53
8.5 Fordrøyning delfelt bygningsarealer.....	57
8.6 Frakopling takarealer.....	59
8.7 Fordrøyning av vei- og bygningsarealer.....	60
8.8 Sammenligning av tiltak.....	62
9. Diskusjon.....	65
9.1 Vurdering av usikkerhet.....	65
9.2 Vurdering av resultater.....	67
10. Konklusjon.....	69
11. Videre arbeid, gjenstående arbeid.....	70
Vedlegg: A.....	74
Vedlegg: B.....	78
Vedlegg: C.....	81
Vedlegg: D.....	82
Vedlegg: E.....	86



## Figurligste

Figur 1. Sammenheng mellom solenergi, atmosfære og jordens overflate (Bjerknessenteret 2009a).....	4
Figur 2. Illustrerer SRES utslipssenarioer med temperaturøkning basert på klimagasser (IPCC 2010).....	8
Figur 3. Framskrivning av vinternedbør for Østlandet (Hanssen-Bauer 2009). ....	10
Figur 4. Framskrivning av sommernedbør for Østlandet (Hanssen-Bauer 2009)....	11
Figur 5. Effekten av økt avrenning i urbane områder ved fortetting (Norsk Hydrologiråd 2011). ....	14
Figur 6. Utfallet ved for stor belastning på fellessystem (Lindholm et al. 2008). ...	15
Figur 7. Måletyper innenfor Hydra II (Taksdal. 2013).....	21
Figur 8. Regncelle avgir forskjellige regnintensitet per areal (Lindholm 2011b).....	22
Figur 9. målte nedbørmengder i modell gir simulert avrenning (Kleidorfer 2009). 23	
Figur 10. Forskjellige tilrenningskurver fra forskningsprosjektet Søren Jaabæks gate (Lindholm 1986). ....	24
Figur 11. Skjematisk forklaring av overflateavrenning. (EPA 2010).....	28
Figur 12. Effektiv nedbør (Hortons metode) (Sælthun 2011).....	29
Figur 13. Rustadskogen boligområde, kart fra Statens kartverk (2013). ....	32
Figur 14 Infiltrasjonsevnen fra Rustadskogen (NGU 2013).....	33
Figur 15. Inndeling i delfelter i Rustadskogfeltet.....	35
Figur 16. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 27. juli 1997. ....	36
Figur 17. Maksimal oppstuvning i ledningsnett mellom kum 26 og 28 etter 13 minutter (Buhler et al. 2011).....	37
Figur 18. Følsomheten basert på endringer i basisverdi fra Tabell 4. ....	38
Figur 19. Simulering 2 med tilhørende parametere får best resultat med 2,94 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene.....	41
Figur 20. Etterprøving med regn fra 14.07.1995. Med kalibreringsparametere får Q-maks en reduksjon på 4,5 %.....	43
Figur 21. Etterprøving med regn fra 27.07.1997. Med kalibreringsparametere får Q-maks en reduksjon på 8,1 %. ....	44
Figur 22. Etterprøving med regn fra 20.08.2008 med kalibreringsparametere. ....	44
Figur 23. Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall. ....	48
Figur 24. Sammenligning av intensiteter med varighet basert på gjentaksintervall med og uten klimatillegg på 50 %. ....	48
Figur 25. Innplotting av fire punkter fra Monsterregnet. (Nils Bent Johansen 2012).....	49
Figur 26. Intensiteten for Monsterregnet i København 2. juli 2011 (Lindholm & Bjerkholt 2013).....	49
Figur 27. 20-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg. ....	50
Figur 28. Dagens 100-års regn er 15,5 % lavere enn 20-års regn med påsatt klimafaktor på 50 %, altså framtidens 20-års regn. ....	51
Figur 29. Fordrøyning av delfelt bygningsarealer med tiltak. ....	52
Figur 30. Fordrøyning av delfelt veiarealer med tiltak.....	53

Figur 31. 10-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.....	54
Figur 32. 20-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.....	54
Figur 33. 50-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.....	55
Figur 34. 100-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.....	55
<i>Figur 35. Simulering med Monsterregnet. ....</i>	<i>56</i>
Figur 36. Oversvømmelsesvolum uten tiltak i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet. ....	57
Figur 37. Oversvømmelsesvolum uten tiltak i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet. ....	58
Figur 38. Oversvømmelsesvolum med tiltak frakopling takarealer i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet.....	60
Figur 39. Oversvømmelsesvolum med tiltak, fordrøyning vei- og bygningsarealer, i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet. ....	61
Figur 40. Oversvømmelsesvolum fra tiltak basert på Monsterregnet.....	62
Figur 41. Sammenligning av tiltak med Monsterregnet.....	62
Figur 42. Sammenligning av tiltak ved forskjellige gjentaksintervall.....	63
Figur 43. sammenligning av tiltak med forskjellige gjentaksintervall. ....	63
Figur 44. Sammenligning av tiltakene med gjentaksintervall og Monsterregnet. ...	64
Figur 45. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 12.08.2009 .....	74
Figur 46. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 14. juli 1995.....	74
Figur 47. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 20. august 2008.....	75
Figur 48. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 27. august 1977.....	75
Figur 49. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 29. juli 2011.....	76
Figur 50. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 16. september 2001 .....	76
Figur 51. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 12. august 2002.....	77
Figur 52. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 6. august 2000 .....	77
Figur 53. Regn 27.08.1977. Simulering med tilhørende parametere får best resultat med 5,19 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene. ....	78
Figur 54. Regn 29.07.2011. Ssimulering 3 med tilhørende parametere får best resultat med 1,86 % forskjell i Q-maks. ....	79
Figur 55. Regn 16.09.2001. Simulering med tilhørende parametere får best resultat med 2,28 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene. ....	80
Figur 56. Etterprøving med regn fra 12.08.2002 med kalibreringsparametere. ....	81
Figur 57. Etterprøving med regn fra 06.08.2000 med kalibreringsparametere. ....	81
Figur 58. Symmetrisk regnhyetogram basert på 10-års gjentaksintervall. ....	82
Figur 59. 10-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg. ....	82
Figur 60. Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall. ....	83
Figur 61. 20-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg. ....	83
Figur 62. Symmetrisk regnhyetogram basert på 50-års gjentaksintervall. ....	84
Figur 63. 50-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg. ....	84
Figur 64. Symmetrisk regnhyetogram basert på 100-års gjentaksintervall.....	85

Figur 65. 100-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg. ....	85
--	----

## Tabelliste

Tabell 1. Dimensjoneringskriterier for oppstuvning fra topp rør. (Lindholm 2007)...	16
Tabell 2. Spildevandskomitéens anbefalte klimafaktorer (Oddvar Lindholm 2012).	18
Tabell 3. Norsk vanns anbefalte minimumskrav for separat- og fellessystem (Lindholm et al. 2008). ....	22
Tabell 4. Inngangsdata for følsomhetsanalysen og utvalgte parametere for videre simulering. ....	39
Tabell 5. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier. ....	41
Tabell 6. Kalibrerings-faktor F basert på verdiene Q-maks, volum og den inntrufne tiden.....	43
Tabell 7. Forslag til konsentrasjonstid i urbane strøk.....	46
Tabell 8. Resultater fra et 60 minutters regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall. ....	47
Tabell 9. intensiteten til 20-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg.....	50
Tabell 10. sammenligner oversvømmelse med dagens IVF mot 50 % klimatillegg.	56
Tabell 11. antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene. ....	56
Tabell 12. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket fordrøyning bygningsarealer. ....	57
Tabell 13. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet. ....	58
Tabell 14. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket frakopling av takflater. ....	59
Tabell 15. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet basert på tiltaket frakopling.....	59
Tabell 16. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket fordrøyning vei- og bygningsarealer.....	60
Tabell 17. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet basert på tiltaket fordrøyning vei- og bygningsarealer. ....	61
Tabell 18. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier. ....	78
Tabell 19. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier. ....	79
Tabell 20. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier. ....	80

## Liste over forkortelser

**AGCM** Atmosphere General Circulation Model  
**AOGCM** Atmosphere Ocean General Circulation Model  
**AR4** IPCCs fjerde hovedrapport  
**DANVA** Dansk Vand- og Spildevandsforening  
**DCM** Delta Change Method  
**DHI** Dansk Hydrologisk Institut  
**EDB** Elektronisk databehandling  
**EPA** Environmental Protection Agency  
**ExFlood** Extreme weather in small catchments: new method for flood protection  
**FN** De Forente Nasjoner  
**GCM** General Circulation Model/Global Climate Model  
**GIS** Geografiske Informasjonssystemer  
**Hydra II** Databasesystem for hydrologiske og meteorologiske data  
**IMT** Institutt for Matematiske realfag og Teknologi  
**IPCC** Intergovernmental Panel on Climate Change  
**IVF** Intensitet/Varighet/Frekvens  
**LID** Low Impact Development (LOD på engelsk)  
**LOD/LOH** Lokal overvannsdiskonering/lokal overvannshåndtering  
**MET** Metrologiske institutt  
**NGU** Norges Geologiske Undersøkelse  
**NORKLIMA** Klimaendringer og konsekvenser for Norge  
**NORVAR** Norsk Vann  
**NOU** Norges offentlige utredninger  
**NS-EN** Norsk Standard som også er en europeisk standard.  
**NVE** Norges vassdrags- og energidirektorat  
**OGCM** Ocean General Circulation Model  
**OS** Other Scenarios  
**RCM** Regional Climate Model  
**RegClim** Regionale Climate Development Under Global Warming  
**RDII** Rainfall Dependent Inflow and Infiltration  
**RDI** Rainfall Dependent Infiltration  
**ROS** Risiko og Sårbarhetsanalyse  
**SRES** Special Report on Emission Scenarios  
**SWMM** Storm water management model  
**T/A** Tid areal  
**TEK** Teknisk forskrift  
**UMB** Universitetet for miljø- og biovitenskap  
**VA** Vann- og avløp  
**VAV** Vann- og avløpsetaten Oslo kommune



# 1. Innledning

Vann som renner av overflaten tak, vegger og andre tette flater kalles overvann. Overvannet påvirkes av flere faktorer hvor regnintensiteter er en av dem. Klimaforskere viser til at regnintensiteten i framtiden vil øke betydelig, noe som igjen vil føre til store materielle skader grunnet oversvømmelser. Denne utviklingen er både en menneskelig og naturlig utvikling, men har en helt annen eskalerende kurve en normalt. Derfor er klimatilpassing et hett tema i overvannshåndterings sammenheng. I urbane- og sentrumsnære områder skjer det en stadig økende grad av fortetting for å maksimere arealutnyttelsen. Dette resulterer i flere tette flater. Gunstig er det med tanke på flere boliger og en kompakt by, men det vil øke belastningen på et allerede overbelastet avløpssystem. Ved nye avløpssystemer eller oppgradering av eldre anlegg bør mottiltak mot eventuelle klimaeffekter tas med for å forhindre eventuelle flomkatastrofer i framtiden.

Denne oppgaven er basert på en prosjektoppgave som en gruppe studenter på institutt for matematiske realfag og teknologi (IMT) ved faget THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer. De fem studentene er Lars Buhler, Mai Lene Raanaas, Samatar Abdi, Renate Sara og Shalaw Barzan. Hensikten med oppgaven var å lære simulering av overvannssystemer med innlagt regnintensitet basert på programvaren SWMM. Feltet Rustadskogen er en del av Skuterudfeltet og ligger under er prøveprosjekt i ExFlood-prosjektet. Det ble lagt til kummer og rør med tilhørende nedslagsfelt. Parametere ble registrert og lagt til som standard verdier. Oddvar Lindholm fortsatte fra der studentene slapp og prøvde forskjellige metoder for å kvalitetsikre modellens inngangsdata og rette på feil som ble funnet. Det ble senere kalibrert med 12. august 2009 regn fra NVE og det ble gjort en følsomhetsanalyse av modellen.

Denne oppgaven skal ta utgangspunktet i Oddvar Lindholms versjon av modellen og kvalitetsikre dataene som modellen er bygget på. Det skal kalibreres, basert på flere regn og det skal kjøres simuleringer med endrede klima og med kraftigere regnintensiteter for å se på modellens reaksjoner på eventuell oppstuvning og flomskader. Det vil bli søkt brukt mottiltak for å opprettholde dagens skadenivå med et klimatillegg på 50 %.

## 1.1 Problemstilling

Problemstillingene som oppgaven skal omhandle er.

- Hvilke parametere er mest følsomme med tanke på kalibrering.
- Hvilken effekt har klimatilpasset nedbørintensitet på modellen
- Optimale mottiltak mot klimaendringene.

## 1.2 Målsetting, fremgangsmåte og struktur

Oppgavens fulle tittel er *Analyse av klimaendringenes virkninger på Rustadskogen med kalibrert modell*. Den er delt opp i to hoved deler, *teoretisk-del* og *praktisk-del*. Oppgaven er delt inn i 11 hovedkapitler med underliggende delkapitler.

Første del er et litteraturstudium som skal presentere viktige og relevante temaer som er nødvendige for gjennomføringen av oppgaven. Andre del av oppgaven er den praktiske delen hvor kalibrering av Rustadskogen overvanns modell skal gjennomføres og framtidige klimaendringer simuleres med klimatillegg. Konklusjoner trekkes deretter basert på resultatene fra den praktiske delen.

Formålet med oppgaven er å øke kunnskapen om framtidens eventuelle utfordringer på avløpsnett i en del av Ås kommune som en del av ExFlood prosjektet. Avløpsnett er spesielt utsatt grunnet klimaendringene med antatt økt regn intensitet i framtiden. Dette gjør at temaet er interessant for forskningsmiljøet på UMB i Ås og at dette vil gi økt innsikt hos teknisk etat i Ås kommune som kan bruke resultatene i sin planlegging framover.

En del av målsettingen med masteroppgaven min er å få kjennskap til dagens teknikker som brukes til å simulere klimaendringenes virkning på overvannsnett. Hensikten er å få mer kunnskap om hva slags påvirkninger framtidens klimaendringer kan gjøre på dagens overvannssystem i feltet Rustadskogen lokalt i Ås kommune og hvilke tiltak som er best egnet til å redusere mulige materielle skader som en konsekvens av eventuelle flom katastrofer.

For å få realistiske data ut fra modellsimuleringene skal den kalibreres og formes slik at den matematiske modellen representerer virkeligheten best mulig. Det er fem målsettinger for oppgaven:

1. Får en dypere forståelse for problematikken klimaendring fra litteraturstudiet
2. Få kalibrert den matematiske modellen til et akseptabelt nivå
3. Kjøre simuleringer med gitte gjentakintervaller med og uten klimatillegg
4. Kjøre simuleringer med forskjellige tiltak for å redusere eventuelle bygningsskader
5. Analysere dataene og konkludere

Som et utgangspunkt forventes det at resultatene fra simuleringene med klimatillegg vil vise bygningsskader fra 20-års gjentakintervall og oppover. Forhåpentligvis vil noen av tiltakene som blir valgt i simuleringen forventes å redusere eventuelle bygningsskader.

# LITERATUR-STUDIE

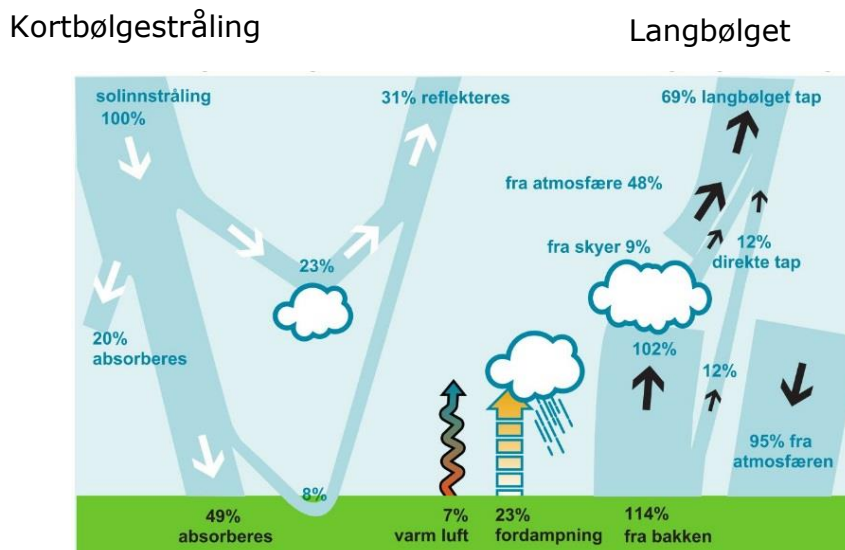


## 2. Klima

Ordet *klima* har sin opprinnelse fra det greske språket og betyr «å helle». Grunnen er at jordens helning har en stor påvirkning på klimaet grunnet vinkelen på solinnstrålingen. Ved ekvator er solinnstrålingen størst grunnet lavest innstrålings vinkel. (Metrologisk Institutt 2013). Ved systematisk observasjon av værets utvikling over en lengre periode, kan vi si noe om været - og eventuelt klima - på det observerte området. For å kunne sammenligne observerte data er det satt en standard for hvordan dataene skal registreres og analyseres. Denne standarden skal basere seg på middelverdier av normalen. Disse normalene kalles standard normalperioder og har en begrenset tidsperiode på 30 år som går fra 1901-1930, 1931-1960, 1961-1990 og 1991-2020 osv (Metrologisk Institutt 2013). Norge ligger i et gunstig område hvor vestavinden og den varme Golfstrømmen gir et varmere klima enn det breddegraden tilsier. Norge er et langstrakt land og derfor er det store variasjoner av både temperatur og antall soltimer per dag på sommer- og vinterstid. I tillegg påvirker terrenget lokale variasjoner over korte avstander (Metrologisk Institutt 2013).

### 2.1 Det globale Klimasystemet

Det globale klima systemet er basert på intern dynamikk og gjennom ytre påvirkninger. De ytre påvirkningene på klimaet kan være naturlige eller menneskeskapte, så som vulkanske utbrudd, forandring i solinnstrålingen, forandring i atmosfærens sammensetninger eller forandring av vegetasjon. (Bjerknessenteret 2009a) Dette er et klima system som må balanseres mellom solinnstrålingen, refleksjon fra jordoverflaten og atmosfære. Denne balansen kalles energibalansen som er vist i Figur 1.



Figur 1. Sammenheng mellom solenergi, atmosfære og jordens overflate (Bjerknessenteret 2009a).

Solen sender ut ultrafiolette stråler gjennom atmosfæren (beskrevet med hvite piler i figuren), som blir absorbert eller reflektert av jordoverflaten og partikler. Av total innstrålingen er det ca. 31 % som reflekteres ut av atmosfæren. Av det som når jordas overflate reflekteres noe tilbake, men det aller meste absorberes og er en stor bidragsyter for jordas gjennomsnittstemperatur på ca. 15 °C. Den absorberte energien sendes ut som langbølgestråler og absorberes av gasser, skyer og partikler i atmosfæren, svarte piler. Noe tappes til verdensrommet, men mesteparten forblir i atmosfæren og sørger for en høyere temperatur på jorda. Skyer, partikler og gasser virker som et «drivhus» for jorda og variasjoner vil gjøre at effekten forandrer seg altså drivhuseffekten. (Bjerknessenteret 2009a)

Hvis vi ser på klima på et globalt nivå må vi legge til andre systemer som vann- og vindtransport. Vann er en viktig bidragsyter som varmfordeler og opprettholdelse av temperatur lokalt og globalt. Solen som energi-kilde varmer opp vannet og skaper strømninger grunnet varmforskjeller i vannet. Strømningene tar med seg kaldt eller varmt vann og påvirker temperaturen i andre områder av jorden (Meteorologisk Institutt 2013). De samme funksjonene gjelder for vind som for vann, solenergien skaper forskjellige energibalanser i atmosfæren og gjør at varm og kald luft lager horisontale trykkforskjeller som igjen resulterer i vind. Det at systemet prøver å gjenopprette likevekten gjør at store vindsystemer settes i gang, og transporterer overskuddsvarme til områder med mindre varme. Vindsystemene klarer aldri å oppnå likevekt grunnet jordas rotasjon og solens varierende strålingskapasitet gjennom året. Som nevnt er det ikke bare solenergien og vind- og havstrømninger som påvirker klimaet. Atmosfærens kjemiske sammensetning har en stor innvirkning på jordens klima hvor gasser som karbondioksid, ozon og metan er de som bidrar mest til klimaforandring. Ved å forandre på den kjemiske sammensetningen, vil klimaet også forandre seg lokalt og globalt. Denne totale drivhuseffekten gjør at middeltemperaturen ligger på rundt 15 °C ved jordens overflate og kalles den naturlige drivhuseffekten, og uten den naturlige drivhuseffekten ville snittemperaturen vært på rundt -18 °C (Meteorologisk Institutt 2013).

### **2.1.1 Klimaforandringer**

Klima kan uttrykkes ved en fordelingskurve og klimaendringen er dermed en forandring i klima-fordelingskurven. Klimaforandringen refererer ofte til globale forandringer med varig karakter (Harstveit et al. 2013). Dette kan vi se ved å studere fortidsklima og rekonstruere klimaet med minst mulig usikkerhet og tidsopløsning bakover i tid. For å skille mellom naturlige og menneske-skapte klimaendringer må det dokumenteres hvordan klimaet var før den industrielle revolusjonen. Forskere har konkludert med stor sannsynlighet at forandringen i klimaet er menneskeskapt, det etter at dataene fra klimagassene ble lagt til i beregningsmodellene (Bjerknessenteret 2009b). De naturlige klimaendringene er som regel regionale og ikke globale hvis vi ser på klimasvingningene med varighet mindre enn 100 år. De globale og langvarige svingningene baserer seg mere på jordens bane rundt solen, vinkelen til jordaksen i forhold til solen og om jorden er nærmest solen sommerstid eller vinterstid. De kortvarige svingningene kommer

derimot av vulkanutbrudd, solens<sup>1</sup> 11-års syklus og naturlige temperaturvariasjoner i havet (Førland et al. 2009). Disse naturlige påvirkningene på klimaet har tidvis gitt store endringer i det globale klimaet over tid. I Norge under den siste istiden, for 20.000 år siden, lå det en 1 kilometer tykk iskappe over Norden. For 125.000 år siden var det en varmeperiode med temperaturer på 4-5 grader høyere enn sommertemperaturene i det 20. århundre. Over tusenvis av år, med små variasjoner i jordens bane rundt solen, har det vekselvis vært istider og varmeperioder. Temperaturstigningen som har skjedd det siste århundret er ikke i samsvar med variasjonene i solinnstrålingen, og kan derfor ikke forklares som årsaken til temperaturøkningen. Data fra Antarktis og Grønland fra etter den industrielle revolusjon viser at karbondioksid og metan overstiger de naturlige variasjonene. Det er registrert en økning av karbondioksid og metan på henholdsvis 40 % og 17 % siden den førindustrielle tiden (Bjerknessenteret 2009b).

### 2.1.2 Observerte globale klimaendringer

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) er et faglig organ under FNs miljøprogram. De samler inn allerede publiserte vitenskapelig, teknisk og samfunnsøkonomisk arbeid. Arbeidet som IPCC gjør er å sikre informasjonen som ligger tilgjengelig og kvalitets sikre materialet for senere å skrive rapporter sammen med kvalifiserte fagekspertter og myndigheter. Det gjør at rapportene har en politisk tyngde og kan brukes til beslutninger i klimakonvensjonen (Fuglestad & Olerud 2011). Det er foreløpig utgitt fire rapporter fra 1990 til 2007. Den neste rapporten forventes i 2013/2014 og skal basere seg på de tre arbeidsgruppene (1. klimasystemet og klimaendringer, 2. på-virkninger av klimaendringer og strategier for tilpasning, 3. mulige tiltak). For å gi en oversikt over den globale klimaendringen er det naturlig å bruke IPCCs (2007) rapport som grunnlag for den globale utviklingen.

- **Temperatur.** Elleve av årene (fra 1995 til 2006) er de varmeste årene som er registrert siden starten av målingene i 1850. Den oppdaterte temperaturstigningen fra forrige rapport, er en oppgang fra 0,6 grader til 0,74 grader på bare de 5 siste årene (2000-2005).
- **Atmosfærisk vanndamp:** Gjennomsnittlig atmosfærisk vanndampinnhold har økt siden 1980 over land og hav så vel som i den øvre troposfæren. Økningen av vanndamp er stort sett i samsvar med den mengden vanndamp som varmluft kan holde på.
- **Havtemperatur:** Observasjoner siden 1961 viser en økning i temperaturer helt ned til 3000 meter. Det antas at hav har absorbert 80 % av den globale varmeøkningen.

---

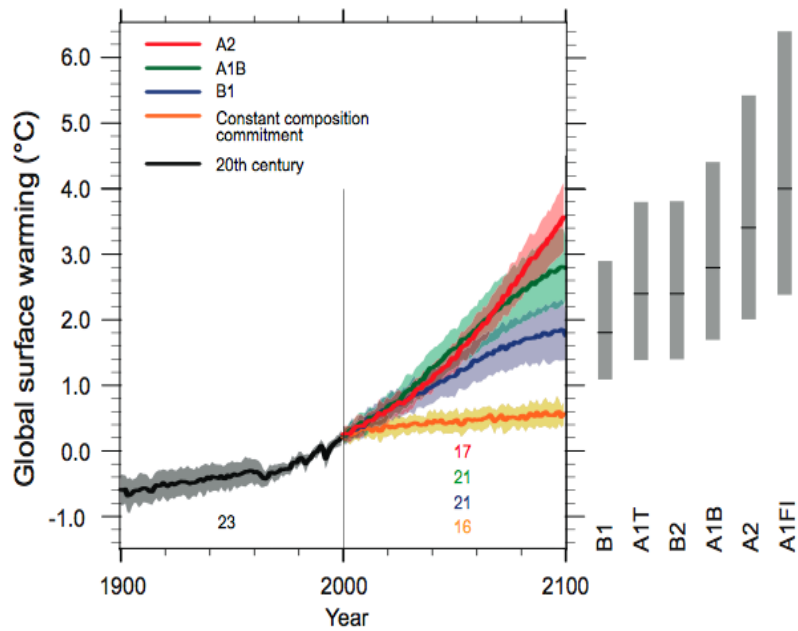
<sup>1</sup> Solen følger normalt en 11-års syklus, der det fram til klimaks på syklusen opptrer flere og flere solflekker. Det er aktive områder med kraftige og ustabile magnetfelter. Ut fra disse feltene kommer det sterke solutbrudd som skyter enorme utladninger av energi ut i rommet i retning mot jorden. (Geographic 2010)

- **Snødekke og isbreer:** Det er registrert en reduksjon i mengde snø og isbreer på begge halvkuler. Det igjen er en av årsakene til stigningen av havnivået.
- **Havstigning:** Den globale gjennomsnittlige havstigningen har steget med 1,8 millimeter per år fra 1961 til 2003. I nyere tid viser det seg at frekvensen har økt til 3,1 millimeter per år fra 1993 til 2003. Det er med høy sikkerhet at man kan anta at det globale havnivå har steget fra 19. til 20. århundre. Den totale havnivåstigningen i det 20. århundre er beregnet til 0,17 meter.
- **Nedbør:** De langsiktige trendene (1900-2005) viser en økning av nedbør i store regioner som Nord- og Sør-Amerika, Nord-Europa og Nord- og Sentral-Asia. Trendene viser også tørke i andre regioner som Middelhavet, sørlige Afrika og deler av Sør-Asia.
- **Tørke:** Mer intense og lengre tørkeperioder har blitt observert over større områder siden 1970-tallet, særlig i tropene og subtropene. Endringer i havoverflatetemperaturer, vindmønstre og redusert snødekke har også vært knyttet til tørke. Hyppigheten av kraftig nedbør har økt over de fleste landområder, og er i samsvar med den observerte økningen i atmosfærisk vanddamp (IPCC 2007).

### 2.1.3 Framskrivninger av globalt klima

IPCC har også vært med på å utvikle modeller for framtidig klimasenarioer. De første utslippssenarioene ble utviklet på tidlig 90-tallet, og senere blitt fornyet ettersom kunnskapen har utviklet seg. Det ble presentert nye utslippsscenarioer, Special Report on Emission Scenarios (SRES) i IPCC spesialrapport i år 2000. Framtidsscenarioene, fordelt på fire grupper, beskriver antatte framtidig utvikling frem mot 2100. Av de 4 «familiegruppene» deles de inn i seks scenariogrupper som igjen fordeles inn i harmoniske scenarioer basert på populasjon og befolkning, verdensøkonomi, teknologi og energibruk (IPCC 2000). Nedenfor er de fire familiegruppene med noen av rammene for å beskrive framtidens scenarier.

- A1(F1, B, T): Beskriver en verden i rask økonomisk vekst, men ujevnt fordelt av verdiene. Befolkningsveksten er estimert til 7 milliarder mennesker i 2100. Balanse mellom fossile og ikke-fossile energikilder er igjen delt inn i tre kategorier: F1, B, og T.(IPCC 2000)
- A2: «Delt verden med høy befolkningsvekst og mindre bekymring for rask økonomisk utvikling. 15 milliarder mennesker i 2100».(I et al. 2009)
- B1: «Globale løsninger på økonomisk og sosial bærekraftighet. Raske endringer i økonomiske strukturer og introduksjon av rene teknologier. 7 milliarder mennesker i 2100».(I et al. 2009)
- B2: «Baseres på lokale løsninger som økonomisk, sosial og miljømessig bærekraft. Høy befolkningsvekst, men en vekstrate mindre enn A2. Den økonomiske utviklingen er noe moderat i forhold til A1 og B1» (IPCC 2000).



Figur 2. Illustrerer SRES utslippsenarioer med temperaturøkning basert på klimagasser (IPCC 2010).

For å simulere klimaforandringer frem til 2100 er det valgt tre av de totalt seks kategoriene som SRES baserer seg på. Kategoriene (B1, A1B, A2) er valgt med hensyn på utslipp som representerer «lav», «medium» og «høy». Grunnet begrenset datakapasitet er det bare brukt tre av i alt seks senarioer. Valget baserer seg kun på at man ønsker to ytterpunkter og representasjon av en slags middelværdi, uten at det er lagt vekt på kvalifisering, preferanser eller en sannsynlighetvurdering av de forskjellige senariokategoriene (Solomon 2007).

Nedenfor blir noen av IPCCs estimerte klimaendringer fra fjerde hovedrapport (AR4) gjengitt.

- Den laveste estimerte temperaturøkningen er på +1,8 °C, mens den høyeste registrerte temperaturøkningen er på +4 °C.
- Den globale temperaturøkningen kan forårsake reduksjon i karbondioksidopptak på land og i hav som igjen kan øke fraksjonen av menneskeskapte utslipp som blir værende i atmosfæren.
- Det er anslått at ikke-tropiske stormer skal bevege seg mot polene og forandre på dagens vind-, nedbør- og temperaturmønstre.
- Is og snødekke er forventet å bli redusert, spesielt utsatt er polområdene.
- Den gjennomsnittlige havnivåstigningen er forventet å stige mellom 0,18 – 0,59 meter i slutten av 2100 århundre.
- Nedbørsmengden er beregnet å øke i de høyereliggende breddegrader, mens det i de subtropiske landområdene forventes en reduksjon i nedbørsmengde.
- Det er forventet at intensiteten på nedbør skal øke i takt med temperaturøkningen.

## 2.2 Klimaet i Norge

Klimavariasjonene i Norge har store variasjoner både geografisk og over tid. Langs vestkysten kan det oppstå store nedbørmengder opp til 5000 mm/år, mens innlandet kan få nedbørmengder helt ned til 350 mm/år. Gjennomsnittlig årsnedbør i Norge er beregnet til 1486 mm og av dette er det estimert at 346 mm går til fordampning og 1140 mm går til avrenning. Årsmiddeltemperaturen har også store variasjoner i Norge, hvor høyfjellet har lav middeltemperatur på  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mens Vestlandets kystområder har en årsmiddeltemperatur på  $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Antall vekstdager for de forskjellige regionene har også store variasjoner, der Vestlandet har 225 dager og høyfjellet har 70 dagers temperaturbestemt vekstsesong (I et al. 2009). Klima i Norge er stort sett avhengig av vestavindsbeltet og Golfstrømsystemet fra Mexicogolfen. Variasjoner i temperaturene i Golfstrømmen vil gi store utslag på Norges klima (Bjerknessenteret 2009c). Uten vestavinden og Golfstrømmen er det anslått at middeltemperaturen i Norge ville vært  $10\text{-}15\text{ }^{\circ}\text{C}$  kaldere enn den er (Bjerknessenteret 2009c).

### 2.2.1 Observerte klimaendringer i Norge

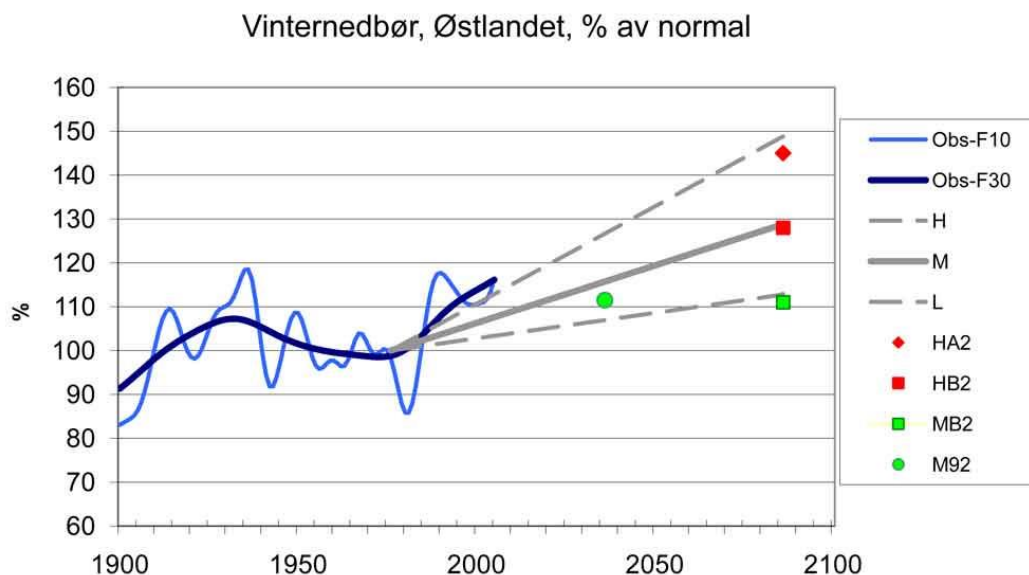
Som nevnt, så er variasjoner fra år til år og fra tiår til tiår som regel naturlige variasjoner i klimasystemet. Men ser vi på tidstrender fra de siste 100-150 år kan det antyde at variasjonene i temperatur, nedbør og sjøisutbredelse er både naturlig og menneskeskapt (I et al. 2009). De siste 50 årene kan vi se en signifikant økning av temperatur grunnet menneskeskapt oppvarming over alle kontinentene bortsett fra Antarktis (IPCC 2007). For 6000-9000 år siden var Norge inne i en varmeperiode hvor temperaturen lå på  $1,5\text{-}2\text{ }^{\circ}\text{C}$  høyere enn normalperioden 1961-1990. Årsaken var at jordens helning var noe større og avstanden til solen nærmere enn i normalperioden. Det samme kan vi se i middelalderen (år 500-1500) hvor temperaturen antagelig lå  $0,5\text{-}1\text{ }^{\circ}\text{C}$  over normalperioden 1961-1990. Årsaken til temperaturøkningen kan ha vært en kombinasjon av unormale sol- og vulkanaktiviteter. I nyere tid ser vi at temperaturen har økt med  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  det siste århundret. I denne perioden har temperaturen variert, men måler vi temperaturforskjellene fra 1965 får vi en temperaturstigning på  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  per tiår fram til dags dato. Siden 1900 har nedbøren økt med nesten 20 % i Fastlands-Norge, hvor vinterhalvåret har fått mest og sommerhalvåret minst økning. Det er ingen klar trend for stormhyppigheten i våre hav- og kystområder selv om Vestlandet har den største økningen i nedbør. Vannføringen har store variasjoner fra år til år av naturlige årsaker, og p tillegg ser vi at temperaturøkningen har gitt økt vannføring om vinteren og våren. På Sørøstlandet kan man se en tendens med lavere vannføring i lengre perioder på sommerstid. Havtemperaturen har også hatt store variasjoner over den siste tiden i likhet med lufttemperaturen, men vist en tendens til økning over de siste tiårene. Når det gjelder havnivået langs norskekysten er det ikke registrert noen økning i de siste 100 årene i forhold til fastlandet. Årsaken kan være landhevingen etter den siste istiden som foreløpig stiger i takt med havnivået (I et al. 2009).

### 2.2.2 Nedskalering av klimamodeller

Klimamodeller som Atmosphere Ocean General Circulation Models (AOGCM) er stort sett basert på en oppløsning typisk 200 x 200 kilometer i atmosfæren. For å se på regionale og lokale forandringer må tettheten på gridene økes. Dette finnes det forskjellige metoder for, som resulterer i nedskalering av AOGCM-resultatene. Det er hovedsakelig to hovedmetoder som blir brukt, den «dynamiske metoden» og den «statiske» (eller empirisk statiske) metoder. Den «dynamiske metoden» baserer seg på de samme fysiske ligninger fra AOGCM. HIRHAM er en metode som met.no har brukt for å beregne regionale klimaendringer i Norden og tilgrensede havområder. Denne metoden bruker datamaterialet fra AOGCM som ligger nærmest området som skal vurderes, og i tillegg ser den regionale modellen på havtemperatur, havisen og andre egenskaper ved bakken. Den «empiriske» nedskaleringen baserer seg på historiske observasjoner for så å identifisere og tallfeste statistiske sammenhenger mellom globalt klima og lokale klimaforhold. Dette kan benyttes til å beregne lokalt klima under de endrede storstilte forholdene som beregnes av AOGCM. Men det forutsettes at disse sammenhengene ikke endres med tiden (I et al. 2009).

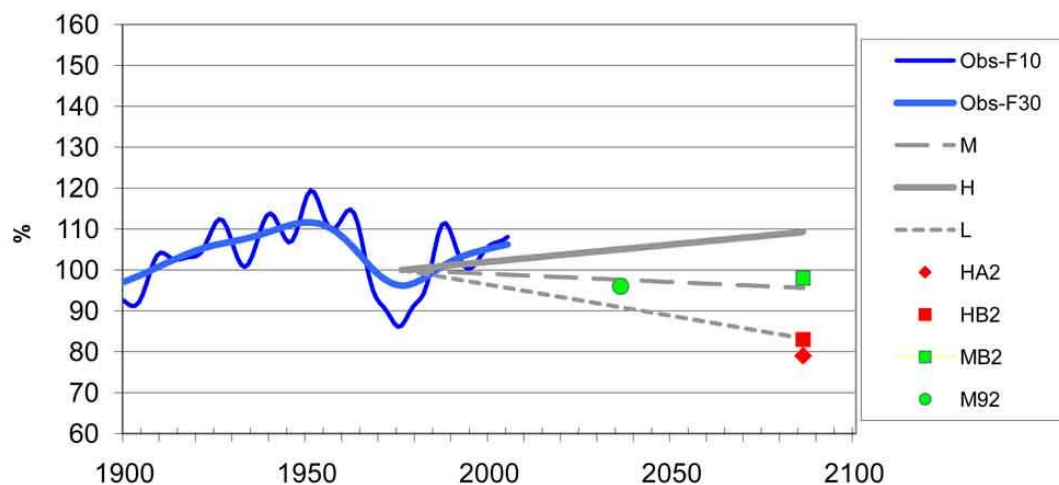
### 2.2.3 Framskrivninger av klimaet i Norge

Utgangspunktet for framskrivningene av nedbørmengde er gjennomsnittlig årsnedbør i den såkalte normalperioden, som omfatter årene 1961 til 1990. Gjennom de siste 20 årene er det bare tre år der årsnedbøren i Norge har vært lavere enn gjennomsnittet for normalperioden. I perioden 1900 til 1920 hadde derimot alle årene en årsnedbør som lå under gjennomsnittet for normalperioden.



Figur 3. Framskrivning av vinternedbør for Østlandet (Hanssen-Bauer 2009).

### Sommernedbør, Østlandet, % av "normal"



Figur 4. Framskrivning av sommernedbør for Østlandet (Hanssen-Bauer 2009).

Deler av nedbørøkningen de siste tiårene har sammenheng med naturlige variasjoner i atmosfæresirkulasjonen. Dette kan likevel ikke forklare hele den observerte nedbørsøkningen (I et al. 2009).

De regionale framskrivningene er basert på tre scenarier A1B, B1 og A2 fra SRES. I de tre scenarioene er det sammenlignet CO<sub>2</sub>-data fra dagens målinger og predikerte CO<sub>2</sub> i 2100.

- B1: Atmosfærens CO<sub>2</sub>-innhold er på 540 ppm<sup>2</sup> i 2100 mot dagens 380 ppm (I et al. 2009).
- A1B: Atmosfærens CO<sub>2</sub>-innhold er på 703 ppm i 2100 (I et al. 2009).
- A2: Atmosfærens CO<sub>2</sub>- innhold er på 836 ppm i 2100 (I et al. 2009).

De tre scenarioene representerer henholdsvis lavt, middels og høyt utslipp av klimagasser. Det må aksepteres en usikkerhet i klimaframskrivningen grunnet manglende kjennskap til framtidige utslipp av partikler og klimagasser kombinert med forenklinger og mangler i klimamodellene. Uavhengig av usikkerheten vil det gi oss en pekepinn på hvordan utviklingen av menneskeskapt klimapåvirkning kan være i Norge i det 21. år-hundre. De dataene som blir presentert under, er basert på 22 klimaframskrivninger med dynamiske metoder, og 50 klimaframskrivninger basert på statiske metoder. Resultatene baserer seg på klimasimuleringer fra forskningsprosjekter nasjonalt og internasjonalt som RegClim, geoExtreme, NorACIA, NorClim og PRUDENCE (I et al. 2009).

- I Norge vil årsmiddeltemperaturen øke med 2,3 °C til 4,6 °C innen 2100 hvor vinterhalvåret vil ha den største økningen.

<sup>2</sup> ppm er «parts per million»



- Vekstsesongen vil øke med fra 1- 2 måneder til 2 - 3 måneder i noen deler av Norge
- I hele landet vil det bli en økning i nedbør. Beregningene viser at økningen blir på 5 til 30 prosent mot slutten av 2100. Vinternedbøren får den største økningen med over 40 prosent i noen deler av Sør-, Øst- og Vestlandet.
- Nedbøren vil øke i alle regioner i alle årstider. Det vil bli flere nedbørsdager totalt over året og nedbørsmengden over disse dagene vil bli høyere over hele Norge.
- Årsavregningen henger sammen med nedbørsendringene og vil øke tilsvarende likt med nedbøren. Det vil allikevel bli noen forskjeller i noen regioner, for eksempel brere regioner som vil få en økning.
- Snøsesongen blir redusert i store deler av landet, men i høytliggende strøk vil snømengden øke mot slutten av århundret.
- Flomframskrivninger er meget usikre, men det antas at flommen skal øke mot slutten av århundret. Flomtidspunktet vil forskyve seg mot tidligere vårflokker mens høst og vinterflokker vil øke.
- Mindre regn på sommerstid vil øke markvanns-underskuddet som kan gi alvorlig tørke og skogbrann i utsatte strøk.
- Havtemperaturen vil øke med 0,5 °C langs vestkysten av Norge, mens overflatevannet i Nordsjøen kan øke opp mot 1,4 °C på 100 år.
- Det antas at havet rundt norskekysten vil stige med 40 til 70 cm avhengig av lokalitet, men grunnet usikkerheten i landhevingen kan havstigningen bli 20 cm lavere til 35 cm høyere enn verdier over (I et al. 2009).

#### **2.2.4 Usikkerheter ved klimaframskrivninger**

Det finnes flere typer usikkerheter som har en kobling til klimaframskrivninger på global og regional skala. For noen av kildene kan man estimere usikkerheten, mens for andre kan man tallfeste usikkerheten. Vi kan i grove trekk dele inn usikkerheten i fire kategorier.

- Naturlige klimavariasjonene
- Naturlig klimapådriv
- Menneskeskapt klimapådriv
- Ufullstendig kunnskap

De naturlige klimavariasjonene kan variere med store utslag, fra globalt helt ned til lokalt nivå. Dette middelværet kan variere for noen år til tiår og mer. De viktigste variasjonene er knyttet til havtemperaturene langs og nær ekvator i Stillehavet (I et al. 2009).

Det naturlige klimapådriv har også en innvirkning på variasjonene på det globale klimaet. Disse pådriverne kan være variasjon i solinnstråling til vulkanutbrudd som gjør det vanskelig å framskrive klimaet (I et al. 2009).

Ut i fra utviklingen som har skjedd det siste århundret finnes det gode bevis for menneskeskapt klimapådriv, og dermed kan det estimeres hvor stort den menneskeskapte klimapådriveren vil være. Men usikkerheten er allikevel stor med

tanke på hvordan samfunnet og energi forbruket kommer til å utvikle seg. Derfor er det utarbeidet en rekke scenarier, som er beskrevet over, for å indikere mulige framtidige hendelser.

Usikkerheten ved forventet endring i de hydrologiske forhold og hendelser er sterkt avhengig av antall modeller, hvilke modeller som blir brukt og hvordan man bruker dem. Hvis vi sammenligner resultatene fra de to modellene, ECHAM4<sup>3</sup> og HadAm3H<sup>4</sup>, får vi to vidt forskjellige resultater. De to modellene legger vekt på forskjellige parametere og gir utslag på vindretningene. I Norge er nedbøren hovedsakelig avhengig av vindretningen grunnet fjellformasjonene langs kysten. Dette gir store ulike utslag på nedbørintensiteten på losiden og lesiden i de norske fjellområdene. ECHAM4 gir en større indikasjon på at vestaværet er den dominerende faktoren til nedbør som resulterer i større nedbør på Vestlandet. AadAm3H gir mere østavær som igjen vil redusere nedbøren på Nordvest-landet og i Nordland (I et al. 2009).

Andre usikkerhetsmomenter i beregningene er ulike metoder for nedskalering av temperatur og nedbør til et lokalt nivå. Det ligger også en usikkerhet i parametersettingen av de hydrologiske modellene. Utslippsscenarioene i modellene gir ulike resultater som kan gi utslag i den kumulative sannsynlighetsfordelingen som er benyttet for å beregne framtidens endringer (I et al. 2009).

### **3. Det urbane avløpssystemet**

#### **3.1 Urbanisering**

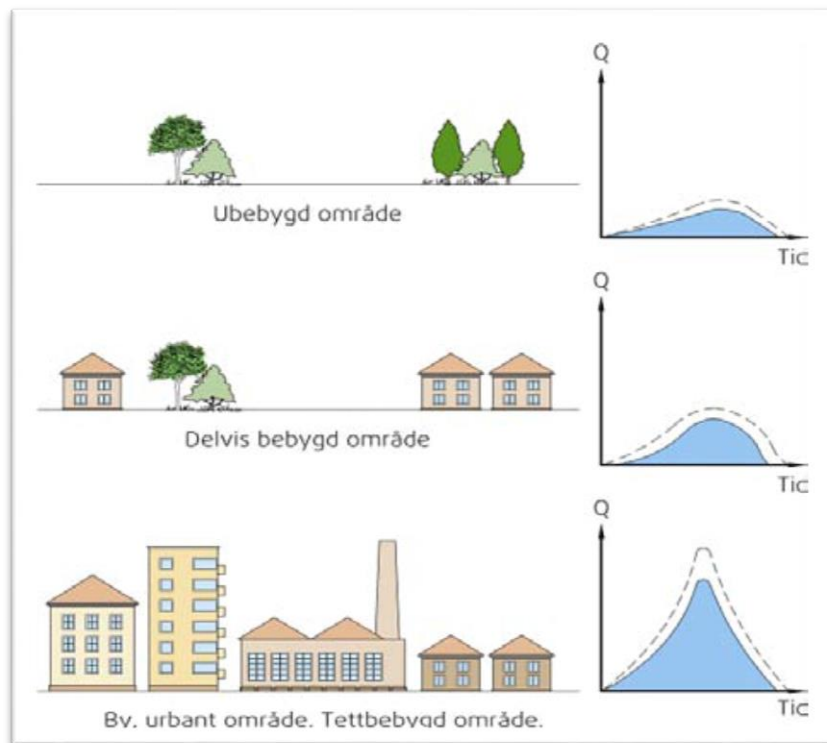
Samspeilet mellom naturlig hydrologi og menneskelig aktivitet kan forklares som urbanhydrologi. Det urbane avløpssystemet er i stor grad et menneskekonstruert system for å bedre levestandarden i de lokale miljøer. Urbanhydrologiske kretsløp består av konstruerte vannveier inn i urbane områder og med konstruerte vannveier ut av systemet. De hydrologiske effektene som et urbanisert område utgjør er hovedsakelig økt overflate avrenning i intensitet og volum, den reduserer infiltrasjonen grunnet tette flater. I tillegg blir evaporasjon og evapotranspirasjon blir redusert grunnet mindre blå og grønne arealer og grunnvannstanden senkes grunnet manglende tilgang på overflatevann. Dette vil igjen skape praktiske konsekvenser for det urbane systemet som for eksempel økt fare for oversvømmelse av veier, anlegg og hus. Det vil skape setningsskader på bygninger grunnet variasjon i grunnvannstand ved fortetting og vil gi generell lavere vannstand som vil resultere i vegetasjonsuttørking og resipienten vil få en større punkt-påkjønning med tanke på forurensning og volum. Kombinerer vi dette med

---

<sup>3</sup> M92 (MPI/IS92a, ECHAM4-IS92a) er en eksempelframskrivning med klimamodellen ECHAM4 og utslippsscenarioet IS92a.

<sup>4</sup> HB2 (Hadley/B2, Had-B2) er en eksempelframskrivning med klimamodellen HadAm3H og utslippsscenarioet B2.

klimaframskrivningene vil dette gi et økt trykk på det urbanhydrologiske avløpssystemet (NVE 2009).



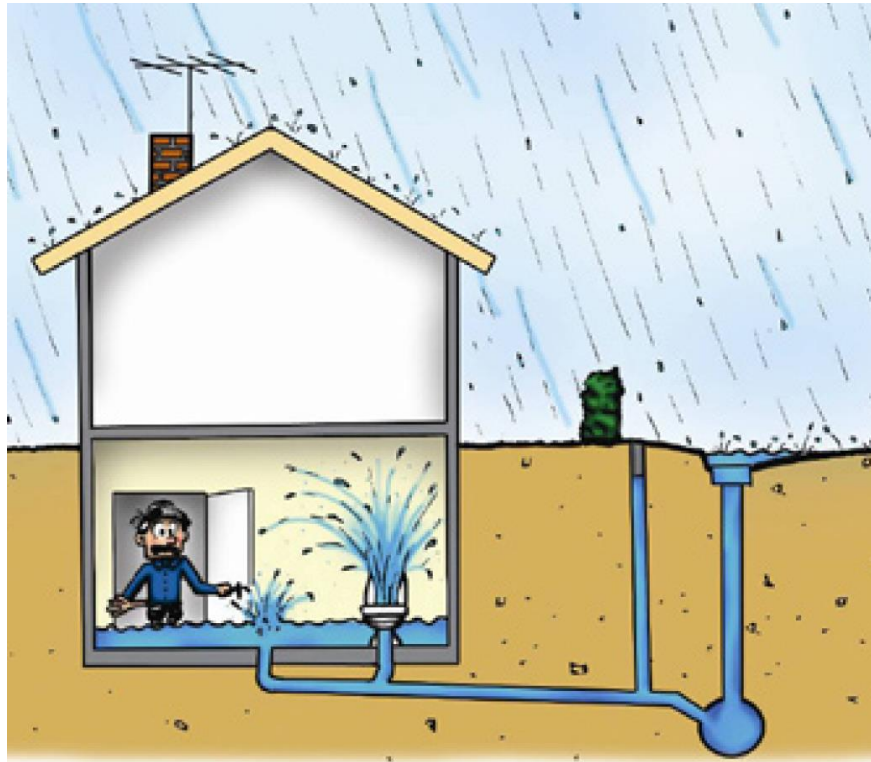
Figur 5. Effekten av økt avrenning i urbane områder ved fortetting (Norsk Hydrologiråd 2011).

I disse urbansystemene kan vi dele systemet inn i to former: uttak av vannressurser til forbrukeren og etablering av impermeable flater som hindrer regnvann i å infiltrere og opprettholde de naturlige hydrologiske forholdene. Det igjen gir systemet to forskjellige avløpsvann å forholde seg til, vann fra tette flater (overvann) og spillvann (Winther et al. 2006).

Overvann kan i grove trekk forklares som regn fra tak, veier og andre tette flater. Mens spillvann er et restprodukt som forbrukere skiller ut fra hovedsakelig boliger og industri. Spillvannet inneholder store mengder suspendert stoff som kan forårsake store miljømessige problemer for befolkningen og økosystem. Det blir derfor transportert til egnede områder hvor spillvannet blir rensert etter tilfredsstillende ønskede krav.

Transport-systemene av avløpsvann har hovedsakelig to hovedsystemer. Fellessystem er et system som innebærer avløpsvann, overvann og drensvann i en og samme rørledning fram til eventuelt renseanlegg og ut i resipienten. Fordelen med dette systemet er at alt vann renses og anses som et godt alternativ for forurenset overvann. Fellessystemer karakteriseres med store rørdimensjoner. Fellessystemet har åpne koblinger til de systemene som benytter seg av fellessystemet. Det kan føre til at avløpsvann fort kan stige opp i sluk og toaletter i bygninger som ligger i oppstuvingsområder ved store regnskyll. Når et regnskyll inntreffer, kommer det store mengder vann som renseanlegget og rørsystemet skal ta unna på kort tid. For å redusere ødeleggelse og hindre overkapasitet på

renseanlegget settes det inn et overløp<sup>5</sup> som fører urensset vann videre til resipienten. Dette kan føre til store forurensninger i allerede sårbare resipienter (Winther et al. 2006).



Figur 6. Utfallet ved for stor belastning på fellessystem (Lindholm et al. 2008).

I et separat avløpssystem skilles overvann og spillvann i to forskjellige ledningssystemer, ofte i en og samme grøft. Dette gjorde man for å redusere forurensningen til resipienten ved store regnskyll grunnet kapasitetsproblemer. Overvannsledningen er dimensjonert etter et gitt gjentagsintervall som varierer mellom 10 til 50 år, mens spillvannsledningen er dimensjonert etter midlere vannføring multiplisert med døgn maks (Vann- og avløpsteknikk 2012), og derfor litt mere forutsigbar med tanke på overkapasitet. Slike separatsystemer har store investeringskostnader under byggeprosessen, men vil igjen redusere faren for overbelastning av renseanlegget og kjeller-oversvømmelser. Overløp ved et separatsystem er ikke nødvendig, men vil redusere forurensningen til resipienten. Forurenset overvann vil fortsatt være et problem for resipienten siden avløpsvannet går gjennom systemet urensset (Butler & Davies 2010).

Hvis vi ser på fellessystem i den nyere tid har dimensjoneringskriteriene variert frem til i dag. Som tabellen under viser har minimumskravene for avløpsledninger for høyde mellom åpent sluk i kjelleren og topp avløpsrør i tilkoblingspunktet variert.

---

<sup>5</sup> Overløpet, dvs. kontrollseksjonen i flomløpet, kan være et fast overløp eller et manøvrerbart løp, enten integrert i rør/dammen eller som en separat konstruksjon.

Tabell 1. Dimensjoneringskriterier for oppstuvning fra topp rør. (Lindholm 2007)

1909 – 1946	30 cm
1946 – 1972	120 cm (50 cm med ventil)
1972 – 1980	50 cm
1980 –	90 cm

### 3.2 Overvann

Overvann er vann som renner av fra tette flater som tak, vegger og andre tilsvarende flater. Overvann har blitt et problem de senere årene på grunn av alle flomskadene vi har hatt. Noen av årsakene til flommene er den eskalerende intensiteten på regnet de siste ti – årene og fortettingen av de urbane områdene som blant annet (byer og tettsteder). Forandring i naturlige vannhydrologi som lukking av bekkefar og drenering av åpne vannspeil og myrer har også en stor innvirkning på flomhyppigheten.

Som nevnt, så har klimaendringene forårsaket en økning i regnintensitet. Dette gjør at grunnvannstanden stiger og påfører avløpssystemet større belastning grunnet infiltrasjon til rørene. Framskrivningene fra de globale klimamodellene viser at klimaendringene vil bli betydelig større enn det vi allerede har opplevd. Det vil si at allerede utviklede avløpssystemer og framtidens overvannssystemer må tilpasse seg de utfordringene som ventes (Lindholm et al. 2007).

### 3.3 Framtidens påvirkning på det urbane avløpssystemet

I de urbane områdene, som beskrevet over, oppstår det svært raskt samling av store mengder med vann grunnet tette flater som dreneres til kostbare transportanlegg. De urbane områdene utvikler seg med fortetting i allerede eksisterende områder og utvider seg i til større arealer. I tillegg har vannmengdene økt på grunn av klimaendringene de siste årene (Lindholm 2011b). Dette gjør at avløpssystemene blir utsatt for større belastninger og skaper store oversvømmelser og forurensninger. Forsikringsselskaper har registrert større og flere utbetalinger grunnet vannrelaterte skader. Det er registrert dobbelt så mange vannskader som brannskader de siste 10 årene. En kombinasjon av økt nedbør og økt havnivå gjør at en eventuell flom kan bli vesentlig større enn antatt. Det vil si at flommen øker med 100 % når regnintensiteten øker med 40 % som vil tilsvare en økning i skadeverdi på hele 200 % (*Vann- og avløpsteknikk* 2012). Fra historiske data har man registrert en utvikling fram til i dags som tilsier at intensiteten har økt med 40-50 % mellom årene 1968-2000. Som følge av klimautviklingen som er registrert vil vi i mange år frem i tid få større og mere intenst nedbør i Norge (*Vann- og avløpsteknikk* 2012).

### 3.4 Framtidens overvannshåndtering

For å behandle overvann på en god måte må metodene tilpasses de lokale forhold og behov. Løsningene skal være av bærekraftig karakter og tilføre omgivelsene

kvalitet. Den optimale håndteringen av overvannet vil være å få vannets overflate synlig i vassdrag og bybilde. Det gjør at arealplanlegging, landskapsarkitekter og byggherrer har en viktig rolle for å optimalisere god funksjonalitet av overvannet.

For å oppnå de beste resultatene for overvannshåndtering fra klimaeffektene trengs det en fremgangsmåte som sikrer gode resultater. Det er utviklet en eksempelstrategi for tiltak mot klimaendringer i Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering basert på fem hovedpunkter (Lindholm et al. 2008).

- Målinger og innsamling av informasjon
- Dokumentasjon av nåsituasjonen
- Analyser av klimaendringenes virkninger
- Tiltak for kompensasjon av fremtidige økninger i forurensningsutslipp og flomskader
- Planer hvor hensynet til klimaendringer bør inn.

For å imøtekomme klimaendringenes virkninger på overvannssystemet bør det settes fokus på langsiktig arealplanlegging. Med bruk av Plan- og bygningsloven, Forurensningsloven og Vannressursloven kan man gi retningslinjer for håndtering av overvannsproblematikken. I kommuneplanens arealdel og kommunedelplaner bør det settes retningslinjer for håndtering av overvannet, flomsoner og spesielt utsatte områder. Ved private byggeprosjekter kan kommunen iverksette tiltak for overvannshåndtering før byggetillatelse blir gitt (Lindholm et al. 2008).

For å iverksette tiltaksplaner kan det brukes en Risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS). ROS analyser benyttes til å identifisere og prioritere risikoreduserende tiltak. Tiltakene kan være årsakreduserende (forebyggende) eller skade reduserende tiltak. Formålet er å gi offentlige instanser og andre berørte, en oversikt over farer, risiko og sårbarhet i arealplanleggingen. Det igjen kan forebygge uønskede hendelser i fremtiden (DSB & beredskap 2011).

### 3.5 Tiltak i avløpssystemet

Løsningen for å takle flomproblematikken i urbane strøk er å håndtere overvannet før det eventuelt dreneres bort i avløpssystemet. Det innebærer å sikre åpne flomveier på overflaten ved å bruke grønne infrastrukturer, veier og gater. Det kan brukes fotballbaner, fritidsarealer og andre egnede arealer for oppstuvning av eventuelle flomtopper for å redusere skader. Videre finnes det en rekke tiltak som rettes direkte mot framtidig forurensnings-utslipp og flomskader grunnet fortetting og klimaendringer (*Vann- og avløpsteknikk* 2012).

Tiltakene kan sorteres i følgende hovedprinsipper:

- **LOD:** Det innebærer å redusere eller forsinke til-renning til avløpssystemet ved å infiltrere overvannet lokalt.
- **Forsinkelser:** Demping og forsinkelser av flomtopper før det går i avløpsnett. Man kan bruke strupeplater på gatesluk, åpne vannveier, dammer, våtmarker etc.

- **Fordrøyning:** I avløpssystemet kan man bruke fordrøyningsbaseng, heving av overløpskanter, bevegelige overløpskanter etc.
- **Økning av rørkapasitet:** Gjennomføres ved å blokke ut eksisterende rør, utskiftning til større dimensjoner, etablere nytt glatt belegg for å redusere fiksjonen og rehabilitering av kummer med dårlig hydraulisk linjeføring. LOD bør benyttes før man etablerer en økning av rørdiameter grunnet kostnader.
- **Omdirigering:** For å redusere eventuelle flaskehalsen kan avløpet omdirigeres til andre områder med bedre kapasitet.
- **Rensende overløp:** Konsentrerte forurensninger i fellessystemet sendes videre til renseanlegg.
- **Separering av fellessystem:** Dette er et kostbart tiltak. Fordelen er at man kan holde tritt med den gradvis økende klimaforverringen (Lindholm et al. 2008).

### 3.5.1 Klimafaktor ( $K_f$ )

Klimafaktoren for nedbør er en tallverdi som skal vise størrelsen på utviklingen klimaforandringene. Faktoren blir multiplisert med verdier tatt ut fra en IVF-kurve og brukt som den dimensjonerende regnintensiteten. Størrelsen på faktoren kan være basert på forskjellige kriterier og prinsipper. Påslaget på IVF-kurvene varierer fra 20 – 50 % avhengig av antall år fram i tid det skal dimensjoneres for og finnes i gjeldende retningslinjer fra fagmyndighetene. Den danske spildevandskomitéen har anbefalt klimafaktorens størrelse med gjentakelsesperioden for dimensjonerende regn, som vist i tabellen under.

Tabell 2. Spildevandskomitéens anbefalte klimafaktorer (Oddvar Lindholm 2012).

Gjentakelsesperiode	2 år	10 år	100 år
Klimafaktor	1,2	1,3	1,4

Hvis prognosene tilsier en økning i klimaendringer på 50 % i løpet av 100 år kan vi anta en lineær utvikling, ifølge DANVA (2007). Ved å øke regnintensiteten vil man kunne finne i hvilke tidsperiode ulike systemkomponenter svikter funksjonskravene (Lindholm et al. 2012). Spildevannskomiteen i Danmark har gjort noen erfaringer med en undersøkelse av regnintensiteter fra 1997-2005. Det viste seg at intensiteten hos sterke regn økte med mere enn 20 % (Bekkum 2012).

For hvert enkelt prosjekt må det tas stilling til hvilken klimafaktor som skal gjelde. Noen kommuner har valgt hvilke klimastrategier som bør leggestil grunne for valgte klimafaktorer for de aktuelle prosjektene. Statens Vegvesen anbefaler at klimafaktoren settes mellom 1,3 – 1,5 på dagens IVF-kurver ved beregning av regnvannsavrenning (Vegvesen 2011). Flere kommuner inkludert Oslo har satt klimafaktoren til 1,5 som dimensjonerende kriterier for utvikling av nye og eventuelle rehabilitering av eldre rørsystemer.

### 3.5.2 Lokal bestemmelse for Ås

- «Ås kommune har satt normalavrenningen til 50 l/s ha, dvs 5 l/s da.
- Det skal benyttes 10 års-regn i 20 minutter. Faktoren er 15 l/s da.
- Det må beregnes hvor mye vann som tilføres kommunalt nett ved denne faktoren i 20 minutter. Fordrøyningen skal dimensjoneres slik at vannet som tilføres kommunalt ledningsnett i 20-minuttersperioden ikke overstiger normalavrenningen.
- I spesielle tilfeller kan kommunen kreve at overvannsmengden til aktuell resipient skal reduseres i forhold til før-situasjonen» (Ås kommune 2012)

### 3.5.3 Manuell beregning av avrenning

For å kunne dimensjonere avløpssystemer på en tilfredsstillende måte kan manuell beregning av avrenning brukes. De mest benyttede manuelle metodene er tid-arealmetoden, enhetshydrogrammetoden og summasjonsmetoden.

Tid-areal metoden for beregning av avrenningen kan uttrykkes slik:

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

hvor

$Q$  = vannføring

$\varphi$  = avrenningskoeffisient

$A$  = nedslagsfelt

$I$  = regnintensiteten

$K_f$  = klimatillegg

For å bruke formelen trenger man en avrenningskoeffisient( $\varphi$ )<sup>6</sup>, et avgrenset område ( $A$ ) og regnintensitet fra IVF-kurver og klimafaktoren. For å benytte metoden må regnskyllets varighet være lik nedbørsfeltets konsentrasjonstid. For å finne konsentrasjonstiden summerer man den største tilrenningstiden på overflaten og strømningstiden i ledningene. Usikkerheten i modellen ligger i hvordan arealene er utformet. Er arealet ikke rektangulært kan det gi feil flomtidspunkt i øvre eller nedre deler av feltet ved valgt varighet. Å definere avrenningskoeffisienten kan også være vanskelig hvis området har variert permeabilitet.

Ved summasjonsmetoden beregner man avrenningen ved først å ha konsentrasjonstiden lik regnskyll og så summerer man alle tilløp til det gitte ledningsstrekket. Ved enhetshydrogrammetoden baserer metoden seg på målte avrenningsverdier. Metoden egner seg best til avrenningsberegninger i eksisterende nett.

---

<sup>6</sup> Avrenningskoeffisienten beskriver forholdet mellom nedbøren og avrenningen fra et gitt område. Koeffisienten er ikke stabil over tid og er avhengig av permeabiliteten og fallforhold.



Det å bruke manuelle metoder for beregning av overvann har sine begrensninger. Ved felt som er større enn 10 km<sup>2</sup> kan dimensjoneringen med manuelle beregninger gi store usikkerheter (Vegvesen 2011). Forskjellene i frekvenskurvene for nedbør og avrenning kan også skape en usikkerhet i modellen, men det er ikke alltid en sammenheng mellom nedbør og avrenning slik formlene viser. Fastsettelse av avrenningskoeffisienten kan være vanskelig og utgjør et usikkerhets-moment for modellene (Vegvesen 2011).

## **4. Regndata**

I oppgaven er det benyttet to former for regndata. Et for kalibrering av simuleringsverktøyet SWMM og et for analyser for fremtidig avrenning ved et fremtidig klimasenario.

### **4.1 Virkelig regndata**

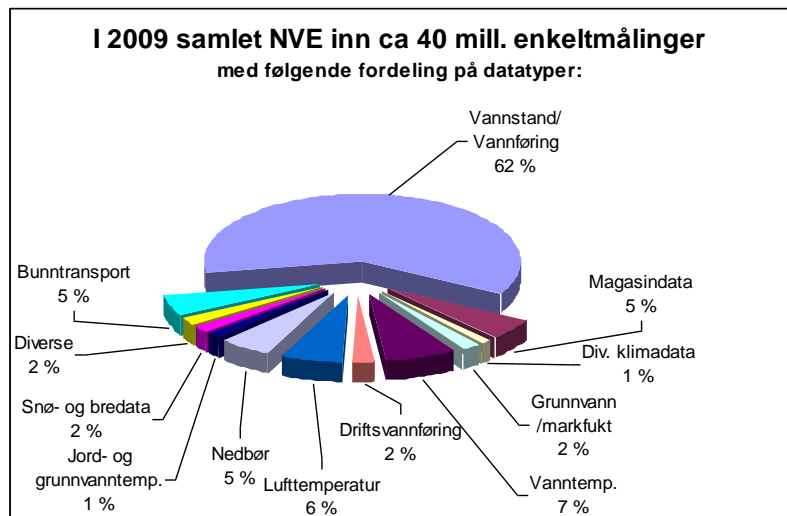
Under kalibreringen ble det brukt virkelige regndata som er registrert på 5.17 Rustadskogen værstasjon. Rustadskogen værstasjon registrerer temperatur målinger, måling av vannavrenning fra Rustaskog feltet, nedbørmålere, måling av fuktighet, vanntemperatur og snø-smeltekar. Værstasjonen har fram til i dag vært Ås kommunes ansvar for å opprettholde registreringer ved stasjonen for NVE. Fra april 2013 er det opprettet et samarbeid mellom NVE, Ås kommune og linjeforeningen Aquariås som har fått som oppgave å overta ansvaret for registreringene og kontrollene ved værstasjonen. Dette vil gi studenter en viktig innsikt i dataregistrering og instrument kjennskap. Dette datamaterialet baserer seg på målte verdier fra to forskjellige vippe-pluviometer siden 1974. Begge nedbørmålerne består av en sylinder formet trakt som fanger opp regnvannet. Under trakten er det to små kar som vipper til hver sin side ettersom karene fylles opp. I nyere tid er pluviometeret skiftet ut fra Plumatic til dagens pluviometer av typen Lambrecht som inkluderer et varmeelement som kan gi tilstrekkelig sikre nedbørsdata også i vintersesongen. For hver vippe måles det 0,1 millimeter og intensiteten av regnet er tatt hensyn til når antall vipp transformeres til millimeter. Det er ikke montert vind skjerm på denne stasjonen (met.no 2010)

Kvaliteten på datamaterialet må anses som meget gode, siden det er jevnlig manuelle kontroller på dataseriene og instrumentene. Antall kontroller har vært varierende, men skal etter dagens situasjon kontrolleres hver 2. uke.

#### **4.1.1 Hydra II**

Hydra II er et system som NVE bruker for å lagre, kontrollere bearbeide analysere og presentere hydrologiske og metrologiske data. I Hydra II ligger det et databasesystem hvor dataene og informasjonen er lagret og kan enkelt hentes ut. Disse dataene baserer seg på målte verdier over hele Norge inkludert Svalbard. Det er 700 vannstand/vannføring stasjoner, 800 magasin-stasjoner hvor 500 ukentlig blir ajourført, 30 snø-puter, 11 massebalanse stasjoner på bre, 60 grunn- og

markvann stasjoner, 430 is- og vanntemperatur stasjoner og 25 sediment stasjoner og diverse andre meteorologiske målingsstasjoner.



Figur 7. Måletyper innenfor Hydra II (Taksdal. 2013)

Data materialet som legges inn i Hydra II har en referanse slik at alt kan spores og gjør det enklere ved eventuelle analyser og beregninger. I dette tilfelle, så har Rustadskogen stasjonsnummer 5.17 hvor hver enkelt parameter, som for eksempel avrenning har referanse 1001.1. Dataene blir lagret i forskjellige tabeller, avhengig av oppløsning i tid og rom og på hvilket plan i kvalitetskontrollen er på. Systemet i Hydra II er forsøkt å være enkelt og er bortimot kompatibelt med de fleste andre lignende systemer som finnes i dag. Behovet for lagring fra andre instanser med samme og ulike datatyper har økt med tiden Hydra II har vært i drift. Det har så langt vist seg at datamodellen og grunnleggende rutiner har dannet en god og fleksibel basis for endringer og utvidelser.

## 4.2 Konstruert regn

Basert på registrerte data fra IVF-kurven kan man beregne seg fram til et konstruert regn som er tilnærmet det virkelige. En slik tilnærming kan forklares ved å konstruere et symmetrisk regnhyetogram. Grunnen for å bruke et regnhyetogram er at regn som er så sterke at de er dimensjonerende, sjelden har en konstant regnintensitet. Fordelen er at den er mere realistisk enn et kasseregn skulle tilsi. Hyetogrammet gir en dimensjonerende vannføring i hele nettet i en og samme beregning. «Grunnen til dette er at regnhyetogrammet i sin mest intense del inneholder virkningen av korte regn som er dimensjonerende for de øvre deler av ledningsnettet som har korte konsentrasjonstider, mens hele hyetogrammet vil virke dimensjonerende for de nedre deler av nettet som har lengre konsentrasjonstider» (Oddvar Lindholm 2013). For å bruke regndata fra IVF-kurver må det forutsettes at det finnes en mengde data med god kvalitet og kontinuerlige oppdateringer (Lindholm 2011c). På bakgrunn av dette er det blitt brukt IVF-kurve fra Ås Rustadskogen for å konstruere de symmetriske regnhyetogrammene.

### 4.3 Dimensjonerende gjentaksintervall

For å oppnå best resultat når et avløpssystem skal dimensjoneres, bør samfunnsøkonomiske og bærekraftige betraktninger ligge til grunn. Dette kan imidlertid være kostbart for mindre prosjekter og derfor benyttes det en norsk standard for optimal dimensjonering basert på gjentaksintervall. Norsk Standard NS-EN 752 har en liten svakhet siden den beregner separat og fellessystem som likeverdige i risikovurderingen. Norsk Vann har utarbeidet en anbefaling som skiller mellom separat og fellessystemer. De er strengere i dimensjoneringskriteriene og regnes som minimumskrav for systemene.

\* Ledningsnettets skal bare fylles til topp av rør ved dimensjonerende regnskyll-hyppighet.

\*\* Oversvømmelsesnivået skal normalt regnes til kjellernivået (90 cm over topp rør)

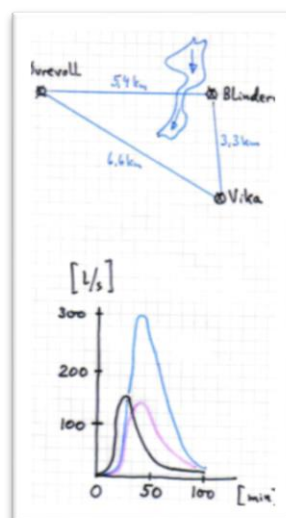
Tabell 3. Norsk vanns anbefalte minimumskrav for separat- og fellessystem (Lindholm et al. 2008).

Dimensjonerende regnskyllhyppighet* (1 i løpet av "n" år)	Plassering	Dimensjonerende oversvømmelses-hyppighet** (1 i løpet av "n" år)
1 i løpet av 5	Områder med lavt skadepotensiale (utkantområder, landkommuner etc)	1 i løpet av 10
1 i løpet av 10	Boligområder	1 i løpet av 20
1 i løpet av 20	Bysenter/industriområder/forretningsstrøk	1 i løpet av 30
1 i løpet av 30	Uderganger/områder med meget høyt skadepotensiale	1 i løpet av 50

### 4.4 Usikkerhet i regndata

Nedbøren i et bestemt tidspunkt i et gitt område kan variere mye selv over korte avstander på noen få kilometer.

Figuren viser beregnede hydrogrammer i samme nett, men med data fra tre ulike pluviografer noen km fra hverandre. (Lindholm 2011b)



Figur 8. Regncelle avgir forskjellige regnintensitet per areal (Lindholm 2011b).

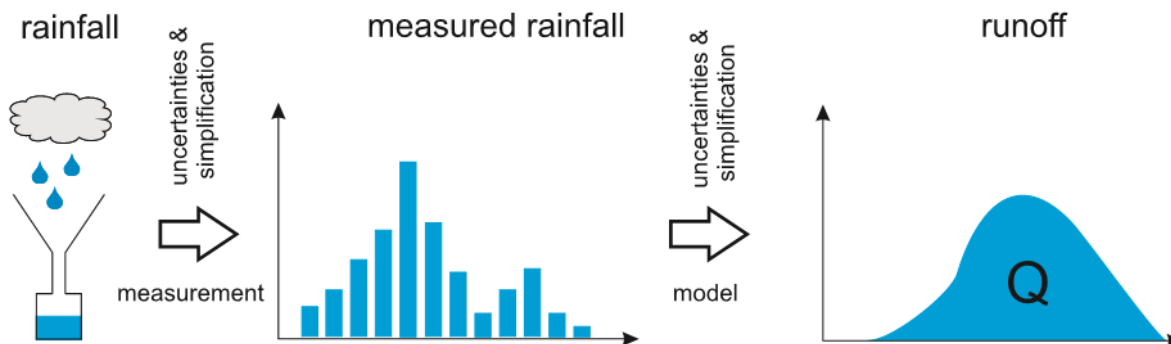
Figuren forklarer at et målt regn ikke nødvendigvis kan kobles direkte til avrenningen på grunn av at nedbørsmengden i feltet kan avvike fra målestasjonens nedbørsmengder.

Transporten av en regncelle som eventuelt følger hovedretningen til avrenningen vil kunne gi utslag på Q-maks ved utløpet. Ved å la en regnbygge følge avløpsvannets hovedretning nedstrøms i nettet og med vannets hastighet på ca. 2 m/s, fikk man en økning i Q-maks for overvann på ca.10 % i forhold til et stasjonært regn (Lindholm 2011b).

## 5. Matematiske modeller

For å oppnå en mest mulig korrekt tilnærming av virkeligheten må kunnskapene om hydrologiske prosesser benyttes for å etablere matematiske beskrivelser av systemet. Ved slike matematiske modellverktøy kan en få oversikt over systemet og parametere som blir brukt og simulere hendelser mange ganger raskere enn ved manuell beregning. Det gjør det enklere og billigere å komme frem til et resultat uten å måtte bruke fullskala-systemer (Lindholm 2011a).

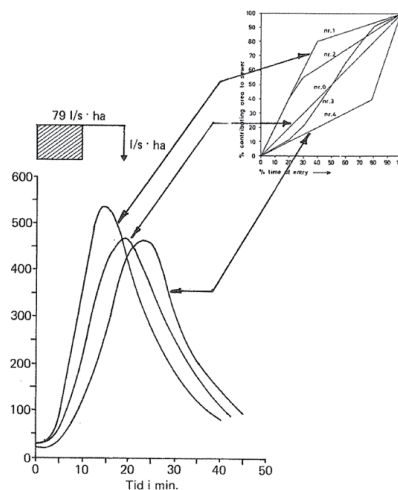
Slike modeller kalles gjerne for urbanhydrologiske avløpsmodeller. Det finnes to ytterpunkter for hydrologiske modeller hvor den *fysiske modellen* i den ene enden bygger på de fysiske lovene som styrer prosessene, ofte i form av differensiallikninger som beskriver masse og energi-flukser. Systemanalytisk tilnærming (black box modeller) baserer seg på empirisk etablerte relasjoner mellom system inngang og utgang uten å beskrive de fysiske egenskapene til systemet (Sælthun 2011). Ved bruk av matematiske modeller kan man tildele intervallene ulike verdier for avrenningskoeffisient og regnintensitet. Dette gjør det mulig å tilnærme seg virkeligheten grunnet variasjon i regnintensitet og avrenningskoeffisient over tid. En annen viktig fordel med matematiske modeller er å kunne beregne oppstuvning i ledningsnett basert på dynamiske bølgeanalyser. Ved manuell beregning er dette en begrensning (Lindholm et al. 2008). For å få et best mulig resultat må det baseres på forsvarlige målinger og kalibreringer. Det vil fremdeles være usikkerheter i modellen som vil påvirke resultatene.



Figur 9. målte nedbørsmengder i modell gir simulert avrenning (Kleidorfer 2009).

## 5.1 Tid-areal kurve

Tid-areal kurve forklarer hvilken tid av andelen avrenningen i et nedslagsfelt. Det gjør at kurven justeres i forhold til hvilken utformingen et nedslagsfelt har. Ved rektangulært areal vil fordelingen av avrenningen være linjært som forklart i forløp 0 i Figur 10. Justeres tid-areal kurven kan variasjonene bli store slik figuren viser. Det kan gjøre at tiden for Q-maks kan forandre seg i tid og mengde, det samme vil skje med grafens utforming. Figuren er basert seg på et areal på 58 ha med et nedbør på 79 l/s ha i 10 minutter. Figuren er basert på et forskning med lengde i N-S retning på 2,3 km og arealet på nedslagsfeltet er 58 ha. Nedbøren var 79 l/s ha i 10 minutter. Variasjonene i fra de to ytterpunktene er på 15 % ved maksimal avrenning som er definert som en moderat følsom parameter (Lindholm 1986).



Figur 10. Forskjellige tilrenningskurver fra forskningsprosjektet Søren Jaabæks gate (Lindholm 1986).

## 5.2 Modellmiljø

Det valgte modellmiljøet i denne oppgaven er basert på programvaren SWMM av United States Environmental Protection Agency (EPA), som er et gratis-program nedlastet fra EPA sine nettsider. Programvaren vil bli nærmere beskrevet i dette kapitlet.

## 5.3 SWMM

EPA Storm Water Management Model (SWMM) er en simuleringsmodell basert på dynamisk nedbør-avrenning som brukes for enkelt-hendelser eller lange (kontinuerlig) simuleringer av avrenning primært for urbane områder. Avrenning i SWMM opererer med en samling av nedslagsområder (*Subcatchment*) som regn faller på, som igjen genererer avrenning. Routing-delen av SWMM transporterer denne avrenningen gjennom et system av rør, kanaler, lagrings/behandlingsenheter, pumper og regulatorer. SWMM sporer mengden og kvaliteten på avrenningen som genereres fra nedslagsfelt, og strømningshastigheten, strømningsdybden, og kvaliteten på vannet i hvert rør og kanal under en simuleringsperiode bestående av flere tids-steg. SWMM ble først utviklet i 1971 og

har gjennomgått flere store oppgraderinger siden da. Den nåværende utgaven, Versjon 5, er blitt renskrevet siden den siste forrige utgivelsen. Som et gratis-program blir SWMM brukt over hele verden for planlegging, analyse og design relatert til overvann, fellessystemer, separatsystemer og andre avrenningssystemer i urbane områder. SWMM kan bare kjøres på Windows Plattform. For andre plattformer må SWMM pakkes inn i et emulerings program som Wineskin. Programmet Wineskin åpnes i Mac eller Linux som igjen åpner simuleringsprogrammet SWMM. SWMM 5 viser et integrert system hvor man kan studere inngangsdata, kjøre hydrologiske, hydrauliske og vannkvalitets-simuleringer, og kan vise resultatene i en rekke formater. Det inkluderer fargekodet drenering av området og transport system i kart, tidsserier i grafer og tabeller, profil-plott og statistiske data. Den siste omskrivingen er produsert av Water Supply and Water Resources Division of the U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory med assistanse fra konsulentfirma CDM, Inc (EPA 2010).

### **5.3.1 Regn**

Regn «Gages» leverer nedbørs-data for ett eller flere nedslagsområder i det modellerte området. Nedbørdataen kan enten være brukerdefinerte tidsserier eller komme fra en ekstern fil. De viktigste inngangsegenskaper av regn «GAGES» inkluderer:

- Opptaks tidsintervall (f.eks., hver time, 15 minutter, etc.)
- Nedbør datatype (f.eks. intensitet, volum, eller kumulative volum)
- Kilde nedbør-data (input tidsserier eller ekstern fil)
- Navn på nedbør, datakilde

### **5.3.2 Delfelt (*subcatchment*)**

Delfelt/nedslagsfelt er den hydrologiske enheten av et landområde hvor topografi og avløpssystemer leder overflateavrenning til et enkelt utslippspunktet. Man deler opp området til passende antall nedslagsområder, og identifiserer utløpspunktet med hver nedslagsfelt. Utløps-punkter kan enten være noder i et avløpssystem eller andre nedslagsfelt. Nedslagsarealet kan deles inn i permeable og/eller tette flater. Overflateavrenning infiltreres i den øvre delen av jordsmonnet av det permeable arealet, mens tette flater har en direkte avrenning til avløpssystemet. Tette flater er igjen delt inn i to delområder, den ene har grop-magasinerings mens den andre delen ikke har grop-magasinerings. Avrenningen fra delområdene i nedslagsarealet kan routes til et annet delområde, eller begge kan routes til nedslagsfeltets utløp (EPA 2010).

Infiltrasjon av nedbør fra permeable arealer av et nedslagsfelt til umettet jord kan forklares med tre forskjellige metoder

- Horton infiltrasjon
- Green-Ampt infiltrasjon
- SCS Curve Number infiltration

For å simulere akkumulering, re-distribusjon og smelting av nedbøren som faller som snø på et nedslagsareal, må det lages et «Snow Pack» objekt. Å simulere grunnvannsstrømning mellom en akvifer under nedslagsfeltet og en node av et dreneringssystem, må det tilføre visse grunnvannsparametere. Opphopede forurensninger på nedslagsarealet er knyttet til arealbruken av nedslagsfeltet (EPA 2010).

Andre viktige parametere for å danne et nedslagsfeltet er:

- Tildeling av en regnsekvens
- Registrering av utløp
- Areal
- Bredder på arealet
- Tette flater i prosent
- Helning på nedslagsarealet
- Mannings  $n$  for overflate-avrenning både permeable- og tette flater.
- Grop-magasinerings for permeable- og tette flater.
- Prosent av tette flater uten grop-magasinerings.

### 5.3.3 Rør

Rør blir brukt som et ledd mellom to noder/kummer for å transportere vann. Det finnes et variert utvalg av forskjellige rørfasonger i programmet. Åpne, lukkede og selvdesignede tverrsnitt på for eksempel bekker er mulig.

SWMM bruker Mannings ligning til å uttrykke forholdet mellom strømningshastighet ( $Q$ ), tverrsnitts-areal ( $A$ ), hydraulisk radius ( $R$ ), og helning ( $S$ ) i åpne kanaler og delvis fulle lukkede rør.

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

hvor

$Q$  = strømningshastighet

$A$  = tverrsnitts-areal

$R$  = hydraulisk radius

$S$  = helning

$n$  = Mannings ruhetkoeffisient

Ved stabil strømning og kinematisk bølge-strømnings routing, er  $S$  beskrevet som helningen til røret/grøften. For Dynamisk bølge blir  $S$  friksjons helningen det vil si tapshøyde per lengde (EPA 2010).

Andre viktige inputparametere for rør er:

- Navn på inn- og utløps noder
- Høyde over havet ved inn- og utløps-noder
- Lengde

- Mannings ruhet
- Tverrsnitts-geometri
- Friksjonstap ved innløp og utløp

### 5.3.4 The Saint-Venant Equations

For simulering av strømming i overvannsrør i SWMM brukes det to forskjellige ligninger, bevaring av masse og moment ligningen for gradvis variert, ustø strømming. Det vil si Saint Venants strømnings-ligning eller kontinuitetsligning. SWMM har tre forskjellige variasjoner av strømningsligninger (EPA 2004).

- Steady Flow Routing
- Kinematic Wave Routing
- Dynamic Wave Routing

I denne oppgaven er det brukt den mest avanserte ligningen basert på Saint Venants endimensjonale strømnings-ligning. I rør brukes kontinuitets- og moment-ligninger og volum-kontinuitet-ligning ved kummer.

Med denne form for 'routing' er det mulig å representere trykkstrømmen når lukket ledning er full, slik at strømmene kan overskride full strømming.

Oversvømmelse oppstår når vanddybden på en node overskrider den maksimalt tilgjengelige dybde, og det overskytende vannet enten er tapt fra systemet eller kan få en oppstuvning ved senere igjen bli tilbake ført til dreneringssystemet.

Dynamisk bølge-routing kan utgjøre kanal lagring, bakevje, inn- og utløpstap, reversert strømming og trykkstrømming.

Saint Venants ligninger kan forklares med massebevaring (DHI 2004):

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

Og momentbevaring:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(I_0 - I_f) = 0$$

hvor

$Q$  = vannføring

$A$  = strømningsareal

$x$  = avstand i strømningsretning

$t$  = tid

$\alpha$  = hastighets distribusjonskoeffisient

$y$  = strømningsdybde

$g$  = tyngdeakselerasjon

$I_0$  = bunnhelning

$I_f$  = friksjonshelning



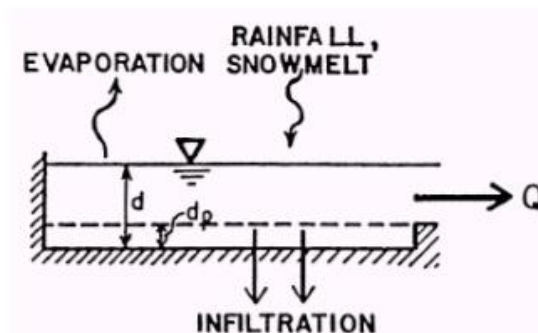
### 5.3.5 Dynamisk bølge-routing

Dynamisk bølge-routing løser Saint Venants endimensjonale strømnings ligninger og derfor skaper den det mest teoretisk nøyaktige resultatet. Disse ligningene består av kontinuitet- og moment-ligningene for rør og en volum-kontinuitets ligning på noder. Med denne form for routing kan man oppnå trykkstrømninger i rørledningene. Flom eller oppstuvning oppstår når vanddybden på en node overskrider den maksimalt tilgjengelige dybden, og det overskytende vannet forsvinner fra systemet eller det kan hope seg opp for så senere å re-entre dreneringssystemet.

Dynamisk bølge-routing kan utføre kanal lagring, bakevje, inngang/utgangs-tap, tilbakeslag, og trykkstrømninger. Fordi det kobler sammen løsningen for både vannstand på noder og strømninger i rør kan det brukes til generelle nettverk, selv de som inneholder flere nedstrøms avsporinger og tilbakeføringer. Ved bruk av Dynamisk bølge i modellen er man avhengig av kortere tidsintervaller.

### 5.3.6 Overflate avrenning

SWMM forklaring på hvordan overflateavrenning fungerer er forklart med illustrasjonen under. Hvert av nedslagsarealene er behandlet som et ikke-lineært reservoar. Tilsiget kommer fra nedbør og eventuelle tilkoblinger fra andre nedslagsarealer. Det er flere utløp fra arealet som infiltrasjon, fordampning og overflate avrenning. Den størst mulige tilbakeholdelse eller oppstuvning av vann er grop-magasineringsen. Overflate avrenning per areal skjer bare når grop-magasineringsen ( $d_p$ ) overskrider dens kapasitet og man får avrenning  $Q$ . Dybden over nedslagsarealet blir kontinuerlig oppdatert ved numerisk å løse en vannbalanse-ligning over nedslagsarealet.



Figur 11. Sjematisk forklaring av overflateavrenning. (EPA 2010)

### 5.3.7 Infiltrasjon

Infiltrasjon er en prosess hvor regnvann faller på nedslagsarealet og trenger seg ned i den permeable umettede jord-sonen. Det finnes tre forskjellige modellerings alternativer for simulering av infiltrasjon. Hortons ligning, Green Ampt metode og avrenning Curve Number. Vi skal ta for oss Hortons ligning (EPA 2010).

Hortons ligning:

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

hvor

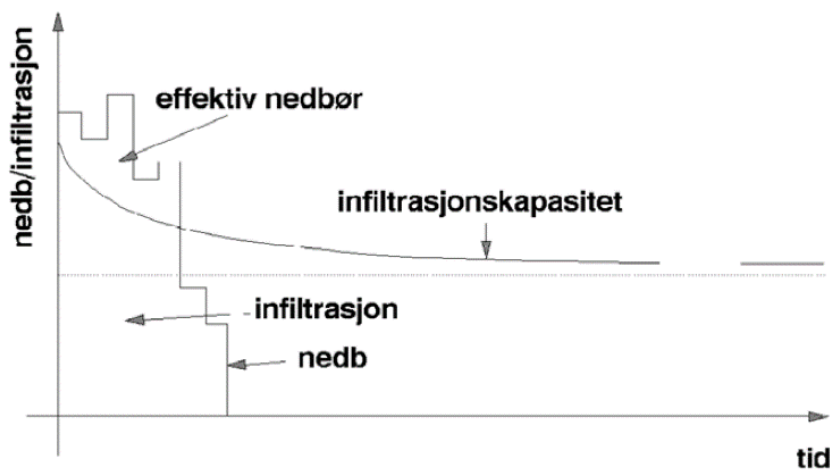
$f_t$  = infiltrasjonshastigheten per tidsenhet

$f_0$  = maksimum infiltrasjons rate

$f_c$  = er likevekt i infiltrasjonen etter at jorden har blitt mettet dvs minimum infiltrasjon rate

$k$  = reduksjons konstanten for jordinfiltrasjon

Hortons ligning er en variasjon på å måle infiltrasjonen eller volumer. Den er basert på empiriske observasjoner som sier at infiltrasjon starter på en konstant rate  $f_0$  og avtar eksponentielt med tiden  $t$ . Etter en tid når jordmetnings nivået når en viss verdi, vil frekvensen av infiltrasjonen flate ut mot verdien av  $f_c$ . (Sons 2005)



Figur 12. Effektiv nedbør (Hortons metode) (Sælthun 2011).

Inndataparametere i SWMM krever ut fra denne metoden en maksimum og minimum infiltrasjons-sats, en faktor som forklarer hvor fort satsen reduseres over tid og tiden det tar til at den fullstendige mettede jorden igjen er tørr.

Horton tar ikke hensyn til andre flater enn infiltrasjonsflater. Tette flater og andre lignende flater som åpne vannflater tar ikke Horton hensyn til. Avrenningen skjer bare når regnvannet overskrider infiltrasjonskapasiteten i det gitte område. Ved simulering i urbane områder er det en fordel å kunne skille tette-flater og infiltrasjons-flater for best mulig å tilnærme seg virkeligheten.

### 5.3.8 Oppstuvning

Når kapasiteten til et system overbelastes vil det skape oppstuvning i kummene. Ved ekstreme tilfeller vil det flomme over topp kum. Her finnes det flere metoder for å behandle oppstuvningen. Det kan flomme over og forsvinne ut av systemet og bli tapt for alltid, eller man kan rute det videre via flomveier til et eventuelt nedenforliggende sluk. Det finnes et alternativ til hvor det overskytende volumet lagres oppå Noden/kum. Det registreres som oppstuvning i areal  $m^2$  hvor det re-

entres systemet når kapasiteten tillater det. I denne oppgavens modell vil denne areal sette til 1000 m<sup>2</sup> for å forsikre seg om at alt vannet i systemet blir med og ikke går tapt.

#### **5.4 Usikkerhet i modeller**

Beregnings-modeller er basert på matematiske tilnærminger av prosesser og kan gi en viss usikkerhet i beregningsresultatene. I tillegg kan innhenting av data, egen grad av kunnskap og forståelse av de fysiske prosessene være kilde til usikkerhet.

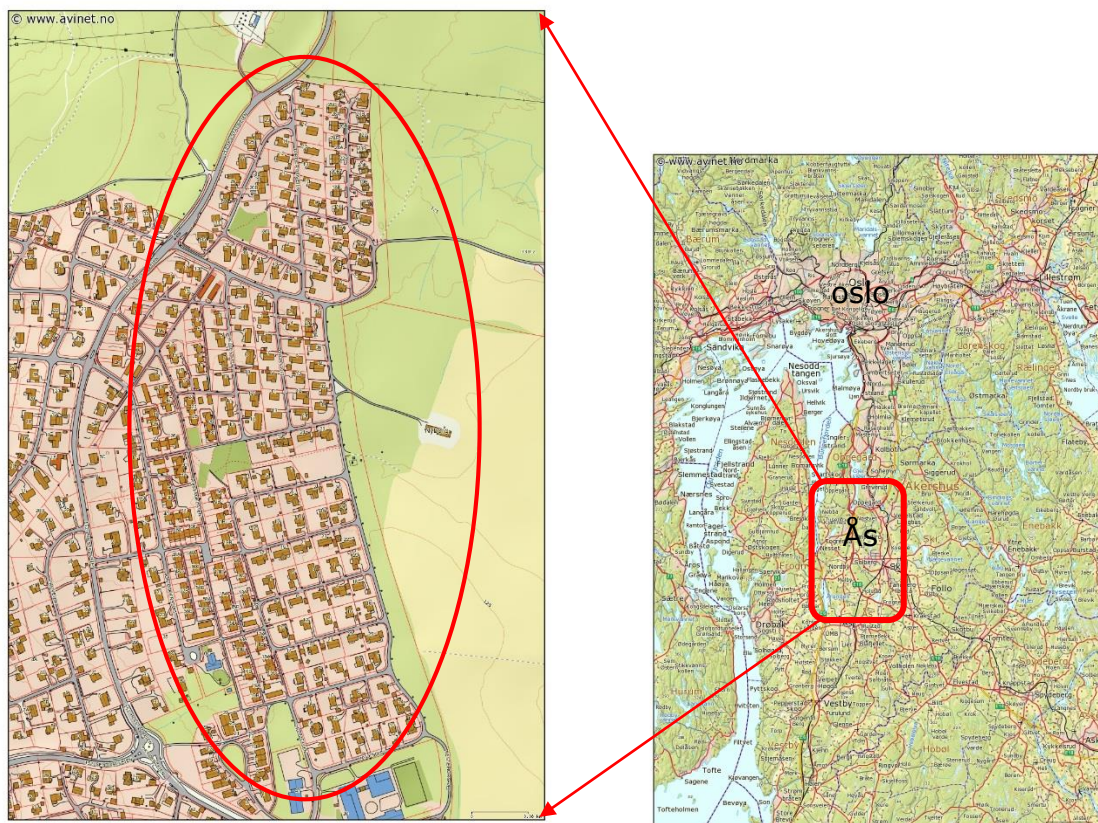
For å redusere risikoen for usikkerhet i modellen må det gjennomføres en følsomhets analyse av viktige parametere for å se hvilke som vil gi mest utslag i forhold til resultatene (Lindholm 2011a).

# PRAKTISK DEL

## 6. Prosjektområdet

I den praktiske delen av oppgaven skal jeg besvare problemstillingene. Basert på teorien blir det gjennomført en følsomhetsanalyse av modellen, kalibrering for å oppnå en god modell og simulere framtidens klimautvikling med eventuelle tiltak.

Ås kommune ligger i Follo som er et av 3 distrikter i Akershus. Kommunen grenser til fire andre kommuner Vestby, Frogn, Oppegård og Ski. Kommunens administrasjonssentrum ligger i Ås sentrum. Ås kommune har 16 386 innbyggere (2010) som innebærer 144,2 innbyggere per km<sup>2</sup>. 84 % av Kommunens innbyggere bor i tettbebygde strøk (SSB 2013). Kommunen har en positiv økning i folketallet og vil se en markant økning når veterinærhøgskolen flytter inn i nye lokaler på UMB. Ås har for det meste leirjord med relativt store korndyrkende gårdsbruk. Kommunen har lite industri som bidrar til arbeidsplasser og inntekter for kommunen. Den største andelen for inntekt og arbeidsplasser er universitetet for miljø- og biovitenskap (Kommune 2013).



Figur 13. Rustadskogen boligområde, kart fra Statens kartverk (2013).

Ås kommune har i sin Kommuneplan (2011 – 2023) beskrevet Overvannshåndtering og flom sikring slik. «Detaljreguleringsforslag for bebyggelse og anlegg og for samferdsel skal inneholde nedbørsanslag og en plan som redegjør for hvordan overvann og flomvann håndteres på en miljøvennlig, effektiv og sikker måte.

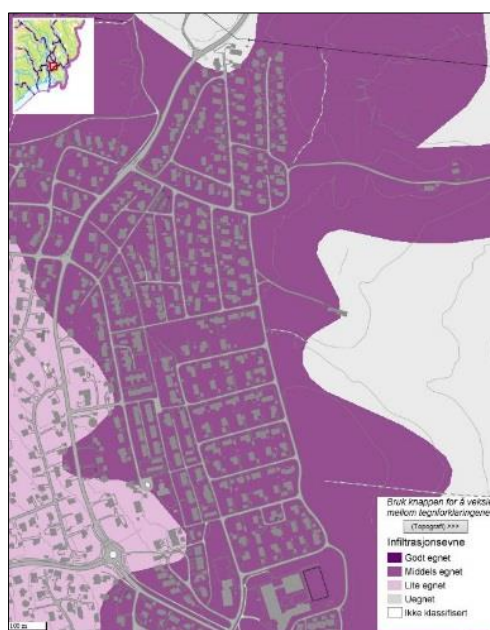
*Nedbørsanslag skal baseres på forventet fremtidig nedbørsregime som følge av klimaendring.» (Ås kommune 2012). Det skal utdypes i sin helhet og ferdigstilles som hovedplan sammen med avløp i løpet av 2014.*

Det avgrensede området som vist i Figur 13 (oversiktskartet) heter Rustadskogen og ligger øst for Ås sentrum og ble kalt opp etter gårdsnavnet som ligger i umiddelbar nærhet. Området har en eldre bebyggelse fra 1973 og har hovedsakelig eneboliger og noen delte boliger som bygningsmasse. Området er på 24,4 ha, hvorav 25,4 % er urbanisert hvor andel takflater utgjør 10,8 %, veiene 8 % og gangveiene utgjør ca. 6,1 % av det totale arealet.

Analysemodellen av feltet ble delt inn i 116 delfelt (subcatchments), 107 knutepunkter/kummer (nodes), 113 ledningsstrekninger (links) og ett utløpspunkt (outfall). Kommunen har ingen registrerte oversvømmelser eller skader på de årene som bebyggelsene har eksistert (Aarseth 2013).

Området har en østvendt helning hvor avrenningen fra området renner ut i Grytelandsbekken. Bekken fortsetter gjennom Skuterud-feltet og ut i Østensjøvannet som er betraktet som et eutrofiert vann og derfor betraktet som et sårbart nedslagsområde. Topografien til området Rustadskogen er tilnærmet likt over det hele med slak helning på ca. 3% i retning utløpets posisjon. Høyeste punkt ligger på 132,5 meter over havet (moh) og utløpet på ca. 120 moh. Vegetasjonen på nedslagsfeltet er hovedsakelig tilknyttet boligene som hager og beplantete fellesarealer med busker, gress og noe bjørketrær.

Grunnforholdene i område Ås kommune viser tydelige tegn på marine avsetninger med noe randmorene i utvalgte områder. Rustadskogen har for det meste marin strandavsetning og to små områder med randmorene (NGU 2013). Infiltrasjonsevnen av området er vist i Figur 14 og viser at evnen til infiltrasjon ligger i kategorien middels egnet.



Figur 14 Infiltrasjonsevnen fra Rustadskogen (NGU 2013).

## 6.1 Avløpssystemet

Avløpssystemet som er benyttet i Rustadskogen boligområder er basert på separatsystem med et overvannsnett og spillvannsnett i en og samme grøft. Oppgavens undersøkelse skal basere seg på overvannsnett for å finne optimale tiltak mot klimaendringer. Overvannsnett består av hovedsakelig betong-rør og kummer. Dimensjonene varierer fra 125 mm til 600 mm. Overvannet fra området renner ut i et utslippspunkt tilknyttet en bekk øst for boligfeltet. Overvannssystemet er tilknyttet tette flater som hustak, veier og noen parkeringsplasser. Veiene renner av til grøftene hvor vannet infiltreres på stedet og ned til grunnvannet. Når infiltrasjonskapasiteten har nådd sitt maksimum eller sin metning, vil vannet renne til nærmeste kum og videre til overvannsnett.

## 7. Kalibrering av Avløpsmodellen

### 7.1 Modelloppbygging

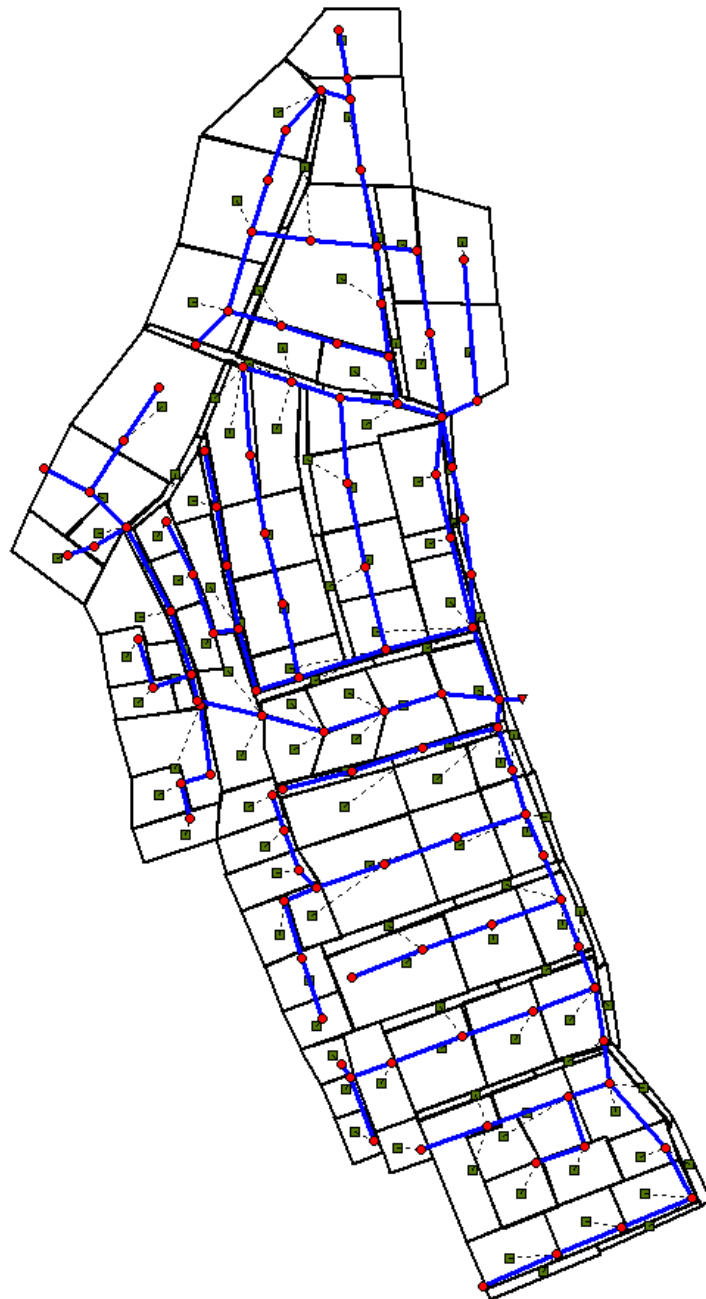
Modellen er bygget opp i samarbeid med 3 medelever i et prosjekt arrangert av UMB i faget THT300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer. Kum-dataene fra Gemini databasen ble lagt inn i SWMM5, mens det resterende av rør og parametere tilhørende kummer og ledninger måtte legges inn manuelt siden SWMM og Gemini ikke var kompatible med hverandre på visse områder. Dette ble utført høsten 2011. Det ble også lagt til kartgrunnlag i modellen, men ved en feil har hele modellen rotert litt og er derfor tatt ut av modellen igjen. Alle punkter er basert på x, y, z koordinater som definerer punktenes plassering i terrenget. Noen av metodene for oppbygging av modellen er forklart under:

#### Metode

- Nedslagsområdene (delfelt) ble delt inn i 116 delfelt basert på kartgrunnlag og visuell inspeksjon med tanke på avgrensninger og topografien. Delfeltene ble delt inn i tomter på 2 og to for å gjøre det enklere med utregning av tette flater fra hustak. Det ble lagt inn egne delfelt for veier i modellen. Figur 15 viser inndelingen av Rustadfeltet.
- Det er gjennomført noen justeringer av data fra Gemini databasen på grunn av at informasjon i Gemini ikke samsvarer med virkeligheten. Det kunne være høydekoter som ikke var i samsvar med topografien, rørtilknytninger som hadde forskjellige høyder i kummene osv. Enkelte kummer i anlegget var uten høydedata fra Gemini. Det ble derfor foretatt innmåling av disse. Topp av kumløkk ble målt med GPS og det ble tatt dybdemåling for å bestemme koten til ledningenes topp og bunn for å definere rørdiameter.
- Alle delfeltene er koblet til overvannssystemet. Disse tilkoblingene ble valgt ut fra antagelser om at delfeltets vann renner ned til nærmeste kum.
- Delfeltene til veiene er koblet til ledningsnett. De tette flatene fra vei er koblet direkte til permeable flater, det vil si at vannet fra veiene infiltreres i

grøftene. Ved en eventuell overbelastning av infiltrasjonen vil det flomme over og renne til nærmeste kum.

- Kalibrering av modellen baserer seg på 9 forskjellige virkelige regn-hendelser hentet fra Rustadskogen nedbørstasjon driftet av NVE. Videre forløp er forklart i oppgaven under delkapittel Kalibrering.
- Følsomhetsanalyse ble gjort for å dokumentere hvilken virkning de forskjellige parameterne hadde på modellen.



Figur 15. Inndeling i delfelter i Rustadskogfeltet.



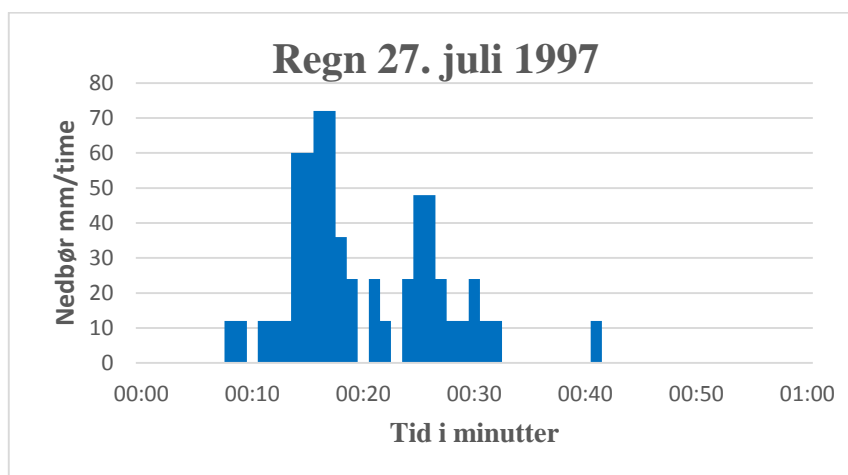
## 7.2 Regndata

**Metode:** Det er samlet inn regndata fra NVE sine databaser HYDRA II for å få ut virkelige regn hendelser og avrenningsdataserier som kan brukes for å kalibrere modellen. Det ble satt noen kriterier for regn-seriene og avrenningsseriene for å kunne sikre kvaliteten på kalibreringen. Noen av kriteriene er beskrevet under:

- En times varighet av regn- og avrenningsserier
- Avrenningen-verdien måtte starte på tilnærmet lik null
- Det må alltid være plussgrader under tidsseriene
- Det kan ikke være snø eller frost i bakken

Årsaken til disse kriteriene er å få nedbørsdataene og avrenningsdataene til å stemme overens. Målesystemet, som forklart tidligere, se kapittel Hydra II, har et usikkerhetsmoment som er vanskelig å kontrollere med tanke på feilregistrering av snø, regn, overflateavrenning, blokkering grunnet frost osv.

Det ble samlet inn ni forskjellige regn-serier med tilhørende avrenning. Fire av dem ble brukt for å kalibrere modellen og de resterende 5 ble brukt for å etterprøve modellens kvalitet med tanke på variasjoner i forhold til målte og simulerte avrenningsverdier.



Figur 16. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 27. juli 1997.

Resterende regndata ligger i **Error! Reference source not found.**

## 7.3 Kalibrering

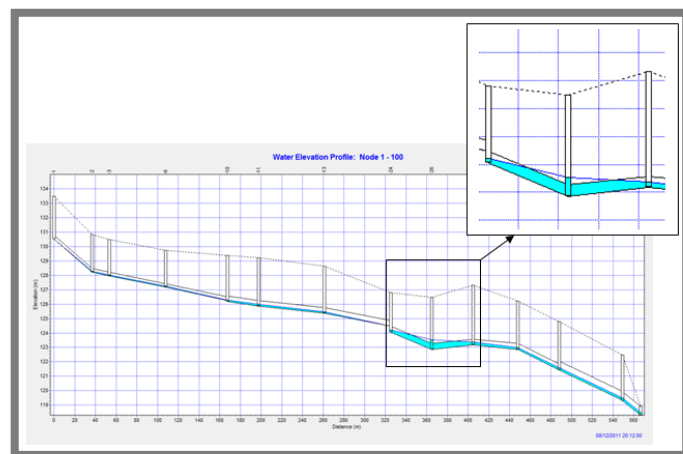
Definisjonen kalibrering er en samling av handlinger som under gitte betingelser oppretter forhold mellom verdier gitt av et måleinstrument, målesystem eller referansemateriale, materielt mål og verdier fra de realiserte normalene (Engan 2011). Av resultatene av kalibreringen skal det alltid refereres til modellens usikkerhet. Målet for kalibreringen avhenger av den spesifikke bruken av modellen. I dette tilfelle er det Q-maks som er viktig fordi modellen skal regne ut eventuelle oversvømmelser i ledningsnettets som igjen er avhengig av Q-maks (Barton 2010).

**Metode:** I en modell-oppbygging baserer man seg på antagelser, faglig vurdering og «best guess/engineering judgement» basert på et teoretisk datagrunnlag. Ved slike antagelser så vil modellen mest sannsynlig ha store avvik i forhold til den virkelige situasjonen modellen skal forestille. For å styrke modellens sikkerhet i forhold til levering av dataverdier må det justeringer til for bedre å representere fysisk oppførsel ved avløpsnett. Dette kan beskrives i tre steg:

- Modell-verifikasjon
- Modelfølsomhet
- Modellvalidering/etterprøving

#### 7.4 Verifikasjon

Ved verifikasjon ble modellen utsatt for et spesifikt regn av en gitt mengde for å se om nedbør og avrenning var i samsvar med utregningene. Det viste seg at mye av vannet ble liggende igjen i kummer hvor rør inn til kummen ikke var i samme høyde ut fra kummen og derfor med en mulighet for vannoppsamling. Det ble også registrert feil i høyder på rør og kummer som i ettertid er blitt etter-kontrollert med kommunens GIS program Gemini. Node 24 med tilhørende rør viste seg å være feilregistrert i Gemini og derfor etterprøvd ved måling av GPS. Etter disse forandringene i modellen viste modellen tilnærmet lik mengde nedbør med avrenning.



Figur 17. Maksimal oppstuvning i ledningsnett mellom kum 26 og 28 etter 13 minutter (Buhler et al. 2011)

#### 7.5 Følsomhetsanalyse

Følsomhetsanalyse kan forklares som en hva-hvis-analyse. Dette verktøyet kartlegger hva som skjer med verdiene hvis noen av størrelsene i modellen avviker fra basisforutsetningene. Resultatene kan illustreres i et stjernerdiagram. Et stjernerdiagram visualiserer flere separate følsomhetsanalyser i én og samme figur. Det angir dessuten nullpunktet for hver variabel ved skjæringen med horisontal akse og variabelens relative viktighet ved helningen på variabelens følsomhetskurve. Dette gjør at vi kan luke ut og analysere hver enkelt parameter for å vurdere følsomheten til modellen opp mot de andre parameterne. Følsomheten er den deriverte til kurvene.

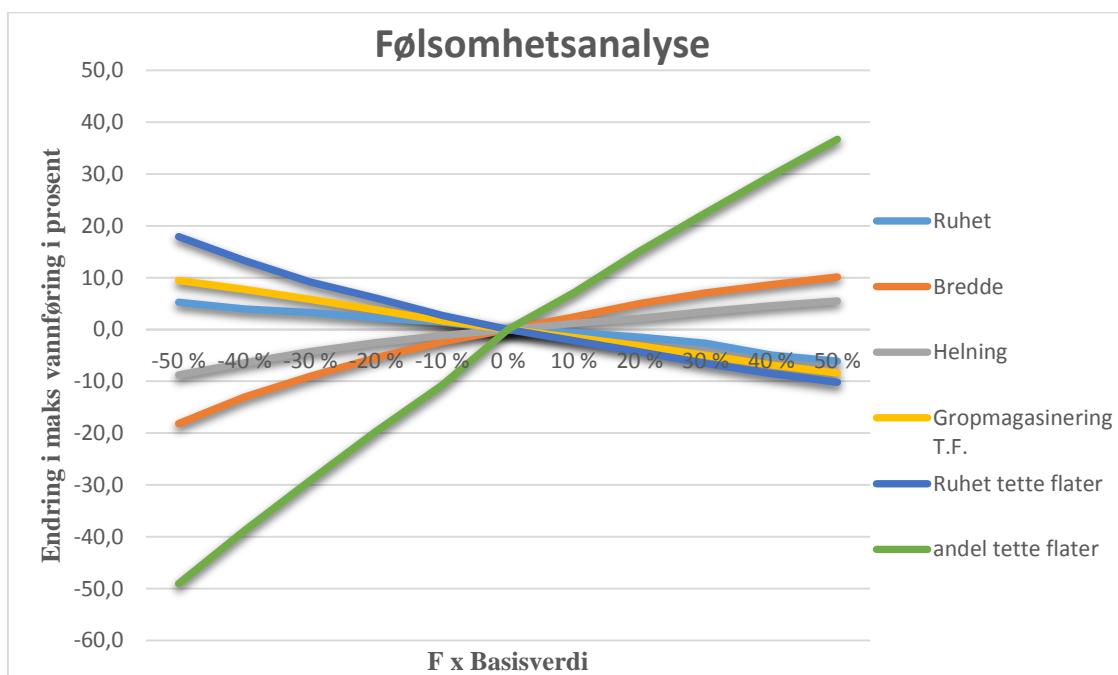
**Metoden** som ble brukt for å komme frem til resultatene for følsomhetsanalysen er basert på de parameterne som kunne være interessant å se om det har en virkning på modellen. Følsomheten gir utslag ved at Q-maks varierer med variasjonene i parameterne som er den mest relevante verdiene, Q-maks, for å finne følsomheten til en avrenningsmodell. Parameteren som ble brukt er som følge:

- Ruhet på rør
- Bredde
- Helning
- Grop-magasinerer
- Ruhet på tette flater
- Andel tette flater

Til-renningstiden for modellen blir kalkulert i forhold til bredden på delfeltet. Det vil si at til-renningstiden reduseres ved økt bredde på feltet og det motsatte vil skje ved innskrenking av bredden, altså økt til-renningstid. Dette er en viktig kalibrerings parameter i modellen for å justere på eventuell Q-maks hvis det skulle være behov for det. Når det gjelder å forandre utformingen av del-arealet for å redusere eller øke til-renningstiden i modellen, har ikke SWMM denne funksjonen. Alle delfelt beregnes som rektangulære delfelt, som igjen gir en usikkerhet i resultatene med tanke på å nærme seg en virkelighetsnær simulering.

### 7.6 Resultat av følsomhetsanalyse

Utgangspunktet for følsomhetsanalysen er tatt fra den kalibrerte modellen fra Oddvar Lindholm (Lindholm & Bjerkholt 2012) uten tillagte veier som tette flater. Følsomhetsanalysen er basert på den opprinnelige nedbøren fra 12.08.2009 som Oddvar Lindholm og studentene brukte under sine simuleringer. Det for å kunne sammenligne lettere datamateriale med oppgavens modell.



Figur 18. Følsomheten basert på endringer i basisverdi fra Tabell 4.

Figur 18 viser de enkelte parameterens påvirkning av følsomheten til modellen. Den mest utslagsgivende parameteren med tanke på Q-maks er variasjoner i andel tette flater fra bygningsarealer. Ved 50 % reduksjon av tette flater reduseres Q-max tilsvarende, dvs en endring i Q-maks på ca. 50 %. Denne parameteren kan da kategoriseres som en *følsom parameter*. De fem andre parameterne har mindre påvirkning og ligger tilnærmet i samme felles område og kan kategoriseres som *middels følsomme* for variasjoner i Q-maks.

I Tabell 4 er det sammenlignet parameterverdier med utgangsverdiene til Oddvar Lindholms modell.

Tabell 4. Inngangsdata for følsomhetsanalysen og utvalgte parametere for videre simulering.

Parametere	Utgangsverdier for parameterne	De endelige utvalgte parameterverdier
Bredde på nedslagsarealet	23	40
Helning på nedslagsarealet i prosent	0,5	0,5
Prosent av tette flater	Variierende	85% av verdien
Prosent tette flater vei	0	50
Bredde på Delfelt vei	0	150
Grop-magasin for tette flater (mm)	1,6	1,6
Grop-magasin for perm. flater (mm)	5	5
Max infiltrasjon rate i Horton (mm/h)	100	75
Min infiltrasjon rate i Horton (mm/h)	20	20
Mannings tall for tette flater (dim. løs)	0,02	0,025
Mannings tall for permeable flater,gress	0,1	0,1
Mannings tall for sement rør (dim. løs)	0,014	0,017
Tette flater uten grop-magasin (%)	0	0

De endelige utvalgte parameterne for videre simulering er valgt for å tilpasse modellen de fysiske omgivelsene og følsomheten til de omtalte parameterne i Tabell 4.

Følgende parameter verdier er valgt:

**Bredden på delfelt bygningsarealer** ble valgt til 40 meter på bakgrunn av delfeltets størrelse og senkning av til-renningstiden. Til-renningstiden blir noe unaturlig lang hvis bredden skal basere seg på 23 meter, se Tabell 4. 23 % av Delfeltene har en bredde over 55 meter og 28 % har under 45 meter. Det utgjør et snitt på ca. 50 meter. I kalibreringen ble det brukt bredderbredder fra 23 til 60 meter. 40 meter kom best ut når de viktigste parameterne var satt.

**Bredden på delfelt for veisystemet** ble satt til 150 meter grunnet arealet for vei og grøft på 0,2 ha. Andel tette flater for Delfeltet vei, ble satt til 50%. de tette

flatene blir routet til de permeable flatene, altså grøften, og infiltrert til grunnen. Belastningen på de permeable flatene blir dobbelt så store som de permeable arealene ellers i systemet og vil få avrenning direkte til nærmeste node. Den totale mengden tette veiarealer er på 3,6 ha som tilsvarer 14,7 % av det totale arealet.

**Andel tette flater** ble registrert fra Statens kartverk som takarealet fra hus og garasjer. De tette flatene som ligger i delfeltene som tilsvarer takarealene vil få en helning på 0,5 %. Asle Flatin fant at ca. 15 % av de tette flatene ikke var tilknyttet ledningsnett (Flatin 1986). Dette er flater som man i kommunen regnet med var tilknyttet ledningsnett (Lindholm 2011b). Utfra disse funnene er alle tette flater i modellen redusert med 15 %. Fra følsomheten i modellen er andel tette flater som er tilknyttet systemet avgjørende på Volum og Q-maks. Q-maks reduseres med tilnærmet 20 % ved 20 % reduksjon av tette flater, se Figur 18.

**Helningen** på delfeltet ble justert til 0,5 %. Som nevnt innledningsvis er tette flater og permeable flater i samme parameterkategori og derfor er alle arealer på 0,5 %. Takflater har normalt en helningsgrad på ca. 25 grader som tilsvarer ca. 28 % som er langt unna parameterverdien i modellen. Det andre problemet er at mange eneboliger har en takrygg hvor taket faller ned på hver sin side. Det gjør at avrenningen på de gitte arealene i modellen bruker dobbelt så lang tid enn i virkeligheten. Dette kan igjen gi utslag på Q-maks. 0,5 % helning i modellen passet best til målte verdiene med bredde på 40 meter. Det gjorde at Q-maks ble redusert til akseptabelt nivå og at regnvannet fikk en lengre oppholdstid i overvannsnett som tilsvarer de målte verdiene.

**Verdiene for grop-magasineringsen** i tette- og permeable flater er verdiene satt til 1,6 og 5 etter hva manualen i EPA SWMM tilsier (i millimeter). Følsomheten er satt til middels følsom og gjør mindre innvirkninger på modellen ved forandring av parameterne.

**I Hortons** infiltrasjon er verdiene satt til maks 75 mm/time og minimum på 20 mm/time grunnet infiltrasjons egenskapene på stedet med mye leirjord (EPA 2010). Analyser viser at Infiltrasjonsverdiene har ingen påvirkning på regndataene som hadde en regnintensitet under 75 mm/time. Først ved større regnintensiteter, over 75 mm/time og en lengre varighet vil man se en virkning på modellen.

**Manningstallet** er justert til 0,025 for tette flater og 0,1 for permeable flater med bakgrunn i de aktuelle forholdene, antagelser og data fra EPA manualen. Det viste seg at følsomheten er noe høyere enn for de fleste parameterne i modellen, men fortsatt ingen store forandringer i modellens Q-maks. vi kan dermed konkludere med at parameterne er lite følsomme med tanke på utfallet av Q-maks.

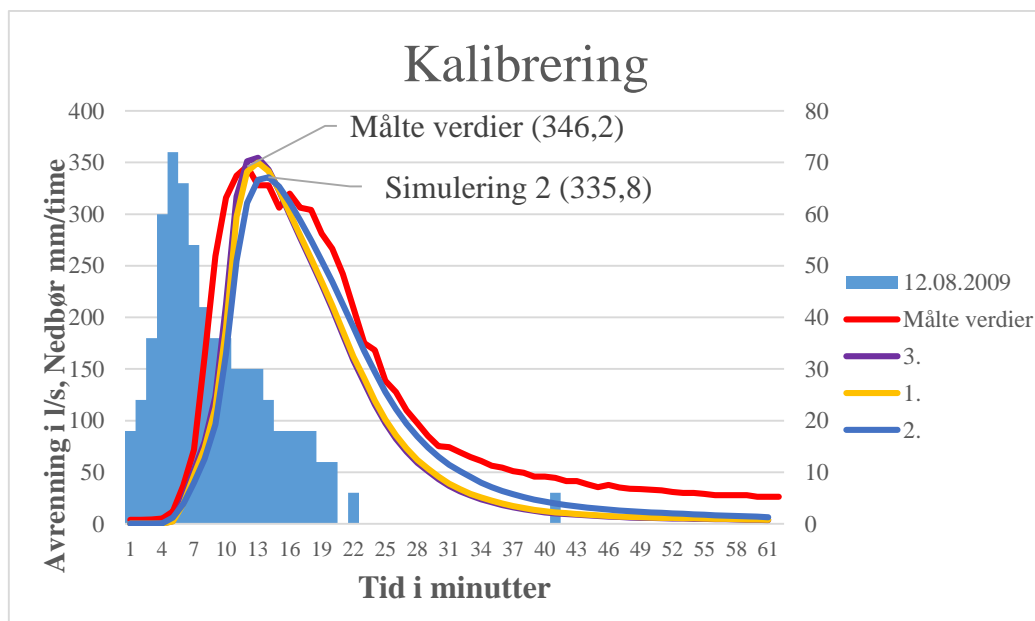
Mannings tallet for rør ble satt til 0,017 som er i toppsjiktet for ruheten i betongrør.

Tabell 5. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier.

Parametere	Alternativ 1 Q = 349,9	Alternativ 2 Q = 336	Alternativ 3 Q = 354,6
Bredde på nedslagsarealet	60	40	60
Helning på nedslagsarealet i prosent	2	0,50	3
Prosent av tette flater	85 %	85 %	85 %
Bredde på Delfelt vei	60	150	60
Prosent tette flater vei	50	50	50
Grop-magasin for tette flater (mm)	2,5	1,6	2,5
Grop-magasin for perm. flater (mm)	5	5	5
Max infiltrasjon rate i Horton (mm/h)	75	75	75
Min infiltrasjon rate i Horton (mm/h)	20	20	20
Mannings tall for tette flater (dim. løs)	0,025	0,025	0,025
Mannings tall for perm. flater, gress	0,1	0,1	0,1
Mannings tall for sement rør (dim. løs)	0,017	0,017	0,017
Tette flater uten grop-magasin (%)	0	0	0

Det ble simulert en mengde ganger med forskjellige kombinasjoner av parametere for å se hvordan modellen oppførte seg med tanke på forsinkelse og Q-maks.

Figur 19 viser simuleringene med parameterne fra Tabell 5 sammenlignet med målte verdier som vist i rødt. Det målte tilhørende regnet er vist i blått.



Figur 19. Simulering 2 med tilhørende parametere får best resultat med 2,94 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene.

I Figur 19 ser vi at nedbøren på maks intensitet 72 mm/time gir en målt maks avrenning på 346,2 l/s hvor den utvalgte kalibrerte modellen får en Q-maks på 335,8 l/s. Det gir et avvik på 2,94 % i forhold til målte verdier, som etter mitt synspunkt er veldig gode resultater. Den simulerte kurven har en tendens til å stupe litt raskere mot null avrenning enn hva målte verdier gjør. Dette kan indikere

at rørene tar inn grunnvann og opprettholder avrenningen ved en høyere verdi enn hva simuleringen viser.

### 7.7 Modellvalidering/etterprøving

Etter å ha sjekket modellens følsomhet i forhold til de viktigste parameterne må modellen valideres og/eller etterprøves for å se om modellen kan gjengi virkeligheten. Ved å sammenligne målte verdier med de simulerte kan man få en indikasjon på hvor nær opp til virkeligheten modellen klarer å simulere (Engan 2011).

**Metodene** for validering og etterprøving er å bruke uavhengige nedbørsdata som ikke er blitt brukt til kalibreringen, som i dette tilfelle er 5 stykker, for å se om modellen kan aksepteres eller må justeres. I formelen beskrevet under, kan man se på graden av god kalibrering i form av F-verdien som er basert på Q-maks, Volum og det inntreffende tidspunkt for Q-maks. Hvis alle målte verdier er lik alle simulerte verdier, skal F bli lik null. Det gjelder dermed å få F nærmest mulig null for å få best resultat fra kalibreringen.

Man velger da de parametere som gir F nærmest null. I denne situasjonen, hvor flom er en viktig del av simuleringen, må Q-maks vektlegges mere ved kalibreringen (Lindholm 2011b).

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

hvor:

$V_{1,2,3}$  = vekttall, til sammen = 1,0

Q = maks vannføring l/s

V = volum i kubikkmeter

T = Tidspunkt for Q-maks

M = målt verdi og b = beregnet verdi

### 7.8 Resultat av etterprøving

Tabellen under viser 4 forskjellige simuleringer som er vurdert opp mot målte verdier fra 4 forskjellige nedbørs intensiteter og tilhørende avrenninger. Tallene er satt inn i formelen over og summert sammen.

Det ble gjennomført kontinuerlig variasjoner i parameterne under simuleringene for å få lavest mulig F-verdi.

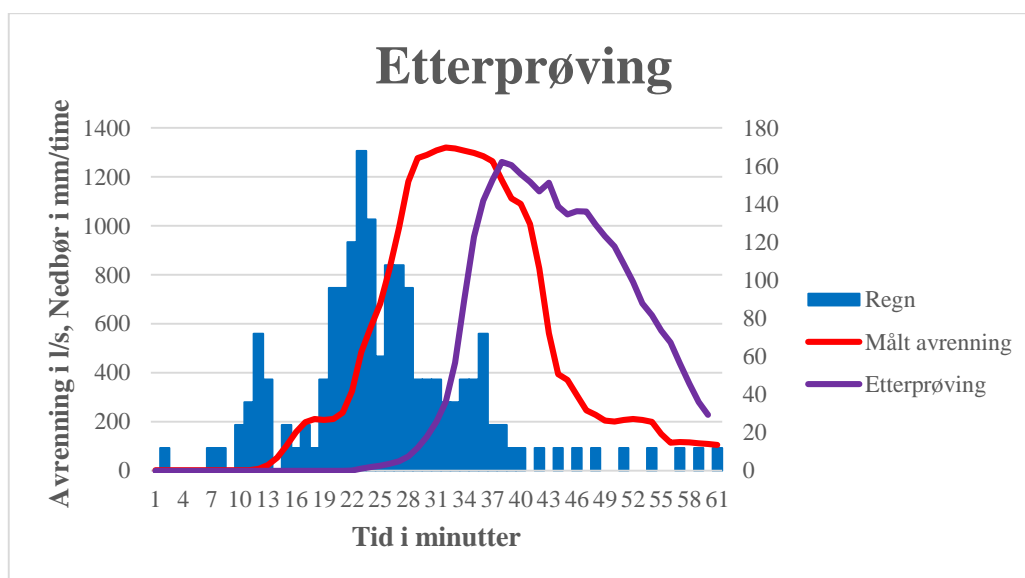
Tabell 6. Kalibrerings-faktor  $F$  basert på verdiene  $Q$ -maks, volum og den inntrufne tiden.

Regndata	12.08.2009	16.09.2001	29.07.2011	27.08.1977
Målte verdier				
$Q$ -maks	346,2	360	294,5	227,00
Volum	6,76	8,7	4,07	5,37
Tid	12	45	12	11
Simulerte verdier				
$Q$ -maks	336	359,3	300,1	215,20
Volum	5,46	9,7	4,05	3,88
Tid	14	41	15	14
<b>F-verdien</b>	<b>106,01</b>			

Det er ikke funnet noen forholdstall som tilsier at  $F$ -verdien på 106 er bra eller dårlig. Ved tidligere kalibrering av modellen har  $F$ -verdien vært oppe i fire tusen. Dette indikerer at den siste kalibreringen har en markant forbedring med tanke på tilnærming av de målte verdiene  $Q$ -maks, Volum og tid.

Når  $F$ -verdien er satt ble det gjennomført 5 forskjellige etterprøving for å se hvordan den kalibrerte modellen oppførte seg. Det ble gjort små endringer for å forbedre resultatene før den endelige resultatet av kalibreringen var et faktum.

Figur 20 viser målte verdier for nedbør i blått og avrenning i rødt. Simulerte verdier vises i lilla.

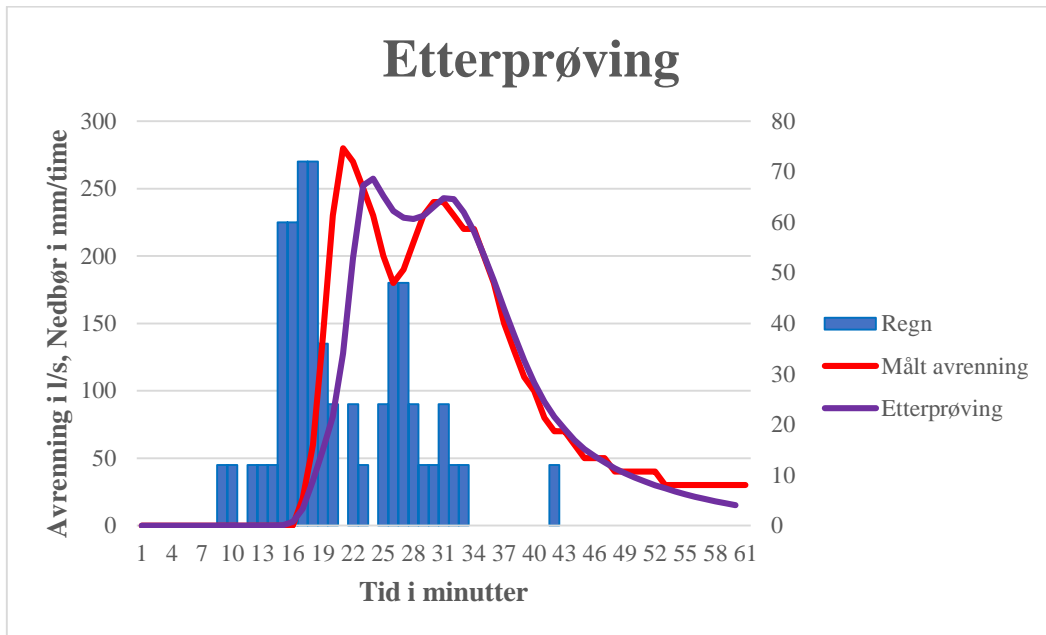


Figur 20. Etterprøving med regn fra 14.07.1995. Med kalibreringsparametere får  $Q$ -maks en reduksjon på 4,5 %.

Figur 20 viser tydelig en sammenheng mellom volum og  $Q$ -maks fra avrennings resultatene. Fra de målte  $Q$ -maks verdiene på 1320,5 l/s gir det en forskjell på 4,5

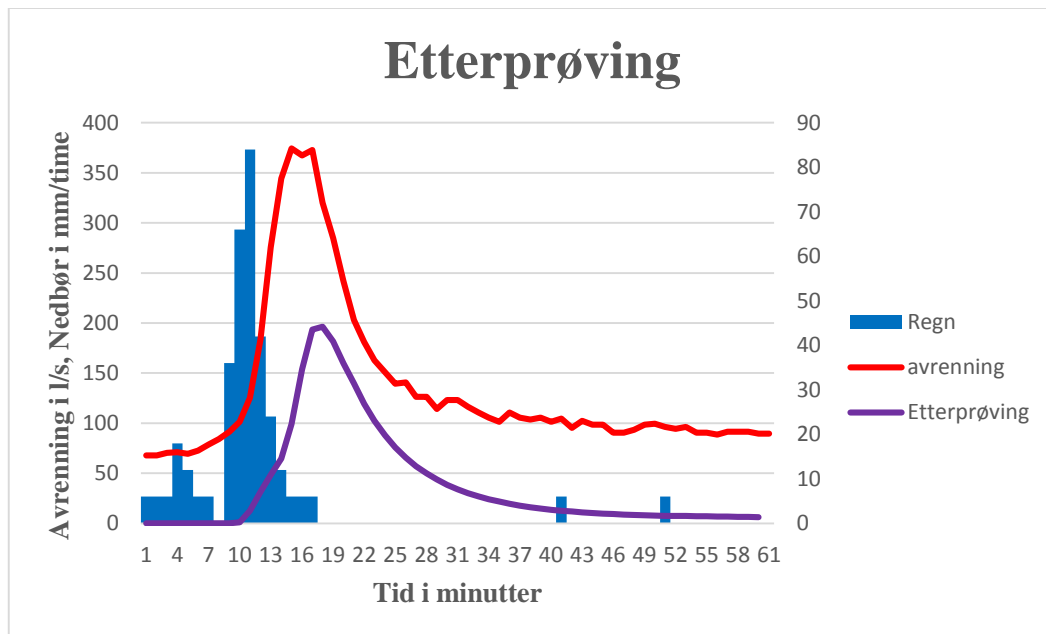


% i forhold til det simulerte Q-maks på 1261,6 l/s. Modellen viser en tidsforskyvning på 9 minutter.



Figur 21. Etterprøving med regn fra 27.07.1997. Med kalibreringsparametere får Q-maks en reduksjon på 8,1 %.

I Figur 21 er det satt inn et regn som viser to topper som igjen gjenspeiles i avrenningen. Den simulerte lilla kurven følger godt etter de målte verdiene på tid og volum, men mister litt på en av de to Q-maks som vises i figuren. Her blir det målt en forskjell i de to Q-maks med henholdsvis 8,1 % og 1,2 %.



Figur 22. Etterprøving med regn fra 20.08.2008 med kalibreringsparametere.

Figur 22 forklarer etterprøvingen av den kalibrerte modellen med regnet fra 20.08.2008. Her ser vi at verdiene til de målte verdiene ikke følger ett av kriteriene

for innhenting av måledata fra Hydra II. Startverdien må være tilnærmet lik null for å kunne sammenlignes med de simulerte verdiene.

Det er flere etterprøvinger av modellen med andre regn i **Error! Reference source not found.**

## 8. Simuleringer i avløpsmodellen

I denne delen av oppgaven skal framtidig klimautvikling som tilsier at intensiteten skal øke markant de neste årene simuleres. Med regndata basert på IVF-kurver utstedt fra Metrologisk Institutt skal det legges til en klima faktor som tilsier den framtidige regnintensiteten som prognosene tilsier. De konstruerte regnhyetogrammene legges inn i simuleringen for å kunne se hvilke eventuelle skader dette kan gi og i hvilket omfang dette vil medføre. Ved å iverksette tiltak mot eventuelt oversvømmelse kan dette simuleres og gi en pekepinn på hva som kan skje ved de gitte tiltakene. Alle simuleringer er basert på den kalibrerte modellen som ble utført tidligere i oppgaven.

### 8.1 Forutsetninger og valg

Modellen baserer seg på de samme antagelsene som ble gjort etter modellkalibrering i kalibreringsavsnittet over.

Simuleringen baserer seg på konstruerte regnhyetogrammer som er nærmere forklart i avsnittet under. Tidssteget for simuleringen er satt til 1 minutt med en varighet på 60 minutter. Tidsintervallet er satt til 5 minutter lik tidsintervallet for inndata for regn. Delfeltene i SWMM er rektangulære og avrenningen regnes å være lineære. Kummene har et oppstuvings areal som er satt til 1000 m<sup>2</sup> for å være sikker på at alt vann forblir i systemet. Oppstuvingen trer i kraft når vannet når topp kum (EPA 2010). I det oversvømmelsen inntreer vil det vise mengden vann som flommer over.

Ved bygningsskader er det satt noen kriterier for å beregne antall bygg som blir berørt ved en eventuell flom. For hver node er det ca. 2,3 bygninger fordelt over området med visse unntak. Det vil bli tatt hensyn til når flommen inntreer i disse områdene. Av de berørte byggene vil det være ca. 50 % - 70 % som får skader. Skadene vil opptre når det samlede volum av flommen i noden overstiger 1 m<sup>3</sup> og mere uavhengig av område (Lindholm 2013a). Alle tall vil bli avrundet til nærmeste hele tall.

### 8.2 Regndata

For å bruke regndata fra IVF-kurver må det antas at dataene som finnes er av god kvalitet og at disse er kontinuerlig oppdatert (Lindholm 2011c). På bakgrunn av dette er det blitt brukt IVF-kurve fra Rustadskogen for å konstruere de symmetriske regnhyetogrammene. Ideen bak konstruksjonen av et symmetrisk regnhyetogram er at:

- Regnet er antatt symmetrisk om sin midtakse
- Konstruksjonsprinsippet er at regnvolumet innenfor de X mest intensive minuttene ( $X/2$  minutter på hver side av midtlinjen) i hyetogrammet nøyaktig skal tilsvare regnvolumet i et "kasseregn" av varighet X minutter.
- Hensiktsmessig beregningssteg vil for de fleste tilfeller være ca. 5 minutter. Steg på bare 1 minutt gir en meget høy spissintensitet. (tilsvarende et "kasseregn" på 2 minutters varighet) (Lindholm 2008).

### 8.2.1 Metode

For å konstruere et symmetrisk regnhyetogram må man følge noen retningslinjer basert på følgende kriterier.

- Valg av gjentakintervall
- Beregning av konsentrasjonstid
- Finne intensiteten utfra IVF-kurven
- Symmetrisk fordeling av innsamlete data

**Gjentaksintervall** er definert som forventet antall år før gjentak av en hendelse,  $T=1/p$ . Gitt fordelingen til  $p$  kan vi finne fordelingen til  $T$  (UIO 2013). I dette tilfelle skal vi basere utregningen på et gitt gjentakintervall på 20 år.

**Konsentrasjonstid:** For å finne regndata til en simuleringsmodell må det først vurderes hvilken konsentrasjonstid feltet har. Det vil si hvor lang tid en dråpe vann bruker fra modellens ytterpunkt til modellens avløp. Konsentrasjonstiden må stemme overens med regn varigheten, ellers vil modellen kunne vise uriktige resultater.

Lengden på det lengste rørstrekket er på 587 meter. Utfra formelen strekning/ tid hvor farten er satt til 1,2 m/s får vi dette regnestykket:

$$587 \text{ m/s} / (1,2 \text{ m/s}) / (60 \text{ min/s}) = 8,2 \text{ minutter}$$

Utfra Northern Virginia BMP Handbook (1992), Tabell 7, Tabell 7. Forslag til konsentrasjonstid i urbane strøk. ble det valgt 10 minutter grunnet en blanding av eneboliger og delte boliger. Det tilsvarer en total konsentrasjonstid for modellen på  $10 \text{ min} + 8.2 \text{ min} = 18.2 \text{ min}$

Tabell 7. Forslag til konsentrasjonstid i urbane strøk.

Sentrumsstrøk, forretningsområder	(Ca. 5 minutter)
Boligområder med flermansboliger	(5-10 minutter)
Eneboliger	(10-12 minutter)

**IVF-kurven:** Når konsentrasjonstiden er valgt kan man finne regndataene fra IVF-kurven ved å bestemme seg for hvilke gjentakintervall man vil basere intensiteten på. Som nevnt er det foretrukket å bruke en varighet på 10 min som tilsvarer 5 minutters beregningssteg i det symmetriske hyetogrammet. Det er mest

hensiktsmessig å bruke et beregningssteg på 5 minutter siden spissintensiteten ved lavere beregningssteg blir veldig høy. Under kalibreringen av modellen tidligere ble det brukt regnvarighet opp mot 60 minutter. Selve simuleringen varte i 60 minutter. For å kunne sammenligne resultatene fra kalibreringen er varigheten for simulering av klimatilpasset tiltak satt til 60 minutter. I regnearket, som er basert på Oddvar Lindholm utregningsprinsippet (Lindholm 2008), ble det satt inn data for utvalgte gjentaksintervaller. I dette forslaget skal vi se på 20 års gjentagsintervall med varighet på 60 minutter. De resterende regnhyetogrammene er lagt ved under **Error! Reference source not found..**

Prinsippene bak et konstruert regnhyetogram er basert på tall fra IVF-kurven fra den lokale nedbørstasjonen 5.17 (NVE stasjonskode) Rustadskogen. Det forutsetter at hyetogrammet er symmetrisk om sin midtakse. Konstruksjonsprinsippet forklares slikt:

$$I_{10} = 96,2 \text{ mm/time}$$

$$I_{20} - I_{10} = (177,9 * 20 - 267,2 * 10) / 10 = 31,9 \text{ mm/time}$$

$$I_{30} - I_{20} = (136 * 30 - 177,9 * 20) / 10 = 18,8 \text{ mm/time}$$

$$I_{40} - I_{30} = (72,3 * 40 - 136 * 30) / 10 = 13 \text{ mm/time}$$

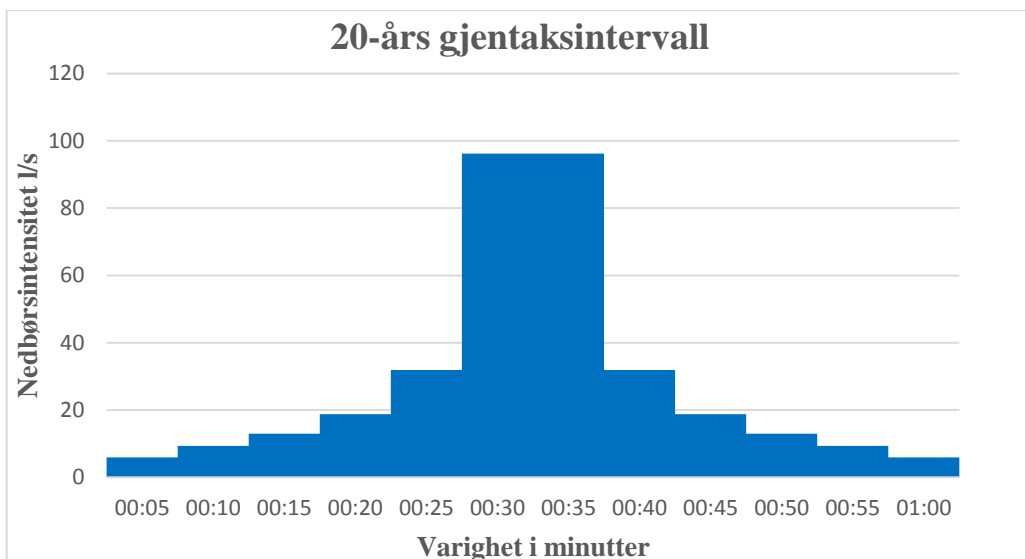
$$I_{50} - I_{40} = (111 * 50 - 72,3 * 40) / 10 = 9,4 \text{ mm/time}$$

$$I_{60} - I_{50} = (81,1 * 60 - 111 * 50) / 10 = 6 \text{ mm/time}$$

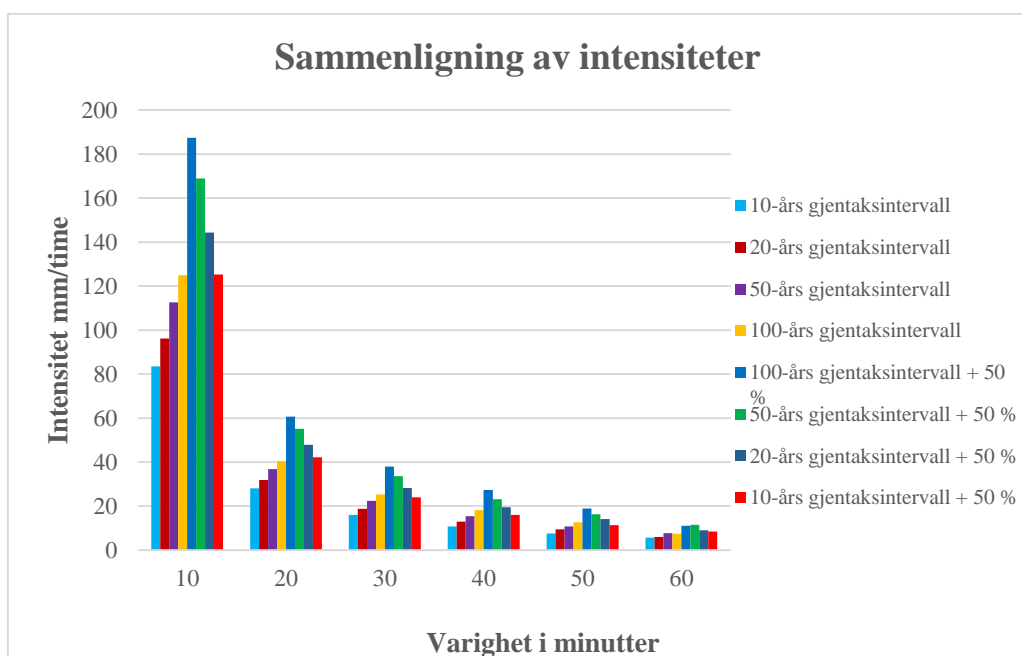
**Symmetrisk fordeling** betyr at varigheten til hvert av intensitetene blir delt i to for så å fordele dataene likt på hver side av midtaksen som vist i figur og tabell under.

Tabell 8. Resultater fra et 60 minutters regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.

Tidsforløpet (Minutter)	Intensitet mm/time
00:05	6
00:10	9,4
00:15	13
00:20	18,8
00:25	31,9
00:30	96,2
00:35	96,2
00:40	31,9
00:45	18,8
00:50	13
00:55	9,4
01:00	6



Figur 23. Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.



Figur 24. Sammenligning av intensiteter med varighet basert på gjentaksintervall med og uten klimatillegg på 50 %.

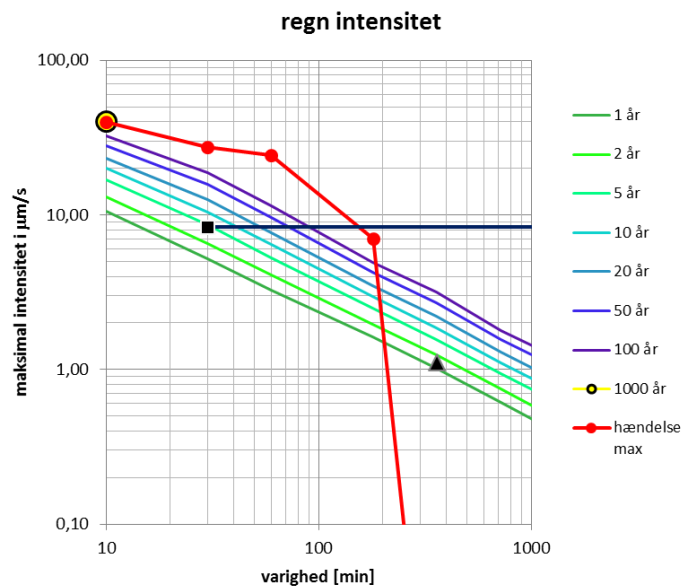
Ved sammenligning av intensiteter, med og uten klimatillegg, i Figur 24 viser det seg at 10-års gjentaksintervall (rød søyle) med 50 % klimatillegg er tilnærmet like stor som 100-års gjentaksintervall (gul søyle) uten klimatillegg.

### 8.2.2 Monsterregnet

I København 2. juli 2011 kom det et regnskyll som skulle sette en standard for hva Danmarks Meteorologiske Institutt (DMI) kaller et Monsterregn. Regnskylllet ble målt til en varighet på ca. 2 timer og 20 minutter og la igjen ca. 155 mm regn per kvadratmeter som tilsvarer ca. 2 ganger måned gjennomsnittet for juli. Tidvis ble det registrert 30 mm på 10 minutter som også er en rekord i København området. Store materielle skader på bygg ble resultatet, i tillegg til stopp i telefonnettet og

strømnettet og enorme trafikale problemer. Skadene ble registrert til 80 000 tilfeller og erstatningsutbetalingene endte på svimlende 6 milliarder danske kroner (DMI 2012).

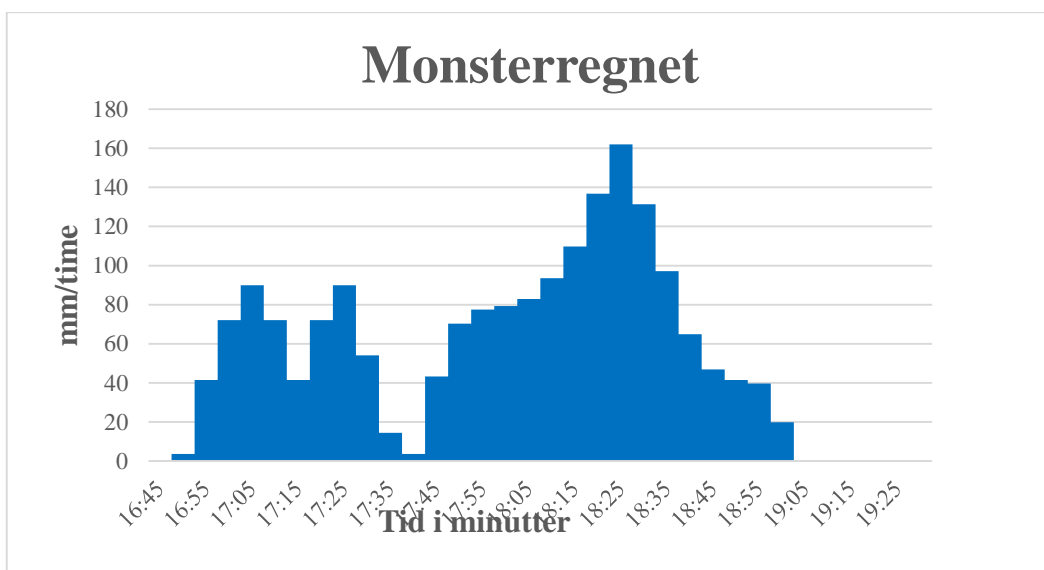
Figur 25 viser en IVF-kurve over Københavns kommunes innplotting av fire punkter markert med rød linje.



Figur 25. Innplotting av fire punkter fra Monsterregnet. (Nils Bent Johansen 2012)

Figur 25 viser målinger helt opp til 1000-års gjentakelsesintervall ved varighet på 10 minutter.

Ut fra registrerte verdier fra radarmålinger er det samlet inn data fra området rundt København. De er blitt plottet inn som mm/time opp mot varigheten til regnskylllet presentert i Figur 26.



Figur 26. Intensiteten for Monsterregnet i København 2. juli 2011 (Lindholm & Bjerkholt 2013)

Oppgaven skal nå videre ta for seg Monsterregnet i modellen fra Ås for å se på hvordan effektene av et slikt regn kan påvirke dagens ledningssystem. Vil det være tilstrekkelig å dimensjonere videre avløpssystemer på en klimafaktor mellom 1,3 til 1,5 på dagens IVF-kurver? Alt tyder på at framtidens nedbør blir større og muligheten for et eventuelt Monsterregn kan være relevant grunnet hendelsen i København som ligger mindre enn 500 km unna (Lindholm & Bjerkholt 2013)

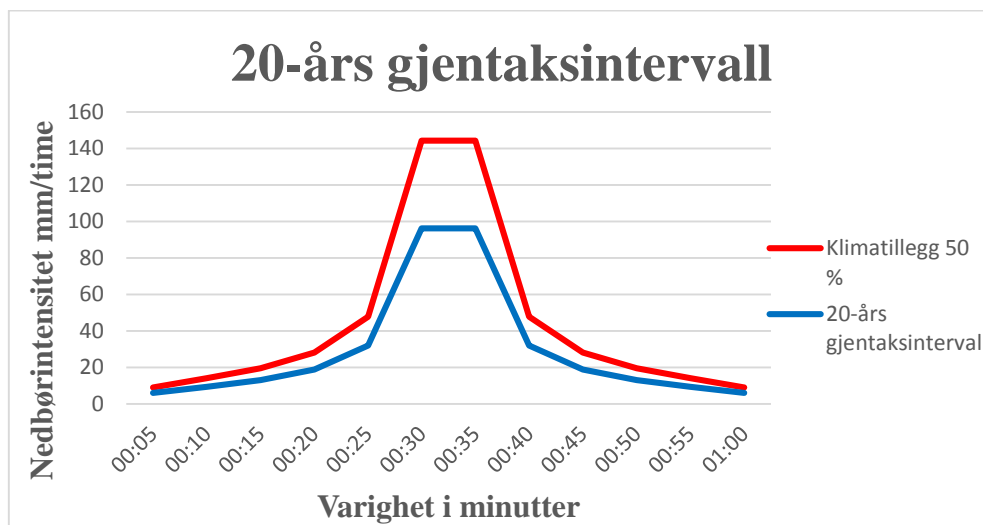
### 8.2.3 Klimafaktor

Som nevnt innledningsvis så finnes det mange forskjellige måter å finne frem til en bestemt faktor for framtidig klimautvikling fra dagens IVF-kurve. Etter samtaler med Oddvar Lindholm og Magnus Olsen er analysen basert på en klimafaktor på 1,5 ganger dagens IVF-kurve for best å beskrive framtidens nedbør om 100 år.

I følgende tilfelle hvor et konstruert regn basert på 20 års gjentakintervall vil utfallet med klimafaktor på 1,5 se slik ut.

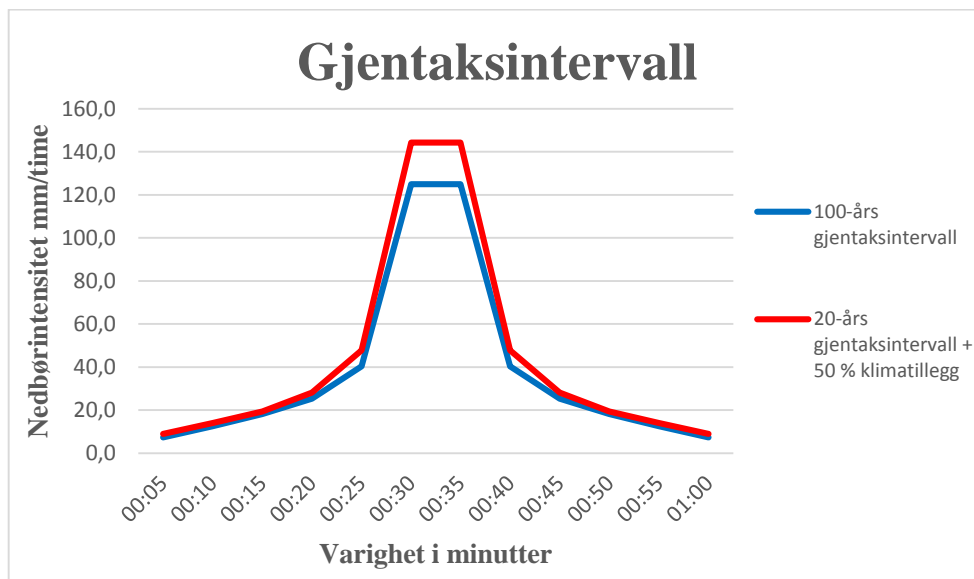
Tabell 9. intensiteten til 20-års gjentakintervall med 50 % klimatillegg.

Tidsforløpet (minutter)	Intensitet (mm/time)
00:05	9
00:10	14
00:15	19
00:20	28
00:25	48
00:30	144
00:35	144
00:40	48
00:45	28
00:50	19
00:55	14
01:00	9



Figur 27. 20-års gjentakintervall med og uten klimatillegg.

Figur 27 viser sammenligning av 20-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg på 50 %. Maks intensitet for 20-års gjentaksintervall øker fra 96 mm/time til 144 mm/time med 50 % klimatillegg.



Figur 28. Dagens 100-års regn er 15,5 % lavere enn 20-års regn med påsatt klimafaktor på 50 %, altså framtidens 20-års regn.

For å kunne se hvilke størrelsesorden et påslag på klimafaktoren på 50 % utgjør, kan man på Figur 28 se at dagens 100-års gjentaksintervall har 15,5 % lavere intensitet enn hva framtidens 20-års regnintensitet vil ha om 100 år.

### 8.3 Simulering av dagens situasjon

For å se på dagens system, hvordan det er dimensjonert og hva det tåler av belastning, ble det gjennomført to simuleringer på henholdsvis 10- og 20-års gjentaksintervall.

Ved simulering av 10 og 20-års gjentaksintervall i modellen viser resultatene oversvømmelser over topp kum med vannmengde 1 m<sup>3</sup> og oppover i 9 av 107 noder/kum.

Konklusjonen utfra de målte verdiene fra simuleringen kan tyde på at systemet ikke opprettholder de dimensjoneringskriteriene som norsk standard NS-EN 752:2008 anbefaler. Det er vanskelig å etterprøve om dimensjoneringene er basert på de samme kriterier som norsk vann anbefaler i dag, eller om det er klimaforandringene som er årsaken til oversvømmelse ved 20-års gjentaksintervall i separatsystemet.

### 8.4 Simulering av klimatilpassnings tiltak

Målet med oppgaven er å finne ut av hvilken effekt klimatilpasset nedbørintensitet har på modellen og å finne mottiltak for å redusere eventuelle oversvømmelser og redusere skader til et minimum basert på dagens situasjon.



**Metode:** I simuleringen er det valgt fire forskjellige tiltak for å redusere skadeomfanget ved økt intensitet.

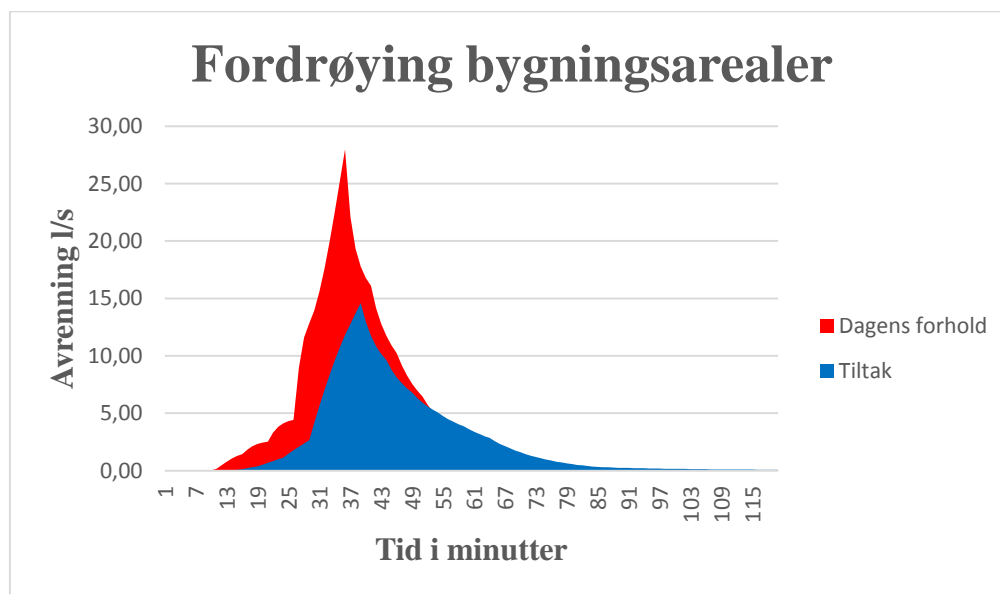
- Fordrøyning av delfelt bygningsarealer
- Frakopling av takflater 100 %
- Fordrøyning av bygnings- og veiarealer

Simuleringen baserer seg på den kalibrerte modellen med konstruerte regn på 100, 50, 20 og 10-års gjentaksintervall og i tillegg Monsterregnet fra København. I dette tilfelle vil det være en skade-reduksjon på 100 % hvis simuleringene med klimafaktor viser samme verdi som utgangspunktet for gjentaksintervallet.

### Fordrøyning:

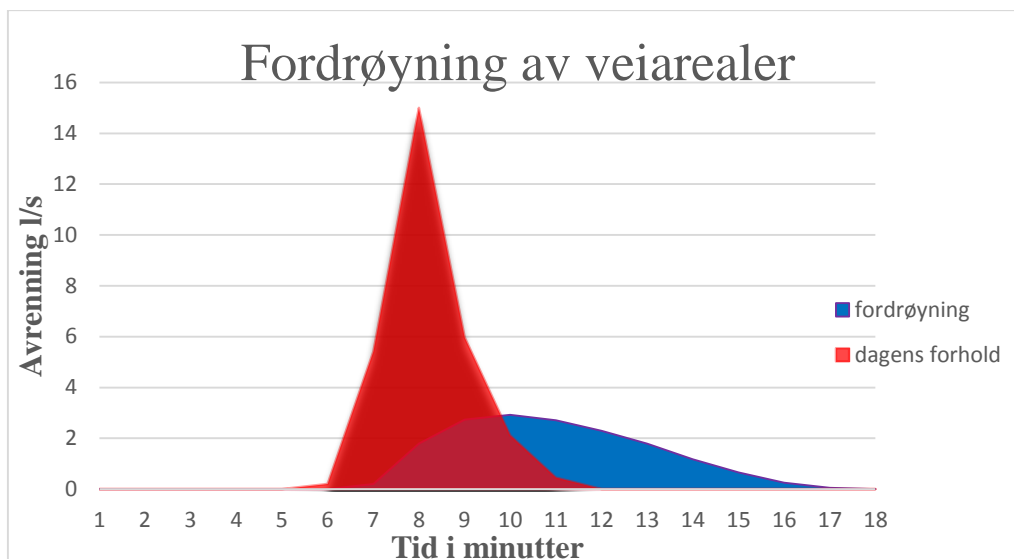
To typer fordrøyning er simulert, en for delfeltene veiarealer og en for delfeltene med hustak.

Tiltak, fordrøyning, i simuleringen baserer seg på tette flater i delfeltene. I delfeltene med bygningsarealer er bredden satt til 5 meter for å gi en tilstrekkelig fordrøyning av overvannet. Det vil øke konsentrasjonstiden med en faktor på 8 i forhold til den kalibrerte modellen. Alle delfeltene som har hustak er koblet til overvannsnett. De permeable flatene er ikke direkte koblet til overvannssystemet, men vil gi sitt bidrag når de permeable flatene får avrenning ved metning eller ved høy regnintensitet overskrider infiltrasjonskapasiteten på 75 mm/time. Delfelt veiarealer vil ikke bidra til forandring i fordrøyningen av delfelt byggearealer siden de er uavhengige av hverandre.



Figur 29. Fordrøyning av delfelt bygningsarealer med tiltak.

Tiltaket, fordrøyning av delfelt bygningsarealer, vil redusere topp intensiteten for avrenningen med 48 % og forskyve tiden med 6 minuttet for hvert delfelt med 20-års gjentaksintervall + 50 % klimatillegg. Fordrøyingsvolumet ble på ca. 39 % for hvert delfelt. Mengden avrenning og volum er avhengig av hvert delfelt grunnet forskjellige størrelser og forholdstall i prosent permeable flater.



Figur 30. Fordrøyning av delfelt veiarealer med tiltak.

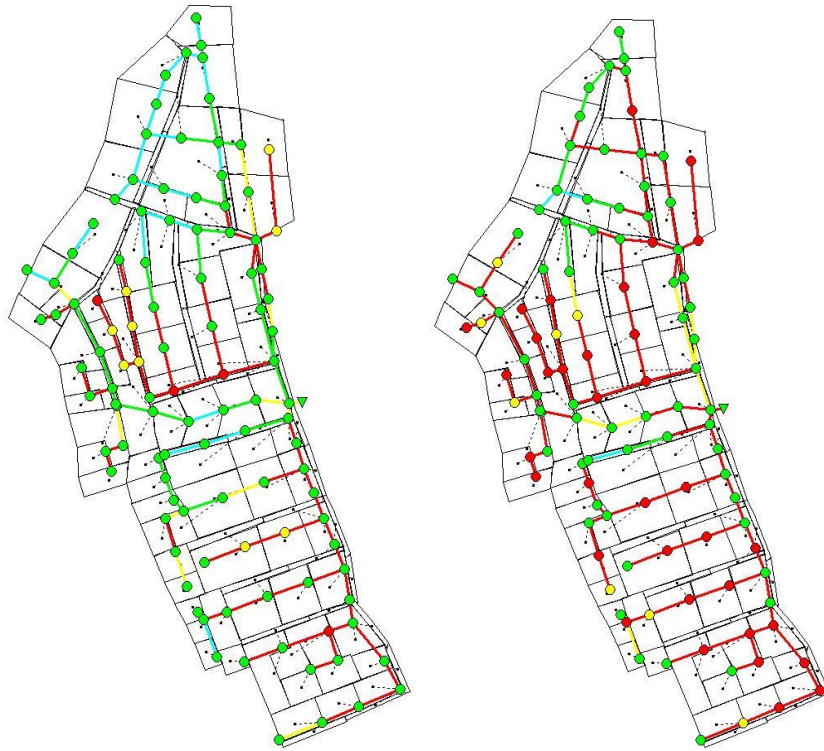
For veiarealene ble bredden på delfeltene redusert fra 150 meter til 10 meter som tilsvarer en økning i konsentrasjonstiden med faktor 15. Toppintensiteten ble redusert med hele 81 % og en tidsforskyvning på 10 minutter. For-drøyingsvolumet blir på 75 % som tilsvarer ca. 22 m<sup>3</sup> per delfelt. Det tilsvarer et total volum på 394 m<sup>3</sup> for delfelt veiarealer i systemet.

**Frakopling av takflater:** Tiltaket, frakopling av takflater, forutsetter at vannet blir infiltrert på stedet som et LOD tiltak. Tiltak forutsetter at mesteparten av takflatene kan kobles bort og at 100 % er en realistisk tilnærming for infiltrasjon.

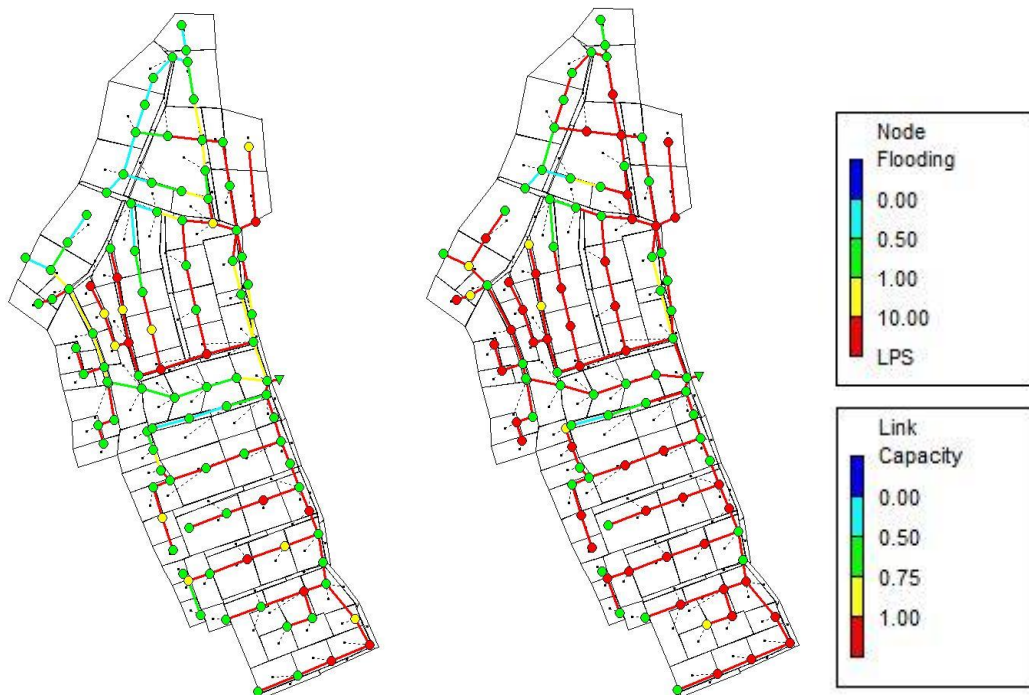
#### 8.4.1 Resultater

Resultatene fra simuleringene er basert på fem forskjellige regn. Fire av dem er 10, 20, 50 og 100 års gjentakintervall som blir presentert med og uten klimatillegg for å vise forskjellene dette medfører. Med tre forskjellige tiltak utgjør det til sammen 27 simuleringer. Rustadskogen er basert på separat avløpssystem og skal dimensjoneres etter oversvømmelse av nodene. Klimatilpasningstiltak blir så vurdert utfra hvor effektive de er med tanke på oversvømmelse over noden/kum. Det er også lagt til et ekstrem vær, «Monsterregnet», for å simulere det som kan være det verste tenkelige. Bygningsskader blir beregnet på grunnlag av samtaler med Oddvar Lindholm hvor konklusjonen ble at en node med 1 m<sup>3</sup> flomvann og oppover tilsvarer 2,3 hus, i tillegg til at 70 % av bygningsmassen får en eventuell bygningsskade. Det vil si 1,61 bygningsskader per oversvømte node.

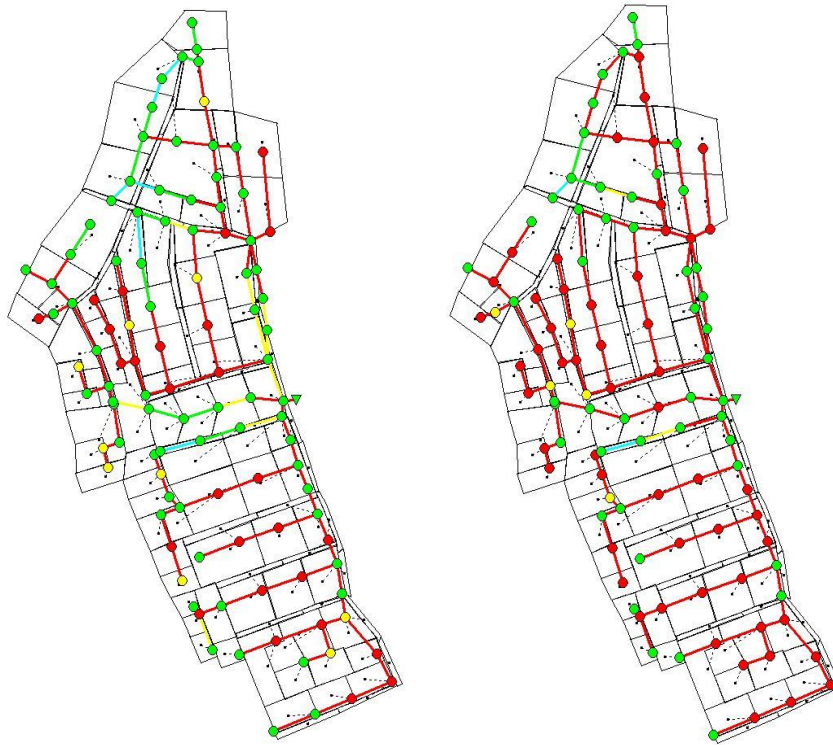
Nedenfor blir feltet Rustadskogen presentert med de gjeldende gjentakintervallene (med og uten klimatillegg) og Monsterregnet.



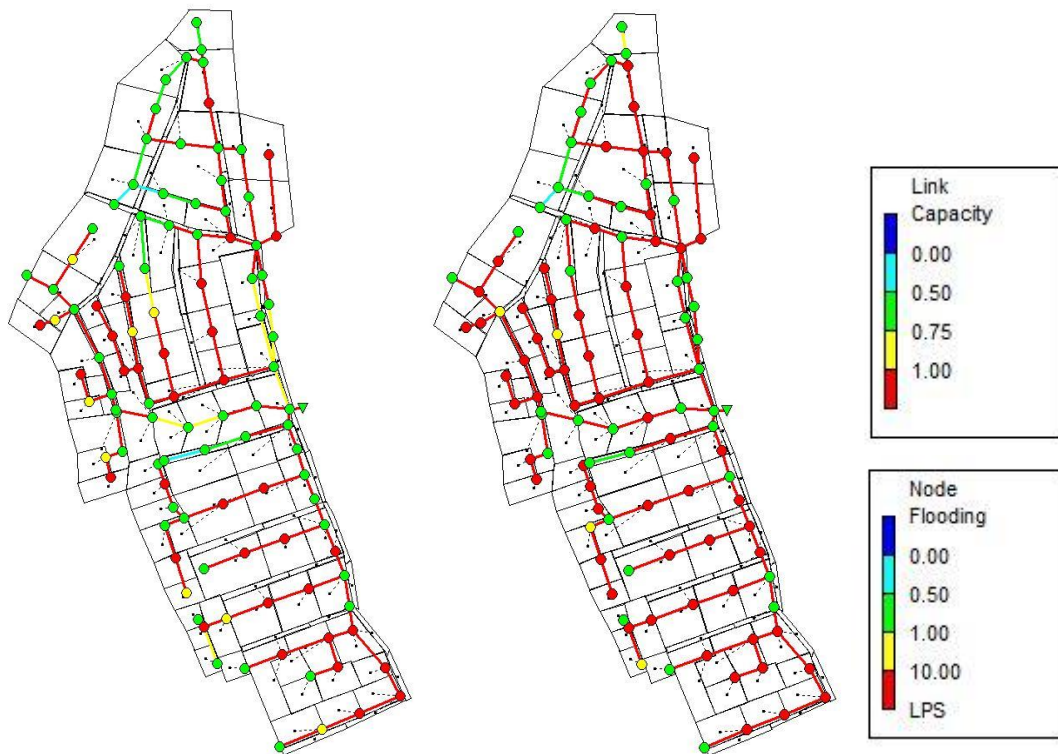
Figur 31. 10-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.



Figur 32. 20-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.



Figur 33. 50-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.



Figur 34. 100-års gjentaksintervall uten klimatillegg til venstre, høyre med 50 % klimatillegg.

For å forklare figurene bedre så kan man se på tabellen under som indikerer hvor mange noder som flommer over med de respektive gjentaksintervallene og hva det utgjør på feltet. Ledningsstrekket viser forskjellige farger hvor rødt indikerer at ledningene yter full kapasitet. Farge variasjonene på nodene/kum viser mengden oversvømmelse i punkter der rødt indikerer en flom på mere enn 10 l/s.



I Tabell 10 vises sammenligningen mellom antall oversvømmelser i forhold til dagens IVF-kurve og antall oversvømmelser med 50 % klimatillegg. Bidraget fra Monsterregnet viser en total oversvømmelse på hele 82 kummer.

Figur 35. Simulering med Monsterregnet.

Tabell 10. sammenligner oversvømmelse med dagens IVF mot 50 % klimatillegg.

<b>Regnintensitet</b> (Gjentaksintervall)	<b>Oversvømmelser</b> (dagens IVF)	<b>Oversvømmelser</b> (50 % klimatillegg)	<b>Økning i kummer</b>
10	9	39	30
20	18	54	36
50	29	58	29
100	38	65	27
<b>Monster</b>	82		

Tabell 11 forklarer antall bygningskader i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg.

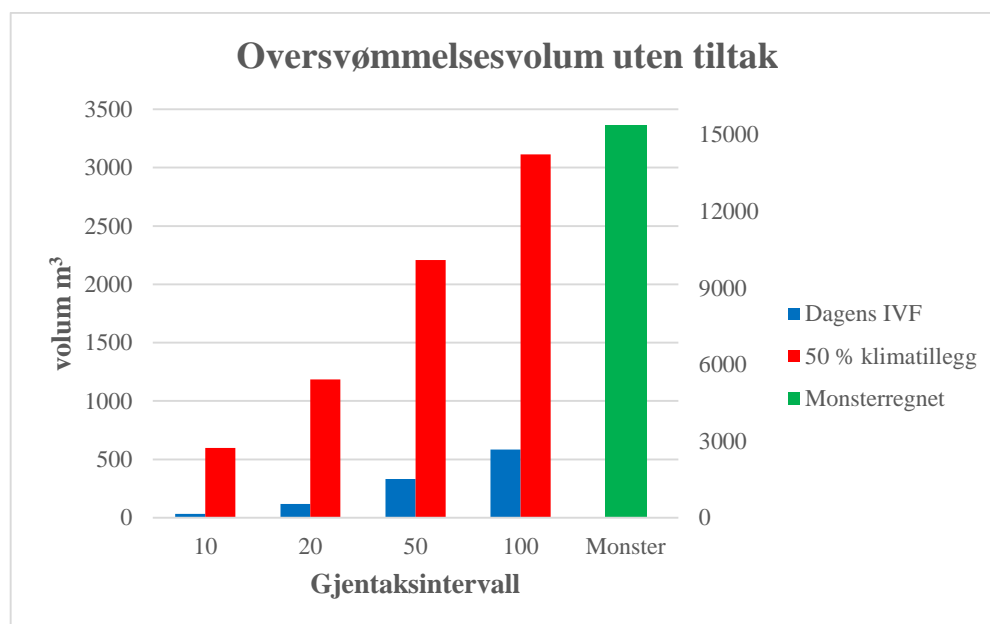
Tabell 11. antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene.

<b>Regnintensitet</b> (Gjentaksintervall)	<b>Skadede bygninger</b> (Dagens IVF)	<b>Skadede bygninger</b> (50 % klimatillegg)
10	14	63
20	29	87
50	47	93
100	61	105
<b>Monster</b>	132	

Simuleringsresultatene viser tydelig at økende gjentaksintervall gir økning i antall potensielle bygningskader. Ser vi at på et 100-års gjentaksintervall vil økningen i bygningskader være på ca. 27 % i forhold til dagens IVF-kurve. For å se på

tiltakene mot eventuelle oversvømmelser som igjen kan skape skader for områder rundt noden, må det estimeres hvor mye flom-vann som eventuelt må behandles for å forhindre et økt skadeomfang.

Monsterregnet er vist i grønt til høyre for gjentaksintervallene og forholder seg til høyre akse som viser i m<sup>3</sup>. De røde søylene representerer gjentaksintervallene med et klimatillegg på 50 % mens de blå representerer nedbør hentet ut fra dagens IVF-kurver uten klimatillegg. De lilla søylene representerer volumet med tiltak basert på 50 % klimatillegg.



Figur 36. Oversvømmelsesvolum uten tiltak i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet.

Volumet fra de respektive gjentaksintervallene med klimatillegg inkludert Monsterregnet viser tydelig at flom vil oppstå ved økt klimanedbør om 100 år sett i forhold til dagens nivå. Økning i mengden flomvann fra dagens 50-års regn vil være på 1875 m<sup>3</sup> som tilsvarer ca. 6 ganger dagens volum på 332 m<sup>3</sup>.

### 8.5 Fordrøyning delfelt bygningsarealer

Tabell 12 forklarer antall flomutsatte noder i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, fordrøyning av bygningsarealer, vises i prosent reduksjon i forhold til dagens IVF-kurve

Tabell 12. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket fordrøyning bygningsarealer.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Oversvømmelser (dagens IVF)	Oversvømmelser (50%klimatillegg)	Oversvømmelser (Fordrøyning)	Prosentvis reduksjon
10	9	39	26	33
20	18	54	38	30
50	29	58	54	7
100	38	65	58	11
Monster	-	82	80	2

Tabell 12 viser at tiltaket alene ikke tilfredsstillende reduksjonen av antall oversvømte noder basert på 50 % klimatillegg. Ved 20-års gjentaksintervall får vi bare ca. 30 % reduksjon i potensiell oversvømmelse av noder ved 50 % klimatillegg.

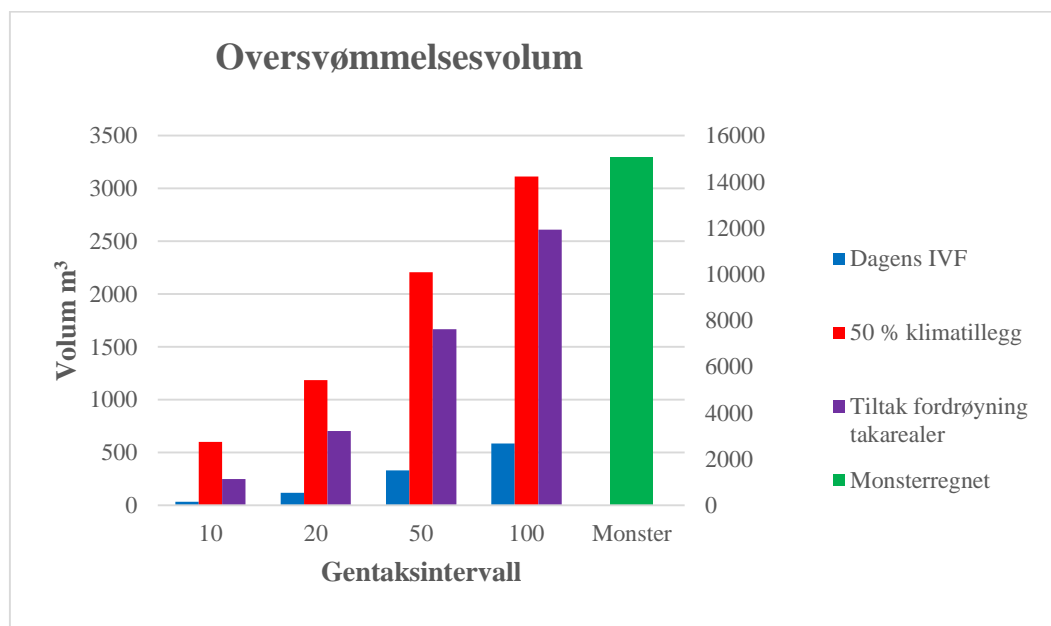
Tabell 13 forklarer antall bygningsskader i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, fordrøyning av bygningssarealer, vises i antall potensielle skadede bygninger basert på 50 % klimatillegg

Tabell 13. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF-kurve)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (fordrøyning)
10	14	63	42
20	29	87	61
50	47	93	87
100	61	105	93
Monster	-	132	129

Simuleringen med tiltaket fordrøyning av delfelt bygningssarealer er ikke tilfredsstillende nok for å opprettholde dagens situasjon med tanke på flomskader på antall bygninger.

Monsterregnet er vist i grønt til høyre for gjentaksintervallene og forholder seg til høyre akse som viser i m<sup>3</sup>. De røde søylene representerer gjentaksintervallene med et klimatillegg på 50 % mens de blå representerer nedbør hentet ut fra dagens IVF-kurver uten klimatillegg. De lilla søylene representerer volumet med tiltak basert på 50 % klimatillegg.



Figur 37. Oversvømmelsesvolum uten tiltak i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet.

Ved 100-års gjentaksintervall vil oversvømmelses-volumet øke fra 585 m<sup>3</sup> uten klimatillegg til 3113 m<sup>3</sup> med klimatillegget. Etter tiltaket er volumet redusert til 2611 m<sup>3</sup>, altså 502 m<sup>3</sup> er fordrøyd, og skadeomfanget er redusert med 11 % i forhold til 100-års nedbør med klimatillegg.

### 8.6 Frakopling takarealer

Tabell 14 forklarer antall flomutsatte noder i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, frakopling takareal, vises i prosent-reduksjon basert på 50 % klimatillegg.

Tabell 14. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket frakopling av takflater.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Oversvømmelser (dagens IVF)	Oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Oversvømmelser (Frakopling)	Prosentvis reduksjon
10	9	39	25	36
20	18	54	31	43
50	29	58	50	14
100	38	65	55	15
Monster	-	82	77	6

Fra tabellen vises det at tiltaket alene ikke er nok for å redusere antall flomutsatte noder ved 50 % klimatillegg.

Tabell 15 forklarer antall bygningsskader i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, frakopling takarealer, vises i antall potensielt skadede bygninger basert på 50 % klimatillegg.

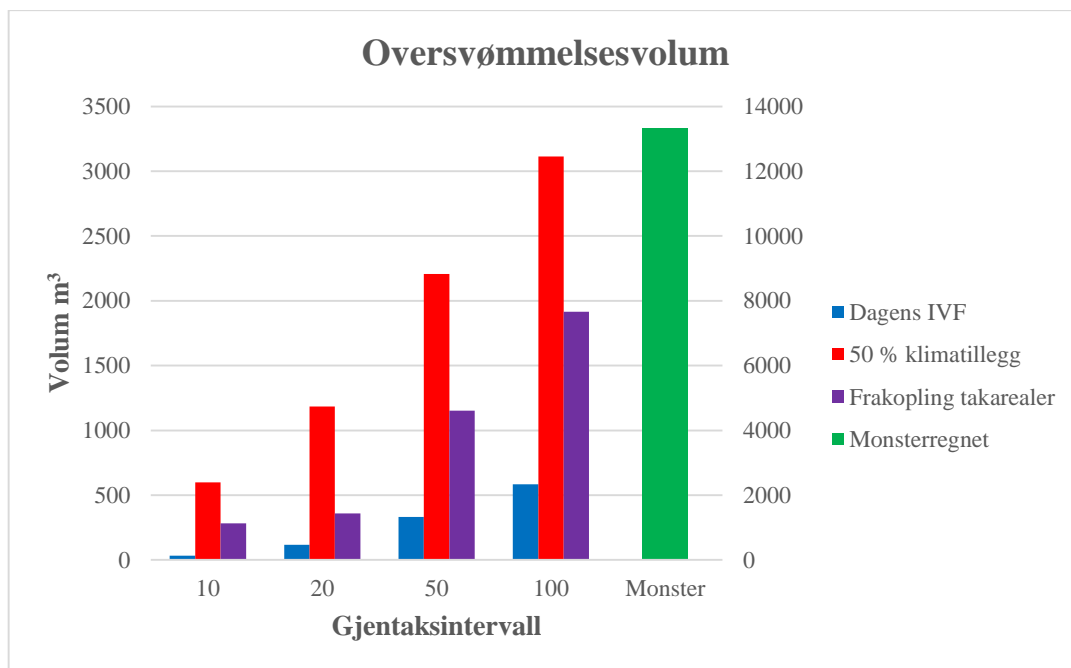
Tabell 15. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet basert på tiltaket frakopling.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (Frakopling)
10	14	63	40
20	29	87	50
50	47	93	81
100	61	105	89
Monster	-	132	124

Simuleringen med tiltaket frakopling av takflater er ikke tilfredsstillende for å opprettholde dagens situasjon.

Monsterregnet er vist i grønt til høyre for gjentaksintervallene og forholder seg til høyre akse som viser i m<sup>3</sup>. De røde søylene representerer gjentaksintervallene med et klimatillegg på 50 % mens de blå representerer nedbør hentet ut fra dagens IVF-kurver uten klimatillegg. De lilla søylene representerer volumet med tiltak basert på 50 % klimatillegg.





Figur 38. Oversvømmelsesvolum med tiltak frakopling takarealer i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet.

Fordrøyningen av flomvannet er på 1197 m<sup>3</sup> ved 100-års gjentaksintervall. Dette er 612 m<sup>3</sup> mere enn utgangspunktet uten klimatillegg. Tiltaket frakopling av takflater viser at tiltaket ikke er tilstrekkelig med tanke på oversvømmelser i forhold til dagens situasjon.

### 8.7 Fordrøyning av vei- og bygningsarealer

Tabell 16 forklarer antall flomutsatte noder i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, fordrøyning av vei- og bygningsarealer, vises i prosent reduksjon basert på 50 % klimatillegg.

Tabell 16. Sammenligner antall oversvømmelser med og uten klimatillegg basert på tiltaket fordrøyning vei- og bygningsarealer.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Oversvømmelser (dagens IVF)	Oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Fordrøyning vei- og bygningsarealer	Prosentvis reduksjon
10	9	39	6	85
20	18	54	17	69
50	29	58	30	48
100	38	65	36	45
Monster	-	82	59	28

Tabellen viser at tiltaket reduserer tilstrekkelig antall oversvømte noder ved 10-, 20- og 100-års gjentaksintervall. Ved 50-års gjentaksintervall er det lite som skal til for å komme på dagens flomnivå. Monsterregnet viser fortsatt stor oversvømmelse med bare 28 % reduksjon i forhold til dagens situasjon.

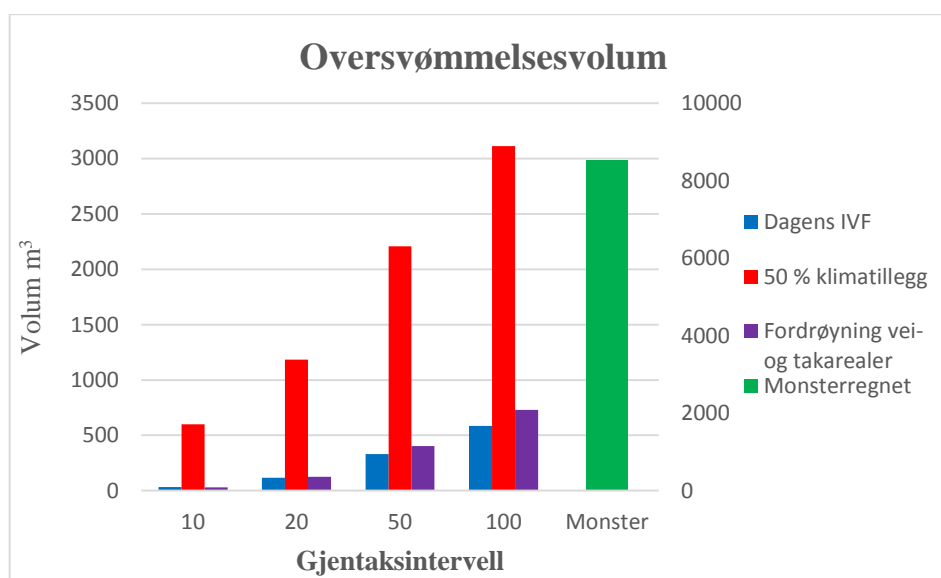
Tabell 17 forklarer antall bygningsskader i systemet basert på gjentaksintervallene med og uten klimatillegg. Effekten av tiltaket, fordrøyning av vei- og bygningsareal, vises i antall potensielle skadede bygninger basert på 50 % klimatillegg

Tabell 17. Antall skader på bygningsmasse ved de gitte gjentaksintervallene og Monsterregnet basert på tiltaket fordrøyning vei- og bygningsarealer.

Regnintensitet (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF-kurve)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (Fordr. byg- og veiarealer)
10	14	63	10
20	29	87	27
50	47	93	48
100	61	105	58
Monster	-	132	95

Tabellen viser at tiltaket alene er tilstrekkelig for å redusere bygningsskader basert på 50 % klimatillegg ved 10-, 20-, 100-års gjentaksintervall. Men ved 50-års gjentaksintervall er effekten redusert til 48 bygningsskader som er et i fra å oppnå kriteriene.

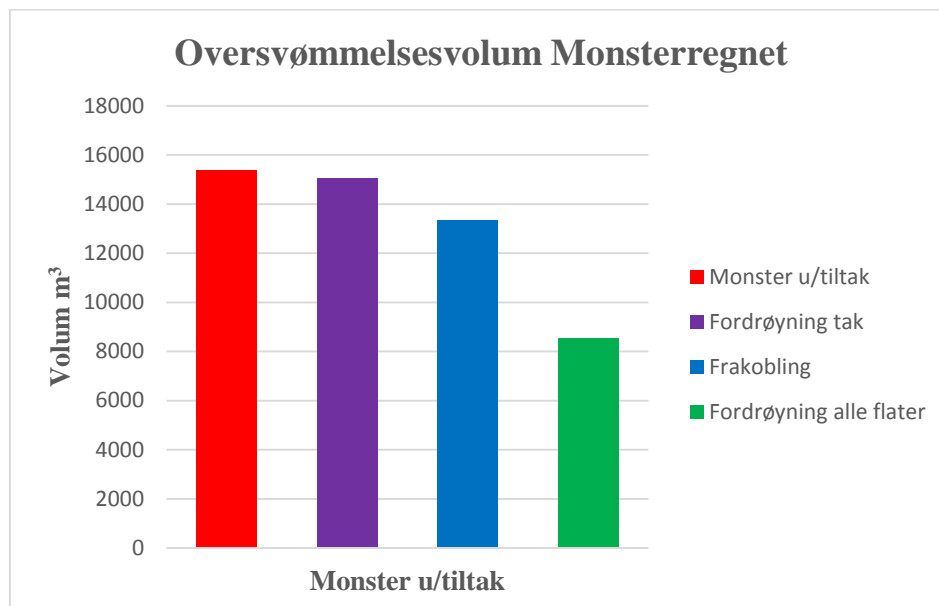
I Figur 39 nedenfor er Monsterregnet vist i grønt til høyre for gjentaksintervallene og forholder seg til høyre akse som viser i m<sup>3</sup>. De røde søylene representerer gjentaksintervallene med et klimatillegg på 50 % mens de blå representerer nedbør hentet ut fra dagens IVF-kurver uten klimatillegg. De lilla søylene representerer volumet med tiltak basert på 50 % klimatillegg.



Figur 39. Oversvømmelsesvolum med tiltak, fordrøyning vei- og bygningsarealer, i de forskjellige gjentaksintervallene og Monsterregnet.

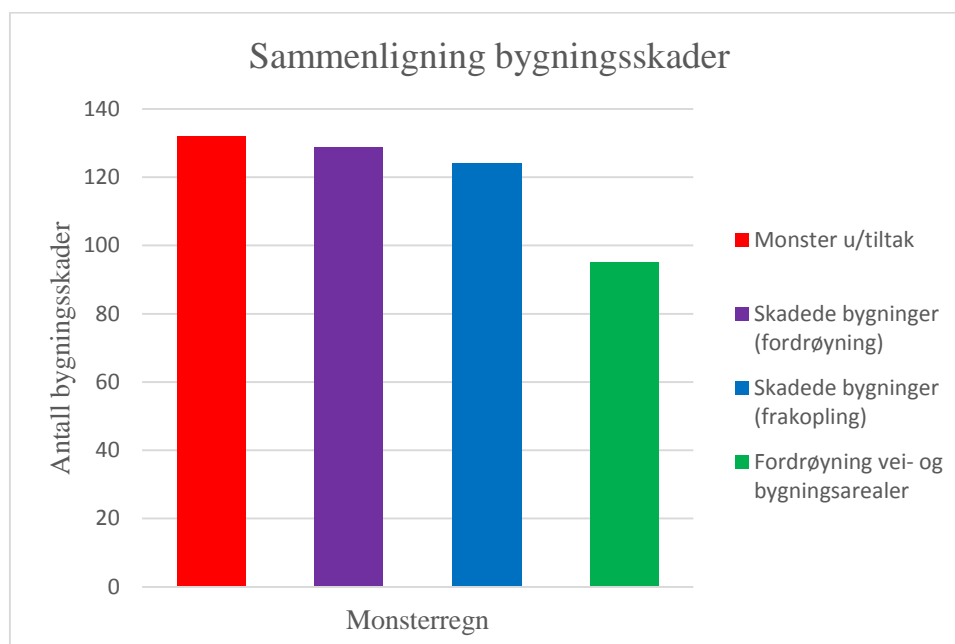
Ved 100-års gjentaksintervall vil oversvømmelses volumet øke fra 585 m<sup>3</sup> uten klimatillegg til 1331 m<sup>3</sup> med klimatillegget. Etter tiltaket er volumet redusert til 729 m<sup>3</sup>, altså 603 m<sup>3</sup> for-drøyd, og skadeomfanget er redusert med 58 % i forhold til 100-års nedbør med 50 % klimatillegg.

## 8.8 Sammenligning av tiltak



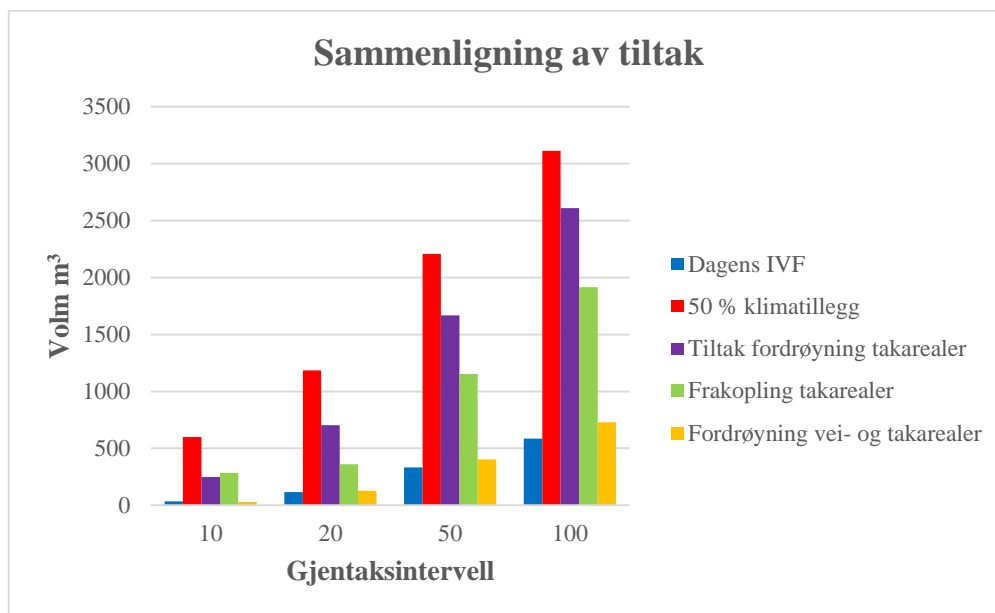
Figur 40. Oversvømmelsesvolum fra tiltak basert på Monsterregnet.

Figur 40 over viser det totale oversvømmelsesvolumet for bare Monsterregnet med og uten tiltak. Tiltakene viser en reduksjon i flomvannet fra 2 % til 45 %, som gir en skadereduksjon på maks 28 % av totalt 132 potensielle bygningsskader.



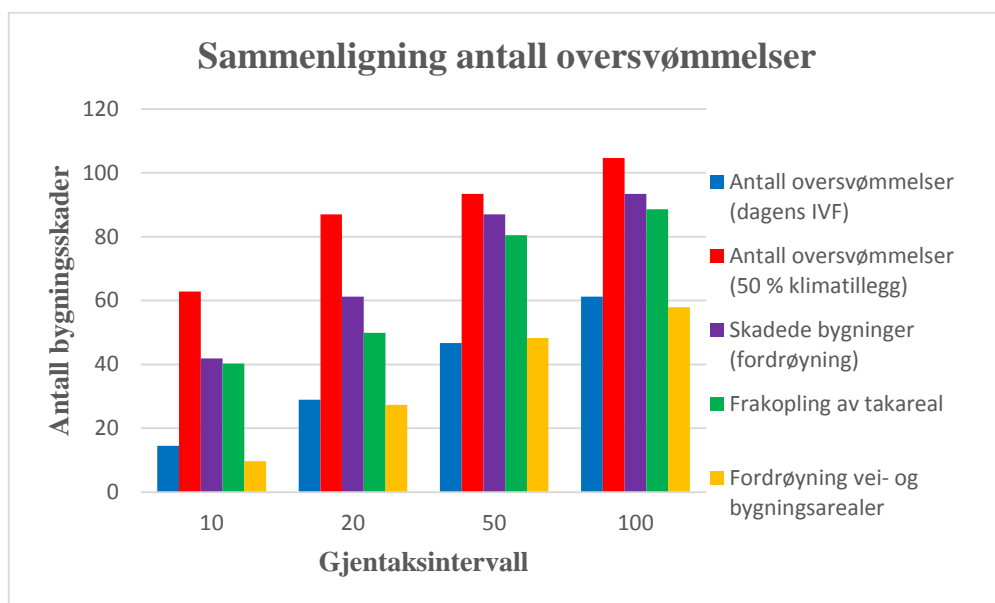
Figur 41. Sammenligning av tiltak med Monsterregnet.

I Figur 41 ser man sammenligningen av tiltakene som er gjennomført. Tiltakene viser variasjoner i effekten et tiltak har på de gjeldende gjentaksintervallene. Den røde søylen skal representere Monsterregnet uten tiltak mens de andre søylene viser med tiltak. Videre kan vi se at alle tiltak kan ikke alene redusere risikoen for eventuelle bygningsskader. Tiltaket fordrøyning vei- og bygningsarealer har den beste reduksjonen av antall bygningsskader



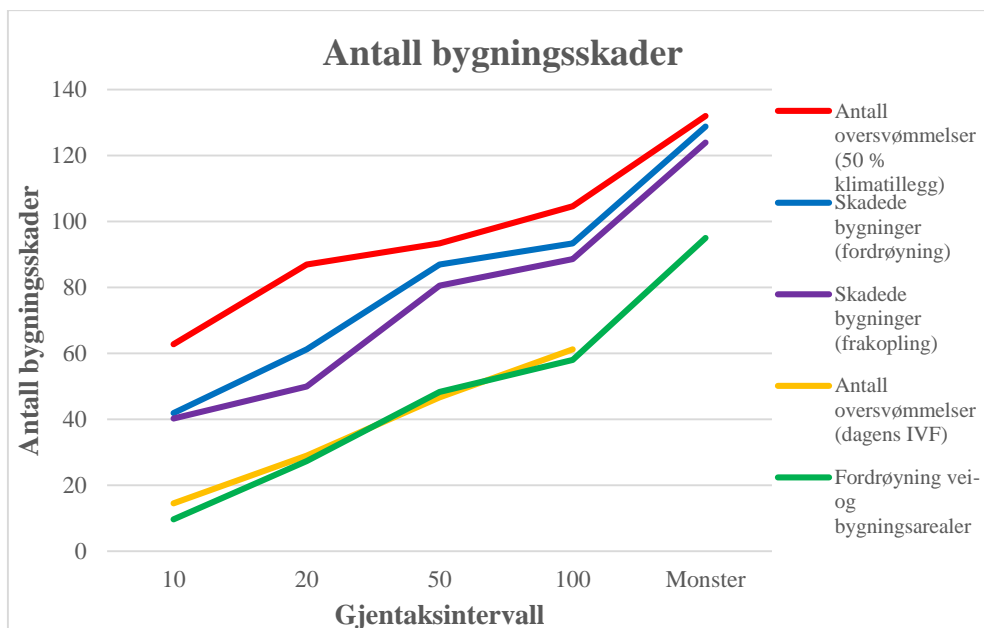
Figur 42. Sammenligning av tiltak ved forskjellige gjentaksintervall.

Figur 42 viser det totale volumet som hvert enkelt tiltak forårsaker ved de gitte gjentaksintervallene. De blå søylene skal representere dagens situasjon mens de andre søylene viser tiltak med 50 % klimatillegg. Ut fra fordrøyd volum er det bare 10-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg som klarer å komme ned til dagens situasjon.



Figur 43. sammenligning av tiltak med forskjellige gjentaksintervall.

I figuren over ser man sammenligningen av tiltakene som er gjennomført. Tiltakene viser variasjoner i effekten et tiltak har på de gjeldende gjentaksintervallene. Den blå søylen skal representere dagens situasjon mens de andre søylene viser tiltak med klimatillegg på 50 %. Videre kan vi se at fordrøyning og frakopling kan ikke alene redusere risikoen for eventuelle bygningsskader.



Figur 44. Sammenligning av tiltakene med gjentaksintervall og Monsterregnet.

I Figur 44 ser vi skadepotensialet målt opp mot gjentaksintervall og Monsterregnet. Den gule linjen representerer dagens skadepotensiale i de gitte gjentaksintervallene. Ut fra figuren ser vi at det er bare tiltaket fordrøyning av alle delfelt, grønn linje, som tilfredsstiller dagens skadenivået om 100 år.

## 9. Diskusjon

Det er registrert lite til-renning i overvannsystemet i Rustadskogen selv etter lengre oppholdsperioder, noe som kan indikere at det finnes lekkasje i ledningssystemet. Ved lange simulerings-perioder er det vanlig å legge inn en RDII- modul i modellen for å gjenskape til-renningen av grunnvann, snø, overflatevann og eventuelt vann i rotsonen til rørsystemet. Oppgaven baserer seg på korte nedbørs-hendelser og jeg har valgt å ta bort RDII-modulen grunnet den korte simuleringsperioden og de valgte intensitetene.

Regndataene som er brukt for kalibrering av modellen er virkelig regn som er basert på fire forskjellige kriterier, nærmere forklart i avsnittet 7. kalibrering av avløpsmodellen. Det gjør at modellen kun er basert på varme sommerdager, og der kalde vinterdager ikke er tatt med. For å simulere vinteravrenning kan man legge inn forskjellige moduler som beskriver lagringskapasiteten til snø og snøsmelting, men siden feltet går under kategorien Lite nedslagsfelt, vil den dimensjonerende avrenningsmengden i modellen basere seg på sommeravrenning.

De konstruerte symmetriske regnhyetogrammene som er brukt i simuleringen er en tilnærming til virkelig nedbør. Dette for å forenkle prosessen med å finne en eksakt intensitet til et gitt gjentaksintervall. Ulikheten mellom virkelig regn og simulert regn er varigheten. Det konstruerte regnet varer i 60 minutter, mens det virkelige regnet har som oftest en langt mindre varighet. Det simulerte regnet vil dermed kunne gi endel variasjoner i Q-maks, respons i avløpsnett og ikke minst i den inntreffende tiden for Q-maks.

For å beskrive framtidens regnintensiteter er det inkludert et klimatillegg på dagens IVF-kurve med en antatt faktor på 1,5. Denne faktoren er basert på antagelsen om verst tenkelige scenario. Resultat av dette tillegget blir økt avrenning og det vil kunne skape oversvømmelser i utsatte områder. De materielle skadene som eventuelt oppstår grunnet oversvømmelse antas skjer når noden blir oversvømt med mere enn  $1\text{m}^3$  mengde vann i løpet av simuleringsperioden. En mangel i den matematiske modellen er at vann forblir på stedet som oppstuvning og ikke strømmer videre nedstrøms som i virkeligheten. Dette betyr at modellen er svært sensitiv med hensyn på vannoppstuvning og dermed mengde flomvann. Her kunne vi valgt å endre modellen for å simulere eventuelle flomveier. Dette ble ikke gjort på grunn av for lite kunnskap tidligere i oppgavens prosess. Det ville gitt store utslag på resultatene fra simuleringen hvis overflateavrenning på permeable overflater oppsto ved høye og eventuelle langvarige intensiteter.

### 9.1 Vurdering av usikkerhet

Usikkerheter antas å ligge i alle ledd i simulering av Rustadskogen og man må forsøke å redusere disse mest mulig. I klimaframskrivninger globalt og regionalt finnes det fire kategorier av usikkerhet som naturlige pådriv og variasjoner, menneskeskapte og kunnskapen om klimapådriv. For å vurdere resultater og bruke

dem videre må hensynet til usikkerheten tas med. I dette tilfelle er, hvilken klimatillegg skal tas i bruk med bakgrunn i klimaforskning?

Klimatillegget er satt til 50 % for å forsikre oss om at framtidens regnintensiteter i modellen minst skal gjenspeile den virkelige intensiteten om 100 år. Dette er et antatt tillegg som er etablert kun etter en beslutning tatt etter diskusjoner med veileder. I dette tillegget ligger det store usikkerheter som vanskelig kan reduseres.

Dataene fra nedbørmåleren er det alltid en viss usikkerhet ved. Det trengs hyppige kontroller for å redusere risikoen for langvarige feilregistreringer av nedbør og avrenning. På Rustadskogen nedbørstasjon har det vært varierende kontroller av instrumentene og derfor finnes det noe usikkerhet i måledataene. Et annet usikkerhetsmoment ved måling/registrering av nedbør er at regncellen må være lik over hele nedslagsfeltet for å gjengi avrenningen av feltet tilsvarende intensiteten som er registrert ved nedbørstasjonen.

En av de største usikkerhetene ligger i modellens utforming og dataene som modellen baserer seg på. Det gir en usikkerhet som vil påvirke modellens resultater i stor grad. I oppgaven er det benyttet et simuleringsprogram kalt SWMM utviklet av EPA. Programvaren er et fullverdig simuleringsverktøy for overvannsimulering, men mangler noen finesser for å justere på noen parametere. Delfeltet i SWMM regnes ut fra et rektangulært utgangspunkt og vil ikke kunne justeres for å tilnærme seg et virkelig nedslagsfelt. Det gir også en begrensning hvis man vil justere på til-renningstiden ved å forandre på formen til konvergent (kremmerhus) eller divergent (kjegle) form. Andre usikkerhetsmomenter i modellen er delfeltene som kunne vært bedre tilpasset overvannssystemet, slik at hvert delfelt hadde en tilknytning til hver sin kum. Det vil redusere en eventuell overbelastning på de allerede utvalgte kummene. Når det gjelder tette arealer som takflater har de fleste bygninger en takvinkel som er brattere enn hva terrenget i modellen tilsier og kan gi misvisende resultater. Det gjør at andre parametere må justeres for å tilfredsstillende modellens tilnærming av virkeligheten.

Modellen av Rustadskogen er modellert med bakgrunn i datamaterialet som ligger i Ås kommunes Gemini database. Under innplotting og kalibrering er det registrert mange feil hvor det meste er rettet på for å tilfredsstillende en god modell. Noen verdier er etterkontrollert med GPS mens andre manglende verdier som kum bunn ble interpolert mellom kummene. For å få en optimal modell trengs det nøyere undersøkelser av nettet for å etterkontrollere de påståtte verdiene i Gemini. Tette flater som hus, vei og garasjer er registrert i Gemini og anses å være korrekte, men tilkoplingen til overvannssystemet er uvisst og estimert til å ha en reduksjonsfaktor på 15 % fra utgangsverdien på 100 % tilkople. Infiltrasjonskapasiteten til Horton på 75 mm/time er basert på EPA manualen og kunne vært etterprøvd for å tilnærme seg et sikrere resultat. Det vil gi utslag på eventuell avrenning med nedbør som har en høyere intensitet enn hva kapasiteten tilsier.

Under kalibreringen ble det benyttet en 3 steg metode for å optimalisere modellen med hensyn på pålitelighet. De tre stegene var verifikasjon, følsomhetsanalyse og etterprøving. Under følsomhetsanalysen ble det benyttet en modifisert modell uten veier tilknyttet overvannssystemet. Dette førte til at følsomhets resultatene ikke ble direkte overførbare sammenlignet med den endelige kalibrerte modellen. En følsomhetsanalyse basert på den nye modellen skulle vært gjennomført, men tiden strakk dessverre ikke til.

Ved etterprøving ble det funnet mange gode resultater fra simuleringene, men noen ekstreme variasjoner oppsto som klart kan grunngis i modellens usikkerhet. Årsaken kan være variasjoner i nedbør i feltet i forhold til registreringer i nedbørmåleren, metning i jordsmonnet, feilregistreringer i nedbørs- og avrenningsdata, eller at modellen er rett og slett kalibrert på feil premisser.

Resultatene for kalibreringen ligger innenfor den akseptable grensen på 15 % for Q-maks i forhold til målte avrenninger (lindholm 2013a). Ser vi på F-verdien hvor volum, tiden og Q-maks er med på å estimere modellens kvalitet, ble resultatet på 106 en verdi som ikke kan sammenlignes med en annen verdi. F-verdien er et mål for hvor godt kalibrert modellen er i forhold til målte verdier. Verdiene fra simuleringen blir sammenlignet og summert sammen med minimum 2 forskjellige nedbør. I denne simuleringen ble det brukt 4 forskjellige nedbør for å få et bedre resultat. Det gjør at kalibreringen blir mer kompleks, men mere nøyaktig grunnet variasjonene i nedbøren. Her ligger det nok endel usikkerhet i hvor godt dette resultatet er. En skala for å vurdere kvaliteten på kalibreringen mangler.

Den matematiske modellen er ikke designet med hensyn på flom. Det vil si at alle flater forholder seg til overvannsrørsystemet og vil ikke ha andre veier å gå under ekstreme forhold. Flom vannet til noder og overflate avrenning fra permeable flater vil stuves opp i nodene, og renne tilbake i systemet. Modellen forholder seg ikke til de lokale forholdene i Rustadskogen hvor flomvannet ville fortsette ned terrenget og forsvunnet ut i utmark.

## **9.2 Vurdering av resultater**

Følsomhetsanalysen viser at andel prosent tette flater har en høyere følsomhet i modellen enn hva de andre parameterne har. Som forklart i teksten i avsnittet 7.5 følsomhetsanalyse, vil en økning av andel tette flater gi den tilsvarende økningen i Q-maks i prosent. Det gjør at usikkerheten i modellen er større på grunn av uvissheten i hvor mange takflater som er tilkoblet til overvannsnett.

Resultatene til etterprøving viste varierende resultater. Fra de registrerte dataene fra 14.07.1995 og 27.07.1997 viste etterprøvingen en Q-maks forskjell på 4,7 % og 8,1 % som kan anses som gode resultater i forhold til hva den akseptable grensen tilsier på 15 % forskjell (lindholm 2013a). To andre etterprøvinger viser en overfølsom modell i forhold til målte verdier. Det vil si at de simulerte verdiene viste langt høyere avrenning i Q-maks, henholdsvis 28,8 % og 26,5 %, enn hva målte verdier tilsier. De to modellene viste høy regn intensitet opp mot 132



mm/time, som kan indikere at 75 mm/time i infiltrasjonskapasitet er for lite i forhold til de lokale infiltrasjonskapasitetene. Følsomheten til infiltrasjonskapasiteten burde vært sjekket slik at vi kunne fått sett om utslaget hadde vært så stort som etterprøvingen tilsier. Ellers kan forskjellene forklares med at det kan være feil i grop-magasineringsen på permeable flater og /eller feil i de registrerte dataene nedbør og avrenning. Den siste etterprøvingen hadde feil utgangsverdier i avrenningen, den startet ikke fra null, og kunne dermed ikke brukes som et mål for modellens kvalitet.

Utgangspunktet for beregningen av antall bygningsskader i simuleringene er forenklet i forhold til virkeligheten. Det er antatt antall hus i nærheten til noden og multiplisert med 70 % som en sannsynlighet for hus skade, nærmere forklart under avsnittet 8.1 Forutsetninger og valg. Det å registrere bygningsskader ved en oversvømmelse på 1 m<sup>3</sup> gir mest sannsynlig et helt annet resultat hvis utgangspunktet er 3 m<sup>3</sup> som en grense for oversvømmelse. En oversvømmelse på 3 m<sup>3</sup> gir en reduksjon på bygningsskader ved 10- og 20-års gjentaksintervall med henholdsvis 78 % og 50 % sammenlignet med 1 m<sup>3</sup>. Variasjonen synker med høyere intensitet grunnet økt volum per node.

Tiltakene som er presentert i oppgaven viser varierende effekt på reduksjon av eventuelle bygningsskader og flom. Ved fordrøyning av takarealer og frakopling av takarealer viser det seg at tiltakene ikke er gode nok med tanke på reduksjon av flom i forhold til dagens intensitet. Effekten av de to nevnte tiltakene reduseres med økende gjentaksintervall som forventet. For tiltaket fordrøyning av alle delfeltene kom resultatene bedre ut enn de andre tiltakene nevnt over. Som forklart i avsnittet 8.4.1 Resultater, er det bare 50-års gjentaksintervall som mangler ca. 2 % fra å tilfredsstillende forutsetningene for et godt resultat.

I oppgaven er det nevnt under tid-areal kurve, at SWMM ikke har en funksjon hvor man kan forandre på arealutformingen som igjen kan forandre på tid-areal kurven. Det ville kanskje løst problemet med etterslepet med tanke på tiden simuleringen ligger etter de målte verdiene.

Simuleringene utført med Monsterregnet inklusive de forskjellige tiltakene viser at dette regnet vil være årsak i store materielle skader. Utgangspunktet er 15369 m<sup>3</sup> flomvann som tilsvarer 132 potensielle bygningsskader for Monsterregnet uten tiltak. Det beste tiltaket for Monsterregnet var å koble fordrøyning til alle del-arealene som ga en reduksjon av flomvolumet med 55 % og en reduksjon av skadeomfanget på 28 % fra utgangspunktet på 95 bygningsskader. Ser vi på 100-års gjentaksintervall med klimatillegg på 50 % så tilsvarer det 105 bygningsskader. Dette er bare 20 % mindre bygningsskader enn konsekvensene fra Monsterregnet.

Ser vi på volum sier Hans Bäckman i Svenskt Vatten «100-års regnet är drygt dubbelt så stort som 10-års. 10 års regnet är ca. dubbelt mot 1-års». Det vil si at dagens 100-års regn med klimatillegg på 50 % tilsvarer et 500-års regn.

Ser vi på regnintensiteten med varighet 10 minutter, vil 10-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg være bortimot like stor som regnintensiteten til 100-års

gjentaksintervall uten klimatillegg ifølge Figur 24. Det vil si at 100-års regnet med klimatillegget på 50 % er lik dagens 1000-års regn. Det er en økning i faktor to i forhold til Hans Bäckmans teori. Ser vi på resultatene fra regnintensitetene til Monsterregnet ser vi at København allerede har fått sitt 1000-års regn i varighet på 10 minutter. Sammenligner vi intensiteten i Monsterregnet i København med et eventuelt Monsterregn i Ås vil intensiteten være høyere i Ås. Hvis vi går ut fra antagelsene som er gjort at 10-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg er like stor som dagens 100-års gjentaksintervall, vil Monsterregnet i Rustadskogen modellen være på samme nivå som dagens 1000-års gjentaksintervall som tilsvarer  $50 \% * 100\text{-års gjentaksintervall (125 mm/time)} = 189 \text{ mm/time}$  i en varighet på 10 minutter. Det tilsvarer en intensitets økning på 23 % i forhold til 1000-års regnet i København.

## 10. Konklusjon

Som beskrevet i oppgaven tidligere vil klimautviklingen øke regn intensiteten på sommerstid og sette et økende press på urbane strøk om hvor mye overvann vi får grunnet tette flater. Det gjør at arbeidet med å utvikle framtidssrettete metoder når det gjelder behandling av overvann blir viktig.

I oppgaven er det presentert data basert på simulering av framtidens klimautvikling av overvann lokalt i Ås Kommune. De antagelsene som er gjort under diskusjonen er basert på resultater fra simulerings modellen. Data materialet som er funnet kan ikke gi klare konklusjoner på grunn av usikkerheten i modelleringen. Nedenfor vil de viktigste konklusjonene fra arbeidet med oppgaven presenteres.

Fra følsomhetsanalysen er konklusjonen at bredden av delfeltene gir en økende følsomhet etter hvert som prosentandelen øker. I analysen viser parameteren andel tette flater fra delfeltene meget stor følsomhet i forhold til maksimal vannføring. Vannføringen er tilnærmet proporsjonal med parameteren andel tette flater. De resterende parameterne viser en lavere variasjon i Q-maks og defineres som mindre følsomme.

Avløpsnett på Rustadskogen er sårbart for økt regnintensitet. Resultatene peker mot en høy grad av oversvømmelse fra utgangsverdiene i lavere intensiteter og reduseres ved høyere intensiteter. Overvannsnett er allerede underdimensjonert i forhold til Norsk standard og det trengs straks-tiltak for å unngå eventuelle framtidige bygningsskader. Monsterregnet viste store potensielle bygningsskader fra ytterste punkt i rørsystemet til utløpspunktet. Det kan konkluderes med at nettet ble totalt overbelastet.

Effektene av tiltakene for fordrøyning og frakopling ga ikke stor nok reduksjon i potensielle bygningsskader for å tilfredsstillende dagens utgangsverdi. Tiltakene frakopling viste noen prosentpoeng bedre resultat enn resultatene av fordrøyning. Det eneste tiltaket som hadde tilfredsstillende resultat var fordrøyning av delfelt fra vei- og bygningsarealer. Tiltakene viste størst reduksjon av skader ved lavest gjentaksintervall. Monsterregnet viste tilnærmet ingen endring i bygningsskader

ved fordrøyning og frakopling av bygningsarealer. Tiltaket Fordrøyning vei- og bygningsarealer ga et noe bedre resultat, men de potensielle bygningsskadene var fortsatt uakseptabelt høye.

## **11. Videre arbeid, gjenstående arbeid**

I denne master oppgaven finnes det flere momenter for videre arbeid og sammenligning av data med oppgavens resultater.

Et moment er å jobbe videre med den kalibrerte modellen og finne de beste tiltakene med utgangspunktet i kost nytte prinsippet. Det vil kunne vise hvilke kostnadsomfang skadene vil utgjøre og eventuelt hvilke utgifter det må til for å redusere skadene med tiltak.

Hvis modellen skal brukes til videre arbeid innen store og intense nedbør bør det vurderes å justere på Hortons infiltrasjons kapasitet. For å tilnærme seg virkeligheten bedre og få bedre resultater ved oversvømmelse må det legges inn flomveier fra oversvømte noder.

Det hadde vært interessant å simulere vinter i modellen. Ved å legge inn moduler som kan beskrive snø, bakke frost, smelting, regn, temperatur osv. vil man kunne se hvordan nettet vil oppføre seg med andre påkjenninger.

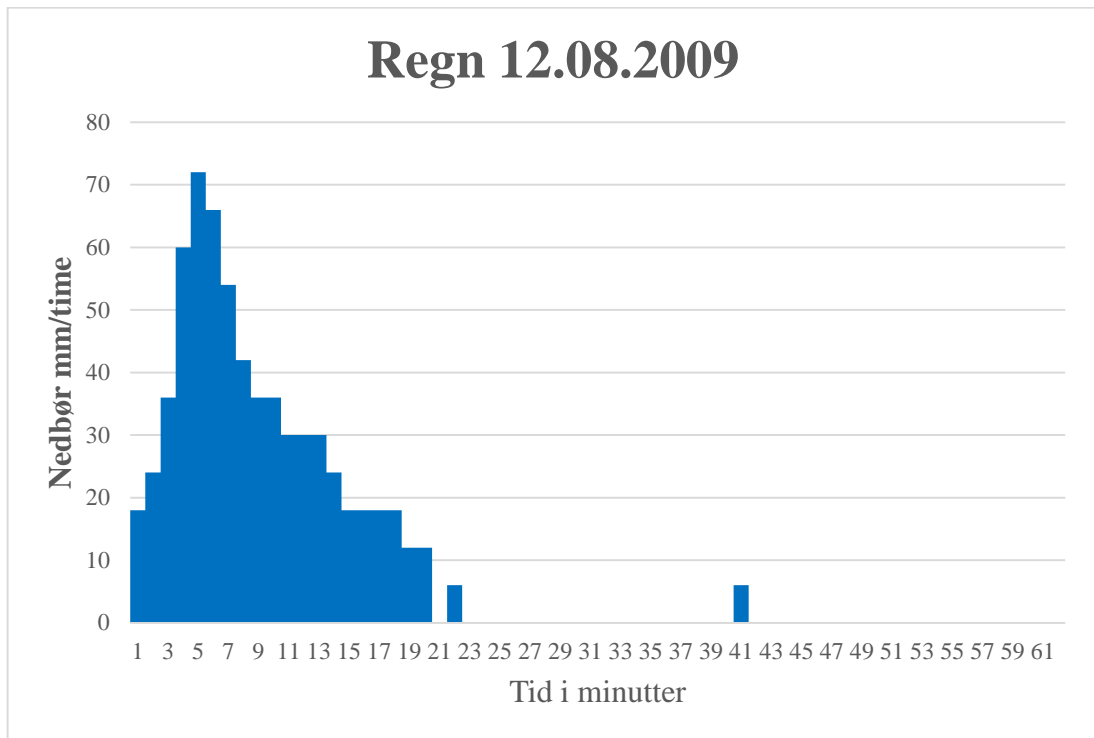
## Referanseliste

- Aarseth, J. F. (2013). *Teknisk avdeling Ås kommune*.
- Barton, M. (2010). TECHNICAL MEMORANDUM. Tilgjengelig fra: [http://your.kingcounty.gov/dnrp/library/wastewater/wtd/construction/CSOBeach/TechDocs/FacilityPlans/NBeach/Draft/AppB\\_NB.pdf](http://your.kingcounty.gov/dnrp/library/wastewater/wtd/construction/CSOBeach/TechDocs/FacilityPlans/NBeach/Draft/AppB_NB.pdf) (lest 01.03).
- Bekkum, I. (2012). *Analyse av klimatilpasningstiltak: en casestudie av overvannsnettet på Bogafjell i Sandnes kommune*. Ås: [I. Bekkum]. 130 s.
- Bjerknessenteret. (2009a). Drivhuseffekt og jordas klima (lest 05.02).
- Bjerknessenteret. (2009b). Klimaendringer i fortiden. (lest 05.02).
- Bjerknessenteret. (2009c). Golfstrømmen og vårt milde klima. (lest 05.02).
- Buhler, L., Raanaas, M. L., Sara, R., Abdi, S. & Barzan, S. (2011). Modellering av overvann ved bruk av SWMM
- Butler, D. & Davies, J. (2010). *Urban drainage*. London: E&FN Spon.
- DHI. (2004). *MOUSE Pipe Flow*. Reference Manual
- DMI. (2012). Klimaendringer giver mere ekstreme regnskyl.
- DSB & beredskap, D. f. s. o. (2011). Samfunnsikkerhet i arealplanlegging.
- Engan, J. A. (2011). *Modellbygging, kalibrering og praktisk bruk av modeller av vannforsyningsnett*. Forelesnings notat THT300, Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- EPA. (2004). Storm Water Management Model, users manual.
- EPA. (2010). Storm Water Management Model, users manual Version 5.0
- Flatin, A. (1986). Feltdokumentasjon, dataanalyse, modellanvendelse og vannføringsmålinger.
- Fuglestvedt, J. S. & Olerud, K. (2011). FNs klimapanel. Tilgjengelig fra: [http://snl.no/FNs\\_klimapanel](http://snl.no/FNs_klimapanel) (lest 10.02).
- Førland, E. J., Benestad, R. E., Flatøy, F., Hanssen-Bauer, I., Haugen, J. E., Sorteberg, A. & Ådlandsvik, B. (2009). *Climate development in North Norway and the Svalbard region during 1900-2100*, b. nr 128. Tromsø: Instituttet. 45 s. : ill. s.
- Geographic, N. (2010). *Solen når snart sin 11-årsryklus*. Tilgjengelig fra: <http://natgeo.no/solen-nar-snart-sin-11-arssyklus>.

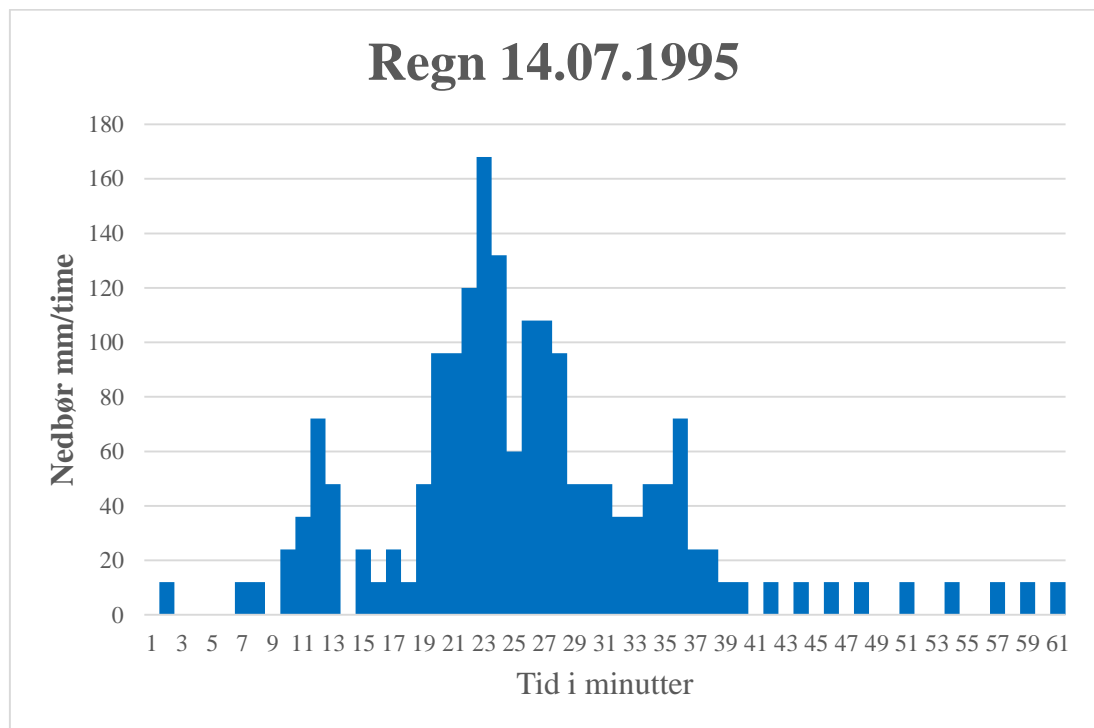
- Harstveit, K. E., Benestad, R. & Fuglestad, J. S. (2013). *klima – klimaendringer*: Den Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/klima/klimaendringer> (lest 06.02).
- I, H.-B., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., et al. (2009). Klima i Norge 2100-Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing.
- IPCC. (2000). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*: © 2013 GRID-Arendal. Tilgjengelig fra: [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_tar/?src=/climate/ipcc/emission/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc/emission/) (lest 10.02).
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2010). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, .
- Kleidorfer, M. (2009). Uncertain calibration of urban drainage models. A scientific approach to solve practical problems.
- Kommune, Å. (2013). *Miljø, mangfold og muligheter*. Tilgjengelig fra: <http://www.as.kommune.no/hjem.125470.no.html> (lest 03.04).
- Lindholm, O. (1986). *Følsomhetsanalyse for parametre i avløpsnettberegninger: fase 1*, b. 1910. Oslo: NIVA. 110 s. : ill. s.
- Lindholm, O., Nie, L. & Bjerkholt, J. T. (2007). Klimaeffektens betydning for oppstuvninger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer. Ås: Instituttet. 77 s. : fig., kart s.
- Lindholm, O. (2008). Omdanning av I-V-F kurven til modellregn som f.eks. symmetrisk hyetogram.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering.
- lindholm, O. (2011a). Usikkerheter i flomberegninger i urbane områder. *Innlegg på fagtreff i Norsk vannforening 14. februar 2011*.
- Lindholm, O. (2011b). *Usikkerheter i flomberegninger i urbane områder*. Institutt for matematiske realfag og teknologi, UMB.
- Lindholm, O. (2011c). Om matematiske modeller for beregning av urbane avløpssystemer.
- Lindholm, O., Endresen, S., Smith, B. T. & Thorolfsson, S. (2012). Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem, 978-82-414-0337-8. Hamar: Norsk Vann BA. 126 s. : ill. s.
- Lindholm, O. & Bjerkholt, J. (2013). Vann nummer 3.

- lindholm, O. (2013a). *Info innsamling fra samtaler og elektronisk post*.
- Lindholm, O. G. & Bjerkholt, J. T. (2012). Analyse av Rustadskogfeltet.
- met.no. (2010). Analyse av korttidsnedbør i Norge 1967-2009, No. 11/2010. Tilgjengelig fra: [http://met.no/filestore/metno\\_report\\_11\\_2010.pdf](http://met.no/filestore/metno_report_11_2010.pdf) (lest 03.03).
- Meteorologisk Institutt. (2013). *Hva er klima*: . Tilgjengelig fra: [http://met.no/Klima/Hva\\_er\\_klima+/Hva\\_bestemmer\\_klimaet+/](http://met.no/Klima/Hva_er_klima+/Hva_bestemmer_klimaet+/) (lest 05.02).
- Metrologisk Institutt. (2013). *Klima*. Tilgjengelig fra: <http://met.no/klima/> (lest 05.02).
- NGU. (2013). *Løsmasser*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (lest 03.04).
- NVE. (2009). *Urbanhydrologi*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/vann-og-vassdrag/hydrologi/vannstandvannforing/urbanhydrologi/>.
- Oddvar Lindholm. (2013). *Lindholm THT 300, Omdanning av I-V-F kurven til modellregn som f.eks. symmetrisk hyetogram*: UMB, IMT.
- Solomon, S. (2007). *Climate change 2007 : the physical science basis : contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. VIII, 996 s. : ill. s.
- Sons, J. W. (2005). *Water Resources Engineering*. 2005 utg.
- SSB. (2013). *Statistisk sentralbyrå*. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/folkendrhist> (lest 03.04).
- Sælthun, N. R. (2011). THT300 Hydrological modelling.
- Taksdal., S. (2013). *Hydroinformatikk, Hydrologisk avdeling*.
- UIO. (2013). *Kurs i praktisk bruk av Bayesianske metoder*.
- Vann- og avløpsteknikk*. (2012). Hamar: Norsk Vann. 704 s s.
- Vegvesen, S. (2011). *Vegbygging Håndbok 018*.
- Winther, L., Linde, J. J., Jensen, H. T., Mathiasen, L. L. & Johansen, N. B. (2006). *Afløbsteknik*. 5 utg.
- Ås kommune. (2012). *Kommuneplan (2011 – 2023)*.

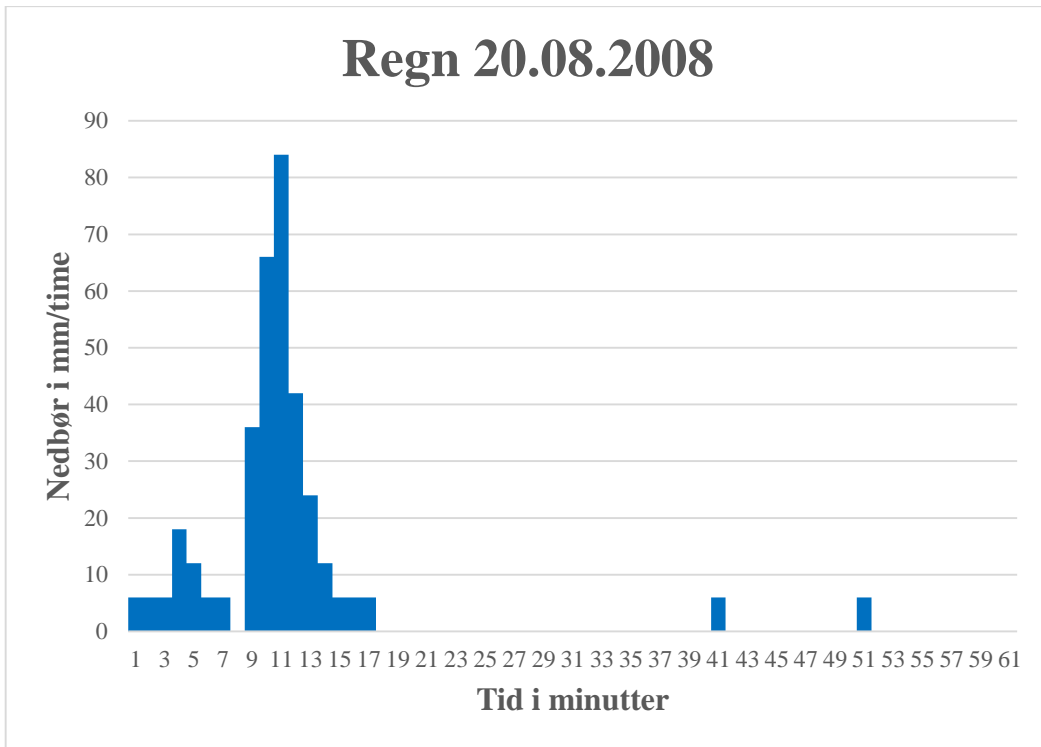
## Vedlegg: A



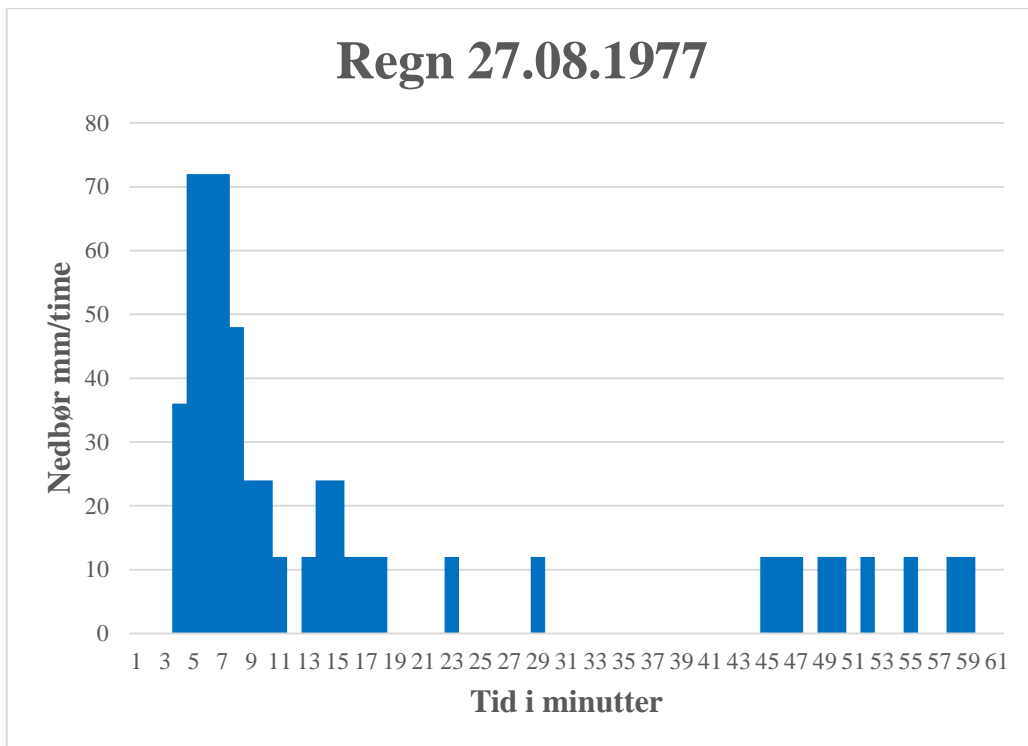
Figur 45. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 12.08.2009



Figur 46. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 14. juli 1995

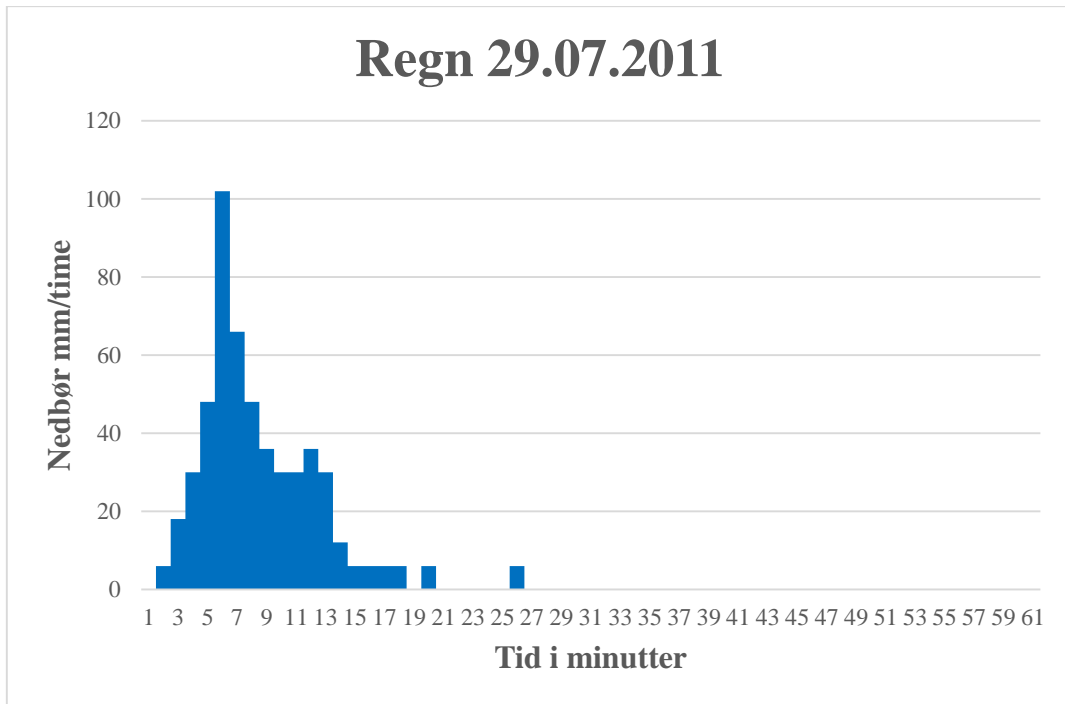


Figur 47. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 20. august 2008

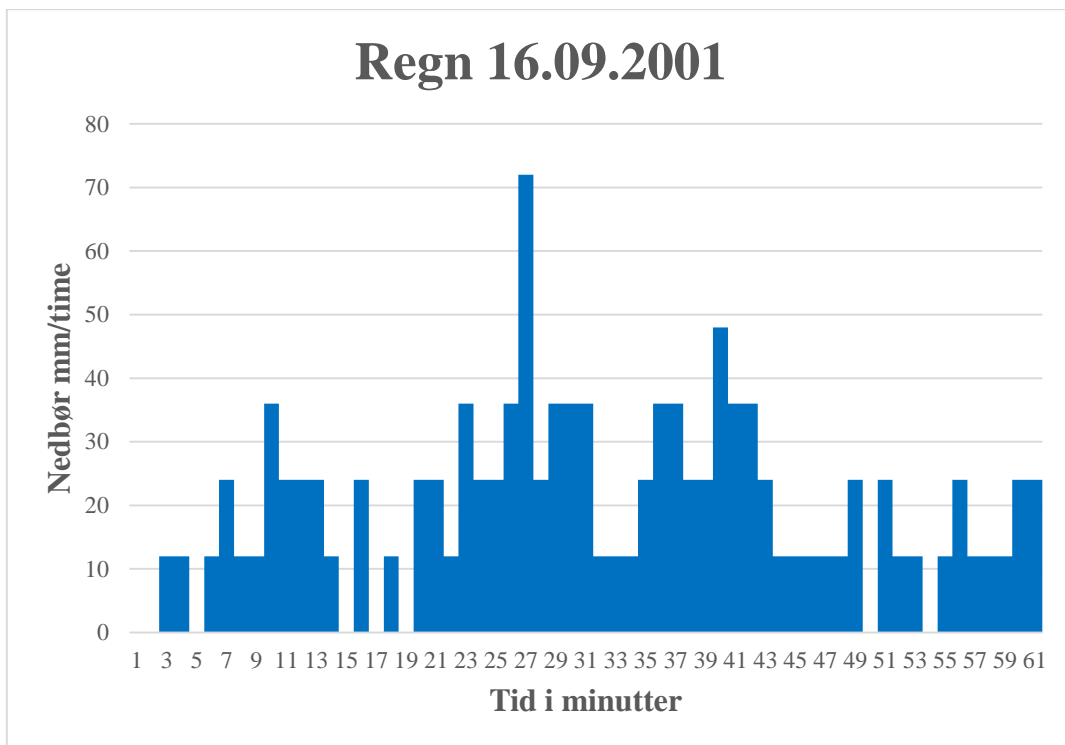


Figur 48. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 27. august 1977.

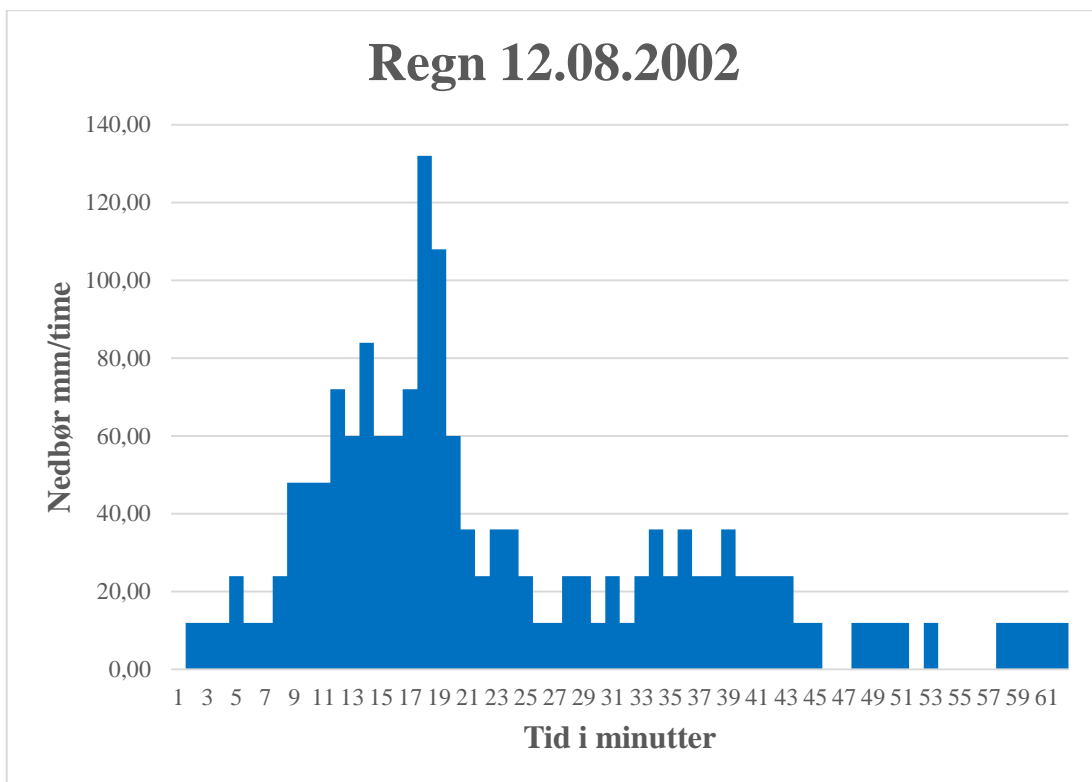




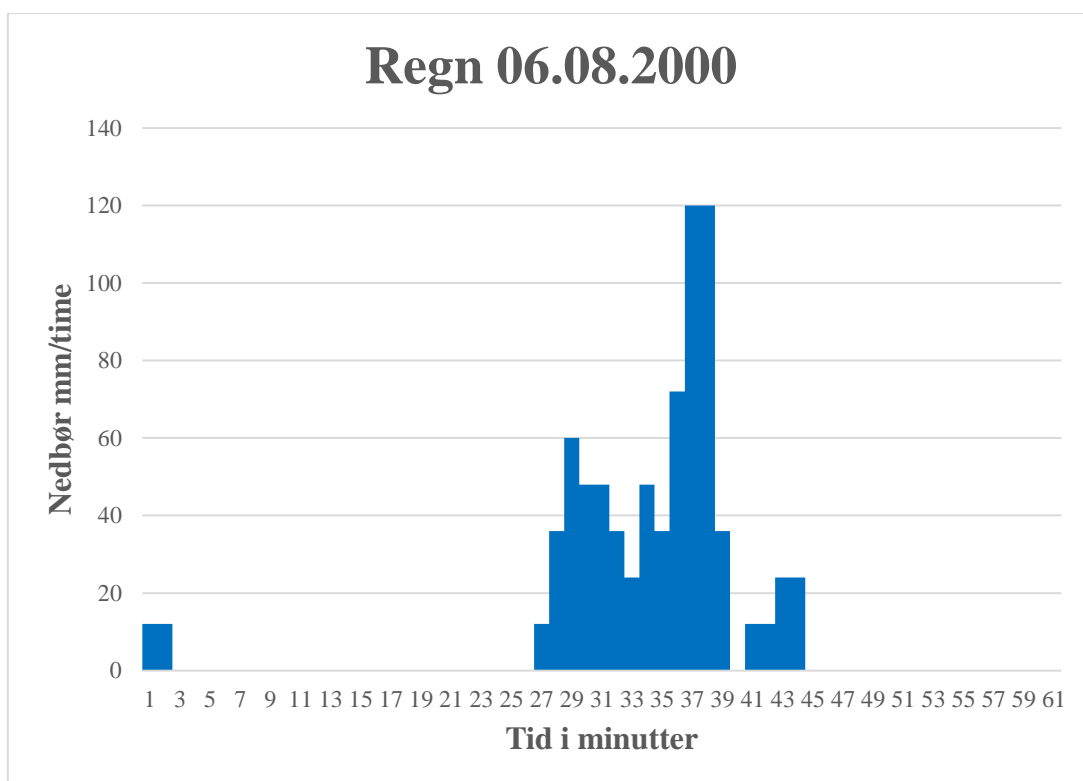
Figur 49. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 29. juli 2011



Figur 50. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 16. september 2001



Figur 51. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 12. august 2002

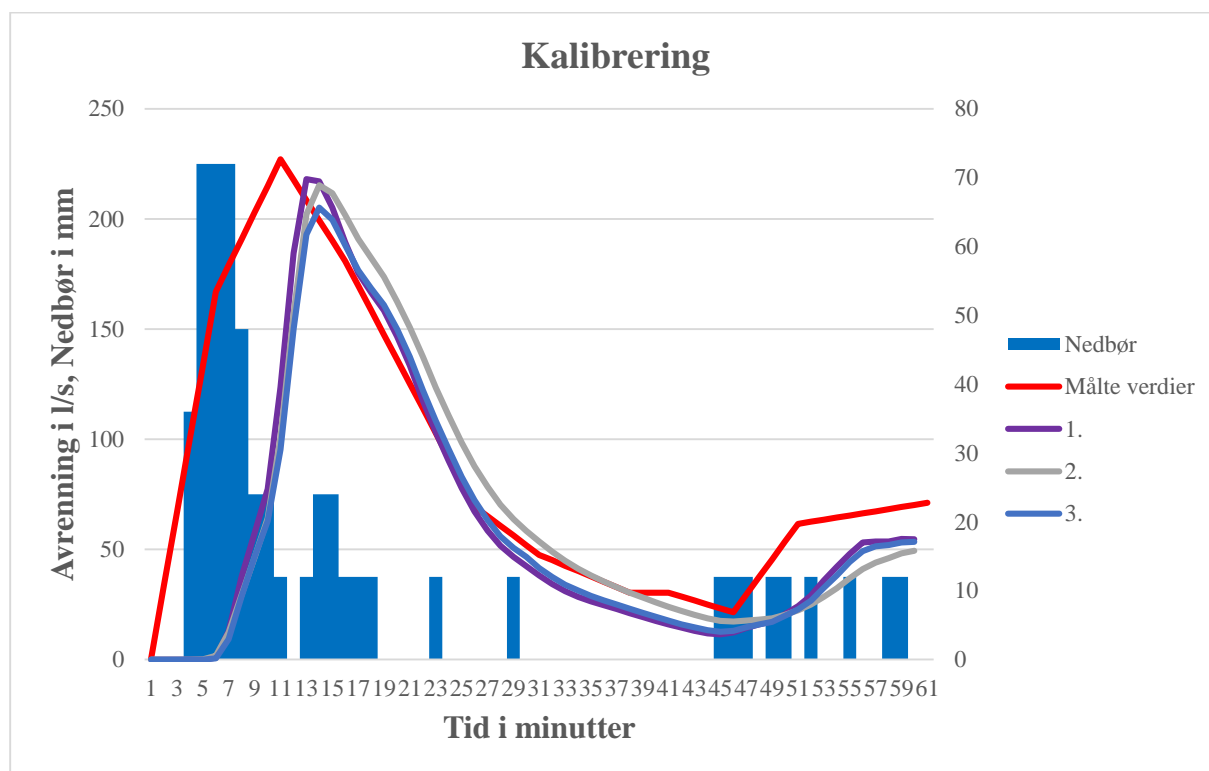


Figur 52. De blå søylene indikerer regnintensiteten for 6. august 2000

## Vedlegg: B

Tabell 18. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier.

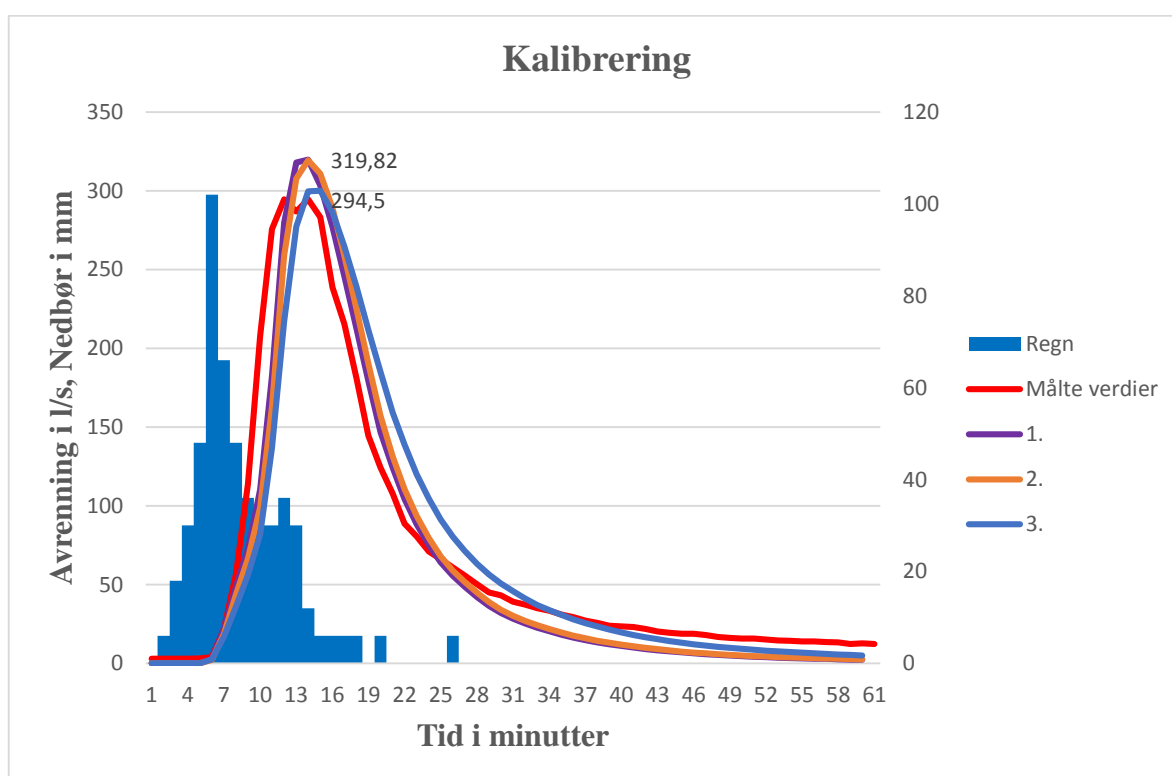
Parametere	Alternativ 1 Q = 217,9	Alternativ 2 Q = 215,2	Alternativ 3 Q = 205,1
Bredde på nedslagsarealet	60	40	40
Helning på nedslagsarealet i prosent	3	0,50	3
Prosent av tette flater	85 %	85 %	85 %
Bredde på Delfelt vei	60	150	150
Prosent tette flater Delfelt vei	50	50	50
Grop-magasin for tette flater (mm)	2,5	1,6	2,5
Grop-magasin for permeable flater	5	5	5
Max infiltrasjon rate i Horton	75	75	75
Min infiltrasjon rate i Horton (mm/h)	20	20	20
Mannings tall for tette flater (dim. løs)	0,025	0,025	0,025
Mannings tall for permeable flater, tett gress (dim. løs)	0,1	0,1	0,1
Mannings tall for sement rør (dim. løs)	0,017	0,017	0,017
Tette flater uten grop-magasin (%)	0	0	0



Figur 53. Regn 27.08.1977. Simulering med tilhørende parametere får best resultat med 5,19 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene.

Tabell 19. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier.

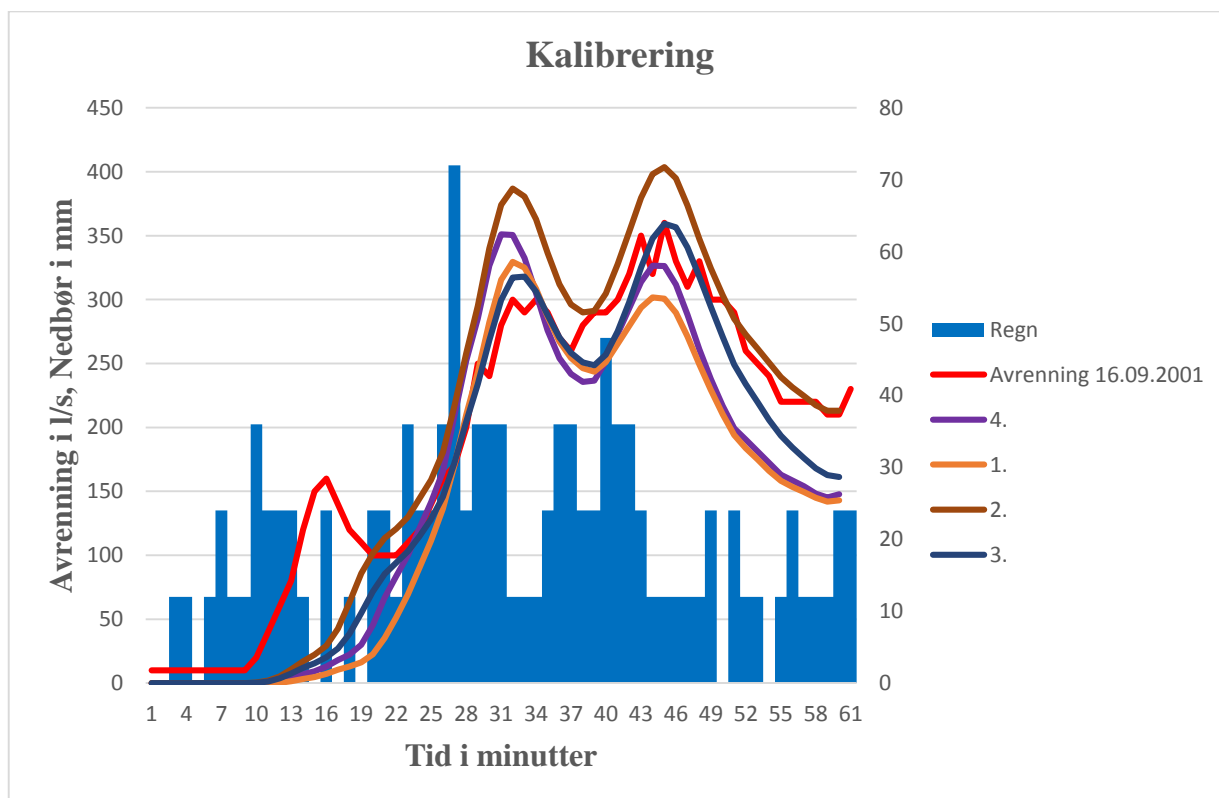
Parametere	Alternativ 1 Q = 319,8	Alternativ 2 Q = 319,4	Alternativ 3 Q = 300,1
Bredde på nedslagsarealet	60	60	40
Helning på nedslagsarealet i prosent	3	3	0,5
Prosent av tette flater	85 %	85 %	85 %
Bredde på Delfelt vei	60	150	150
Prosent tette flater vei	50	50	50
Grop-magasin for tette flater (mm)	2,5	2,5	1,6
Grop-magasin for permeable flater (mm)	5	5	5
Max infiltration rate in Horton (mm/h)	75	75	75
Min infiltration rate in Horton (mm/h)	20	20	20
Mannings tall for tette flater (dim. løs)	0,025	0,025	0,025
Mannings tall for permeable flater, tett gress (dim. løs)	0,1	0,1	0,1
Mannings tall for sement rør (dim. løs)	0,017	0,017	0,017
Tette flater uten grop-magasin (%)	0	0	0



Figur 54. Regn 29.07.2011. Ssimulering 3 med tilhørende parametere får best resultat med 1,86 % forskjell i Q-maks.

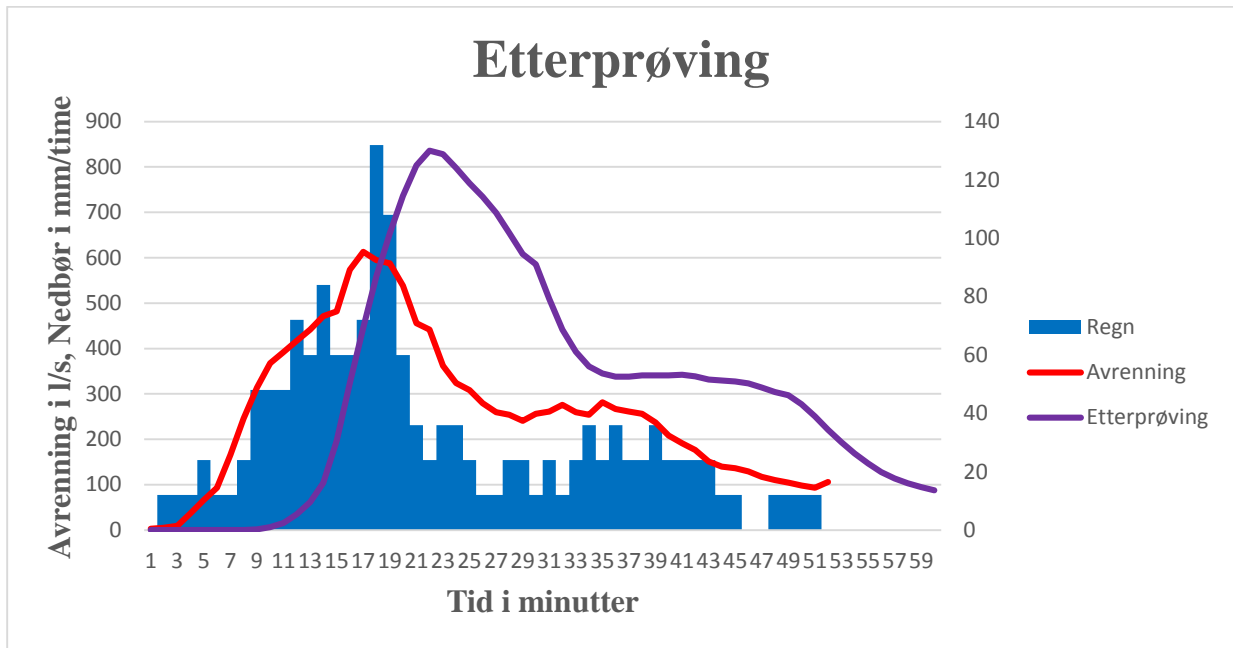
Tabell 20. Oversikt over alternativene 1-3 med tilhørende parameter-verdier.

Parametere	Alternativ 1 Q = 329,6	Alternativ 2 Q = 386,7	Alternativ 3 Q = 359,3
Bredde på nedslagsarealet	23	23	40
Helning på nedslagsarealet i prosent	3	2	0,5
Prosent av tette flater	85 %	100 %	85 %
Prosent tette flater vei	50	50	50
Bredde på Delfelt vei	60	150	150
Grop-magasin tette flater (mm)	2,5	1,6	1,6
Grop-magasin for permeable flater (mm)	5	5	5
Max infiltration rate in Horton (mm/h)	75	75	75
Min infiltration rate in Horton (mm/h)	20	20	20
Mannings tall for tette flater (dim. løs)	0,025	0,02	0,02
Mannings tall for permeable flater, tett gress (dim. løs)	0,1	0,1	0,1
Mannings tall for sement rør (dim. løs)	0,017	0,017	0,017
Tette flater uten grop-magasin (%)	0	0	0

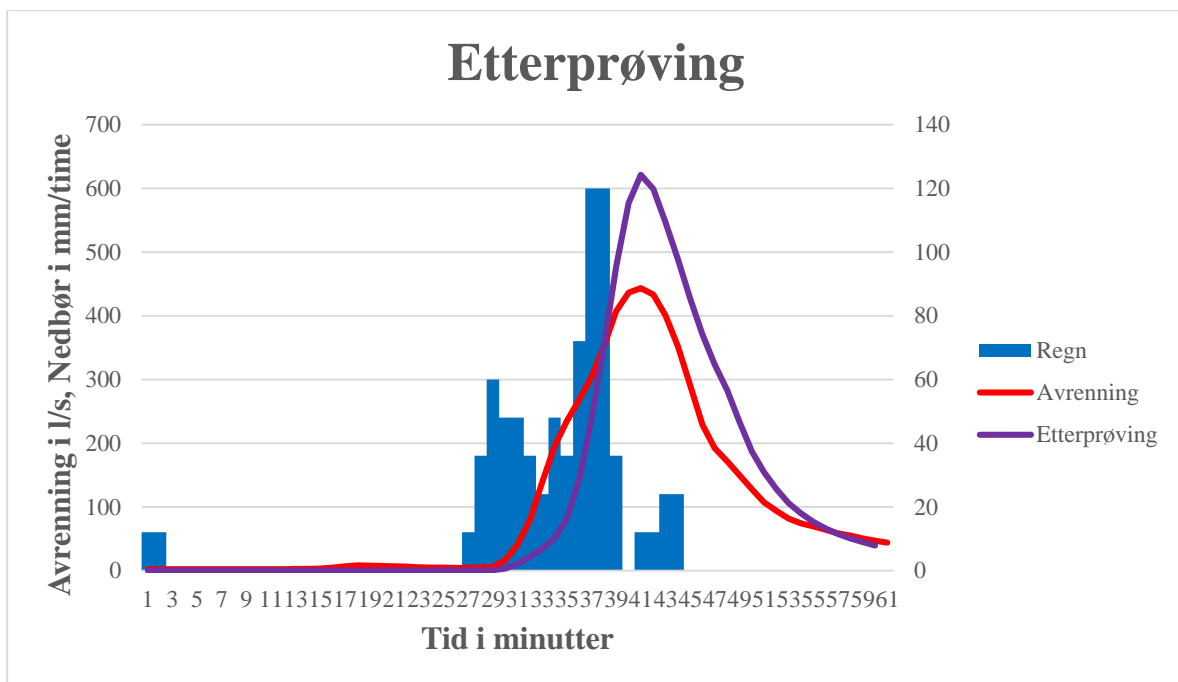


Figur 55. Regn 16.09.2001. Simulering med tilhørende parametere får best resultat med 2,28 % forskjell i Q-maks i forhold til de målte verdiene.

## Vedlegg: C

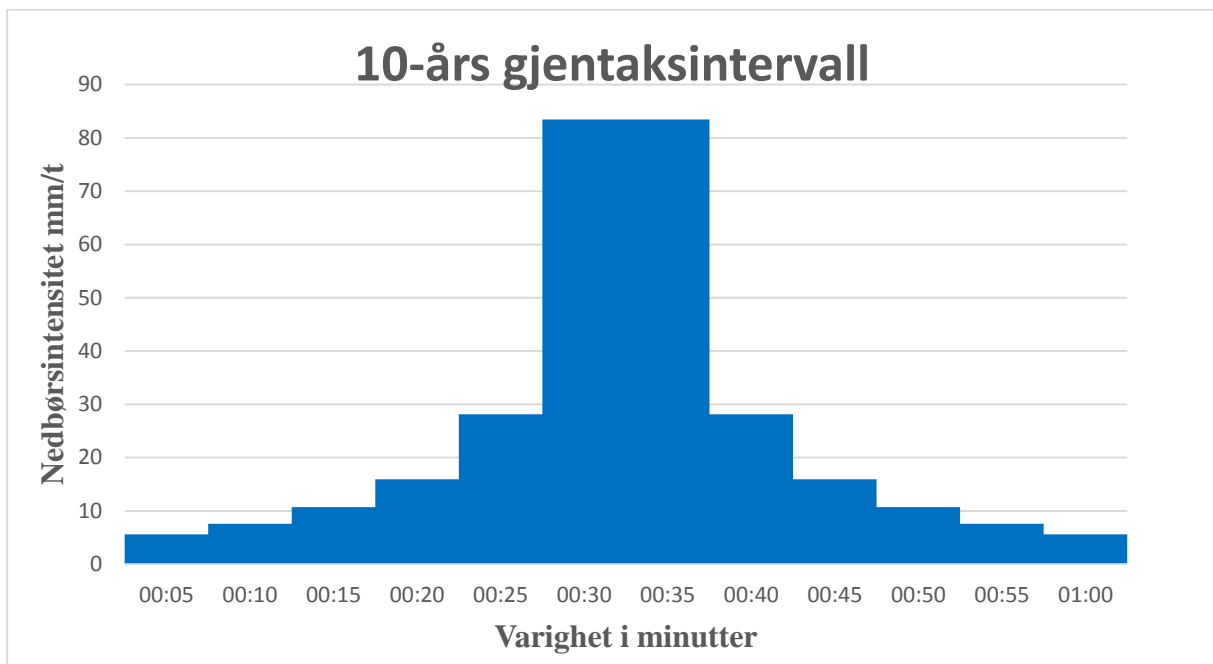


Figur 56. Etterprøving med regn fra 12.08.2002 med kalibreringsparametere.

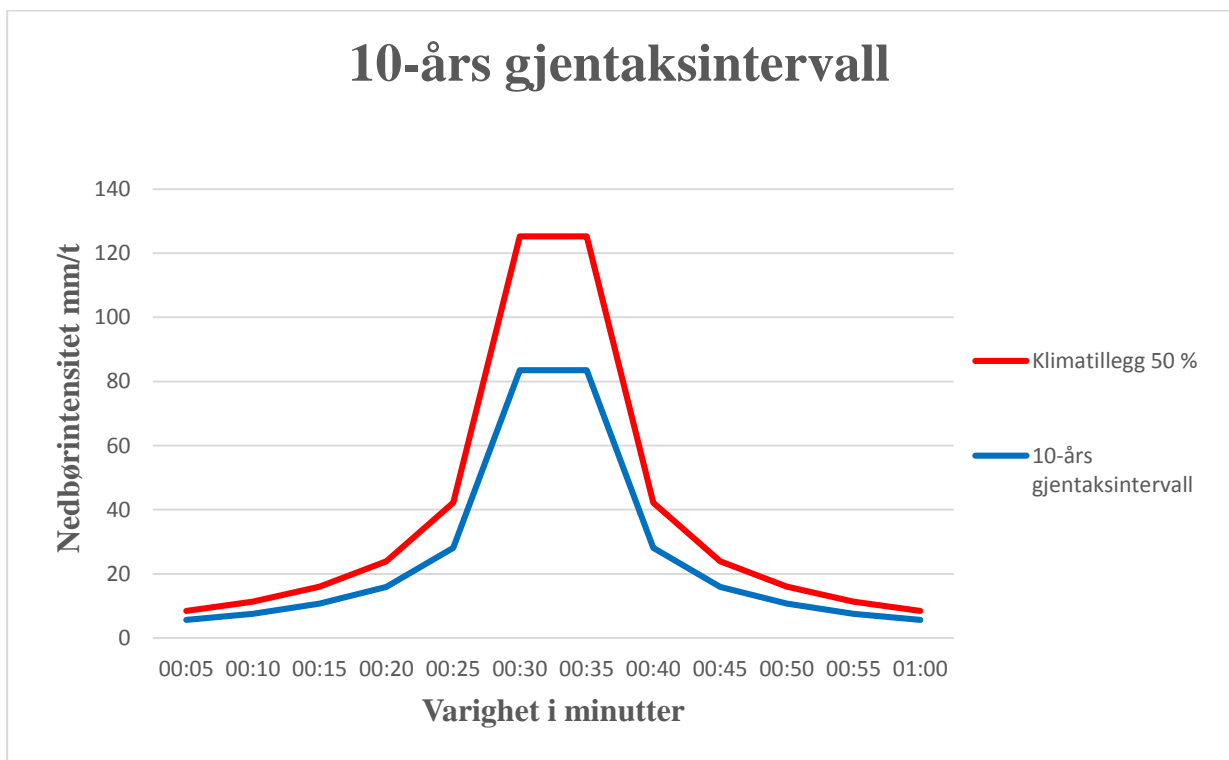


Figur 57. Etterprøving med regn fra 06.08.2000 med kalibreringsparametere.

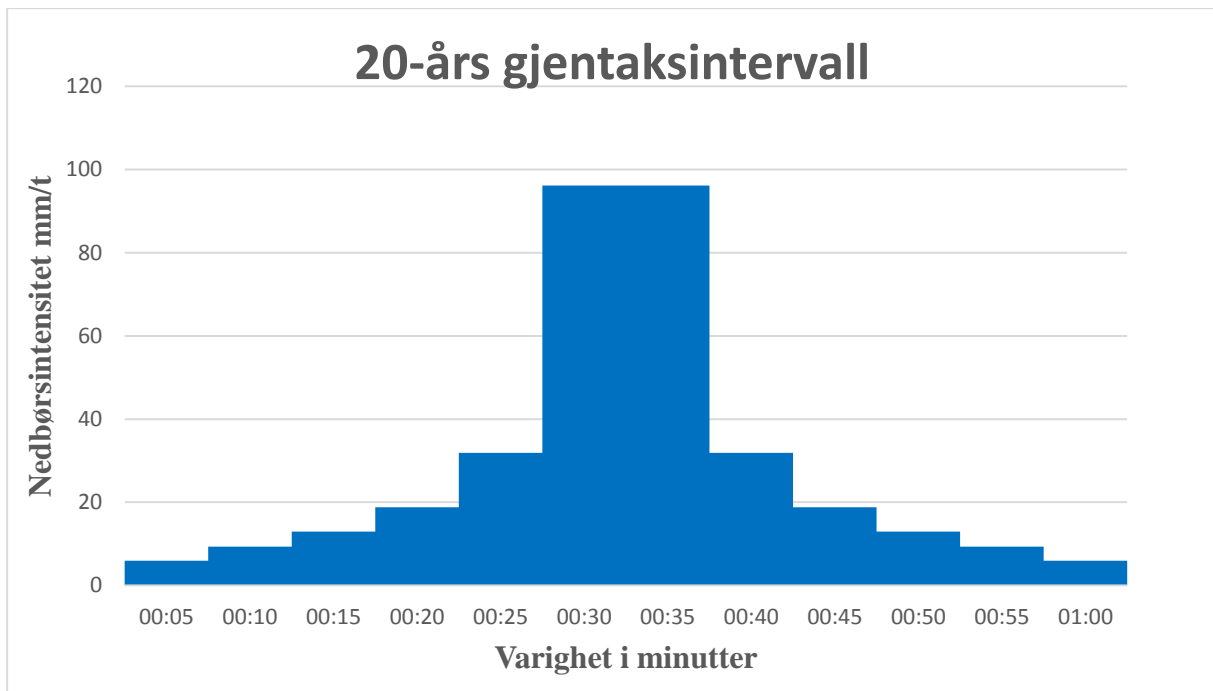
## Vedlegg: D



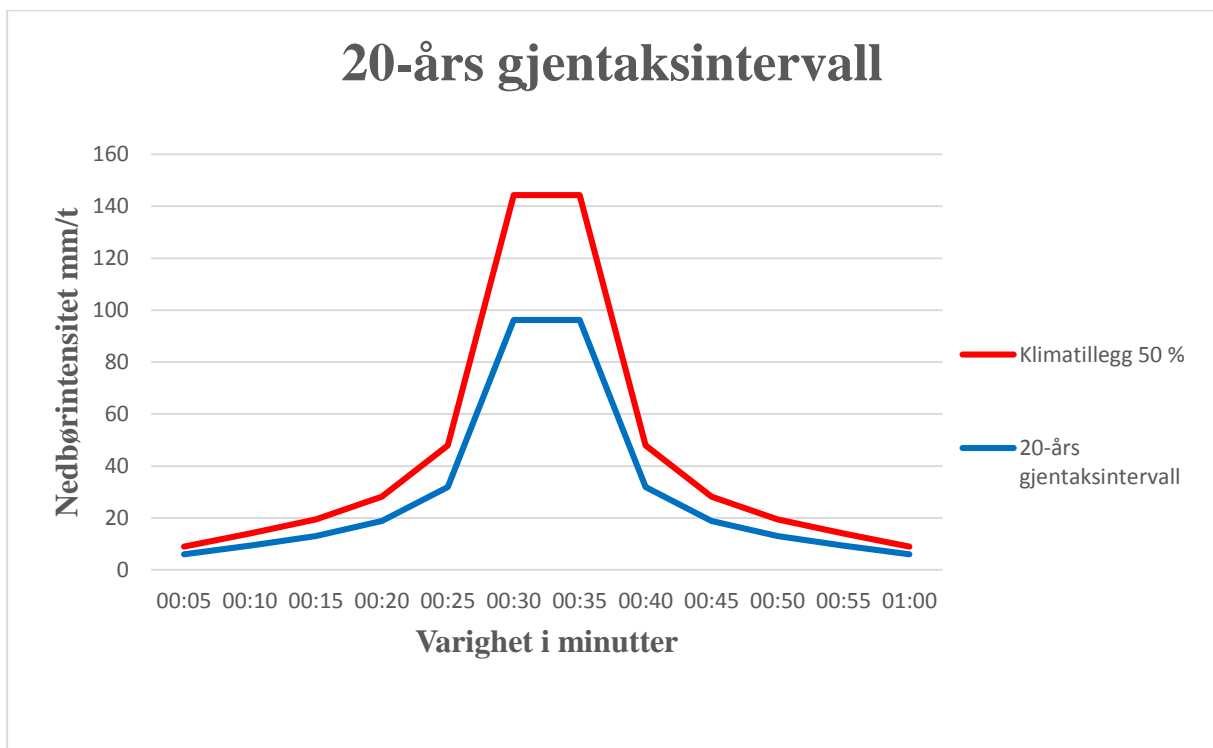
Figur 58. Symmetrisk regnhyetogram basert på 10-års gjentaksintervall.



Figur 59. 10-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg.

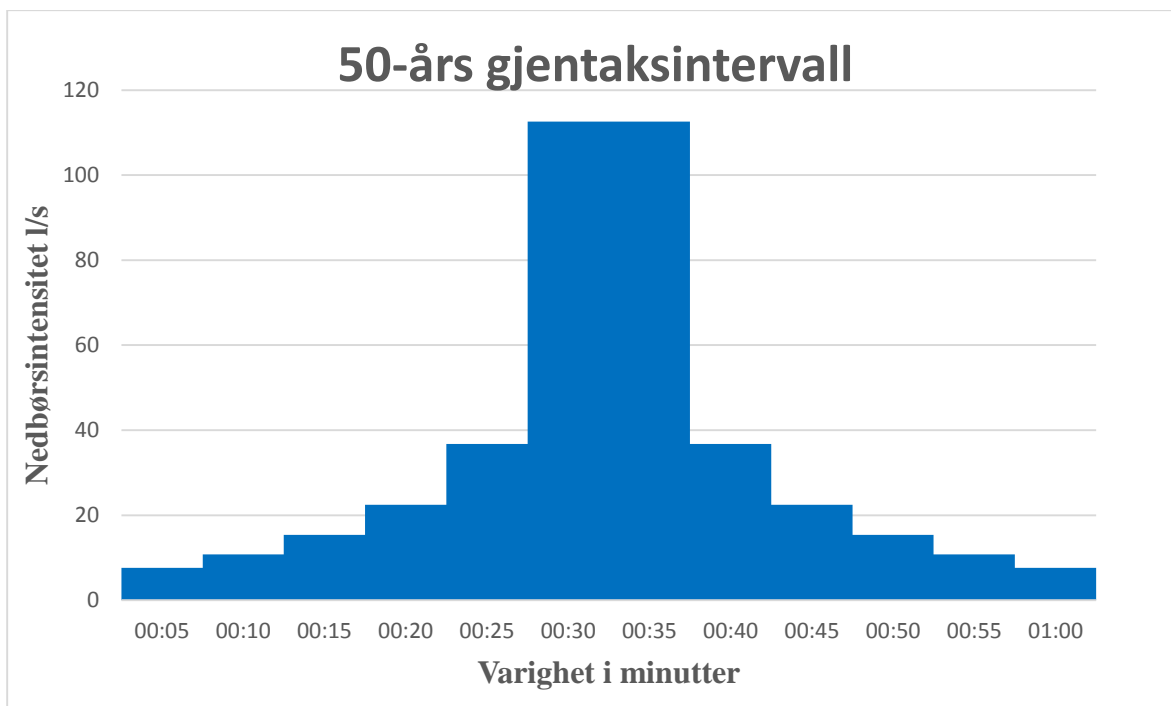


Figur 60. Symmetrisk regnhyetogram basert på 20-års gjentaksintervall.

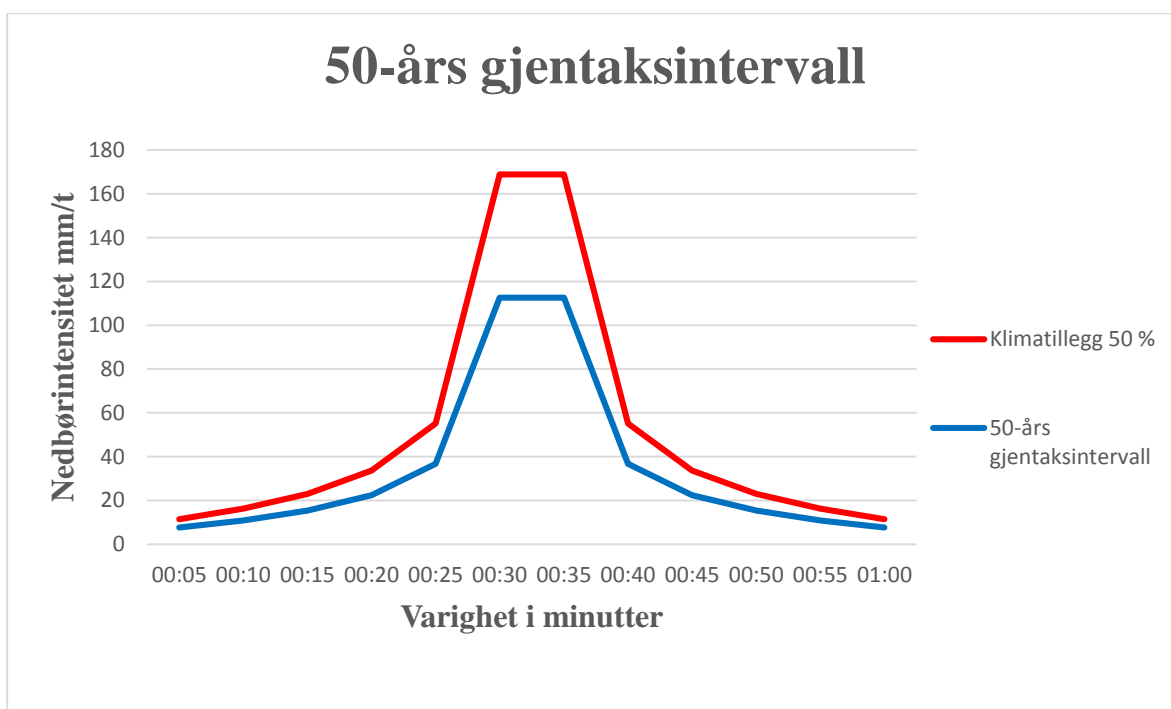


Figur 61. 20-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg.

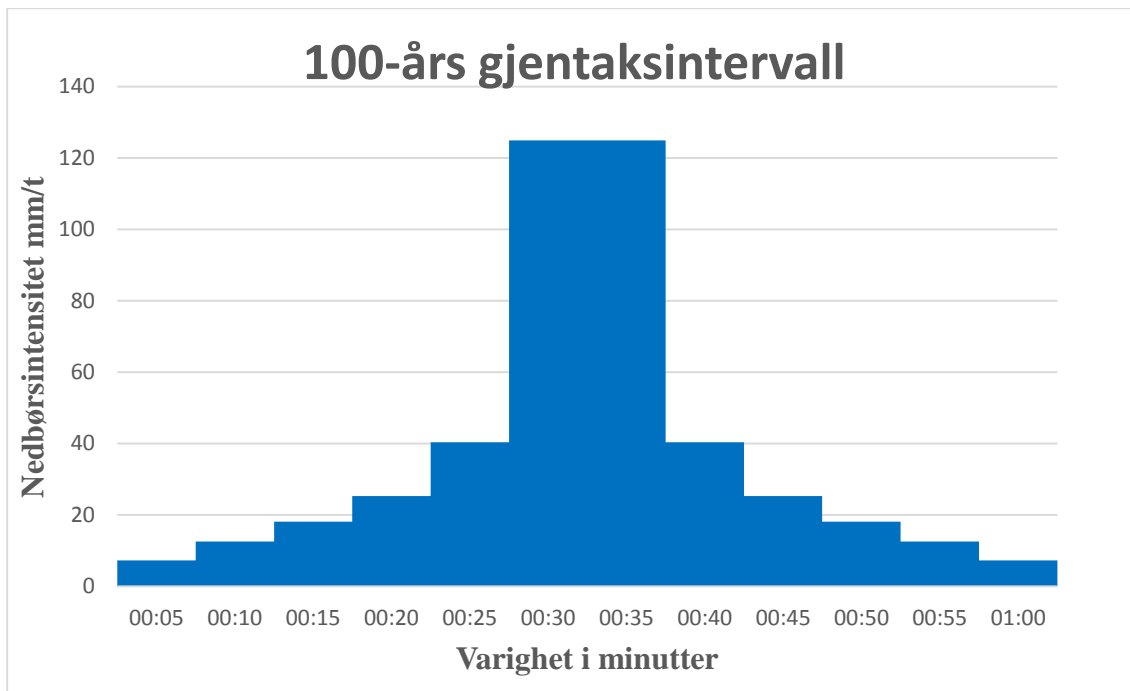




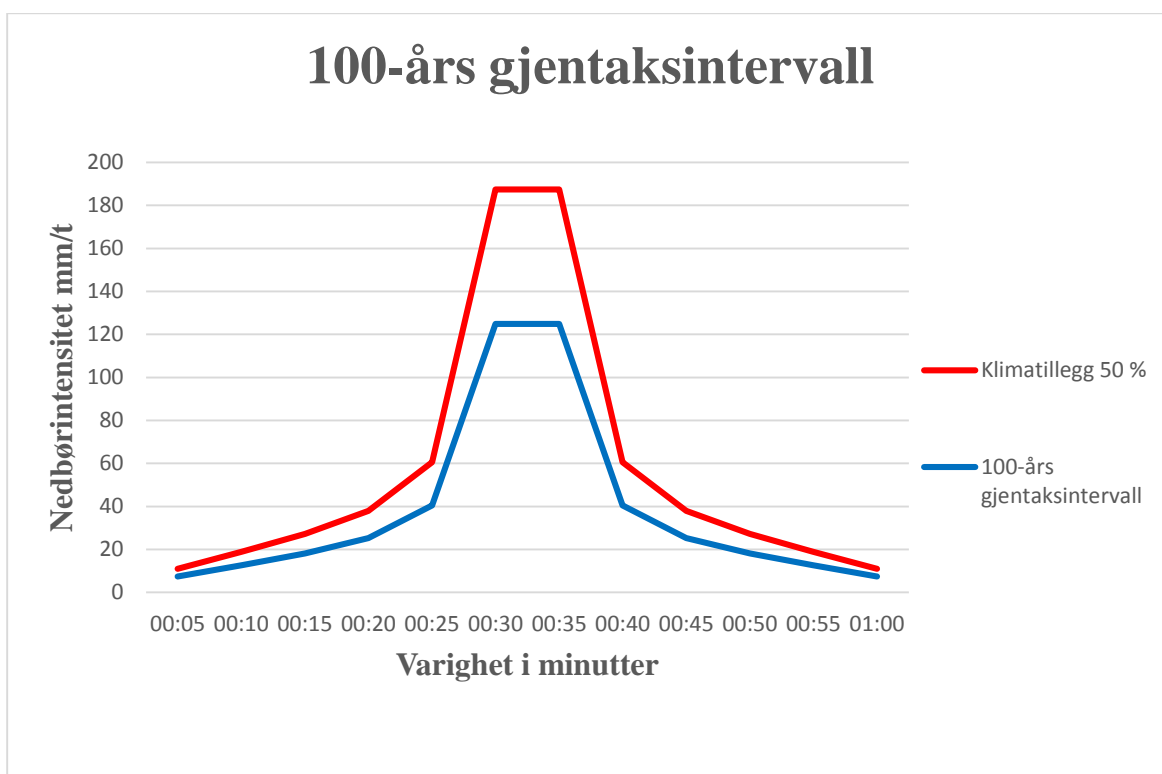
Figur 62. Symmetrisk regnhyetogram basert på 50-års gjentaksintervall.



Figur 63. 50-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg.



Figur 64. Symmetrisk regnhyetogram basert på 100-års gjentaksintervall.



Figur 65. 100-års gjentaksintervall med og uten klimatillegg.

## Vedlegg: E

Simuleringsresultater med 10-års gjentaksintervall

Noder	Uten tiltak		Fordrøyning	Frakopling	Fordrøyning vei+bygg
	10	10+50 %	10+50 %	10+50 %	10+50 %
1					
2					
3					
4					
5					
6		x			
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
20					
21					
22					
23		x	x		
24					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32		x			
33		x	x		
34	x	x	x	x	
35					
36					
37		x			
38					
39	x	x	x	x	
40	x	x	x	x	
41	x	x	x	x	x
42	x	x	x	x	x
43	x	x	x	x	x
44		x	x	x	x
45					
48					
51					
52					
53					
54					
62		x			
112			x		
114		x	x		
115		x	x	x	

116		x	x	x	
117		x	x	x	
119		x	x		
120	x	x	x	x	
121		x			
124					
125		x	x		
126					
127					
128		x	x		
129					
130					
131		x	x	x	
132		x	x		
133					
134					
135			x	x	
137					
142		x	x		
143		x			
144					
145		x			
146		x	x		
147					
148					
149		x			
150					
151					
152		x	x		
153		x			
154					
155					
156					
158					
159					
160					
162		x	x		
163		x			
164					
165					
169					
170					
172					
173					
174					
175					
177					
179					
180	x	x	x	x	x
351					
815					
853					
854		x			
4102	x	x	x	x	x
4104		x	x		x

## Simuleringsresultater med 20-års gjentaksintervall

Noder	Uten tiltak		Fordrøyning	Frakopling	Fordrøyning vei+bygg
	20	20+50 %	20+50 %	20+50 %	10+50 %
1					
2					
3					
4					
5					
6		x			
7					
8					
9		x			
10		x			
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17		x			
18					
20					
21					
22					
23		x	x	x	
24		x			
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32		x	x	x	
33		x	x	x	
34	x	x	x	x	x
35					
36		x			
37	x	x	x	x	x
38		x	x	x	
39	x	x	x	x	
40	x	x	x	x	x
41	x	x	x	x	x
42	x	x	x	x	x
43	x	x	x	x	x
44	x	x	x	x	x
45		x			
48					
51		x			
52		x			
53					
54					
62		x	x		
112		x			
114		x	x	x	
115	x	x	x	x	x
116	x	x	x	x	

117		x	x	x	
119		x	x	x	
120	x	x	x	x	x
121		x	x		
124		x			
125		x	x	x	
126					
127					
128		x	x	x	x
129					
130		x			
131	x	x	x	x	x
132	x	x	x		
133					
134					
135	x	x	x	x	
137		x			
142	x	x	x	x	
143		x	x	x	
144					
145		x	x		
146		x	x	x	x
147					
148					
149		x	x		
150		x			
151					
152		x	x	x	x
153		x	x	x	
154					
155					
156					
158					
159					
160					
162		x	x	x	x
163		x	x		
164					
165					
169					
170		x			
172					
173					
174					
175					
177					
179					
180	x	x	x	x	x
351					
815					
853		x			
854		x	x		
4102	x	x	x	x	x
4104	x	x	x	x	x

## Simuleringsresultater med 50-års gjentaksintervall

Noder	Uten tiltak		Fordrøyning	Frakopling	Fordrøyning vei+bygg
	50	50+50 %	50+50 %	50+50 %	50+50 %
1					
2					
3		x			
4					
5					
6		x	x	x	
7					
8					
9		x			
10		x	x		
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17		x	x		
18					
20					
21					
22					
23	x	x	x	x	x
24		x	x		
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32	x	x	x	x	
33	x	x	x	x	
34		x	x	x	x
35					
36		x	x		
37	x	x	x	x	x
38		x	x	x	
39	x	x	x	x	x
40	x	x	x	x	x
41	x	x	x	x	x
42	x	x	x	x	x
43	x	x	x	x	x
44	x	x	x	x	x
45		x	x	x	
48					
51		x	x		
52		x	x		
53					
54					
62		x	x	x	x
112					
114		x	x	x	
115	x	x	x	x	x
116	x	x	x	x	x

117	x	x	x	x	
119		x	x	x	
120	x	x	x	x	x
121		x	x	x	x
124		x	x	x	
125	x	x	x	x	x
126					
127					
128	x	x	x	x	x
129					
130		x	x	x	
131	x	x	x	x	x
132	x	x	x	x	x
133					
134					
135	x	x	x	x	x
137		x	x		
142	x	x	x	x	x
143	x	x	x	x	x
144					
145		x	x		x
146	x	x	x	x	x
147					
148		x			
149		x	x	x	x
150		x	x	x	
151					
152	x	x	x	x	x
153	x	x	x	x	x
154					
155					
156					
158					
159					
160					
162	x	x	x	x	x
163		x	x	x	x
164					
165				x	
169				x	
170		x	x	x	
172					
173					
174		x	x	x	
175			x		
177					
179		x	x	x	
180	x	x		x	x
351		x		x	
815		x			
853		x	x	x	
854		x	x	x	x
4102	x	x	x	x	x
4104	x	x	x	x	x



## Simuleringsresultater med 100-års gjentaksintervall

Noder	Uten tiltak		Fordrøyning	Frakopling	Fordrøyning vei+bygg
	100	100+50 %	100+50 %	100+50 %	100+50 %
1					
2					
3		x	x		
4					
5					
6	x	x	x	x	
7					
8					
9		x	x	x	
10		x	x	x	
11		x			
12					
13					
14					
15					
16					
17		x	x	x	
18					
20					
21		x			
22					
23	x	x	x	x	x
24		x	x	x	
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32	x	x	x	x	x
33	x	x	x	x	x
34	x	x	x	x	x
35					
36		x	x	x	
37	x	x	x	x	x
38		x	x	x	
39	x	x	x	x	x
40	x	x	x	x	x
41	x	x	x	x	x
42	x	x	x	x	x
43	x	x	x	x	x
44	x	x	x	x	x
45		x	x	x	
48		x	x		
51	x	x	x	x	
52	x	x	x	x	
53					
54					
62	x	x	x	x	x
112	x	x	x		
114	x	x	x	x	x
115	x	x	x	x	x
116	x	x	x	x	x
117	x	x	x	x	x

119	x		x	x	
120	x	x	x	x	x
121	x	x	x	x	x
124	x	x	x	x	x
125	x	x	x	x	x
126	x				
127					
128	x	x	x	x	x
129					
130	x	x	x	x	x
131	x	x	x	x	x
132	x	x	x	x	x
133					
134					
135	x	x	x	x	x
137		x	x	x	
142	x	x	x	x	x
143	x	x	x	x	x
144					
145	x	x	x	x	x
146	x	x	x	x	x
147					
148		x	x		
149	x	x	x	x	x
150		x	x	x	
151					
152	x	x	x	x	x
153	x	x	x	x	x
154					
155		x			
156					
158		x		x	
159					
160					
162	x	x	x	x	
163	x	x	x	x	
164					
165					
169					
170		x	x	x	x
172					
173					
174		x	x	x	
175					
177					
179		x	x	x	
180	x	x	x	x	x
351		x	x		
815		x			
853		x	x	x	
854	x	x	x	x	x
4102	x	x	x	x	x
4104	x	x	x	x	x
Total					

## Simuleringsresultater med Monsterreg

Noder	Uten tiltal	Fordrøyning	Frakopling	Fordrøyning vei+bygg
1	x	x	x	
2	x	x	x	
3	x	x	x	x
4				
5				
6	x	x	x	x
7				
8				
9	x	x	x	x
10	x	x	x	x
11	x	x	x	
12	x	x	x	
13	x	x	x	
14				
15				
16				
17	x	x	x	x
18				
20				
21	x	x	x	
22		x		
23	x	x	x	x
24	x	x		x
26				
27			x	
28				
29				
30				
31				
32	x	x	x	x
33	x	x	x	x
34	x	x	x	x
35				
36	x	x	x	x
37	x	x	x	x
38	x	x	x	x
39	x	x	x	x
40	x	x	x	x
41	x	x	x	x
42	x	x	x	x
43	x	x	x	x
44	x	x	x	x
45	x	x	x	x
48	x	x	x	
51	x	x	x	x
52	x	x	x	x
53				
54				
62	x	x	x	x
112	x			
114	x	x	x	x
115	x	x	x	x
116	x	x	x	x
117	x	x	x	x
119		x	x	x
120		x	x	x
121		x	x	x

124		x	x	x
125		x	x	x
126				x
127		x	x	
128	x	x	x	x
129	x	x	x	
130	x	x	x	x
131	x	x	x	x
132	x	x	x	x
133	x	x		
134				
135	x	x	x	x
137	x	x	x	x
142	x	x	x	x
143	x	x	x	x
144				
145	x	x	x	x
146	x	x	x	x
147	x	x	x	
148	x	x	x	x
149	x	x	x	x
150	x	x	x	x
151				
152	x	x	x	x
153	x	x	x	x
154	x	x	x	
155	x	x	x	
156				
158	x	x	x	
159				
160				
162	x	x	x	x
163	x	x	x	x
164	x	x	x	
165	x	x		
169	x	x	x	
170	x	x	x	x
172	x	x	x	
173	x	x	x	
174	x	x	x	x
175	x	x	x	
177				
179	x	x	x	
180	x	x	x	x
351	x	x	x	x
815	x	x	x	x
853	x	x	x	x
854	x	x	x	x
4102	x	x	x	x
4104	x	x	x	x