

ANALYSE AV KLIMATILPASNINGSTILTAK - EN CASESTUDIE AV OVERVANNSNETTET PÅ BOGAFJELL I SANDNES KOMMUNE.

ANALYSIS OF CLIMATE CHANGE ADAPTION MEASURES
- A CASE STUDY OF THE STORMWATER NETWORK IN BOGAFJELL IN THE
MUNICIPALITY OF SANDNES.

INA BEKKUM

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP

INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2012



Forord

Dette er en masteroppgave utformet ved Institutt for matematiske realfag og teknologi ved Universitetet for miljø- og biovitenskap våren 2012. Masteroppgavens arbeidsramme tilsvarende 30 studiepoeng. Med denne masteroppgaven avsluttes min mastergrad i vann- og miljøteknikk.

Oppgavens tema er klimaendringenes negative påvirkninger på avløpssystemer i urbane strøk, og hydrauliske tiltak for avbøting av disse. Oppgaven er en del av forskningsprosjektet ExFlood og tar for seg en hydraulisk og økonomisk analyse av klimatilpasningstiltak på Bogafjell i Sandnes.

Arbeidet med oppgaven har vært krevende og utfordrende, men fullt ut like inspirerende og givende. Det har vært et spennende studiemester hvor jeg føler at jeg har fått benyttet meg av kunnskap jeg tidligere har fått gjennom studiet, samtidig som jeg har tilegnet meg ny kunnskap.

Jeg vil gjerne få takke min hovedveileder Oddvar Lindholm for gode råd, konstruktive tilbakemeldinger og faglig støtte gjennom arbeidet med oppgaven. Takk også til biveileder Jarle Bjerkholt for gode innspill.

Takk til DHI ved Thomas Eidsmo, som stilte Mike Urbans programpakke disponibel til bruk i oppgaven. Takk til Geir Lindholm ved Rosim AS, som stilte programvaren ROSIE til disposisjon og som har vært uunnværlig i prosessen med installering og opplæring av programmet. Takk også til Sandnes kommune, som har stilt avløpsmodellen av Bogafjell til rådighet.

Takk til ExFlood-gruppen for interessante diskusjoner og tverrfaglig samarbeid. Takk til Svein Storrvik fra Norconsult, og Magnus Olsen fra VAV, for informasjon omhandlende kostnadstall. Jeg vil også rette en takk til Harald Moseby i FNO for hjelp med VASK.

Jeg vil gjerne takke alle studiekamerater på Fløy 5 for godt studiemiljø – både faglig og sosialt sett. En ekstra stor takk til Jakob Myking for godt samarbeid om oppgavens faglige tema.

Tusen takk til mamma og pappa, Janne og Jonas – og Jens, som alltid støtter opp.

Ås 07.05.2012

Ina Bekkum

Sammendrag

Begrepet *klima* kan forklares som en beskrivelse av gjennomsnittsværet på ett sted eller et område, slik det fremkommer av enkeltobservasjoner bearbeidet ved statistiske metoder etter internasjonale retningslinjer. Jordens klima relateres til energimengden lagret i klimasystemet, som hovedsakelig påvirkes av strålingsenergien fra solen. Med klimaendring menes en varig global endring av klima grunnet en forstyrrelse eller endring i den globale energibalansen. Forskere har aldri vært sikrere på at klimaendringene vi står ovenfor i dag i stor grad utspiller seg som følge av antropogen aktivitet. Menneskelige utslipp av karbondioksid har ført til økt drivhuseffekt i atmosfæren, noe som igjen har gitt en global oppvarming. For norske forhold regnes det med at den globale oppvarmingen vil gi blant annet økte årsmiddeltemperaturer, kortere snøsesong, økt årsnedbør og flere dager med høye nedbørsverdier.

Det synes at flomskader forårsaket av overvann har økt de senere år, særlig i tettsteder og byer. Den økte urbaniseringsgraden har ført til en større fortetting i urbane strøk, hvor de permeable flatene dekkes med impermeabel asfalt og bebyggelse. Dette fører til en større mengde overvann som må renne av på overflaten, i stedet for å infiltreres i jorden. Økte regnintensiteter, som følge av klimaendringene, har stor påvirkning på avløpssystemet. Store nedbørsmengder genererer mer overvann og gir økt avrenning. For at avløpssystemet skal kunne takle de endrede forutsetninger skissert ovenfor, må det tas hensyn til fortetting og klimaendring gjennom en klimatilpasset overvannshåndtering. En klimatilpasset overvannshåndtering vil søke å redusere risikoen for urban flom ved redusert tilrenning til avløpssystemet og forsinkelse av flomtoppene. Det har vist seg at tiltak i kategorien *åpne og lokale overvannsløsninger* er velegnede tiltak for klimatilpassing.

For å simulere klimaendringenes effekt på avløpssystemet og klimatilpassingstiltakenes avbøtende virkning kan man benytte seg av urbanhydrologiske avløpsmodeller. I denne oppgaven er det gjennomført et casestudie av overvannsnett på Bogafjell i Sandnes kommune. Det er gjort simuleringer av enkeltregn i form av symmetriske nedbørshyetogram, med og uten klimatillegg – i Rosie/ArcGIS med MOUSE beregningsmotor – for å teste tiltaksprinsipper som frakopling av overvann, fordrøyning av overvann og kapasitetsøkning i ledningsnett. For å teste klimatilpassingstiltakenes hydrauliske effekt som mottiltak mot klimaendringer søkes det å finne tiltakenes avbøtende skadevirkning ved et 100-års regn med 50 % klimatillegg. På bakgrunn av resultatene fra den hydrauliske analysen gjøres det en økonomisk analyse av tiltakene, hvor en kost-effekt analyse står sentralt. Effektivitetsmålet er at klimatilpassingstiltakene skal bringe skadenivået ved et 100-års regn med 50 % klimatillegg ned til dagens skadenivå ved 100-års regn. Tiltakenes lønnsomhet beregnes ved å finne investeringens netto nåverdi, og tiltakene antas å være lønnsomme dersom netto nåverdi er positiv eller lik null.

Av tiltakene som testes oppnår alle effektivitetsmålet om å bringe skadenivået ned til referansesituasjonen, utenom *frakopling av overvann fra takarealer*. Dette tiltaket kan ikke implementeres i hele feltet, noe som antas å være grunnen til at målet ikke oppnås. Under de gjeldende forutsetninger er det *frakopling av overvann fra takarealer* og et kombinasjonstiltak

med *frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten* som kan anses som lønnsomme klimatilpasningstiltak på Bogafjell. Av disse to er det bare kombinasjonstiltaket som oppfyller effektivitetskravet.

Resultatene fra den hydrauliske analysen preges av flere usikkerheter, hvor en ukalibrert modell og en kontinuerlig undervurdering av skadenivå trekkes frem som spesielt viktige. Grunnet manglende kostnadsinformasjon vil også den økonomiske analysen preges av usikkerheter.

På bakgrunn av resultatene ser vi at klimaendringene vil ha konsekvenser for ledningsnett på Bogafjell i form av flere oversvømmelser fra kummer og flere skader på hus og bygninger. Avløpssystemet på Bogafjell er sårbart i forhold til en økning i andelen tette flater. Det spekuleres i om det muligens vil være samfunnsøkonomisk lønnsomt med et høyere skadenivå enn referansesituasjonens nivå i et nytt klimaregime på Bogafjell. For å gjøre en samfunnsøkonomisk vurdering av avløpssystemet på Bogafjell og klimatilpasningstiltakenes lønnsomhet, bør en hydraulisk og økonomisk analyse gjennomføres med et så detaljert skade- og kostnadsbilde som mulig.

Abstract

The term *climate* can be defined as the average weather in an area, as shown by individual observations processed by statistical methods according to international guidelines. The climate of the earth is related to the amount of energy stored in the climate system, mainly affected by the radiation energy from the sun. Climate change refers to a permanent change in the climate due to disturbances or changes in the global energy balance. Researchers within the subject have never been more confident in the fact that the climate changes we face today are unfolding, to a great extent, as a result of anthropogenic activity. Emissions of carbon dioxide, caused by humans, have increased the greenhouse effect in the atmosphere, which then again has led to global warming. The global warming is, for the Norwegian climate, expected to lead to higher annual temperatures, shorter lasting snow season, increased annual precipitation and more days with high intensity rainfall.

It seems that the number of flood damages caused by stormwater has increased over the past years, especially in urban areas. The high urbanization rate has led to a great densification in urban areas, where the permeable surfaces has been covered with impermeable surfaces such as roads, parking lots and buildings. This means that a greater amount of stormwater must run off the surface, rather than infiltrate into the soil. Increased intensity of precipitation, as a result of climate change, has significant impact on the urban drainage systems. A great amount of rain generates more surface water and then more runoff. In order for the drainage system to adapt to these conditions, as described above, urbanization and climate change has to be taken into account when planning the system. Climate change adapted stormwater management will seek to reduce the risk of urban flooding by reducing the amount of surface runoff to the system, and delay the peak flood. Measures that can be characterized under the

term low impact development (LID) have shown to be effective in the adaption of climate change.

One can make use of hydrological drainage models to simulate the effects of climate change, the climate change adaption measures and their remedial effect on the drainage system. In this thesis a case study of the stormwater network in Bogafjell, in the municipality of Sandnes, has been conducted. Single rain events, constructed as symmetrical hyetograms, have been simulated, with and without a climate addition of 50 % on the intensity of the rains. The simulations have been executed in Rosie/ArcGIS with MOUSE engine, and hydrological principles such as disconnection and detention of stormwater, and increased capacity of the drainage system, have been tested. The climate adaption measures and their remedial effect on flood damages have been tested during a rain event with a return period of 100 years and 50 % climate addition. An economic analysis is conducted based on the results from the hydraulic analysis, where the cost-effectiveness of the climate adaption measures has been tested. The different climate adaption measures' efficiency goal is to bring the damage level during a rain event with a return period of 100 years and 50 % climate addition back to the current damage level during a rain event with a return period of 100 years. The measures are considered profitable if the net present value is zero or positive.

Disconnection of stormwater from roof areas cannot be implemented in the whole catchment and for this reason the measure cannot bring the damage level down to current levels. Under the given conditions it is only the climate change measures *disconnection of stormwater from roof areas* and *disconnection of stormwater from roof areas combined with surface detention of stormwater* that can be considered as profitable measures. The combined measure is the only one of these two that meets the efficiency requirement.

The results from the hydraulic analysis are affected by several uncertainties, especially the non-calibrated model and the constant underestimation of damage level. Due to lacking information about the different cost factors, the economic analyses also will be affected by uncertainties.

Based on the results we see that the consequences on the urban drainage system on Bogafjell from climate change will be more surface flooding from manholes, as well as more water damages in buildings and houses. It seems that it might be economically profitable with a higher damage level than the current level in a new climate regime on Bogafjell. An economic evaluation of the drainage system, and the climate change adaption measures and their profitability, should be executed with as much details on costs and damages as possible.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	IV
Figurliste.....	XI
Tabelliste	XIV
Formelliste.....	XVI
Liste over forkortelser	XVII
Del 1: Introduksjon.....	1
1 Innledning.....	2
1.1 Innledende om oppgavens faglige tema	2
1.2 Refleksjoner rundt oppgavens formål.....	3
1.3 Problemstilling.....	3
1.4 Fremgangsmåte, metode og struktur	3
2 Om forskningsprosjektet ExFlood	4
Del 2: Teoretiske betraktninger	7
3 Klima.....	8
3.1 Det globale klimasystem	8
3.2 Klimaendring	10
3.2.1 IPCC om klimaendring.....	11
3.2.2 SRES	13
3.2.3 Observerte globale klimaendringer	15
3.2.4 Globale klimaframskrivninger	16
3.3 Klima i Norge	17
3.3.1 Observerte klimaendringer i Norge.....	18
3.3.2 Regionale klimaframskrivninger for Norge	20
3.3.3 Regional klimaframskrivning for Vestlandet/Rogaland	21
3.3.4 Konsekvenser av klimaendringer i Rogaland.....	22
3.4 Klimamodellering.....	23
3.4.1 Globale klimamodeller	24
3.4.2 Regional nedskalering av globale klimamodeller	25
3.4.3 Delta Change Method.....	26
4 Urbanhydrologi og det urbane avløpssystem	27
4.1 Økonomiske betraktninger rundt en samfunnsøkonomisk dimensjonering av avløpssystemet	30
4.2 Dimensjonerende normer	33

4.2.1	Beregning av regnvannsavrenning	36
4.2.2	Ulike måter å gå inn med regndata i beregning av regnvannsavrenning	38
4.2.3	IVF-kurver.....	39
4.3	Endrede forutsetninger for det urbane avløpssystem	40
5	Klimatilpasset overvannshåndtering	44
5.1	Klimafaktor.....	45
5.2	Generelt om kompenserende tiltak mot klimaendringenes effekt	46
5.3	Åpne og lokale overvannsløsninger	47
6	Matematisk modellering av urbanhydrologiske avløpssystem	53
6.1	Modellmiljø Mike Urban og ROSIE	55
6.1.1	Mike Urban/MOUSE	55
6.1.2	Rosie Mouse.....	58
Del 3:	Casestudie.....	59
7	Innledende om casestudiet	60
7.1	Presentasjon av caseområdet; Bogafjellfeltet i Sandnes kommune.....	60
7.2	Landskapets karakter	61
7.2.1	Topografi.....	62
7.2.2	Grunnforhold, løsmasser og infiltrasjonsevne	63
7.3	Ledningsnett	65
7.3.1	Urbanhydrologisk modell av caseområdet.....	65
8	Hydraulisk analyse	67
8.1	Konstruksjon av symmetriske hyetogram	68
8.2	Valg av klimafaktor:.....	70
8.3	Forutsetninger, antagelser og innstillinger ved simulering og hydraulisk analyse....	72
8.3.1	Tid-areal metoden	72
8.3.2	Kumegenskaper.....	72
8.3.3	Tidssteg	73
8.3.4	Oversvømmelse fra kum	73
8.3.5	Antall antatt skadede hus/bygninger	73
8.4	Simulering av klimatilpasningstiltak	74
8.4.1	Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	75
8.4.2	Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	75
8.4.3	Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer.....	76

8.5	Resultater fra hydraulisk analyse.....	77
8.5.1	Sammenligning av systemets respons ved dagens regnintensiteter og klimajusterte regnintensiteter	77
8.5.2	Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	80
8.5.3	Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	82
8.5.4	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer.....	84
8.5.5	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter	86
8.5.6	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og fordrøyning av overvann på overflaten	88
8.6	Oppsummering og sammenligning av klimatilpasningstiltakenes effekt.....	91
8.7	Følsomhetsanalyse.....	92
9	Økonomisk analyse	94
9.1	Totale skadekostnader	94
9.2	Nåverdimetoden.....	95
9.2.1	Stigende klimatillegg.....	96
9.2.2	Diskonteringsrente	97
9.3	Kostnader vurdert i analysen	97
9.3.1	Skadekostnader på bygninger/hus	98
9.3.2	Tiltakskostnader	101
9.4	Resultater fra analyse av dagens nett med og uten klimatillegg.....	101
9.4.1	Alternativ analysemetode	102
9.5	Resultater fra kostnadsanalyse av klimatilpasningstiltak	104
9.5.1	Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	105
9.5.2	Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	105
9.5.3	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal.....	106
9.5.4	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og økning av ledningsdiameter	107
9.5.5	Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	108
9.6	Tiltakenes kostnadseffektivitet	109
9.7	Tiltakenes lønnsomhet	110
Del 4:	Diskusjon og konklusjon	113
10	Diskusjon.....	114
10.1	Vurdering av metode	114
10.1.1	Usikkerhet i hydraulisk modell	115
10.1.2	Usikkerhet i bakgrunns materialet.....	116

10.2	Vurdering av resultater	116
10.2.1	Hydraulisk analyse	116
10.2.2	Økonomisk analyse	118
11	Konklusjon	119
12	Personlige refleksjoner ved avslutning av oppgaven	120
	Referanser.....	122
	Vedlegg A: Delta Change Method	i
	Vedlegg B: Symmetriske regnhyetogram	ii
	Vedlegg C: Kummer med oversvømmelse ved ulike gjentaksintervall med og uten klimatillegg.....	vii
	Vedlegg D: Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	viii
	Vedlegg E: Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av vann på overflaten.....	xi
	Vedlegg F: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer	xv
	Vedlegg G: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter.....	xviii
	Vedlegg H: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	xx
	Vedlegg I: Kummer som oversvømmes ved lave gjentaksintervall.....	xxii
	Vedlegg J: Lønnsomhetsanalyse av klimatilpasningstiltak relativt til investeringstidspunkt	xxiii

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av et mindre nedbørsfelt hvor det rurale området drenerer til det mer urbane området med mer omfattende infrastruktur (ExFlood 2009).	5
Figur 2: Det globale klimasystem (World Ocean Review).	9
Figur 3: Tilbakekoblingsmekanismer (Bjørnæs 2009).	12
Figur 4: Oversikt over SRES' utslippsscenarioer (IPCC 2000).	13
Figur 5: Illustrasjon av SRES' scenarioer knyttet til utslipp av drivhusgasser til venstre og global overflateoppvarming til høyre (IPCC 2010).	15
Figur 6: Framskrivning av årsnedbør, til venstre, og vinternedbør, til høyre. H = høy framskrivning, M = medium framskrivning, L = lav framskrivning (NOU - Klimatilpasning 2009a).	21
Figur 7: Framskrivning av årstemperatur, til venstre, og vintertemperatur, til høyre. H = høy framskrivning, M = medium framskrivning, L = lav framskrivning (NOU - Klimatilpasning 2009b).	22
Figur 8: Klimamodellenes utvikling (Bjerknessenteret 2009b).	25
Figur 9: Fellessystem. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).	29
Figur 10: Separatsystem (duplikatsystem) med dreinsvann til spillvannsledning. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).	29
Figur 11: Separatsystem (duplikatsystem) med dreinsvann til overvannsledning. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).	30
Figur 12: Fullverdig separatsystem med LOD. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).	30
Figur 13: Det grunnleggende prinsipp for økonomisk optimering som funksjon av gjentakperiode, fritt etter Winther et.al (2011).	31
Figur 14: Minimums servicenivå, etter Lindholm (Lindholm 2011d)	32
Figur 15: Oppstuvning (Nie 2003).	34
Figur 16: Oversvømmelse (Nie 2003).	34
Figur 17: Utvikling i antall meldte vannskader og erstatningsutbetalinger (FNO 2012).....	41
Figur 18: Urbaniseringens påvirkning på avrenningsforhold, fritt etter Lindholm (2011b) og Stahre (2004).	42
Figur 19: Illustrasjon av forskjellen mellom konvensjonell overvannshåndtering og overvannshåndtering ved bruk av åpne og lokale løsninger i samme område (Lindholm et al. 2008).	48
Figur 20: Treleddsstrategi for håndtering av nedbør med eksempeltall som må tilpasses lokalt, etter Lindholm et al. (2008).	49
Figur 21: Illustrasjon av ulike kategorier åpne overvannsløsninger, etter Stahre (2004).	49
Figur 22: Beskrivelse av modell A (tid-areal) (DHI b)	57
Figur 23: Bogafjellfeltet, kart hentet fra Statens kartverk (2012)	61
Figur 24: Bogafjell (caseområdet innrammet), bearbeidet kart fra Sandnes kommune (2010)62	

Figur 25: Til venstre; Bogafjell i froskeperspektiv og til høyre; fra toppen av Kladden og nedover Bogafjell	62
Figur 26: Terrengprofil, henholdsvis i nordlig og nord-østlig retning (Statens Kartverk 2012).	63
Figur 27: Løsmassekart av caseområdet (Norges geologiske undersøkelse 2012b).....	64
Figur 28: Infiltrasjonsevne i caseområdet (Norges geologiske undersøkelse 2012b).....	64
Figur 29: Nye utløp på Bogafjell.....	65
Figur 30: Modell etter endring, med to nye utløp	66
Figur 31: Planskisse over den originale hydrologisk-hydrauliske modellen over Bogafjell fra DHI, hentet fra Vike (2010)	67
Figur 32: IVF-kurver, Rovik (Meteorologisk institutt 2012).....	68
Figur 33: Symmetrisk regnhyetogram med 60 minutters varighet og 20 års gjentakintervall	70
Figur 34: Tabell hentet fra Holvik (2010)	71
Figur 35: Tabell hentet fra Holvik (Holvik 2010).....	71
Figur 36: Regnhyetogram, 20 års gjentakintervall, dagens intensitet og 50 % klimatillegg..	72
Figur 37: Beregning av oversvømmelsesvolum fra kum/sluk.....	74
Figur 38: Beregning av fordrøyningsvolum	76
Figur 39: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 5 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %	77
Figur 40: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 10 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %	78
Figur 41: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 20 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %	78
Figur 42: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 50 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %	78
Figur 43: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 100 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %	79
Figur 44: Totalt oversvømmelsesvolum ved ulike gjentakintervall, uten klimatilpasningstiltak	80
Figur 45: Ledninger med endret diameter og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg	81
Figur 46: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter.....	82
Figur 47: Delfelt med endret konsentrasjonstid og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg.....	83
Figur 48: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	84
Figur 49: Delfelt med frakoblet takvann og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg	85
Figur 50: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer	86
Figur 51: Ledninger med endret diameter ved frakopling av takvann og antall oversvømmelser i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg.....	87

Figur 52: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakobling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter	88
Figur 53: Delfelt med økt konsentrasjonstid og antall oversvømmelser ved 100-års regn med 50 % klimatillegg	89
Figur 54: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten.....	90
Figur 55: Sammenligning av antall oversvømmelser ved ulike klimatilpasningstiltak	91
Figur 56: Sammenligning av antall antatt skadede bygninger ved ulike klimatilpasningstiltak	92
Figur 57: Følsomhetanalyse andel tette flater og konsentrasjonstid	93
Figur 58: Prinsippet for stigende klimatillegg.....	97
Figur 59: Skadekostnader som funksjon av flomtype i Trondheim (NORVAR 2004).....	100
Figur 60: Forholdet mellom skadede bygninger og gjentaksintervall, for sammenligning med dansk metode.....	103
Figur 61: Tiltakets lønnsomhet relatert til investeringsår, klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	111

Tabelliste

Tabell 1: Eksempler på skader og kostnader benyttet av danske Miljøstyrelsen (COWI/NIRAS 2007) i en økonomisk analyse av klimatilpasningstiltak	33
Tabell 2: Anbefalte dimensjoneringsfrekvenser for ulike områder, som gitt i NS-EN752:2008 oversatt fra engelsk til norsk etter Holvik (Holvik 2010).	35
Tabell 3: Norsk Vanns anbefalte minimums dimensjonerende hyppigheter for separat- og fellesavløpssystem, etter Lindholm et.al (2008).	35
Tabell 4: Utslipp fra avløpsnett (Lindholm et al. 2007).....	43
Tabell 5: Anbefalte klimafaktorer (DANVA 2011).	46
Tabell 6: Lineær framskrivning av 10-års regn (DANVA 2011).....	46
Tabell 7: Ulike lokale og åpne løsninger for overvannshåndtering	50
Tabell 8: Verdier fra IVF-kurve	69
Tabell 9: Verdier for symmetrisk regnhyetogram.....	70
Tabell 10: Sammenligning av antall oversvømmelser ved dagens regnintensiteter og med 50 % klimatillegg	79
Tabell 11: Sammenligning av skadenivå ved dagens regnintensiteter og med 50 % klimatillegg.....	80
Tabell 12: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter.....	81
Tabell 13: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	81
Tabell 14: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	83
Tabell 15: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten	83
Tabell 16: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer	85
Tabell 17: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer.....	85
Tabell 18: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter	87
Tabell 19: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakobling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter	87
Tabell 20: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten.....	89
Tabell 21: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	89
Tabell 22: Metode for beregning av antall regnhendelser for hvert gjentakintervall gjennom analyseperiode	95
Tabell 23: Resultater fra VASK; årsak "Drenering".	99
Tabell 24: Resultater fra VASK; årsak "Stopp i avløpet. Tilbakeslag".	99
Tabell 25: Enhetskostnader for tiltak	101
Tabell 26: Totale skadekostnader uten klimatilpasningstiltak	102

Tabell 27: Sammenligning mellom dansk analysemetode og valgt analysemetode	103
Tabell 28: Antall skadede bygninger på Bogafjell ved bruk av "danske gjentaksintervall" ..	104
Tabell 29: Sammenligning mellom dansk analysemetode og valgt analysemetode etter justering etter forhold funnet fra Bogafjell.....	104
Tabell 30: Totale skadekostnader ved klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter..	105
Tabell 31: Netto nåverdiberegninger av klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter	105
Tabell 32: Totale skadekostnader ved klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten.....	106
Tabell 33: Netto nåverdiberegning av klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten.....	106
Tabell 34: Total skadekostnad klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal .	106
Tabell 35: Netto nåverdiberegning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal	107
Tabell 36: Totale skadekostnader klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter	107
Tabell 37: Netto nåverdiberegning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter.....	108
Tabell 38: Totale skadekostnader for klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	108
Tabell 39: Netto nåverdiberegning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og fordrøyning av overvann på overflaten	109
Tabell 40: Oppsummering av tiltak, oppfyllelse av mål og kostnader for å nå det bestemte mål	109
Tabell 41: Rangering av tiltakene etter kostnadseffektivitet.....	110

Formelliste

Formel 1: Gjentakintervall som funksjon av overskridelsessannsynlighet.....	40
Formel 2: Nedbørsfrekvens som funksjon av gjentakintervall.....	40
Formel 3: Klimafaktor (Arnbjerg-Nielsen 2008).....	45
Formel 4: Saint Venants kontinuitetslikning (DHI a).....	55
Formel 5: Saint Venants momentlikning (DHI a).....	55
Formel 6: Netto nåverdi (Finansdepartementet 1997).....	96

Liste over forkortelser

AGCM	Atmosphere General Circulation Model
AOGCM	Atmosphere Ocean General Circulation Model
CS	Collection System
DANVA	Dansk Vand- og Spildevandsforening
DCF	Delta Change Factor
DCM	Delta Change Method
DHI	Dansk Hydrologisk Institut
EDB	Elektronisk databehandling
EMIC	Earth System Model of Intermediate Complexity
ExFlood	Extreme weather in small catchments: new method for flood protection
FNH	Finansnæringens hovedorganisasjon
FN	De Forente Nasjoner
FNO	Finansnæringens fellesorganisasjon
GCM	General Circulation Model/Global Climate Model
GIS	Geografiske Informasjonssystemer
HS	Harmonized Scenarios
IMT	Institutt for Matematiske realfag og Teknologi
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVF	Intensitet/Varighet/Frekvens
KPI	Konsumprisindeks
LID	Low Impact Development (LOD på engelsk)
LOD/LOH	Lokal overvannsdistribusjon/lokal overvannshåndtering
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
RDII	Rainfall Dependent Inflow and Infiltration
SRES	Special Report on Emission Scenarios
TEK	Teknisk forskrift
UMB	Universitetet for miljø- og biovitenskap
VA	Vann- og avløp
VASK	(Finansnæringens fellesorganisasjons) Vannskadestatistikk
VAV	Vann- og avløpsetaten Oslo kommune
WD	Water Distribution
WP	Work Package

Del 1: Introduksjon

1 Innledning

1.1 Innledende om oppgavens faglige tema

Klimaendringer er et hett tema i tiden, både blant mannen i gata og akademikere i ulike faggrupper. Klimaendringer har forekommet flere ganger i tidene før oss, klimaendringer skjer her og nå, og vil uten tvil skje i tidene fremover også. Forskning har vist at klimaendringene vi opplever i dag mest sannsynlig skyldes en kombinasjon av naturlig variasjon og menneskeskapte årsaker. At menneskelig aktivitet har så stor påvirkning på klodens atmosfære oppleves skremmende for mange. Verdens forskere driver kontinuerlig arbeid med undersøkelser av hvordan klimaendringene vil gjøre seg gjeldende.

Klimaendringene er en endring i jordens energibalanse og av prosessene i det globale klimasystem. Klimaendringene er forventet å intensivere og akselerere den hydrologiske syklus, noe som gir hyppigere og mer intense tilfeller av ekstreme nedbørshendelser. Overvann kan hovedsakelig betegnes som regnvann som renner av fra overflater som tak, veger og andre tette flater. Overvann kan også oppstå på permeable flater som er mettet med vann. Det synes at flomskader forårsaket av overvann har økt de senere år, og klimaendringene antas å være en av hovedårsakene til dette.

Denne oppgaven er en del av IMT sitt bidrag til forskningsprosjektet ExFlood. ExFlood omhandler ekstremvær i mindre nedbørsfelt, og nye metoder for beskyttelse mot flom og oversvømmelse. Det overordnede tema i denne oppgaven er klimaendringenes effekt på det kommunale avløpssystem. For å belyse temaet er et av studieområdene i ExFlood valgt som caseområde; Bogafjellfeltet i Sandnes kommune. Denne oppgaven bygger delvis på arbeidet utført av Ivar Haga i hans masteroppgave ved IMT våren 2011: «*Analyse av klimaendringers virkninger på overvannsnettet i Bogafjellfeltet, Sandnes kommune – en casestudie*». Haga utførte ved hjelp av modellverktøyene ROSIE og Mike Urban en flomanalyse for fremtidige estimerte nedbørshendelser i ledningsnettet på Bogafjell. Haga simulerte både historiske og konstruerte regnhendelser for å se på konsekvensene som ekstreme regn fører til i ledningsnettet. Han fant områder i ledningsnettet hvor modellen viste tilfeller av oversvømmelser ved ulike nedbørshendelser. I Hagas resultater vises det også at det trolig ikke er regnets totale volum som er utslagsgivende for konsekvensene i ledningsnettet, men heller utformingen på nedbørens toppintensitet – intensitetens størrelse, og når denne forekommer (tidlig eller sent i regnet). I tillegg viste Haga at en økning i regnets intensitet vil gi flere kummer med oppstuvinger over bakkenivå – altså oversvømmelser.

Denne oppgaven vil videreføre Hagas arbeid og resultater, og i oppgaven vil det gjøres en vurdering av mulige tiltak mot klimaendringenes effekt på ledningsnettet. Ved en analyse av ledningsnettet i Bogafjellfeltet og økonomiske vurderinger, søkes det å komme frem til effektive tiltak mot klimaendringenes negative virkning på avløpssystemet. Et effektivt tiltak vil i så måte være et tiltak som har en god hydraulisk funksjon samtidig som det oppfyller visse samfunnsøkonomiske krav. Den konvensjonelle overvannshåndtering med

bortledning i sluk og rør har vist seg å være sårbar for klimaendringenes effekt. Lokale og åpne overvannsløsninger er siden 1980-tallet blitt mer og mer populært i Norge, og antas å kunne erstatte eller supplere de tradisjonelle løsningene for en bedre funksjonsoppnåelse. Det vil i stor grad fokuseres på tiltak som hører under begrepet åpen og lokal overvannshåndtering (LOD/LOH) i denne oppgaven.

1.2 Refleksjoner rundt oppgavens formål

Formålet med oppgaven er først og fremst å bidra med kunnskap knyttet til klimaendringer og deres påvirkning på landets kanskje viktigste infrastruktur – avløpssystemet. Med flere tilfeller av intense nedbørshendelser er avløpssystemet spesielt utsatt, og økt kunnskap om hvordan man kan begrense og beskytte mot skader som følge av klimaendringer er viktig.

Oppgaven er, som tidligere nevnt, et bidrag til forskningsprosjektet ExFlood, som ønsket at mastergradsstudenter ved IMT skulle se nærmere på hva klimaendringer vil bety for ledningsnettene i de ulike studieområdene i prosjektet. I den forbindelse håper jeg at oppgaven kan bidra med mer informasjon til dette temaet, og at mitt arbeid og mine resultater vil være relevant for forskningsprosjektet.

Oppgaven vil også kunne være interessant for Sandnes kommune og deres arbeid med Bogafjellfeltet og ledningsnettet der, og jeg håper og ønsker at Sandnes kommune vil benytte seg av arbeidet jeg har lagt ned i denne oppgaven for videre undersøkelser av feltet.

1.3 Problemstilling

Ut fra oppgavens bakgrunn og betraktninger rundt tema presentert ovenfor, er det tatt utgangspunkt i følgende spørsmål og problemstillinger gjennom oppgavens arbeid:

1. Hvilke *klimatilpasningstiltak* vil være *hydraulisk effektive* som mottiltak for å avbøte skadene som oppstår i det kommunale avløpsnettet som følge av klimaendringer? og
2. Hvilke *klimatilpasningstiltak* vil være *kostnadseffektive* som mottiltak mot klimaendringenes negative konsekvens på det kommunale avløpsnettet?

1.4 Fremgangsmåte, metode og struktur

Gjennom oppgaven skal problemstillingene ovenfor belyses ved hjelp av teoretiske betraktninger og en casestudie av Bogafjellfeltet i Sandnes kommune.

Oppgaven består av fire deler. Første del er en introduksjon til oppgavens tema og problemstilling. Andre del omhandler en teoretisk del, som er resultatet av et litteraturstudium bestående av en systematisk gjennomgang av skrevne kilder omhandlende relevante tema for oppgaven. De teoretiske betraktningene gir det nødvendige grunnlaget for fullt ut å forstå

oppgavens faglige tema og relevans, samtidig som informasjon videre benyttet i casestudiet presenteres. Enkelte emner i litteraturdelen vil ikke direkte overføres til oppgavens casestudie, men er likevel presentert da de anses som viktige elementer for en helhetlig forståelse av det faglige tema. Litteraturen som er benyttet er i stor grad anerkjent litteratur og kildene vurderes derfor som pålitelige. Del tre omhandler casestudiet, hvor en stor del av problemstillingene belyses gjennom en hydraulisk og økonomisk analyse av klimatilpasningstiltak. Del fire er siste del i oppgaven og inneholder diskusjon og konklusjon knyttet til resultatene og problemstillingene.

2 Om forskningsprosjektet ExFlood

NORKLIMA er et av Forskningsrådets større forskningsprogram som omhandler klimaendringer og konsekvenser for Norge. Programmets hovedmål er å «gi nødvendig ny kunnskap om klimasystemet, klimaets utvikling i fortid, nåtid og fremtid, samt direkte og indirekte effekter av klimaendringer på natur og samfunn som grunnlag for samfunnsmessige tilpasningstiltak» (Forskningsrådet 2010; 2008).

ExFlood er et forskningsprosjekt finansiert av NORKLIMA, som omhandler ekstremvær i små nedbørsfelt og nye metoder for beskyttelse mot flom. ExFlood ledes og koordineres av Bioforsk, med samarbeidspartnere som blant annet NVE, FNH, Statens Vegvesen og UMB. Fredrikstad, Sandnes og Trondheim er kommunale deltakere. Med hver sin urbanhydrologiske modell over ulike avløpsfelt representerer de tre kommunene tre ulike kystklima fra Norge. Disse feltene opptrer som studieområder i prosjektet. Studieområdene er valgt på bakgrunn av klimaregion, tilgjengelig data, eksisterende forskning og rapporterte problemer og skader på infrastruktur knyttet til ekstreme værhendelser. I tillegg til disse tre studieområdene benyttes Skuterudfeltet i Ås kommune som et pilotområde for ExFlood. Prosjektets hovedmål er å se hvordan tiltak i mindre nedbørsfelt i Norge kan benyttes for å redusere den negative effekten av ekstreme værhendelser på infrastruktur. Arbeidet inkluderer utvikling av nye tiltak, vurdering av eksisterende tiltak, testing av de ulike tiltakene og inkorporering av disse i hydrologiske modeller. Deretter ønskes det å konstruere brukervennlige verktøy til bruk i arealplanlegging for kvantifisering av utløpsmengden fra multifunksjonelle nedbørsfelt med urbane elementer og/eller elementer fra uforstyrret natur, jordbruk, skogområder og infrastruktur (ExFlood 2009; Forskningsrådet). Med et slikt planleggingsverktøy vil mulighetene for økonomisk optimalisering av tiltak mot effektene av ekstreme værhendelser være større (Stolte et al. 2011). Gjennom prosjektets arbeid ønsker man å redusere den maksimale avrenningen og det totale avrenningsvolumet fra nedbørsfeltene for å unngå oversvømmelser og skader på infrastruktur (Olsen 2011).



Figur 1: Illustrasjon av et mindre nedbørsfelt hvor det rurale området drenerer til det mer urbane området med mer omfattende infrastruktur (ExFlood 2009).

Prosjektets aktivitet er delt inn i fire arbeidspakker. De fire arbeidspakkene samhandler med hverandre gjennom hele prosjektet. Arbeidspakke én (WP1) inneholder kartlegging, identifisering og analyse av interessenter som påvirkes av ekstreme værhendelser. Arbeidspakken utgjør hovedsakelig en kvalitativ analyse og gjennom spørreskjema vil interessenters oppfatning av, og tilpasning til, hendelser og eventuelle tiltak registreres. Områder hvor flom har funnet sted kartlegges, og en beskrivelse av forholdene ved tidspunktet for de ulike hendelsene registreres. Informasjonen fra arbeidspakken lagres i en database sammen med et topografisk kart med lokalisering av historiske problemområder (ExFlood 2010).

Arbeidspakke to (WP2) vil på bakgrunn av WP1 finne hensiktsmessige hydrologiske modeller for ulike arealbruk og hydrologiske områder som kan finnes i et komplekst nedbørsfelt (f.eks. MOUSE for urbane områder, LISEM for jordbruksarealer og CoupModle for skogområder). Disse modellene samkjøres slik at man får én helhetlig hydrologisk modell som kan gi resultater for hele nedbørsfeltet. Modellen vil brukes på de ulike studieområdene for å gjennomføre analyser av dagens situasjon, potensielle fremtidige situasjoner med eventuelle klimaendringer og endringer i arealbruk, i tillegg til analyser av flomdempende tiltak. I denne arbeidspakken ønsker man også å rangere de ulike parameterne brukt i modellene i henhold til deres sensitivitet (ExFlood 2010).

I Arbeidspakke tre (WP3) vil effektiviteten til eksisterende tiltak identifisert i WP1, og eventuelle nye tiltak (fra WP2), testes ved å benytte seg av modellene fra WP2. Tiltakenes effektivitet beskrives av evnen til å dempe og eventuelt redusere flommer, kostnader forbundet med tiltakene, tiltakenes funksjon, utforming av tiltakene og prestasjon under ulike forhold. Arbeidet fra arbeidspakken skal resultere i en oversikt over både eksisterende og nye tiltaks effektivitet, i tillegg til retningslinjer for hensiktsmessig bruk av tiltakene (ExFlood 2010).

Den fjerde og siste arbeidspakken (WP4) har til hensikt å kombinere erfaringer og resultater fra de tre forestående arbeidspakkene. Arbeidspakken skal inneholde én teknisk del

omhandlende implementeringen av et arealplanleggingsverktøy, hvor de ulike studieområdene benyttes ved testing. Ved bruk av arealplanleggingsverktøyet skal man kunne få svar på hvilke tiltak som bør velges i ulike områder. I tillegg skal arbeidspakke 4 inneholde en samfunnsvitenskapelig del omhandlende interessentenes rolle i prosjektet og hvordan man skal kunne definere, rettferdiggjøre og informere om valg av tiltak mot de negative effektene av ekstreme værhendelser (ExFlood 2010).

Denne masteroppgaven inngår hovedsakelig som en del av Arbeidspakke 3 med testing av tiltak og deres effektivitet ved bruk av modellverktøyene ROSIE og Mike Urban. Som tidligere nevnt er det tiltakenes hydrauliske funksjon og effekt, i tillegg til kostnader knyttet til tiltakene, som vil være i fokus.

Del 2: Teoretiske betraktninger

3 Klima

Begrepet klima kan forklares som «en beskrivelse av gjennomsnittsværet på ett sted eller et område, slik det framkommer når enkeltobservasjoner bearbeides statistisk etter internasjonale retningslinjer» (Meteorologisk institutt a). Mens *klima* er en beskrivelse av gjennomsnittsværet på et område over en lengre tidsperiode er begrepet *vær* knyttet til atmosfærens tilstand over en mindre tidsperiode. Systematiske observasjoner av været på et sted over en lengre periode gir oss grunnlag til å si noe om vær som kan ventes. For å få en systematisk og statistisk beskrivelse av klima på et sted, benyttes klimainformasjon hentet ut fra observasjonene, i form av middelverdier, variasjoner rundt normalverdiene og ekstreme verdier (Meteorologisk institutt b). Normalene beregnes for flere meteorologiske og hydrologiske data og representerer middelverdier fra «standard normalperioder». Standard normalperioder er middelverdier for bestemte 30-årsperioder, som 1901-30, 1931-60, 1961-90, 1991-2020 osv. De ulike 30-årsperiodene er internasjonale avtalte perioder som muliggjør sammenligning av middelverdier for samme periode verden over (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Jordens klima deles ofte inn i klimasoner etter geografisk breddegrad, og ut fra dette angis tre klimasoner på hver halvkule som begrenses av vendesirkene¹ og polarsirkene; det tropiske klima, det tempererte klima og polarklima. Denne enkle sammenhengen mellom breddegrad og klima kompliseres meget av jordoverflatens varierende egenskaper. (Dannevig & Harstveit 2009).

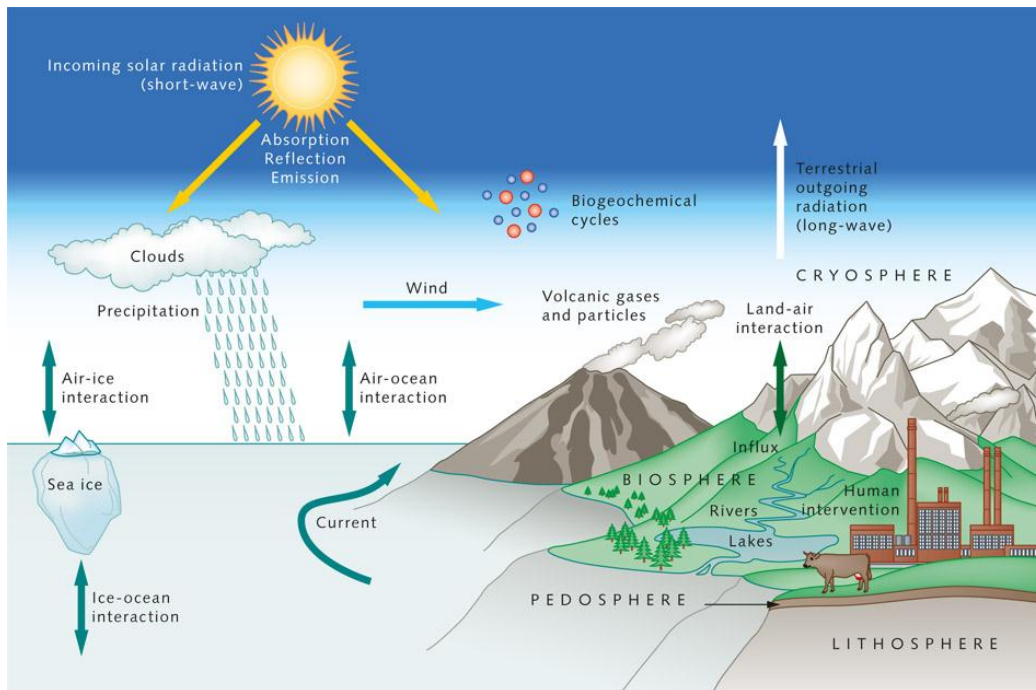
3.1 Det globale klimasystem

Jordens klima er relatert til energimengden lagret i klimasystemet (Bjerknessenteret 2007a). Det globale klimasystem er bygd opp av de fem komponentene hav, atmosfære, kryosfære², landjord og biosfære (Davies & Simonovic 2005). Disse komponentene kan ikke sees som isolerte systemer, da de i mange tilfeller påvirker hverandre. Sammen med drivkreftene bak klimasystemet og eventuelle klimaendringer, vil de ulike komponentene kunne svekke eller forsterke hverandres prosesser ved forstyrrelser i energibalansen – dette fenomenet omtales som tilbakekoblingseffekter (Cicero 2010). Det globale klimasystem påvirkes hovedsakelig av strålingsenergien fra solen – kilden til tilnærmet all naturlig energi på jorden. Den globale energibalansen kan beskrives som forholdet mellom den kortbølgede strålingsenergien fra solen og den utgående langbølgede strålingsenergien som jorden reflekterer og sender tilbake til atmosfæren (Buchdal & Hare 2000a). Dette forholdet kalles også jordens albedo (Kunnskapsforlagets papirleksikon 2009b). Solens stilling på himmelen er av stor betydning for varmen som tilføres jordoverflaten og atmosfæren, og grunnet dette er et områdes breddegrad en viktig faktor i forhold til klima. Områdene rundt ekvator mottar mer strålingsenergi fra solen, og her er energibalansen positiv, mens den i polområdene er negativ.

¹ Vendesirkene er breddesirkler på jorden og på himmelen, parallelle med ekvator i avstand fra denne på 23° 27'. Vendekretsene danner på jorden skillet mellom de tempererte soner og den tropiske sone, og solen står der i senit ved henholdsvis sommer- og vintersolverv (Kunnskapsforlagets papirleksikon 2009b).

² Kryosfæren er den delen av jordoverflaten hvor vann finnes i fast form, som i isbreer, snø, tele, permafrost og islagt vann (Universitetet i Oslo 2011).

Denne forskjellen i energibalanse danner grunnlaget for horisontale trykkforskjeller i atmosfæren, noe atmosfæren søker å motvirke (Meteorologisk institutt c).



Figur 2: Det globale klimasystem (World Ocean Review).

For å opprettholde likevekten i atmosfæren vil store vindsystemer settes i gang. Luftstrømmer overfører energi fra områder med positiv energibalanse til områder med negativ energibalanse (Meteorologisk institutt c). Varme lagres og transporteres også som fuktighet når vann fordampes fra jordens overflate, og frigjøres når luften avkjøles og kondenserer og danner skyer og nedbør (Buchdal & Hare 2000b). Atmosfæren består av store deler nitrogen og oksygen, i tillegg til andre gasser, som holdes på plass av gravitasjonskrefter. Atmosfærens kjemiske sammensetning spiller en viktig rolle i reguleringen av jordens klima, hvor drivhusgassene³ er av spesielt stor betydning, selv om de kun utgjør en forholdsvis liten del av atmosfærens gassinnhold (Meteorologisk institutt 2009a). Drivhusgasser, som vanndamp, karbondioksid, ozon og metan, absorberer en del av den langbølgede infrarøde varmestrålingen fra jordens overflate. Dette fører til en oppvarming av atmosfæren til en gjennomsnittstemperatur på 15 °C ved jordoverflaten, og kalles den naturlige drivhuseffekten. Drivhuseffekten gir grunnlag for liv på jorden, og uten den naturlige drivhuseffekten ville gjennomsnittstemperaturen på jordoverflaten vært rundt -18 °C (Meteorologisk institutt 2009b).

På samme måte som solen setter i gang luftstrømmer vil også havstrømmer dannes. Havstrømmene kan være påvirket av vind og/eller tetthetsforskjeller. Sirkulasjonen i havet er langsom i motsetning til sirkulasjonen i atmosfæren. Havene kan lagre mer varme enn atmosfæren, og oppleves også som mer stabile. Vann i tropiske områder lagrer mye av varmen fra atmosfæren og transporterer denne mot polområdene og høyere breddegrader,

³ Drivhusgasser blir også omtalt som klimagasser.

hvor vannet avkjøles og den kjølige atmosfæren varmes opp. Disse energistrømmene mellom de ulike komponentene i det globale klimasystemet er viktige faktorer for klimaet (Davies & Simonovic 2005). I tillegg til forskjell i energibalanse vil luft- og havstrømmenes retning påvirkes av andre ting, som jordens rotasjon rundt solen og om egen akse. Topografiske forhold, som fjellkjeder og andre høydeforskjeller på landoverflaten, og bunnforhold i havene, spiller også inn (Meteorologisk institutt c). Egenskaper ved vegetasjon og jordsmonn påvirker transporten av varme fra grunnen til atmosfæren, hvor fuktighetsinnholdet i jorden vil være en viktig faktor med tanke på energibruk ved evaporasjon. Kryosfæren påvirker klimaet med egenskaper som stor refleksjon av strålingsenergi, lav termal konduktivitet og evnen til å lagre store mengder ferskvann. Biosfæren spiller også en stor rolle i det globale klimasystem, blant annet gjennom karbonsyklusen, den hydrologiske syklus og overflatens albedo (Davies & Simonovic 2005). Kort sagt kan man si at det globale klimasystemet med dets luftstrømmer, havstrømmer og resten av vannets kretsløp produserer det vi opplever som vær (Olsen 2011) og gir opphav til jordens ulike klimasoner.

3.2 Klimaendring

Klimaendring kan forstås som en endring i forventet værmønster og vil tilsi endringer i den statistiske beskrivelsen av klimaet, enten i middeltemperatur eller i variasjonene rundt normalverdier og/eller ekstremverdier. Med klimaendringer menes en varig global endring i klima. Begrepet skilles fra begrepet klimavariasjon, som beskriver naturlige svingninger i klima (Fuglestad et al. 2012). Naturlige klimavariasjoner opptrer ofte regionalt og ikke globalt, og spesielt tenker man da på svingninger i klima som har en varighet kortere enn 100 år (Bjerknessenteret 2009a). Klimaendringer vil forekomme når den globale energibalansen forstyrres eller endres. Prosessene som forårsaker dette kan være såkalte ytre eller indre prosesser. De ytre prosessene kan være endringer i jordens bane rundt solen, forandringer i mengde strålingsenergi fra solen og kollisjoner med kometer eller meteoritter. Endringer i havsirkulasjon og forandringer i atmosfærens kjemiske sammensetning er eksempler på indre prosesser som virker innen jordens klimasystem (Buchdal & Hare 2000c). Prosessene som forårsaker endring i den globale energibalansen kalles gjerne klimapådriv (Bjerknessenteret 2007a).

Ved bruk av hjelpemidler, som blant annet fossiler, sedimentære bergarter, iskjerner, oksygen-isotoper og årringer i trestammer, kan man studere klima og klimaendringer gjennom jordens historie (Kunnskapsforlagets papirleksikon & Askheim 2011). Ved slike paleoklimatologiske⁴ studier er det påvist store historiske endringer i klima gjennom tidene (Fuglestad et al. 2012). Man skiller mellom naturlige klimaendringer og menneskeskapte klimaendringer. Mens de historiske variasjoner i klima regnes å være naturlige, mener mange at man nå står ovenfor en endring i klimaet som i stor grad skyldes menneskeskapte årsaker.

⁴ Paleoklimatologi er «vitenskapen om de klimatiske forhold i tidligere perioder av Jordhistorien» (Kunnskapsforlagets papirleksikon & Askheim 2011).

3.2.1 IPCC om klimaendring

FNs klimapanel, IPCC, ble etablert i 1988 av FNs miljøprogram og verdens meteorologiorganisasjon, med formål om å frembringe best mulig fagkunnskap om klima og klimaendringer (Olerud & Fuglestvedt 2011). Sammen med Klimakonvensjonen og Kyotoprotokollen utgjør IPCC FNs organer som arbeider med klima. Mens IPCC hovedsakelig har et faglig fokus, er Klimakonvensjonen og Kyotoprotokollen et mer politisk organ. Da myndighetene er involvert i utarbeidelsen av IPCCs rapporter og skriver under på panelets konklusjoner, har også disse rapportene stor politisk tyngde (Hambro 2007) og utgjør det viktigste vitenskapelige grunnlaget for beslutninger i Klimakonvensjonen (Olerud & Fuglestvedt 2011).

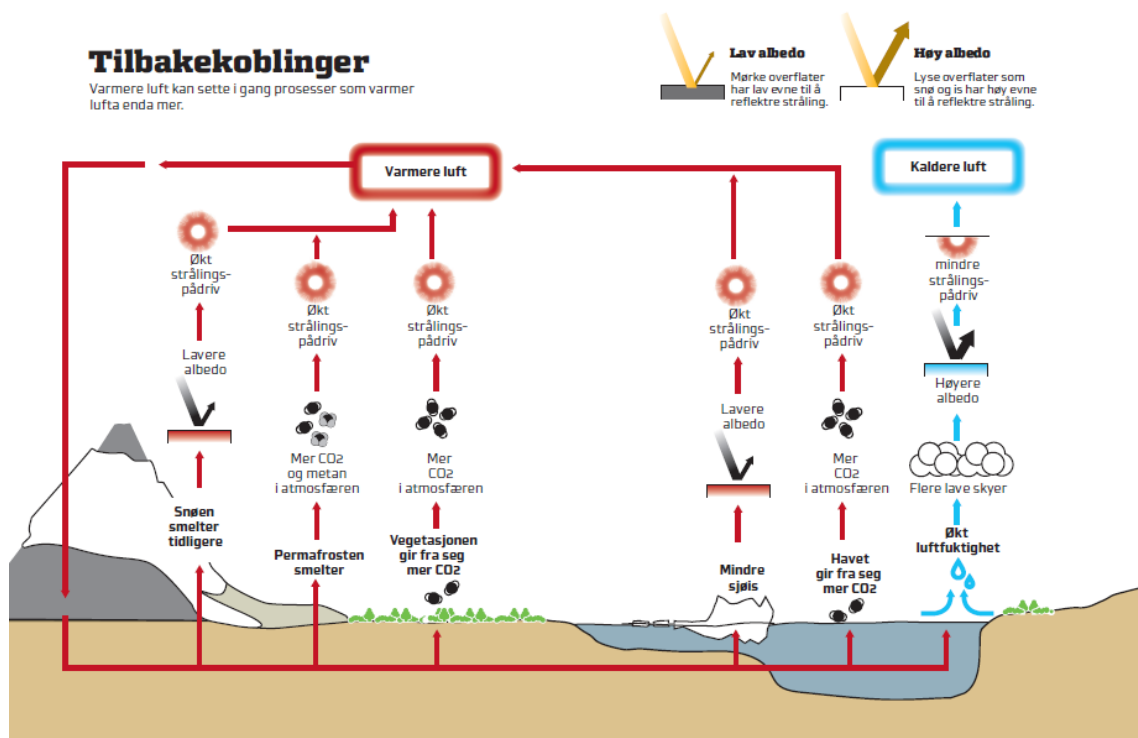
IPCC utfører ikke egen forskning, men tar utgangspunkt i allerede publisert vitenskapelig, teknisk og samfunnsøkonomisk arbeid. For å sikre en objektiv og fullstendig vurdering av tilgjengelig informasjon er gjennomgang og kvalitetssikring av materiale en av IPCCs viktigste arbeidsoppgaver. Flere tusen frivillige forskere fra hele verden bidrar med arbeid til IPCC. Materialet som bidrar til IPCCs rapporter er nøye selektert og vurdert av eksterne fageksperter og myndigheter (IPCC). IPCC har levert fire hovedrapporter med informasjon om klima og klimaendringer, henholdsvis i 1990, 1995, 2001 og 2007. En femte rapport er ventet å leveres i 2013/2014 (Olerud & Fuglestvedt 2011).

Etter arbeidet med den fjerde hovedrapporten mener forskere at vi står ovenfor et klima i endring som kan gi oss store utfordringer. Det trekkes tydelige konklusjoner om en global oppvarming i et økende tempo, hvor årsaken antas å være en kombinasjon av naturlig variabilitet og menneskeskapt oppvarming. I tillegg til dette konkluderer IPCC i rapporten at klimaendringene i tiden fremover vil være større enn de vi allerede har sett, og at det vil være nødvendig med store utslippsreduksjoner av klimagasser for å unngå store klimaendringer (Jansen 2007).

Forskerne involvert i arbeidet med IPCCs fjerde rapport har aldri vært sikrere på at klimaendringene som utspiller seg i dag, i stor grad skyldes menneskelig aktivitet. Man antar at den globale oppvarmingen har en direkte sammenheng med den forsterkede drivhuseffekten som oppleves, grunnet økt mengde klimagasser i atmosfæren. Den menneskeskapte klimagassen som har størst betydning for det globale klimasystemet er karbondioksid, og det er forbrenning av olje, kull og gass som er den største kilden til de menneskeskapte utslippene av karbondioksid. Konsentrasjonen av karbondioksid i atmosfæren, sammen med metan og lystgass, har økt betydelig etter 1750 og den industrielle revolusjon. Sammenlignet med resultater fra undersøkelser av iskjerner ser man at dagens atmosfæriske konsentrasjoner av karbondioksid og metan overstiger de naturlige variasjonene gjennom de siste 650 000 år (Bjerknessenteret 2007b).

Tilbakekoblingsmekanismene – prosessene som virker mellom de ulike komponentene i klimasystemet – kompliserer bildet av klimaendringer betraktelig. Et eksempel på en tilbakekoblingsprosess kan illustreres med mengden vanndamp i atmosfæren. Vanndamp er

den viktigste klimagassen i den naturlige drivhuseffekten. Ved en global temperaturøkning vil man oppleve et økt innhold av vanndamp i atmosfæren, på grunn av økt fordamping fra jordens overflate. Dette vil forsterke den allerede gjeldende temperaturøkningen betraktelig, og ifølge IPCC antas det at den globale oppvarmingen vi opplever er omkring dobbelt så stor som den ville vært uten denne tilbakekoblingsmekanismen. Tilbakekoblingseffekter kan enten forsterke eller redusere de menneskeskapte klimaendringene vi opplever. Mye av den gjenværende usikkerheten i forhold til vår forståelse av klima, klimasystemet og klimaendringer, knyttes til disse mekanismene og manglende kunnskap om deres virkemåte. I den tredje hovedrapporten til IPCC ble tilbakekoblingsmekanismene utpekt som et av åtte områder hvor man trenger større vitenskapelig forståelse (Kallbekken 2006).



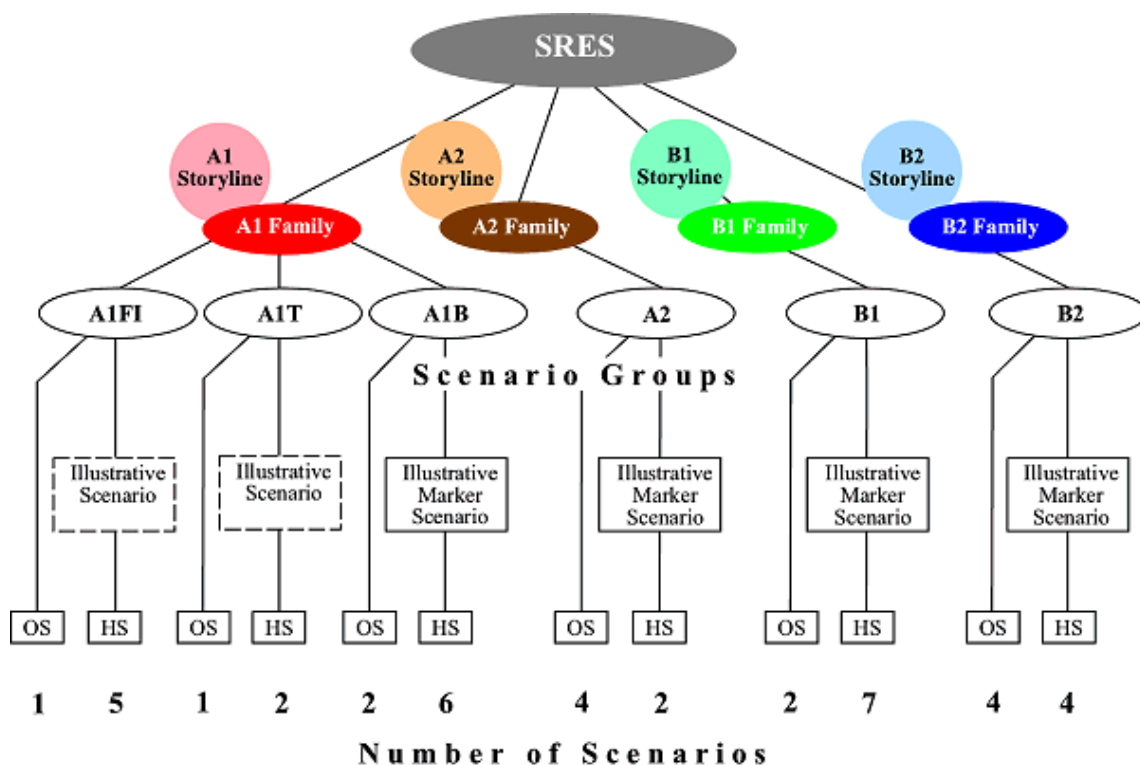
Figur 3: Tilbakekoblingsmekanismer (Bjørnæs 2009).

Selv om IPCC i hovedsak er en anerkjent organisasjon mottar de også kritikk. Mye av denne kritikken kommer fra klimaskeptikere, som generelt stiller seg skeptiske til om klimaet er i endring og om menneskelig aktivitet spiller noen vesentlig rolle i eventuelle klimaendringer (Zero 2009). IPCC har også blitt kritisert for å være forsiktige i sine konklusjoner (Cicero 2009). I de siste år har IPCC blitt kritisert for å være konservative og at deres utgivelser bygger på utdatert forskning. På en klimakonferanse i København i mars 2009 presenterte over 2500 forskere nyere forskning som et tillegg til IPCCs fjerde hovedrapport. Konklusjonene fra de nye bidragene var at «klimaendringene går raskere og er mer omfattende enn presentert i IPCCs fjerde hovedrapport» (Zero 2009).

3.2.2 SRES

En del av arbeidet til IPCC har også vært knyttet til utviklingen av utslippsscenarioer som kan benyttes i globale sirkulasjonsmodeller for utvikling av ulike scenarier for klimaendringer. Utslippsscenarioene beskriver ulike alternativer for fremtiden og er viktige verktøy for å analysere drivkrefter og deres påvirkning på klimagassutslipp, i tillegg til en vurdering av usikkerheten knyttet til dette. De første utslippsscenarioene ble utviklet i 1990 og 1992 og var banebrytende i forhold til estimering av klimagassutslipp. Nye scenarier ble presentert i IPCCs spesialrapport om utslippsscenarioer (SRES) i år 2000, grunnet ny kunnskap om klimaendringer og drivkreftene bak utslipp av klimagasser. Spesielt var det i forståelsen av karbonintensitet i energiforsyning, utslipp av svovel og inntektsforskjeller mellom industri- og utviklingsland, skjedd store endringer siden 1992 (IPCC 2000).

De «nye» utslippsscenarioene beskriver mengden fremtidige utslipp av drivhusgasser, basert på ulike antagelser om fremtidig utvikling av teknologiske, samfunnsøkonomiske og demografiske, sosiale og miljørelaterte drivkrefter. I utslippsscenarioene er litteratur om eventuelle utenforliggende overraskelser eller katastrofer ikke tatt hensyn til. Scenarier som forutsetter implementering av klimainitiativ fra FN's Klimakonvensjon eller oppnåelsen av utslippsmål fra Kyotoavtalen er heller ikke inkludert i utslippsscenarioene. De nye utslippsscenarioene består totalt av 40 scenarier som grupperes i fire framtidsscenarioer som kalles *storylines*. Disse framtidsscenarioene er beskrivende kvalitative historier, og representerer fire ulike sett med alternativer av fremtidig utvikling frem mot 2100 (IPCC 2000).



Figur 4: Oversikt over SRES' utslippsscenarioer (IPCC 2000).

Som vist i figur 4 deles de fire scenariefamiliene inn i seks scenariogrupper, som igjen deles inn i harmoniserende scenarier som har noenlunde like antagelser knyttet til populasjon og befolkning, verdensøkonomi, teknologi og energibruk. De harmoniserende scenarier betegnes HS. Alle scenariogrupper har noen scenarier som utforsker usikkerheter i drivkrefter bak utslippene utover det som gjøres i de harmoniserende scenarioene. Disse scenarier betegnes OS (IPCC 2000).

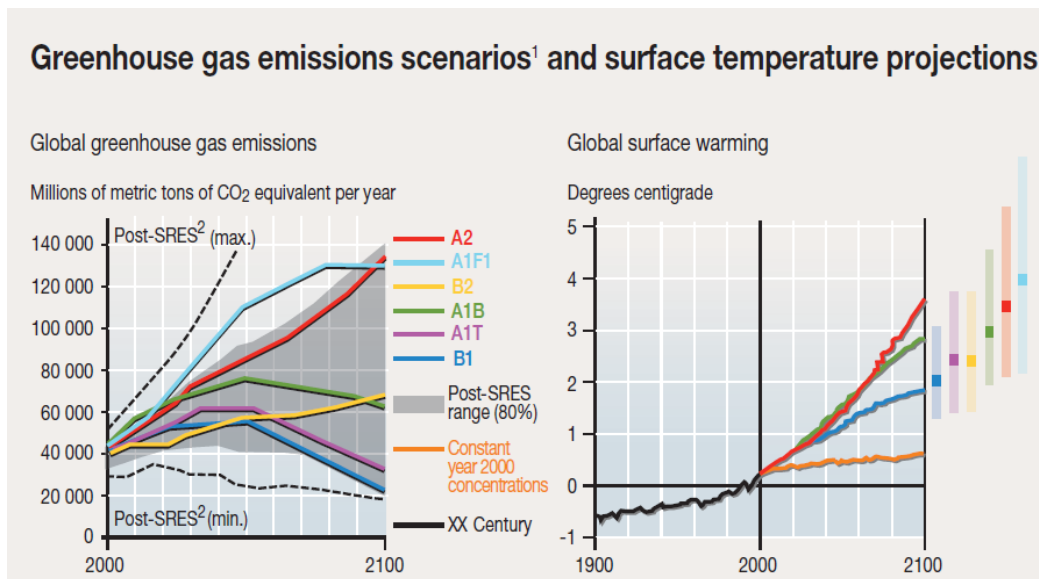
Framtidsscenarioene i scenariefamilie A1 beskriver en verden med rask økonomisk vekst, tidlig introduksjon av ny og mer effektiv teknologi, og en befolkningsvekst som når sitt høydepunkt i midten av århundret før den sakte reduseres. Regionale forskjeller mellom inntekt per innbygger reduseres, og man ser et økende samspill mellom ulike regioner med økte kulturelle og sosiale interaksjoner. A1-familien deles videre opp i tre ulike scenariogrupper som skilles fra hverandre da de beskriver ulike teknologisk endring i energibruk (IPCC 2000):

- A1F1: Fossilintensive energikilder (er en sammenslåing av to undergrupper; A1C hvor man benytter seg av en ren kull-teknologi som er miljøvennlig, dersom man ser bort fra utslippene av drivhusgasser og A1G, som er en fremtid med ekstensiv bruk av olje og gass).
- A1B: Balanse mellom fossilintensive og ikke-fossile energikilder.
- A1T: Ikke-fossile energikilder, som solenergi og kjernekraft.

Scenariefamilie A2 beskriver en heterogen verden, hvor man er opptatt av regional uavhengighet og beskytter lokal identitet. Befolkningsmønstrene i de ulike regionene konvergerer sakte, noe som fører til en kontinuerlig økende global populasjon. Den økonomiske veksten og teknologiske utviklingen er mer fragmentert og skjer saktere enn i de andre scenarier (IPCC 2000).

B1 maler et bilde av en verden med samme befolkningsmønster som i A1. B1-familien har raskere endringer i økonomisk struktur, og går mot en service- og informasjonsøkonomi med reduksjoner i materialforbruk, hvor en renere og mer ressurseffektiv teknologi introduseres. Globale løsninger i forhold til økonomisk, sosial og miljømessig bærekraft, utviklet på grunn av økt samarbeid mellom regioner, er viktige tema i scenarioene (IPCC 2000).

Scenarioene i B2 følger en storyline hvor fokuset ligger på lokale løsninger for økonomisk, sosial og miljømessig bærekraft. Verden opplever en konstant befolkningsvekst, men i en vekstrate lavere enn i A2. Man har en moderat økonomisk utvikling, og saktere og mer variert teknologisk endring enn i scenariefamiliene A1 og B1 (IPCC 2000).



Figur 5: Illustrasjon av SRES'scenarioer knyttet til utslipp av drivhusgasser til venstre og global overflateoppvarming til høyre (IPCC 2010).

3.2.3 Observerte globale klimaendringer

Ifølge IPCCs fjerde hovedrapport er «oppvarmingen av klimasystemet utvetydig, noe som nå er tydelig fra observasjoner av økte globale gjennomsnittstemperaturer i atmosfære og hav, omfattende smelting av snø og is, og økende globalt gjennomsnittlig havnivå» (IPCC 2007). En rekke endringer er observert i temperatur, nedbør, og isbreer og snødekke. Nedenfor gis en gjengivelse av IPCCs (2007) observasjoner av «nylige» klimaendringer:

- **Global overflatetemperatur:** Den globale overflatetemperaturen økte med 0,74 °C mellom 1906 og 2005. Den gjennomsnittlige temperaturøkningen i løpet av de siste 50 år er nesten dobbelt så stor som oppvarmingen de 100 siste år. Den totale temperaturøkningen fra 1850-1899 til 2001-2005 er 0,76 °C.
- **Vanndamp i atmosfæren:** Den gjennomsnittlige mengden vanndamp i atmosfæren har vært økende, i hvert fall siden 1980-tallet. Dette gjelder over vann og hav, i tillegg til i øvre troposfære. Økningen som oppleves er stort sett konsistent med den ekstra vanndampen varmere luft kan holde på.
- **Havtemperatur:** Observasjoner siden 1961 viser en økning i global gjennomsnittstemperatur i havet ned til 3000 meter dyp. Havet globalt har absorbert mer enn 80 % av varmen som er tilført klimasystemet. En slik oppvarming vil føre til utvidelse av sjøvannet, noe som bidrar til at havnivået stiger.
- **Isbreer og snødekke:** I gjennomsnittet har isbreer og snødekker minket på begge halvkuler. En utbredt reduksjon i isbreer og iskapper har bidratt til en stigning i havnivået.

- **Havstigning:** Det er *meget sannsynlig*⁵ at tap fra isdekkene på Grønland og i Antarktis har bidratt til en stigning i havnivå mellom 1993 og 2003. Det er *høy grad av sikkerhet* for at hastigheten i observert havnivåstigning økte fra det 19. til det 20. århundret. Den totale stigningen i havnivå i det 20. århundre er anslått til å være 0,17 m.
- **Arktisk temperatur:** Gjennomsnittstemperaturen i arktiske strøk har i de siste 100 år økt nesten dobbelt så hurtig som den globale gjennomsnittstemperaturen. Temperaturene i Arktis har høy variasjon mellom tiårsperiodene. En varm periode ble også observert mellom 1925 og 1945.
- **Arktisk sjøis:** Årlig gjennomsnittlig arktisk sjøisutbredelse har gått ned med 2,7 % per tiår, med større nedgang på 7,4 % per tiår sommerstid.
- **Permafrost:** Temperaturen på toppen av permafrosten har generelt økt siden 1980-tallet. Det maksimale areal som sesongmessig er frosset har minket med ca. 7 % på den nordlige halvkule siden 1900, med en reduksjon på opptil 15 % om våren.
- **Nedbør:** Betydelig økte nedbørmengder er observert i deler av verden, blant annet i nordlige Europa, mens det i andre områder er observert tørke.
- **Nedbørens intensitet:** Frekvensen av intense nedbørsepisoder har økt over de fleste landområder. Dette er konsistent med oppvarming og observert økning i vandampinnholdet i atmosfæren.
- **Salinitet:** Endringer i nedbør og fordampning over havene er foreslått å forårsake et lavere saltinnhold i vann på midlere og høyere breddegrader, og høyere saltholdighet i vann på lavere breddegrader.
- **Vind:** Vestlige vinder på midlere breddegrader er blitt sterkere på begge halvkuler siden 1960-tallet.
- **Tørke:** Mer intense og lengre tørkeperioder er blitt observert over større områder siden 1970-årene, spesielt i tropene og subtropene
- **Ekstreme temperaturer:** Utstrakte endringer i ekstreme temperaturer er observert de siste 50 år. Kalde dager/netter og frost er mindre vanlig, mens varme dager/netter og varmebølger er mer vanlig.

3.2.4 Globale klimaframskrivinger

På bakgrunn av SRES' utslippsscenarioer og bruk av avanserte klimamodeller får man, sammen med informasjon hentet fra observasjoner av klimaendringer, et kvantitativt grunnlag for å estimere sannsynligheter for ulike aspekter av fremtidige klimaendringer (IPCC 2007). Nedenfor blir et utdrag av IPCCs (2007) klimaframskrivinger fra fjerde hovedrapport gjengitt:

- De fleste av scenarioene presentert i SRES antyder en global oppvarming på omkring 0,2 °C per tiår. Selv om konsentrasjonene av drivhusgasser og aerosoler holdes konstant på et nivå tilsvarende 2000-tallet, vil man fortsatt kunne forvente en

⁵ IPCC opererer med ulike grader av sannsynlighet: nærmest sikkert (> 99 % sannsynlig), svært sannsynlig (> 95 %), meget sannsynlig (> 90 %), sannsynlig (> 66 %), mer enn 50 % sannsynlig, meget usannsynlig (< 10 %), svært usannsynlig (< 5 %) (Bjerknessenteret 2007b).

oppvarming på 0,1 °C per tiår. Temperaturendringene vil meget mulig bli større enn dem som ble observert forrige århundre. Det beste estimatet for oppvarming i forhold til det milde scenarioet B1 er +1,8 °C, mens det i forhold til A1F1 er +4,0 °C.

- En global oppvarming vil kunne redusere land- og havoverflatens opptak av atmosfærisk karbondioksid, noe som vil kunne øke fraksjonen av antropogene utslipp av drivhusgasser i atmosfæren.
- Det er forventet at oppvarmingen vil være størst over landområder, og ved de fleste høye nordlige breddegrader, mens den vil være minst over Sørishavet og deler av Nord-Atlanteren.
- Det antas at snødekkene vil reduseres, og i alle scenarioer vil sjøis i Arktisk og Antarktis krympe.
- Det er *meget sannsynlig* at hendelser med varme ekstremtemperaturer, hetebølger og intens nedbør vil forekomme hyppigere.
- Ekstratropiske stormer forventes å bevege seg mot polene, noe som fører til endringer i vind, nedbør og temperaturmønster.
- Det er *meget sannsynlig* at vi vil få en økning i nedbørsmengde på høyere breddegrader, mens det er *sannsynlig* at vi vil få en nedgang i de fleste subtropiske landområder.
- Den gjennomsnittlige havnivåstigningen er forventet til å ligge mellom 0,18 – 0,59 m i slutten av dette århundret.
- Tidligere og fremtidige utslipp av karbondioksid vil fortsette å bidra til oppvarming og havnivåstigning i mer enn tusen år fremover, grunnet tiden det tar å fjerne denne gassen fra atmosfæren.

3.3 Klima i Norge

Norges naturlige klimavariasjoner er betydelige, både geografisk og i tid. Fra Lindesnes til Nordkapp strekker Norge seg over mer enn 13 breddegrader, og vi har store variasjoner i solinnstråling. Klimaet i Norge er mildere enn den nordlige beliggenheten skulle tilsi, og er varmere enn andre steder på samme breddegrader (Hanssen-Bauer et al. 2009). Dette skyldes *«et vekselspill mellom varme havstrømmer og vindsystemer, der den geografiske fordelingen av hav, land og fjellkjeder er sentral»* (Dannevig & Harstveit 2011).

Som en del av det nordlige Europa, vil Norges vindforhold i stor grad domineres av Vestavindsbeltet - den nord-atlantiske oscillasjon. I dette området oppstår lavtrykk som forplanter seg vestover fra østkysten av Nord-Amerika over Atlanterhavet til Europa på vinterstid. Vestavindsfeltet varierer i styrke, noe som gir stor atmosfærisk variabilitet over Europa. Vind fra sørøst vil gi nedbør over Sør- og Østlandet, mens Vestlandet ligger i regnskygge. Dersom vinden kommer fra sørvest vil situasjonen være motsatt. Dreininger i vindmønsteret over Norge vil kunne gi betydelige forskjeller i nedbørsmengde og -fordeling over landet (Hanssen-Bauer et al. 2009). Norge har mesteparten av landegrensen mot hav, og vest for Spitsbergen finnes åpent vann på høyere breddegrad enn noe annet sted på kloden (Dannevig & Harstveit 2011). Atlanterhavet og de nordiske hav domineres av nordgående

transport av varme og salte havstrømmer i de øverste 500 meter av havet i øst og sørgående transport av kalde og ferske vannmasser i dypet i vest. De varme og salte havstrømmene kommer fra Golfstrømmen og Atlanterhavsstrømmen (sistnevnte er en forlengelse av Golfstrømmen). Dette er en viktig varmekilde for Norskehavet og Barentshavet, og holder disse hav isfritt om vinteren. I tillegg påvirker de varme strømmene lufttemperaturen, spesielt i Norges kystnære strøk. Kombinasjonen av varme transportert via hav og atmosfære fører til milde vintertemperaturer langs Norges kyst og i havområdene utenfor. Temperaturene er gjerne 10 til 20 °C høyere enn middeltemperaturen fra tilsvarende breddegrader på jorden (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Norges mange fjell har en skjermende virkning som gir et mildere kontinentalt klima enn avstanden fra kysten skulle tilsi. Dette gjelder i stor grad for områdene Østafjells og for Finnmarksvidda (Dannevig & Harstveit 2011). Årsmiddeltemperaturen for hele landet er omkring +1 °C, men varierer fra -4 °C i høyfjellet til +6 °C langs kysten av Vestlandet. De lavtliggende områdene i Oslofjorden har flest såkalte varme døgn, hvor temperaturen er over 20 °C. De laveste verdiene for midlere vindhastighet i løpet av 10 minutter, 10 meter over bakken, finnes i indre deler av Østlandet, Finnmark og Troms og er på 22-24 m/s. Utsatte deler av kysten har en midlere vindhastighet opp mot 40 m/s. Gjennomsnittlig årsnedbør for Norge er beregnet til å være 1486 mm, hvor man har anslått at 346 mm fordampes, mens 1140 mm går til infiltrasjon/avrenning. Områdene i øvre Gudbrandsdalen og indre Troms er de tørreste områder, mens Vestlandets midtre strøk er våtest, med over 5000 mm årsnedbør enkelte steder. Korttidsnedbøren er også større i de våteste områdene. Det er målt ettdøgns nedbørsverdier med gjentaksintervall på fem år over 130 mm visse områder på Vestlandet og i Nordland. Gjennomsnittlig har nedbørfelt nær kysten kun et par dager i året med snødekke, mens det i høyfjellet ofte er dekket av snø over 300 dager i året. I breområdene i Norge er det alltid snø og/eller is (Hanssen-Bauer et al. 2009).

3.3.1 Observerte klimaendringer i Norge

- **Temperatur:** Siden 1875 kan Norges variasjon i årsmiddeltemperatur deles inn i fire perioder; en kald periode fra 1875 til 1900, en periode med en økning i middeltemperatur frem til 1930 (perioden kalles gjerne «the early 20th century warming»), en periode med avkjøling frem mot 1960-tallet og til slutt den pågående oppvarmingen. Utviklingen av årsmiddeltemperaturen for fastlands-Norge etter 1900 har mange likhetstrekk med globaltemperaturens utvikling. Oppvarmingsraten har vært omkring 0,08 °C per tiår de siste 100 år, og temperaturøkningen siden 1965 har vært over 0,4 °C per tiår (Hanssen-Bauer et al. 2009). I tiden fra 1985 og frem til dags dato har temperaturen vært varmere enn normalen, med en tendens til videre oppvarming (Meteorologisk institutt d).
- **Årsnedbør:** De siste 100 år har den årlige nedbøren økt mellom 0,3 og 2,1 % per tiår i ulike deler av Norge. Den største økningen har forekommet på Vestlandet og i store deler av Midt- og Nord-Norge (Førland et al. 2007). For fastlands-Norge har

årsnedbøren økt med nesten 20 % siden 1900 (Hanssen-Bauer et al. 2009). Økningen i nedbør er blitt spesielt tydelig de siste 20 år (Meteorologisk institutt d).

- **Ett-døgns nedbør:** På Sør-Vestlandet har man sett en svak tendens til økning i ekstreme tilfeller av ett-døgns nedbør de siste tiår, mens det i andre deler av landet kun har vært svært små endringer (Hanssen-Bauer et al. 2009). Førland et.al (2007) viser til indikasjoner på at frekvensen til ekstreme ekstremverdier er synkende, mens frekvensen av høye ettdøgns nedbørsverdier er økende.
- **Korttids-nedbør:** Fra målestasjonen på Blindern i Oslo er det vist en klar økning i hyppigheten av høye én-times nedbørsverdier i perioden 1968-2008 For en måleserie fra Karmøy er det ingen tilsvarende trend i perioden 1968-2002 (Hanssen-Bauer et al. 2009)
- **Vind:** Det er få lange homogene måleserier av vind i Norge, noe som vanskeliggjør vurderingen av endringer i vindforhold. Generelt sett er det likevel konkludert med at vindseriene fra kystområder ikke viser noen tydelig trend i økt hyppighet av døgn med sterk vind i årene 1961-1990 (Hanssen-Bauer et al. 2009).
- **Snø:** Fra en analyse av langtidsvariasjon av snøforhold i Norge er det funnet at snøsesongen har blitt kortere i løpet av de siste 100 år. Det er en klar tendens til at snøsesongen starter senere og slutter tidligere enn før. Også for antall dager med snø og maksimal snødybde er det negative trender. De sørligste områdene i landet viser det mest konsistente bildet av mindre snø og kortere snøsesong. Det må presiseres at fjellområder er dårlig representert i studiene, da det her er mangel på lange tidsserier (Hanssen-Bauer et al. 2009).
- **Permafrost:** Siden 1999 er det gjort kontinuerlige observasjoner av bakketemperatur som viser at permafrosten i Norge varmes opp i et høyt tempo. Blant annet viser observasjoner fra Dovrefjell en oppvarmingstrend siden 2003, og etter den milde høsten i 2006 virker de termiske forholdene i bakken forandret. Man ser her de første tegn på at bakken tiner og tørker opp, og det antas at det er første gang at permafrost som tiner direkte observeres i Norge (Hanssen-Bauer et al. 2009).
- **Hav:** Hydrografiske observasjoner fra Barentshavet gjennom 1900-tallet viser betydelige variasjoner i havtemperatur, både fra år til år og over dekadene. Målingene viser at temperaturen på 2000-tallet klart oversteg temperaturen fra de varmere 1930- og 1940-årene. Målinger fra Norskehavet viser at etter slutten på 1900-tallet har både havtemperatur og salinitet økt, og vi har i dag den høyeste observerte havtemperatur siden måleseriene startet. Det antas at de observerte temperaturøkningene er en kombinasjon av langperiodiske klimasvingninger og menneskeskapt global oppvarming (Hanssen-Bauer et al. 2009).
- **Arktisk sjøis:** I Barentshavet, Grønlandshavet, Norskehavet og i havet rundt Island er det betydelige variasjoner i iskanten. En sammenligning av tidligere observasjoner⁶ og satellittbasert informasjon de siste 30 år, viser at det var mye mer is enkelte år på 1800-tallet enn det har vært nå. Det er særlig sommerutbredelsen som har avtatt i Arktis, og en større del av isen består av tynnere førsteårsis enn av tykk flerårsis. For Barentshavet har isutbredelsen avtatt de siste 30 år, men da særlig om vinteren og

⁶ De tidligste iskantobservasjoner ble gjort av sel- og hvalfangere og går tilbake til rundt 1750

mindre sommerstid. Målinger av istykkelsen i dyphavs bassengene i det indre Arktis viser at istykkelsen er redusert fra 3,71 m i 1980 til 2,46 m i 2000. Istykkelsen i området rundt Nordpolen har avtatt med 40 % fra 2001 til 2007. Ved kombinasjon av data om isdrift med informasjon om istykkelse og isutbredelse er det vist at fra 2005 har den gamle flerårsisen, som er ti år eller eldre, praktisk talt forsvunnet (Hanssen-Bauer et al. 2009).

3.3.2 Regionale klimaframskrivninger for Norge

Nedenfor vil hovedkonklusjonene av de regionale klimaframskrivninger for Norge, hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2009) sin rapport med bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning⁷, gjengis. Klimaframskrivningene er basert på scenarioer for menneskeskapt utslipp av klimagasser (B1, A1B og A2 – disse scenarioene vektlegges av IPCC da de representerer henholdsvis et lavt, middels og høyt utslippsscenario (Hanssen-Bauer 2012)), resultater fra koblede globale klimamodeller, og dynamiske og empiriske metoder for å nedskalere disse resultatene til regionale data med større geografisk detaljrikdom. Det er framskrivninger fra den regionale klimamodellen HIRHAM fra Meteorologisk institutt, og en global atmosfæremodell med variabel oppløsning fra Bjerknessenteret som er benyttet til å beregne de regionale klimaendringene i Norden og de tilgrensende havområder (Hanssen-Bauer et al. 2009). Klimamodellering og regionalisering av globale klimamodeller vil presenteres i kapittel 3.4.

- Årsmiddeltemperaturen i Norge anslås å øke med 2,3 til 4,6 °C innen 2100. Det forventes at det blir varmere i alle landsdeler og for alle årstider, men temperaturøkningen vil være størst i vinterhalvåret, og minst om sommeren.
- Alle de ulike framskrivningene viser at antall kalde dager og frostdager vil avta. Det er forventet at antall dager med temperaturer over 20 °C vil øke, spesielt i Øst- og Sør-Norge, men også i Trøndelag og i Finnmark.
- Det beregnes at årsnedbøren i gjennomsnitt for Norge vil øke med 5 til 30 % mot 2100. Nedbørsmengdene er forventet å øke i alle årstider og regioner i Norge, men den naturlige variabiliteten kan likevel føre til at man lokalt kan oppleve perioder fra år til tiår med redusert nedbør.
- Det blir flere antall dager med høye nedbørsverdier, og gjennomsnittlig nedbørmengde for disse dagene blir høyere i hele Norge og for alle årstider.
- Snøsesongen blir kortere i hele landet. Reduksjonen blir størst i lavlandet, hvor 2-3 måneders reduksjon beregnes mot slutten av århundret.
- Endringene i midlere vindforhold blir små, mens det forventes større endringer for høye vindhastigheter. Frekvensen av tilfeller med høye vindhastigheter ser ut til å øke.
- Havets overflatetemperatur vil kunne øke med 0,5 °C langs vestkysten og med 1,0 – 1,5 °C i det vestlige Barentshavet de neste 65 årene. I Nordsjøen kan overflatetemperaturen øke med 1,4 °C på 100 år. Man kan oppleve en utflating eller en

⁷ NOU Klimatilpasning er et utvalg oppnevnt av regjeringen med formål om å gjennomføre en offentlig utredning om Norges sårbarhet og tilpasningsbehov som følge av klimaendringene som ventes.

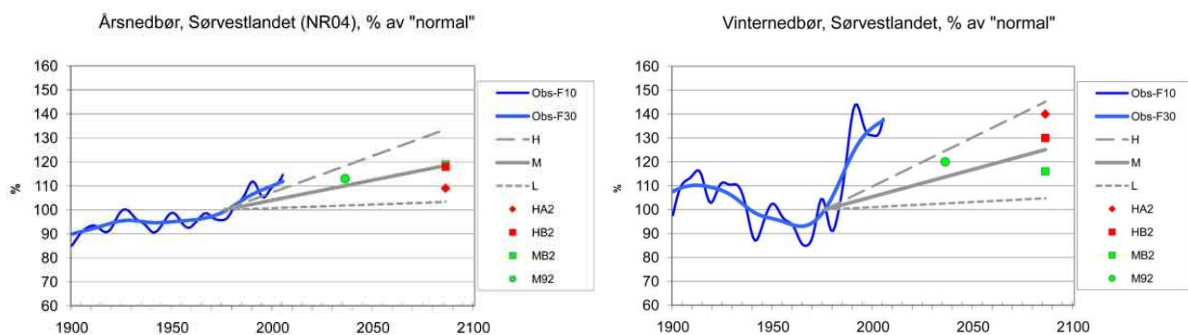
nedgang i havtemperatur utover 2000-tallet, dersom de multidekadiske svingningene i havtemperatur opptrer som tidligere. Dersom perioden med varme temperaturer opprettholdes vil man kunne få en dramatisk og rask økning i havtemperatur, når «*både naturlig variabilitet og menneskeskapt oppvarming bidrar i samme retning*».

- Forsuringen av havet beregnes å akselerere.
- Tykkelse og utbredelse av det arktiske isdekket vil fortsette å avta utover århundret.
- Havnivået langs norskekysten forventes i løpet av 2000-tallet å stige rundt 70 cm langs kysten av Sør- og Vestlandet, rundt 60 cm i Nord-Norge og rundt 40 cm innerst i Oslofjorden og Trondheimsfjorden som følge av klimaendringene. Dette er relativt til landnivå, noe som vil si at det er tatt hensyn til landheving⁸.

3.3.3 Regional klimaframskrivning for Vestlandet/Rogaland

I Rogaland vil havnivået stige frem mot år 2100. Rogaland vil få en økning i gjennomsnittstemperatur, og hyppigere tilfeller av intens nedbør og kraftigere stormer. Som følge av dette vil flomsesongen endres og utvides, og i tillegg vil flom og skred kunne oppstå steder som tidligere ikke har vært utsatt (Fylkesmannen i Rogaland 2011).

Sør-Vestlandet er den regionen i Norge som har opplevd størst økning i årlig nedbørsmengde de siste 30 år. Økningen her har vært på 8 %, mens resten av landet har hatt en økning på 5 %. Vinternedbøren kan øke med så mye som 45 % i deler av Sør-Vestlandet mot 2100. Det antas at nedbørsmengden om sommeren vil avta (NOU - Klimatilpasning 2009a).

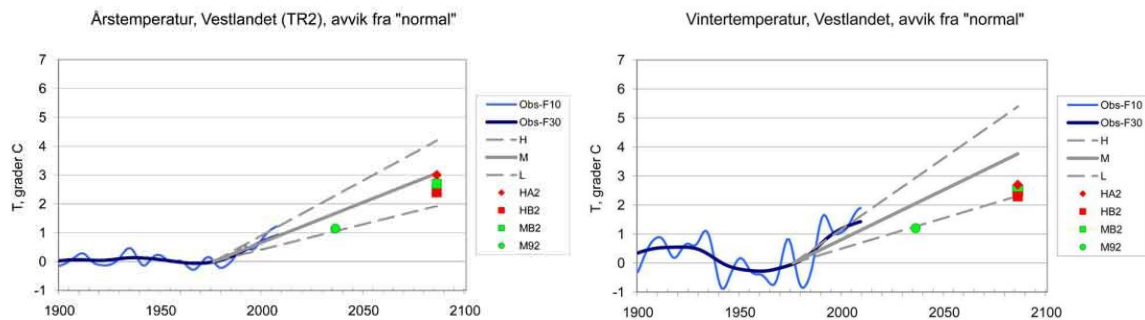


Figur 6: Framskrivning av årsnedbør, til venstre, og vinter nedbør, til høyre. H = høy framskrivning, M = medium framskrivning, L = lav framskrivning (NOU - Klimatilpasning 2009a).

Det forventes også mer intens nedbør i Rogaland. En midlere framskrivning for Sør-Vestlandet viser at antall dager med mye nedbør vil øke med 86,7 % fram mot år 2100, samtidig er nedbørmengden på dager med mye nedbør anslått å øke med 17,5 % gjennom samme periode (NOU - Klimatilpasning 2009c).

⁸ Etter siste istid har landet i Norge og Island hevet seg kraftig da vekten av den fennoskandiske innlandsisen har forsvunnet. Landhevingen pågår fortsatt, men går stadig saktere. Landhevingen har tidligere vært større enn havstigningen, noe som har ført til at havnivået har sunket, relativt sett. Dette forholdet forventes å endres i fremtiden (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Den årlige middeltemperaturen på Vestlandet vil stige med 1 til 2,3 °C innen år 2050, og 1,9 til 4,2 °C mot år 2100 (NOU - Klimatilpasning 2009b). Selv forsiktige framskrivninger viser at Sør-Norge vil få flere dager med middeltemperatur over 20 °C. I dag er det i gjennomsnitt ingen slike dager i Rogaland, men i løpet av de neste 90 årene kan det komme opp i over 10 dager med temperaturer over 20 °C i året. Antallet kalde dager og frostdager minker. Vekstsesongen vil også endres, og det antas at om rundt 50 år starter vekstsesongen på Jæren i Rogaland i januar/februar og varer en uke inn i desember. En slik vekstsesong kan sammenlignes med Belgisk klima (Fylkesmannen i Rogaland 2011).



Figur 7: Framskrivning av årstemperatur, til venstre, og vintertemperatur, til høyre. H = høy framskrivning, M = medium framskrivning, L = lav framskrivning (NOU - Klimatilpasning 2009b).

3.3.4 Konsekvenser av klimaendringer i Rogaland.

Det finnes både indirekte og direkte konsekvenser av klimaendringer. De direkte konsekvensene gjør seg gjerne gjeldende i hydrologien i form av økt flom- og skredfare, økt avrenning og stigning i havnivået.

Flom er ikke et entydig begrep, og brukes generelt om høy vannføring og vannstand. En flom kan karakteriseres som en vannstand/vannføring som gir oversvømmelse og skade. Flom kan opptre som en smeltevannsfloam eller en regnfloam, eller en kombinasjon av disse. Hovedsakelig kan man si at skadefloam oppstår nesten uten unntak i forbindelse med store nedbørsmengder. Det er likevel ingen entydig sammenheng mellom store nedbørsmengder og flom (Sælthun 2008). Flom avhenger av vassdragets tilstand (grunnvannsstand, markvannsinhold, snø og tele og vassdragets flomdempende egenskaper), snøsmelting og nedbørsmengde og -intensitet. Regnfloam er utbredt i kystnære vassdrag på Vestlandet i høst- og vintermånedene (forårsaket av frontalnedbør (Sælthun 2008), men har tidligere ikke vært et stort problem i Rogaland – mye på grunn av fjell og fjorder som gjør at vassdragene fører vannet raskt ut i sjøen. De siste årene har man hatt en økning av raske regnfloam. Med en forventet økning i nedbørsmengde, og hyppighet av intens nedbør, kommer også en forventet økning av regnfloam. På grunn av økt temperatur vil flommenes tidspunkt flytte seg, og flomfare vil hovedsakelig oppstå tidligere på våren og senere på høsten. Økt nedbør i form av regn på vinteren kan også føre til vinterfloam, noe som tidligere ikke har vært vanlig i Rogaland. Hvis bakken er frossen i slike situasjoner, vil faren for flom øke betydelig da vannet ikke kan infiltreres. Utfordringer fremover i Rogaland er at flommene vil bli flere og

større, og at man vil kunne få problem med flom og oversvømmelser andre steder enn tidligere (Fylkesmannen i Rogaland 2011).

Store nedbørsmengder, da spesielt ved intense kortvarige nedbørshendelser, vil ha stor betydning i utløsningen av steinsprang, jordskred, flomskred og snøskred. Rogaland er i utgangspunktet et fylke med mye løsmasser og mange skråninger med over 30 graders helning, og økt nedbør vil dermed gjøre fylket mer utsatt for jord- og løsmasseskred. Ras kan, som flom og oversvømmelser, oppstå steder som tidligere ikke har vært utsatt (Fylkesmannen i Rogaland 2011).

Stormflo er en økning i havnivået på toppen av springflo, som skyldes at vinden skyver vannet foran seg og stuver dette opp mot land. Stormfloden er beregnet å kunne gå opp til 2,5 meter. Allerede er det sett eksempler på at høy vannstand og stormflo kan føre til problemer i Rogaland (Fylkesmannen i Rogaland 2011), og med en økning i havnivå i tillegg, vil problemene mest sannsynlig utvikle seg videre.

3.4 Klimamodellering

Databaserte klimamodeller er forskernes fremste verktøy i estimeringen av fremtidig klima og klimaendringer. Ved bruk av klimamodeller har man mulighet til å simulere hvordan klimaet vil utarte seg, og endre seg, i fremtiden. Klimatiske konsekvenser av ulike utslippsscenarioer og klimapådriv kan også utforskes (Bjerknessenteret 2009b). Klimamodeller er basert på fundamentale fysiske lover, uttrykt som matematiske ligninger som løses ved hjelp av modellens beregningsmotor og dens regnemaskinkode. De fysiske lovene tilpasses det globale klimasystemet ved fysiske tilnærminger og justeres deretter gjennom matematisk diskretisering (Bjerkholt 2011; Randall et al. 2007). En modell vil aldri kunne gi et korrekt bilde av virkelighetens klima, kun en forenklet beskrivelse av det. Det er svært viktig å kvantifisere usikkerheten knyttet til modellresultatene, i tillegg til en kalibrering⁹ av modellen ved en sammenligning av modellert og observert klima¹⁰. Usikkerhetene i dagens klimaframskrivninger kan grovt deles inn i fire kategorier (Hanssen-Bauer et al. 2009):

- *Naturlig klimavariasjon*: De naturlige og tilfeldige variasjonene i klimaet kan ha varierende geografisk utstrekning, og varigheter mellom noen år til flere tiår. I visse tilfeller kan de naturlige klimavariasjonene vare i mer enn hundre år.
- *Naturlig klimapådriv*: Klimapådriv, som vulkanutbrudd og endringer i solinnstråling, som er utenfor menneskelig kontroll.
- *Menneskeskapt klimapådriv*: Endringer i de menneskeskapte klimapådriv, hovedsakelig knyttet til utslipp av klimagasser.

⁹ Kalibrering kan defineres som en prosess hvor karakteristikkene i en modell justeres i forhold til observerte verdier slik at de bedre forklarer det fysiske system og dets oppførsel.

¹⁰ Måleserier av observert klima strekker seg om lag 150 år bakover i tid, og gjør det mulig å kalibrere dagens modeller (Bjerknessenteret 2009b).

- *Ufullstendig kunnskap*: Det vil alltid være usikkerheter knyttet til vår forståelse av klimaet og klimaendringer, da dette er et meget komplekst system med mange prosesser og vekselvirkninger mellom prosessene som ikke er fullt mulig å forstå.

For å få mest mulig korrekte modellresultater er det viktig at modellen har detaljerte data om det globale klimasystemet, dets oppførsel og de ulike prosesser og drivkreftene som virker i systemet. Både naturlige og menneskeskapt klimapådriv må inkluderes i modellen for å kunne oppnå et tilnærmet riktig bilde av fortidens, nåtidens og fremtidens klima (Bjerkholt 2011; Bjerknessenteret 2009b).

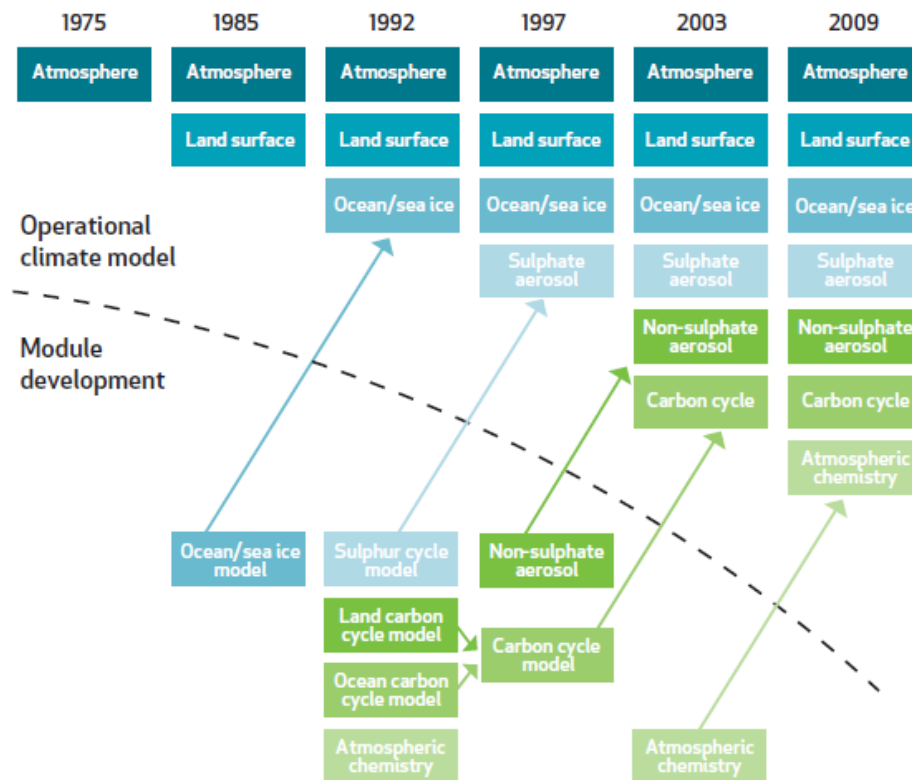
3.4.1 Globale klimamodeller

Klimamodeller klassifiseres etter modellopløsning, kompleksitet og funksjon, og det finnes hovedsakelig tre modellkategorier. De enkleste modeller har en grov tidsmessig og romlig oppløsning, og gir gjennomsnittlige resultater for temperatur på global skala. Modellene er hurtige og brukervennlige, men kan ikke brukes til estimering av variabler som nedbør. *Earth System Models of Intermediate Complexity* (EMIC) er modeller som er mer komplekse enn de enkleste modeller, men ofte mindre komplekse enn de mest kompliserte modellene (Davies & Simonovic 2005). EMIC ble utviklet for å fylle gapet mellom de enkleste og mer kompliserte modeller. Det finnes et bredt spekter av EMIC. EMIC har de senere år blitt mer kompliserte, men har likevel en nokså forenklet fremstilling av noen av de fysiske prosesser (Randall et al. 2007).

General Circulation Models (GCM) er de mest kompliserte modellene som skildrer klimaets «tredimensjonale karakter» og løser ligninger som blant annet beskriver energibevegelse, moment og massebevaring. Det finnes ulike typer GCM som vektlegger ulike prosesser og områder i klimasystemet, og som produserer forskjellige resultater ut fra samme inngangsdata. De ulike modelltypene av GCM kan kobles sammen til én modell med resultater som gir et mer robust og helhetlig bilde av det globale klimasystemet, med større detaljeringsgrad enn de enklere modellene. De mest brukte modellene er såkalte *Atmosphere Ocean General Circulation Models* (AOGCM), som er en kombinasjon av AGCM (Atmosphere GCM) og OGCM (Ocean GCM) (Davies & Simonovic 2005). Oppbyggingen av en koblet modell som AOGCM kan forklares som et rutenett som legges over jordens overflate med en romlig horisontal oppløsning mellom 250 og 600 km, mellom 10 og 20 vertikale lag i atmosfæren, og opp til 30 vertikale lag i hav (IPCC-TGICA 2007). Disse avanserte modellene benyttes til å beregne strømningsmønstre, temperatur og andre klimavariabler i hav og atmosfære og er i tillegg til å være basert på fysiske naturlover også basert på forenklete beskrivelser av bl.a. varmestråling, skydekke, havis, fuktighet i jordsmonnet og utbredelse av snø (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Modellforbedringene fra enkle modeller til GCM har vært mange, men kan hovedsakelig grupperes i tre kategorier. Først og fremst har mange modeller fått en finere vertikal og horisontal oppløsning i tillegg til en forbedring av viktige dynamiske prosesser, som for

eksempel adveksjon¹¹. For det andre er flere prosesser fra klimasystemet inkorporert i modellene, eksempler på dette er modelleringen av aerosoler, av jordoverflaten og av prosesser som involverer sjøis. Sist, men ikke minst, er parametriseringen av de fysiske prosessene forbedret (Randall et al. 2007). Selv om klimamodellene har gått gjennom en stor utvikling fra de enkle atmosfæremodellene fra 1970-tallet til dagens kompliserte modeller, er det fortsatt mye som gir usikkerhet i modellresultatene. Blant annet er fortsatt skydannelse et område som må forskes mer på (Bjerknessenteret 2009b), i tillegg til virvelstrømmer i havene (Randall et al. 2007).



Figur 8: Klimamodellenes utvikling (Bjerknessenteret 2009b).

En ny generasjon Earth System Models kombinerer de kompliserte GCM med modeller av andre biologiske og fysiske prosesser, som karbonsyklusen, atmosfærisk kjemi, havets kjemiske prosesser og vegetasjonsdynamikk (Lenart 2011).

3.4.2 Regional nedskalering av globale klimamodeller

Et av de større problemene med globale klimamodeller, som GCM, er at klimaprojeksjonene fra modellene ikke kan anvendes i regionale eller lokale analyser. I regionale analyser kreves modeller med finere romlig oppløsning enn man får fra én rute i rutenettet til GCM. Det er utviklet flere ulike metoder som muliggjør utviklingen av regionale klimascenarier/klimaframskrivninger basert på GCM. Prosedyren kalles gjerne for

¹¹ Adveksjon = horisontal forflytning av luft (Kunnskapsforlagets papirleksikon 2011).

nedskalering eller *regionalisering* (IPCC-TGICA 2007). De ulike metodene deles hovedsakelig inn i to kategorier; dynamisk nedskalering og empirisk nedskalering (Roosmalen 2009). Usikkerhetene knyttet til modellens resultater er større på lokal enn global skala. Dette skyldes hovedsakelig at naturlig klimavariasjon gir større utslag på en liten geografisk skala, i tillegg til at spredningen mellom de ulike klimamodellenes resultater som betraktes øker (Hanssen-Bauer et al. 2009).

Dynamiske nedskaleringsmetoder baserer seg på de samme fysiske ligninger som brukes i de koplede globale klimamodeller (Hanssen-Bauer et al. 2009). Metodene innebærer hovedsakelig bruken av en klimamodell over et begrenset område med høyere oppløsning integrert i en GCM. En klimamodell over et begrenset område kalles RCM. En RCM bruker randbetingelser og informasjon fra GCM som inputverdier i modellen. Man bruker da verdier fra den ruten i rutenettet som ligger nærest området som skal vurderes. RCM beskriver karakteristikker ved mindre områder, noe som GCM ikke klarer grunnet den lave oppløsningen. Dette kan være komplekse topografiske egenskaper, innsjøer og inhomogeniteter i landjordens overflate (IPCC-TGICA 2007; Roosmalen 2009). Andre dynamiske metoder kan være interpolering av resultater fra GCM, eller anvendelsen av en global modell med variabel oppløsning som har høyere oppløsning i det sentrale området (IPCC-TGICA 2007; Roosmalen 2009).

Empiriske nedskaleringer (også kjent som statistiske eller empirisk-statistiske nedskaleringer) baserer seg på konseptet om at lokalt/regionalt klima hovedsakelig er en funksjon av den globale atmosfæriske tilstand. Ved empiriske nedskaleringsmetoder utarbeides statistiske sammenhenger mellom stor-skala atmosfæriske variabler og lokale eller regionale klimavariabler, basert på historiske observasjoner av lokalklima og observerte atmosfæriske forhold på global skala. Det forutsettes at disse sammenhenger ikke endres med tiden, noe som gjør det mulig å benytte dem til å estimere lokalt klima under de globale forhold som beregnes av AOGCM. Empiriske nedskaleringsmetoder deles ofte inn i tre grupper; regresjonsmodeller, værklassifikasjonsskjemaer og værgeneratorer (Hanssen-Bauer et al. 2009; Roosmalen 2009).

3.4.3 Delta Change Method

Delta Change Method (DCM) er en mindre sofistikert empirisk nedskalering (Roosmalen 2009) som går ut på at man beregner forskjellen mellom dagens og fremtidens klima ved bruk av GCM, for deretter å legge til den kvantifiserte differansen til observerte tidsserier for å generere nye tidsserier justert for klimaendringer som kan brukes som inputdata i ulike modeller. Forskjellen som estimeres beskrives ved en faktor som kalles Delta Change Factor (DCF) (CCSP 2008; Hay et al. 2000).

DCM ble tidlig utviklet, og brukes fortsatt mye i dag. Spesielt har DCM blitt mye brukt i urbanhydrologien, hvor fokuset gjerne har vært knyttet til nedbør med høy intensitet uttrykt i form av IVF-kurver, og fremtidig forventet økning i intensitet. Olsson et al. (2009) utviklet en

metode hvor man i stedet for å bruke en enkel DCF for en definert tidsperiode utleder en fordeling av faktorer som dekker hele spekteret av nedbør fra lave til høye intensiteter¹². Fordelingen oppnås ved å beregne endringer i nedbørintensitetenes sannsynlighetsfordeling og deretter modellere faktorene som en funksjon av prosentilene i fordelingen. En slik metode gir en mer fullstendig beskrivelse av de forventede økninger i intensitet, hvor ulike intensiteter får ulik endring.

Samme metode, med noen endringer, ble benyttet av Nilsen (2008) i hans masteroppgave hvor han testet en DCM for Oslo-området. Til interesse ligger en mer inngående og skjematisk forklaring av metoden vedlagt i vedlegg A.

4 Urbanhydrologi og det urbane avløpssystem

Hydrologi defineres som *“det geofysiske faget som omhandler vannet på jorden, forekomsten, sirkulasjonen og fordelingen av dette, de kjemiske og fysiske egenskapene og reaksjonene med omgivelsene, inkludert relasjonen til levende organismer”* (Norges vassdrags- og energidirektorat 2008). Samspillet mellom menneskelig aktivitet og det naturlige vannkretsløpet gjør seg i stor grad gjeldende i urbanhydrologien, som kan forklares som den delen av det hydrologiske kretsløp som omfatter bebygde områder. I urbane og urbaniserte områder har menneskelig aktivitet forstyrret og endret den naturlige balansen i kretsløpet. Den urbane påvirkningen sees i flere av de hydrologiske prosessene, og hovedsakelig kan den sees i to former: uttak av vann fra det naturlige kretsløp til etablering av vannkilde for drikkevann og bruksvann til mennesker, og etablering av impermeable overflater som hindrer regnvannet i å nå det naturlige dreneringssystemet. Disse påvirkninger gir opphav til to typer vann; spillvann og overvann (Winther et al. 2011).

Spillvann er vann fra vannforsyningen forurensset av ulik menneskelig aktivitet, og refererer ofte til avløpsvann fra boliger i form av noe fortynnet kloakk. Spillvann er på grunn av dets innhold av oppløste og suspenderte stoffer uønsket, da stoffene kan utgjøre en helsemessig og miljømessig risiko. Overvann kan hovedsakelig betegnes som regnvann som renner av fra overflater som tak, veier og andre tette flater, og gjør seg meget gjeldende i urbane og bebygde strøk. Overvann kan også oppstå på permeable flater hvor vannet ikke kan infiltreres, dersom grunnen er mettet med vann, eller dersom infiltrasjonshastigheten er for lav. Overvannet forurenses av flatene det renner av på, og inneholder ofte forurensninger som tungmetaller og miljøgifter fra avsetninger på overflaten. Forurensningene stammer fra blant annet atmosfærisk nedfall, avgasser fra kjøretøy og maskiner, og forbrenning av organiske stoffer.

For å beskytte menneskers liv og helse, samt ivareta en tilfredsstillende miljømessig håndtering av spillvann og overvann, er det i bebygde og urbane strøk anlagt et kunstig

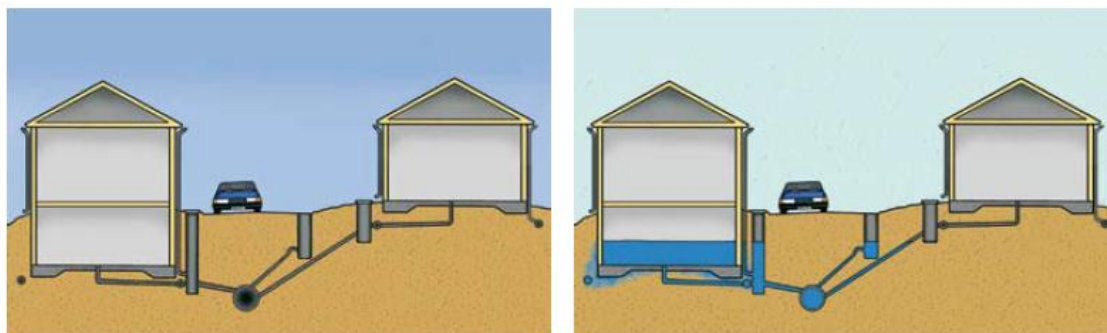
¹² Metoden ble utviklet av Olsson og de andre refererte før 2009 (antatt 2008), men her refereres det til casestudiet av Kalmar utført i 2009.

dreneringssystem; det urbane avløpssystemet. Spillvann og overvann blir sammen med drenevann gjerne betegnet som avløpsvann.

Avløpssystemets hovedfunksjon er å samle opp, transportere og behandle avløpsvann slik at vannet oppnår en tilfredsstillende kvalitet før det ledes ut i en resipient. Det urbane avløpssystemet kan være et fullt ut kunstig dreneringssystem eller en kombinasjon av kunstig og naturlig dreneringssystem. Når man snakker om oversvømmelse og flom i urbane områder refereres det gjerne til ekstreme nedbørshendelser som gir en vannmengde overskridende avløpssystemets kapasitet, som fører til oppstuvinger i systemet med oversvømmelse på overflaten. Avløpssystemet fungerer da ikke i henhold til hensikten, vann klarer ikke å dreneres i det kunstige dreneringssystemet og vil trekke inn i bygninger eller bli liggende på overflaten. (Nie 2003).

Avløpssystemet er konvensjonelt bygget opp av et nett av ulike rørledninger med ulike komponenter (blant annet ventiler og overløp) som leder vannet fra ebyggelse via et avløpsrenseanlegg til en resipient. Alle komponenter i systemet må møte visse funksjonelle krav, men generelt sett er det gjerne selve ledningsnettets som er den begrensende faktoren for hele systemets totale funksjonsevne (Nilsen 2008). Avløpssystemet er hovedsakelig offentlig og anlegges på offentlig grunn (Lindholm 2011a). Det tradisjonelle avløpssystemet kan, på bakgrunn av avløpsvannets sammensetning, være utformet som et av to systemer; fellessystem eller separatsystem.

Fellessystemet er et avløpssystem hvor spillvann, overvann og drenevann ledes via én stikkledning fra den enkelte bebyggelse til renseanlegg og resipient i samme rørsystem, og kjennetegnes i grove trekk av store ledninger på store dyp. Overvannet sendes dermed til renseanlegg, noe som kan være fordelaktig med tanke på overvannets forurensninger. Tørrværsavrenningen i et fellessystem består av spillvann og drenevann og er meget liten, i størrelsesorden 1-5 % av ledningenes maksimale vannføring (Winther et al. 2011). For at ledningene skal være selvrensende i tørrværsperioder legges de med tilstrekkelig fall. I fellessystemet har man en kobling mellom systemet og eventuelle sluk i kjellere (se figur 9), noe som lettere gir oversvømmelser bestående av regnvann og kloakk i lavtliggende kjellere grunnet oppstuvning ved store regnværshendelser som gir vannføringer større enn systemets kapasitet. Fellessystemer gir stor belastning på renseanleggene, både med tanke på kvantitet og kvalitet. For å avlaste systemet og renseanleggene ved større regnværshendelser, og for å kunne gjøre ledningsstørrelsen mindre, settes det gjerne inn regnoverløp/nødoverløp som trer i kraft når vannføringen overskrider ledningens maksimale kapasitetsnivå. I fellessystemene vil både regnvann og urensset kloakk gå ut i resipient via overløp, noe som kan føre til store forurensninger i sårbare resipienter (Winther et al. 2011).

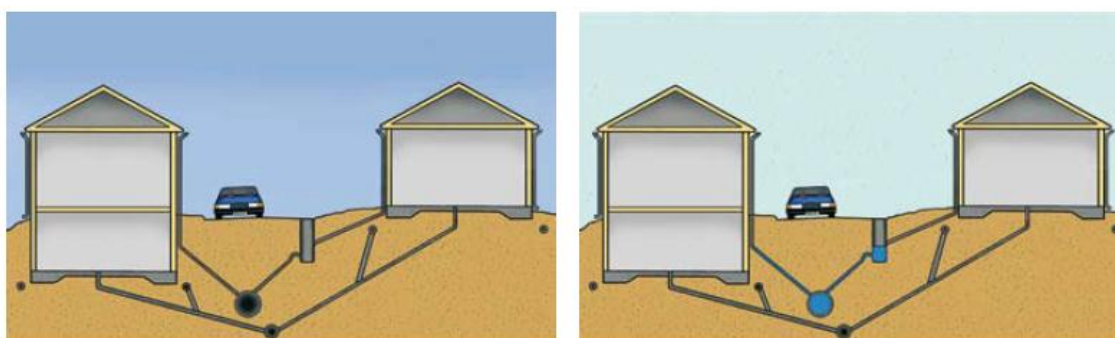


Figur 9: Fellessystem. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).

Separatsystemet skiller spillvann og overvann i to ledningssystemer, og krever dermed to stikkledninger fra den enkelte bebyggelse. Spillvannsledningene har mindre diameter, og ligger ofte dypt på grunn av kobling til kjellere. Overvannsledningene er ofte store og ligger grunnere, da hovedfunksjonen er å lede bort regnvann (Winther et al. 2011).

Spillvannsledningene leder kommunalt (og i visse tilfeller industrielt) avløpsvann til rensesanlegg, mens et eget overvannssystem leder regnvann direkte til resipient. Dette gir en lavere og mer stabil belastning på avløpsrensanlegg, og man unngår også store utslipp av urensset kloakk via overløp. Mye av overvannet går urensset ut i resipient, noe som er ufordelaktig. Svært forurenset overvann kan vurderes å ledes inn på spillvannsnettet for å sendes til rensesanlegg. Mindre renseløsninger for overvann, som sandfang og oljeavskillere, kan også redusere forureningsgraden noe. Separatsystem krever mer grøfteplass og er gjerne mer kostbart enn fellessystemet. Separatsystemet er et system med større kompleksitet enn fellessystemet, og muliggjør feilkoblinger mellom spillvanns- og overvannsnett, noe som i begge tilfeller vil kunne ha svært uheldige utfall med urensset spillvann ut i resipienter og overvann med variabel og mulig svært høy vannføring.

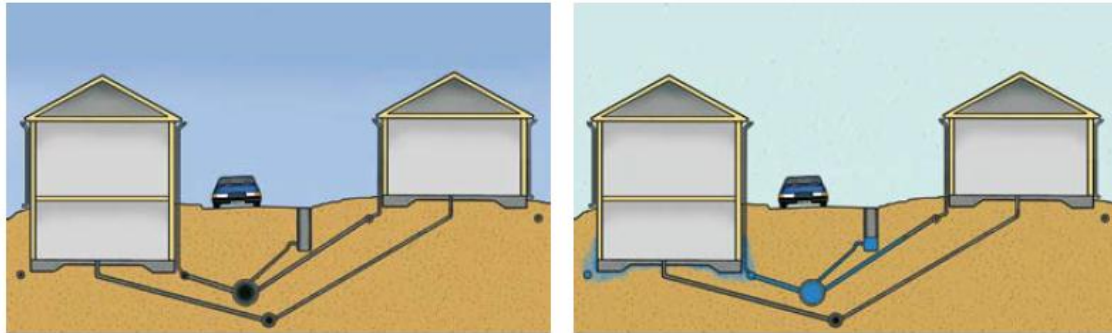
Drensvannet er av økonomiske og praktiske årsaker ofte koblet til det lavereliggende spillvannsnettet, som vist av figur 10. Man slipper da å pumpe opp drensvannet til overvannsnettet (Winther et al. 2011).



Figur 10: Separatsystem (duplikatsystem) med drensvann til spillvannsledning. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).

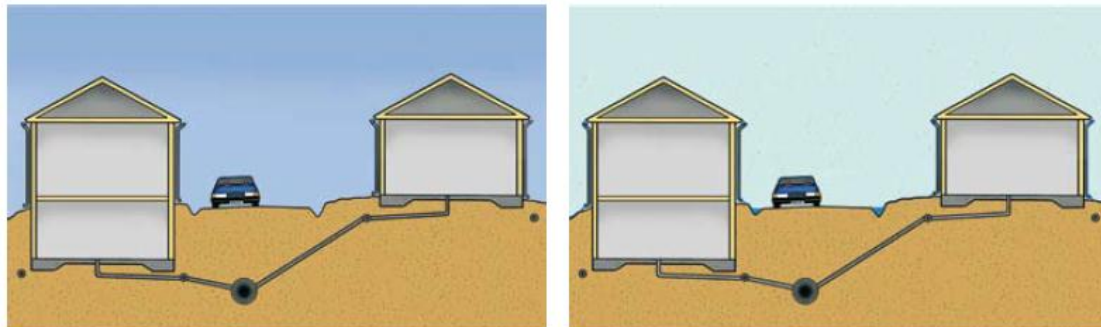
Dersom drensvannet er koblet til overvannsnettet, som vist i figur 11, vil man ved oppstuvning i ledningsnettet kunne få en ansamling av overvann rundt boligens grunnmur. Da grunnmuren sjelden har en vanntett sammenføyning mellom vegger og gulv vil dette kunne gi skader og

oversvømmelse i kjeller dersom vannet står rundt muren over en lengre periode (Haga 2011; Svenskt Vatten 2007).



Figur 11: Separatsystem (duplikatsystem) med drensvann til overvannsledning. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).

I Sverige kalles gjerne separatsystemet for et duplikatsystem hvor drensvannet ledes til enten spillvanns- eller overvannsledningen. Drensvannets bortledning varierer gjerne innenfor et område. Et fullverdig separatsystem er ifølge Svenskt Vatten et system hvor spillvannet ledes bort i spillvannsledning, eventuelt sammen med drensvann, mens overvannet avledes i grøfter eller ved bruk av andre lokale metoder for overvannshåndtering (LOD) (Svenskt Vatten 2007). Et slikt system illustreres i figur 12.



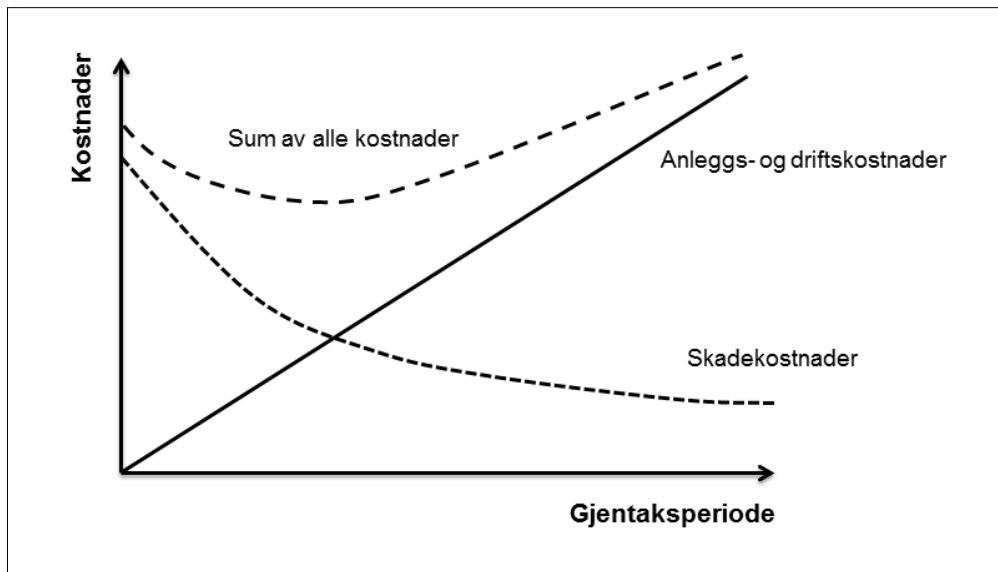
Figur 12: Fullverdig separatsystem med LOD. Tørrværsituasjon til venstre, regnsituasjon til høyre (Svenskt Vatten 2007).

4.1 Økonomiske betraktninger rundt en samfunnsøkonomisk dimensjonering av avløpssystemet

Avløpssystemet er en av de viktigste infrastrukturene i et samfunn, og i Norge en av de infrastrukturene med høyest gjenskaffelsesverdi (Lindholm 2011a).

Som tidligere nevnt kan en overbelastning av avløpssystemet føre til oversvømmelser med flomskader og store forurensninger i omgivelsene, og også skader på infrastrukturen i seg selv. Andre ulemper som tapt arbeidstid, trafikkforstyrrelser, erosjon, sykdomsomkostninger og ekstra arbeid knyttet til hendelsen er også gjeldende (Lindholm 2011b).

En samfunnsøkonomisk dimensjonering av avløpsledningsnett finner man i forholdet mellom investerings- og driftsutgifter og skadekostnader i anleggets levetid¹³. En økning i investeringskostnadene (knyttet til en kapasitetsøkning av systemet, gjerne i form av større ledningsdiametere) gir lavere skadekostnader (spesielt med tanke på finansiell kompensasjon i forbindelse med kjelleroversvømmelser og andre skader knyttet til urban oversvømmelse) (Nilsen 2008). Denne dimensjoneringen knyttes gjerne opp mot et samfunnsøkonomisk optimalt gjentakintervall (Winther et al. 2011) for en definert hendelse¹⁴, som forklart ved figur 13:



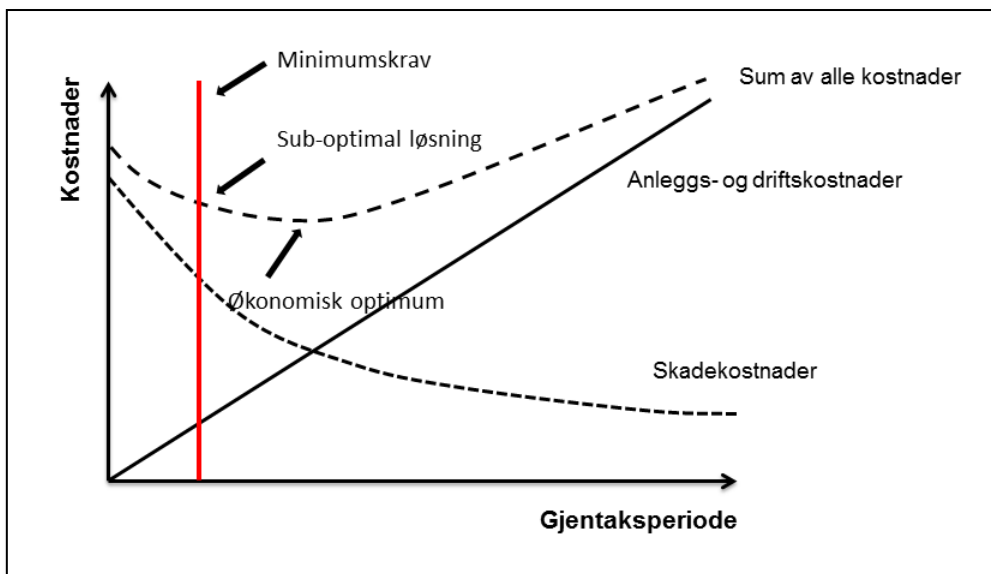
Figur 13: Det grunnleggende prinsipp for økonomisk optimering som funksjon av gjentakperiode, fritt etter Winther et.al (2011).

De samlede utgifter for dimensjonering, eller oppgradering av et avløpssystem, til å tåle et gitt gjentakintervall for en definert hendelse, beregnes. Disse kostnadene sammenlignes med kostnadene forbundet med skader for et gitt gjentakintervall. Skadekostnaden er et uttrykk for den gjennomsnittlige skade på årsbasis. Som det vises i figur 13 finner man et minimum ved å summere alle kostnader (Nilsen 2008).

En risikobetraktning er også en fremgangsmåte for å finne optimalt gjentakintervall for oversvømmelse/floam i ledningsnett (i hovedsak basert på samme prinsipp som i optimeringsberegning). Risiko defineres som sannsynligheten for en hendelse multiplisert med konsekvensene av denne hendelsen. Man ønsker å minimalisere risikoen for erstatningsutbetalinger og skader sett over et gitt antall år, og dette vurderes opp mot de kostnader som oppstår på bakgrunn av ulike alternativer for bygging og drift av ledningsnett. Kommunens servicenivå ovenfor abonnentene er også et viktig moment i en risikobetraktning (Lindholm et al. 2008), og i Danmark blir dette lagt inn i optimeringsberegningen, som vist i figur 14, hvor et minimumskrav til service gjelder:

¹³ Vanligvis satt til 100 år (Lindholm 2011a)

¹⁴ F.eks. oversvømmelse i ledningsnett.



Figur 14: Minimums servicenivå, etter Lindholm (Lindholm 2011d)

Det er sjelden det blir gjort en fullstendig samfunnsøkonomisk optimalisering av avløpsnett (Nilsen 2008). Mangel på informasjon om det totale kostnadsbildet vanskeliggjør prosessen, og innhenting av eventuell tilgjengelig informasjon er et krevende og omfattende arbeid som gjerne blir nedprioritert.

Urban flom og oversvømmelse fra av et avløpssystem gir, som tidligere nevnt, mange ulemper for samfunnet. Både direkte, indirekte og avledede skader/ulemper knyttes opp mot slike hendelser (COWI/NIRAS 2007):

- Direkte skader: Materielle skader på boliger, varehuslager, andre bygninger og biler forårsaket av vann eller strømmende vann. Ved slike skader oppstår både reparasjons- og gjenetableringskostnader.
- Indirekte skader: Trafikkulykker grunnet vannplaning og trafikkforstyrrelser grunnet ødeleggelse av veg/jernbane/tuneller. Når slike hendelser inntreffer vil ulike kostnader knyttet til produksjonstap og tidstap oppstå, i tillegg til administrative kostnader og arbeidskostnader.
- Avledede ulemper/sosiale kostnader: Blant annet reduksjon av boligpris ved gjentatte oversvømmelser, sykdom ved kontakt med avløpsvann fra fellessystem, brudd i strøm-, vann-, og varmforsyning, kommunikasjonsproblemer, erosjon, forringelse av biologiske forhold i resipienter og utslipp av slamavleiring og sedimenter fra avløpssystem til resipient.

Den danske Miljøstyrelsen har i et prosjekt omhandlende økonomisk analyse av avløpssystemet, utført en samfunnsøkonomisk vurdering av mulige klimatilpasningstiltak. Som bakgrunn for analysen av tiltak er ulike kostnader ved urban flom og oversvømmelse vurdert. Eksempler på skader og enhetskostnad per skade fra materiale hentet fra prosjektet vises i tabell 1:

Tabell 1: Eksempler på skader og kostnader benyttet av danske Miljøstyrelsen (COWI/NIRAS 2007) i en økonomisk analyse av klimatilpasningstiltak

Skade	Enhet	Enhetskostnad
Kjelleroversvømmelse	Antall eiendom med kjelleroversvømmelser	10 000 – 50 000 kr /kjeller (ulike kilder med ulike kostnader presenteres i den originale rapport)
Oversvømmelse på stueplan	Antall eiendom med vann i stueetasje	0 – 800 000 kr/oversvømmelse
Sykdom som følge av berøring med infisert vann	Antall syke personer <i>eller</i> Antall personer som har vært i kontakt med infisert vann	7 200 kr/syke person 2 430 kr/person
Oversvømmelse av varelager	Antall varelager	Avhenger av type varelager
Trafikkforstyrrelser	Antall forsinkede bilister	127 kr/bilist
Veibrudd	Antall veibrudd	1 000 000 kr/veibrudd
Skader på avløpsanlegg	Antall brønner (kum) med skader som følge av oppstuvning <i>og</i> Antall hovedpumpestasjoner som ødelegges	30 000 kr/brønn (kum) 1 000 000 kr/pumpestasjon
Administrasjonskostnader (kommune, rådgivere)	Antall timer kommunalt ansatte bruker på skadene <i>og</i> Antall timer innleide rådgivere bruker på skadene	300 kr/time 1 000 kr/time
Transformatorstasjoner	Antall stasjoner som oversvømmes og må renoveres og rengjøres	1 000 000 kr/stasjon
Manglende elektrisitetsforsyning	Antall husstander uten elektrisitet i opp til 5 døgn <i>og</i> Antall virksomheter uten elektrisitet i opp til 5 døgn	1 682 kr/husstand 0,0026 % av årsumsetning/virksomhet

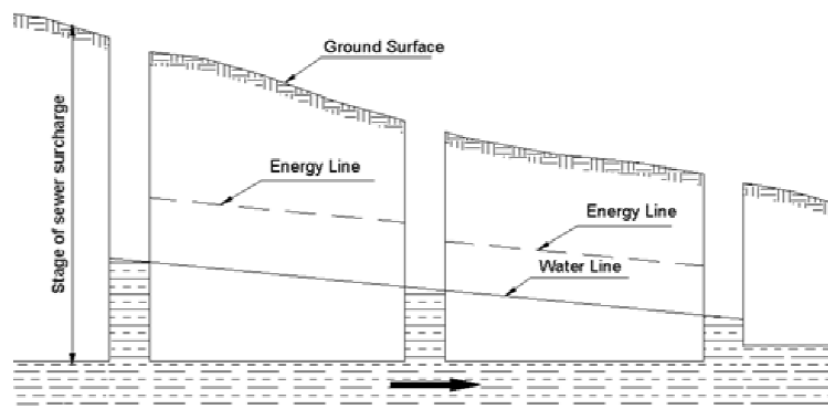
4.2 Dimensjonerende normer

Som tidligere nevnt benyttes de forklarte optimeringsmetoder sjelden. I stedet brukes enklere retningslinjer, som dimensjonerende normer for optimale gjentaksintervall. Normenes hensikt er å gi et tilfredsstillende funksjonsnivå som ligger i nærheten av det teoretiske optimum. Normene angir som regel et funksjonskriterium som avløpssystemet må oppfylle, og kriteriet kan sies å være direkte relatert til det lokale klima, eller mer nøyaktig; det lokale nedbørsmønsteret. Dette forholdet mellom dimensjonering og lokalt nedbørsmønster er en av

grunnene til at man må inkludere og vurdere estimater av klimaendringer ved dimensjonering av avløpssystem (Nilsen 2008).

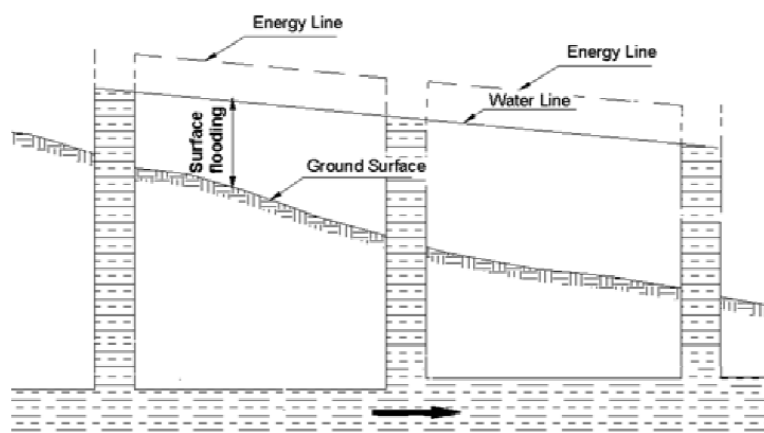
I normene er begreper som «oppstuvning» og «oversvømmelse» brukt, og en kort forklaring på disse begreper følger:

«Oppstuvning» er en tilstand i ledningsnett hvor spillvann og/eller overvann holdes under trykk i et gravitasjonsbasert dreneringssystem eller avløpssystem, men ikke forlater systemet for deretter å forårsake oversvømmelse på overflaten (Nie 2003). En oppstuvings situasjon forklart med vannivå og vannets energilinje i forhold til overflaten vises i figur 15.



Figur 15: Oppstuvning (Nie 2003).

«Oversvømmelse» forklares som en tilstand hvor spillvann og/eller overvann forlater ledningsnett, eller ikke kan dreneres i ledningsnett, og blir liggende på overflaten eller trekker inn i bygninger (Nie 2003). Prinsippet for oversvømmelse forklart med vannivå og vannets energilinje vises i figur 16.



Figur 16: Oversvømmelse (Nie 2003).

NS-EN 752 var den første nasjonale standarden omhandlende dimensjonering av avløpssystem i Norge og var basert på EUs EN752 utgitt i 1996 (Nie 2003). Dagens gjeldende standard er NS-EN 752:2008 *Utvendige stikklednings og hovedledningssystemer*, som vises nedenfor. Standarden påpeker nødvendigheten av hensyntagen til klimaendringer i dimensjoneringen av urbane avløpssystemer for at avløpssystemet skal møte funksjonskravene i leveperioden. Standarden sier også at man for større områder og infrastrukturer hvor risiko for offentlig helse og miljø er signifikant, bør benytte seg av syntetiske regn og databaserte simuleringer av avløpssystemet (Holvik 2010).

Tabell 2: Anbefalte dimensjoneringsfrekvenser for ulike områder, som gitt i NS-EN752:2008 oversatt fra engelsk til norsk etter Holvik (Holvik 2010).

Område	Dimensjonerende oversvømmelsesfrekvens	
	Gjentaksperiode (1 gang i løpet av n år)	Sannsynlighet for overskridelse et gitt år
Rurale områder	10 år	10 %
Boligområder	20 år	5 %
Bysentrum/industriområder/handelso- mråder	30 år	3 %
Undergrunnsbaner/underganger	50 år	2 %

I standarden er det ikke oppgitt om standarden gjelder for både separat- og fellessystem, men det antas generelt at den gjelder for begge system (Lindholm et al. 2008).

Norsk Vann¹⁵ anbefaler et noe strengere sett med dimensjoneringsfrekvenser som kan brukes dersom man ikke selv beregner optimal gjentakperiode for det gjeldende feltet.

Tabell 3: Norsk Vanns anbefalte minimums dimensjonerende hyppigheter for separat- og fellesavløpssystem, etter Lindholm et.al (2008).

Dimensjonerende regnskyllhyppighet (1 gang i løpet av n år)	Plassering	Dimensjonerende oversvømmeshyppighet (1 gang i løpet av n år)
5 år	Områder med lavt skadepotensiale (utkantområder, landbrukskommuner)	10 år
10 år	Boligområder	20 år
20 år	Bysenter/industriområder/handelso- mråder	30 år
30 år	Underganger/områder med meget høyt skadepotensiale	50 år

Ved dimensjonerende regnskyllhyppighet skal ledningsnettets fylles til topp av rør (oppstuvning til topp rør), mens oversvømmelsesnivået er definert til et kjellernivå 90 cm over topp av rør i hovedledningsnettets. 90 cm har siden 1980 vært minimumskravet til høyde mellom åpent sluk i kjellergulv og topp av avløpsrør i tilknytningspunktet. For bruken av tabellen anbefales det

¹⁵ Norsk Vann er en interesse- og kompetanseorganisasjon for vann- og avløpssektoren i Norge som blant annet arbeider for å synliggjøre sektorens utfordringer, påvirke gjeldende regelverk, forbedre utdanningssystemet og øke rekrutteringen til sektoren.

at hovedledningsnettene først dimensjoneres ved bruk av «dimensjonerende regnskylshyppighet» med rør som så vidt går fulle, deretter brukes en databasert simuleringsmodell til å beregne nivået av sikring mot oppstuvning i forhold til «dimensjonerende oversvømmelseshyppighet» (Lindholm et al. 2008).

For ny utbygging må kommunene også forholde seg til retningslinjer fra NVE, som forutsetter høyere sikringsnivå for visse typer arealbruk og infrastrukturer (Lindholm et al. 2008).

Når man skal analysere og/eller dimensjonere et avløpssystem som skal tåle visse flom- eller oppstuvingssituasjoner, er det tre forhold som er av avgjørende betydning; kriterier for akseptable konsekvenser og deres hyppighet (gjentaksintervall), beregningsmetoder for flom- og oppstuvingsanalyser og til sist inngangsdata for regn (Lindholm et al. 2003). Kriterier for akseptable virkninger/konsekvenser finner man i de dimensjonerende standardene.

4.2.1 Beregning av regnvannsavrenning

For å kunne dimensjonere et ledningsnett med tilfredsstillende kapasitet må vannmengdene relatert til de dimensjonerende regnskylshyppigheter og oversvømmelseshyppigheter beregnes. Dette kan gjøres ved manuelle metoder eller ved bruk matematiske modeller for EDB-beregning. Nedenfor kommer en kort forklaring av de mest brukte metodene.

Manuelle metoder:

- *Tid-arealmetoden/den rasjonelle formel:* I tid-arealmetoden tar man for seg en årskurve (hentet fra IVF-diagram¹⁶) som gjelder for det aktuelle området. Man bruker regnskyl med ulik varighet (for eksempel 5, 10, 15, 20, 30 min) med den gitte intensitet fra årskurven. Konsentrasjonstiden¹⁷ for de enkelte regnskyl settes lik regnets varighet. For regnskyllet med den laveste varighet trekker man en kurve (isokron) som markerer det geometriske stedet for alle de punkter som gir fra seg vann til utløpet etter den valgte varighet. Ved bruk av den rasjonelle formel¹⁸ og verdiene for areal og intensitet kan man beregne avrenningskoeffisienten¹⁹ og deretter avrenningsmengden. Slik fortsetter man med økende varighet helt til man kommer til et punkt hvor avrenningen er større ved lavere varighet. Denne varigheten gir da maksimal avrenning (Bøyum & Thorolfsson 2001).

¹⁶ IVF-diagram er et diagram som viser intensitet og varighet for ulike regnhendelser langs en gitt frekvens (gjentaksintervall). Se nærmere forklaring i kapittel 4.2.3.

¹⁷ Konsentrasjonstiden for et felt defineres som den lengste tiden vann som faller ved nedslagsfeltets begrensingslinje trenger til å renne på overflata frem til ledningssystemet pluss den tiden det tar for vannet å transporteres gjennom ledningssystemet ned til det betraktete punkt (Bøyum & Thorolfsson 2001).

¹⁸ Den rasjonelle formel beskriver avrenningsmengde som et resultat av avrenningskoeffisient multiplisert med intensitet og areal.

¹⁹ Avrenningskoeffisienten beskriver forholdet mellom avrenning fra et område og nedbøren over samme område, og er blant annet avhengig av permeabilitet og fallforhold i terrenget. Avrenningskoeffisienten er ikke konstant, men øker i løpet av et regnskyls varighet da jorden blir mer vannmettet og har mindre mulighet til å ta i mot vann.

- *Summasjonskurvemethoden/flomplanmetoden:* Ved bruk av denne metoden må man, for et valgt ledningsnett med fastlagte traseer, ta for seg hvert enkelt ledningsstrek og finne tilløpet til dette for deretter å summere opp alle tilløp til ledningene oppstrøms det punktet man vil beregne avløpsmengden til. Først beregnes konsentrasjonstiden for hele feltet, deretter velges regnskyll med varighet lik konsentrasjonstiden. Siden intensitetene blir mindre over større varigheter vil man med regnvarigheter større enn konsentrasjonstiden få mindre avrenning. I metoden benyttes 2 tenkte regnskyll som begge er like store som det virkelige regnskyll, men med en uendelig varighet. Det konstrueres to summasjonskurver, en for hvert av regnskyllene. Summasjonskurve 1 (S1) starter ved det virkelige regnets start, mens summasjonskurve 2 (S2) starter ved det virkelige regnets slutt. De to summasjonskurvene tegnes opp og man trekker S2 fra S1 og får da SS – den resulterende summasjonskurven. Avrenningen finnes ved å multiplisere SS med regnskyllens intensitet (Bøyum & Thorolfsson 2001).
- *Enhetshydrogrammet:* Enhetshydrogrammet kan ikke anvendes for dimensjonering av et nytt avløpssystem, da den forutsetter at man kan måle avrenning fra feltet ved et målt regnskyll. Metoden egner seg godt til avrenningsberegninger i eksisterende nett. Et enhetshydrogram for en gitt varighet er det hydrogrammet som finnes ved å summere alle vannføringer for å finne effektiv nedbør – volumet over den gitte varighet. Deretter dividerer man vannføringsverdiene med enhetsvolumet og får dermed verdiene for enhetshydrogrammet for gitt varighet og enhetsvolum (Bøyum & Thorolfsson 2001).

Matematiske/hydrologiske modeller:

For mindre nedbørsfelt med konsentrasjonstider under 15 minutter, vil manuelle metoder kunne gi gode verdier for grove overslagsberegninger, og kan vurderes benyttet. Med økende antall knutepunkter og kompleksitet i ledningsnettet vil EDB-modeller være mer gunstig. EDB-modeller er økonomisk lønnsomt (Lindholm et al. 2003). Dersom man vil benytte seg av manuelle metoder må forutsetningen være at rørene ikke får oppstuvning, det vil si at rørene ikke går mer enn så vidt fulle. Dersom man ønsker å beregne oppstuvingssituasjoner må man bruke EDB-modeller med mulighet til å kjøre dynamiske bølgeanalyser, som MOUSE eller SWMM. Ved bruk av manuelle metoder er man i praksis begrenset til å benytte seg av konstant regnintensitet og avrenningskoeffisient. Dette er en stor forenkling av virkeligheten. Ved bruk av matematiske modeller kan avrenningskoeffisienten og regnintensiteten variere med tiden slik de gjør i virkeligheten, da man kan dele regnskyll opp i mindre intervaller (ofte mellom 2-5 minutt) og tildele intervallene ulike verdier for regnintensitet og avrenningskoeffisient. Magasinering i ledningene kan tas inn i modellen ved hjelp av delfyllingskurver og andre hydrauliske forhold som fall, ruhet og fart (Bøyum & Thorolfsson 2001). Ved bruk av matematiske modeller med hydrologisk minne kan man også kjøre tidsserieanalyser hvor modellen holder rede på de hydrologiske enhetsprosessene og tilstandene i ledningsnettet, og på den måten gjør at feltets reaksjon på et regn også er avhengig av det forrige regnets karakter og tidspunkt (Lindholm et al. 2008). EDB-modellene er gjerne basert på den rasjonelle formel eller på en vannbudsjettbetragtning. Matematiske

modeller for det urbane avløpssystemet og den aktuelle urbanhydrologiske modell benyttet i denne oppgaven blir nærmere beskrevet i kapittel 6.

4.2.2 Ulike måter å gå inn med regndata i beregning av regnvannsavrenning

Det er den mest ugunstige situasjon som skal gi dimensjonerende avrenning. I små nedbørsfelt (under 20-50 ha) er det stort sett sommersituasjonen som gir høyest avrenningsintensitet, og dermed dimensjonerende vannføring. Volumavrenningen kan bli stor om vinteren da marken er frossen og man kan få smeltevann i tillegg (Lindholm et al. 2008). Ifølge Lindholm et al. (2008) må en sommersituasjon beregnes for å finne maksimal avrenning for alle feltstørrelser i alle deler av landet. I tillegg bør man beregne vinteravrenning på frossen mark med snøsmelting og langvarig regn og høstavrenning med langvarig regn og våt mark dersom feltene er større enn 20-50 ha.

Ved beregning av regnvannsavrenning er regndataene og måten man bruker representative regnverdier avgjørende for resultatet og dets anvendelighet. Seks måter å gå inn med regndata i avrenningsberegninger vil kort forklares.

- *Kasseregn*: Man velger ut et regn fra en IVF-kurve, eksempelvis et regn med 20 minutters varighet, 140 l/s·ha med et gjentakintervall på 50 år. En IVF-kurve konstrueres på basis av utsnitt fra regnmålinger, og ved å bruke et kasseregn hentet fra IVF-kurver vil man miste for- og etterregnet. Dette kan føre til volumfeil i beregningene. Forregnet og etterregnet har lavere intensitet enn kasseregnet, og bidrar ikke særlig til maksimalt volum. Etterregnet gir en økning i tømmetid i ledningssystemet. Dersom man analyserer et ledningsnett for et kasseregn får man i beste fall bare dimensjonerende vannføringer for de punkter i nettet som har en konsentrasjonstid lik regnets varighet (Lindholm et al. 2003). Dette er i henhold til Imhoffs sats som sier at «den største vannføring får man for det regnskyll som har varighet lik hele feltets konsentrasjonstid» og som gjelder for felt med tilnærmet rektangulær geometrisk form (Bøyum & Thorolfsson 2001).
- *Omdanning av kasseregn til et modellregn*: For å redusere problemet med de manglende for- og etterregnet i kasseregn hentet fra IVF-kurver, er det utviklet ulike standardtillegg som kan konstrueres inn rundt kasseregnet og som simulerer forregnet og etterregnet. Modellregnene som konstrueres ved bruk av kasseregn og standardtillegg er gjerne av typen SIFALDA eller SIFNEL. Disse beskriver ulike proporsjoner i for- og etterregnet, i forhold til formen på modellregnet (Lindholm et al. 2003).
- *Mange kasseregn, valgt langs hele IVF-kurven*: Man kan øke sannsynligheten for å få dimensjonerende vannføringer flest mulig steder i nettet ved å gjøre beregninger med mange kasseregn langs en IVF-kurve i stedet for å kun benytte seg av ett enkelt kasseregn. Man gjør da beregninger med ulike regnvarigheter inntil den maksimale konsentrasjonstiden for området er nådd. Deretter sorterer man ut de regn som ga høyest vannføring i de punkter man er interessert i å analysere nærmere (Lindholm et al. 2003).

- *Omdanning av en IVF-kurve til et symmetrisk regnhyetogram:* Regn som er dimensjonerende har sjelden en konstant regnintensitet, men har tvert imot en meget høy toppintensitet en viss tid etter regnets start. Regnhyetogrammet konstrueres etter en spesiell fremgangsmåte på basis av en vanlig IVF-kurve. Det antas at hyetogrammet er symmetrisk om midtaksen. Konstruksjonsprinsippet er at regnvolumet i de x mest intensive minuttene ($x/2$ på hver side av midtaksen) tilsvarer regnvolumet i et kasseregn med en varighet på x minutter. De viktigste fordeler med regnhyetogrammet er at man a) får et mer realistisk regnforløp (med forregn og etterregn) og dermed avrenningsforløp, b) kan benytte seg av regnhyetogrammet til alle størrelser av ledningsnett uavhengig av konsentrasjonstid i en region med ensartede meteorologiske forhold og c) får dimensjonerende vannføringer i alle deler av avløpsnettet i en og samme beregning. Dette fordi regnhyetogrammet i sin mest intense del inneholder virkningen av korte regn som er dimensjonerende for de øvre deler av ledningsnettet med kortere konsentrasjonstider, men hele hyetogrammet virker dimensjonerende for de deler av nettet som har lengre konsentrasjonstider (Lindholm et al. 2003).
- *Lange tidsserier hvor man lager frekvensfordelingsfunksjoner for ulike hendelser:* Dette er en avansert måte å gjøre beregninger på. Med EDB-modeller kan man kjøre lange tidsserier med verdier fra nedbørmålinger som kan generere sannsynlighetskurver for hvor ofte ulike situasjoner oppstår i ledningsnettet. Disse kan igjen brukes til å lage frekvensfordelingsfunksjoner for de ulike situasjonene (Lindholm et al. 2003).
- *Utarbeidelse av dimensjonerende modellregn på basis av kjøring med lange tidsserier:* Utgangspunktet for denne metoden er at det antas at man kan bruke et modellregn som resulterer i at kravene til oversvømmelsesfrekvens blir tilfredsstilt. Modellregnet er gjerne kun gyldig i det feltet det ble utviklet for. Kort forklart finnes det dimensjonerende regn ved å kjøre flere beregninger til man har en regnintensitet hvor man får oppstuvning over de fastsatte krav. Det dimensjonerende regnet finnes i et modifisert ledningsnett, hvor ledningsdiameterne er akkurat så store at kravene til oppstuvning er tilfredsstilt (Lindholm et al. 2003).

4.2.3 IVF-kurver

En IVF-kurve er en logaritmisk graf som viser intensiteten, varigheten og frekvensen (gjentaksintervallet) til nedbørshendelser for et gitt område. Kurvene består av sammenhengende verdier av regnets intensitet og varighet, som nås eller overskrides med samme gjentaksintervall (Winther et al. 2011). Disse kurvene er en viktig del av urbanhydrologien som fagfelt og er nødvendige hjelpemidler i flere beregninger, spesielt beregninger omhandlende regnvannsavrenning. Oppbyggingen av IVF-kurvene er ren matematikk og tar utgangspunkt i en frekvensanalyse av lengre måleserier av nedbør. Returperiodene for regnhendelser med ulike varigheter beregnes ved ekstremverdideregninger hvor de årlig største intensitetene ved de ulike varigheter plukkes ut fra målingene. De maksimale årlige intensitetene for en gitt varighet vil variere i størrelse fra år til år, og

oppfører seg dermed som en tilfeldig variabel. Sammen gir de et utvalg av tilfeldige variabler. Disse variablene fordeles etter en ekstremverdifordeling (gjærne Gumbelfordelingen) og tildeles en overskridelsessannsynlighet (Sælthun 2008; Winther et al. 2011).

Gjentaksintervallet T er et mål for hvor mange år det i gjennomsnitt er mellom hver gang en bestemt regnintensitet overskrides, og uttrykkes gjærne som den inverse av overskridelsessannsynligheten p :

$$T = \frac{1}{p}$$

Formel 1: Gjentaksintervall som funksjon av overskridelsessannsynlighet

Man benytter seg også gjærne av frekvensen som en invers av gjentaksintervallet (Winther et al. 2011):

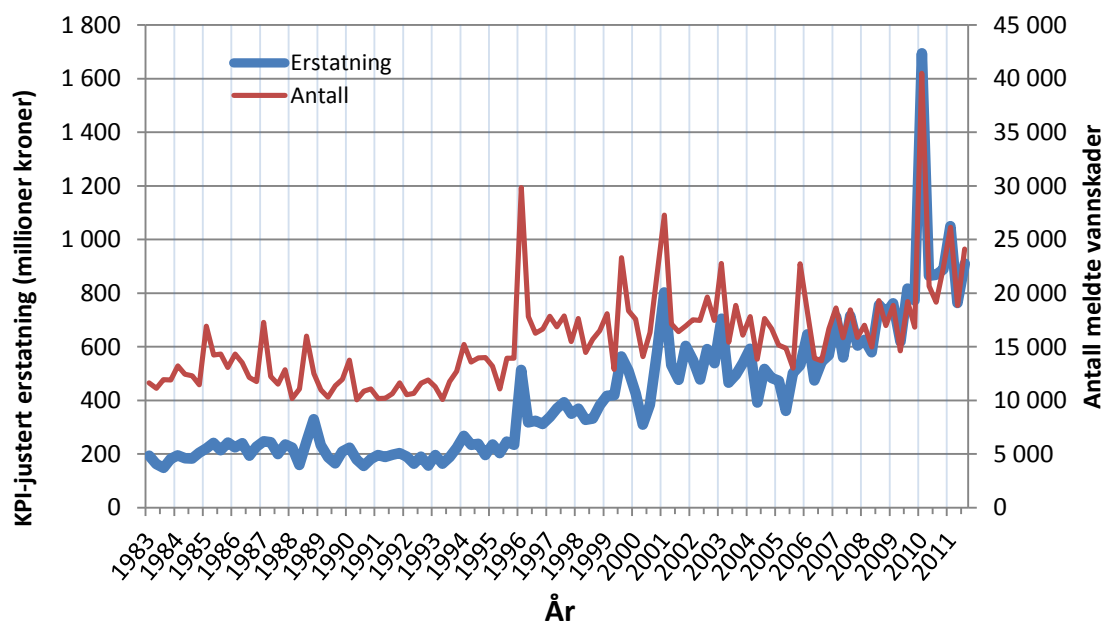
$$n = \frac{1}{T}$$

Formel 2: Nedbørsfrekvens som funksjon av gjentaksintervall

4.3 Endrede forutsetninger for det urbane avløpssystem

Det synes at flomskader i tettsteder og urbane bystrøk, forårsaket av overvann, har økt de senere år. Disse urbane oversvømmelsene har gjort særlig stor skade på kjellere og annen bygningsmasse, i tillegg til avløpssystemet i seg selv, og man har sett en betydelig økning i forsikringsselskapenes utbetaling for flomskader på bygninger og infrastruktur (Lindholm et al. 2008).

I figur 17 vises utviklingen i antall meldte skader og utbetalt erstatning fra 1983 til 2011. Antall meldte skader øker tydelig fra midten av 1990-tallet og frem til i dag. Dette samsvarer med den observerte økning i nedbør, beskrevet i kapittel 3.3.1, som viser at økning har vært spesielt stor de siste 20 år.

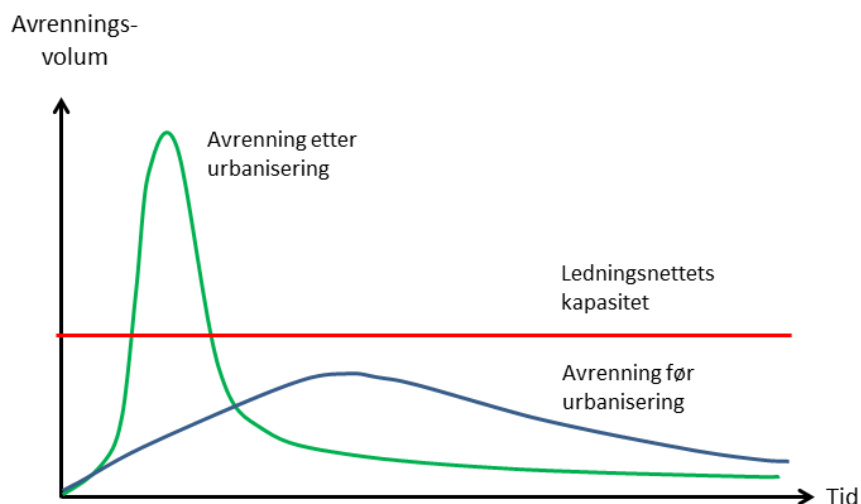


Figur 17: Utvikling i antall meldte vannskader og erstatningsutbetalinger (FNO 2012)

Det er flere aspekter rundt de økte flomskadene, men et fellestrekk er at det urbane avløpssystemet møter utfordringer som gir nye forutsetninger for avløpssystemets funksjon.

Samtidig som vann- og avløpsnettene ble utbygd, ble overvannet gjennom 1900-tallet i økende grad drenert fra byer og tettsteder via ledningsnett (Lindholm et al. 2008). Flere bekker og vassdrag ble også delvis eller helt lukket for å frigjøre areal til videre utbygging. En bekkelukning er et stort inngrep i naturen og reduserer vassdragsområdets naturlige flomdempingsevne betraktelig. Utbyggingen har i liten grad tatt hensyn til flomvann og flomveier og overflatene er ikke formet for bortledning av overvann (Andreassen 2011).

Den store utbyggingen og den økte urbaniseringsgraden har ført til en fortetting av tettsteder og byer i Norge. I stedet for naturlige permeable flater, som vi finner i uberørt natur, er overflatene i byer og tettsteder i stor grad dekket av impermeabel asfalt og bebyggelse. I skog og uberørte naturområder vil omtrent 80 – 90 % av regnvannet infiltreres og resten renne av eller fordampe. I urbane strøk vil kun mellom 0 – 10 % av regnvannet infiltreres. Dette fører følgelig til en stor overflateavrenning, og i visse tilfeller vil opp mot 100 % av regnvannet renne av på overflaten. Når lite vann infiltreres i jorden vil grunnvannsstanden synke, og i bebygde områder kan dette blant annet føre med seg råtning av påler over grunnvannsnivå, setninger i leire, og drenering i tunneller (Lindholm 2011c). Grunnet den store andelen tette flater blir det ikke bare mer avrenning, men også raskere avrenning, med høyere intensitet enn tidligere (Stahre 2004). Den store overflateavrenningen gir en høy belastning på ledningsnettene som skal håndtere de store mengdene overvann, og mens mengdene overvann øker forfaller og foreldes infrastrukturen. Ledningsnettene holder ikke tritt med de økende belastningene (Lindholm et al. 2007).



Figur 18: Urbaniseringens påvirkning på avrenningsforhold, fritt etter Lindholm (2011b) og Stahre (2004).

Klimaendringene forventes å gi (og har allerede gitt) en økt årsnedbør i Norge. Da antall døgn med nedbør ikke øker like mye som mengdene med nedbør, tyder det på at det kan forventes mer intens nedbør enn før. Man forventer også en økning i havnivå og stormflo.

Klimaendringene vil ha stor betydning for avløpssystemet og dets funksjon. Særlig vil nedbørsøkningen ha stor påvirkning, da den vil gi store nedbørsmengder som oppstår svært raskt, som igjen gir en økt avrenning og genererer store mengder overvann. Det ventes en økning i såkalte «flash floods» - raske og ekstreme flommer i mindre felt som følge av klimaendringene. Flere nedbørsdager gir en oftere fuktig og/eller vannmettet jord, som igjen kan øke avrenningen. Dette forteller oss at en nedbørshendelse med gitt intensitet kan gi større oversvømmelse, sammenlignet med før (her vil følgelig den økte andelen tette flater forsterke dette fenomenet). En oftere fuktig og vannmettet jord vil kunne øke grunnvannsnivået, noe som kan føre til økt innlekking av grunnvann i avløpssystemet. Dette vil redusere systemets kapasitet og gi en økning i overløpsutslipp og oversvømmelsesrisiko. Et økt havnivå vil i kystnære områder kunne gi inntrenging av havvann, og oftere og større oppstuvinger i ledningsnett, i tillegg til økte overløpsutslipp. Stormflo på toppen av høyt tidevann vil forverre en slik situasjon (Lindholm et al. 2007).

Utslipp fra avløpsnett er, ved siden av flom og oversvømmelser, også et omfattende problem. Klimaendringene forventes å øke utslippene fra regnvannsoverløp i fellesavløpssystemer og overvannsutslipp i separatsystemet. Tabell 4 viser en oversikt over ulike utslipp som kan oppstå i et avløpssystem.

Tabell 4: Utslipp fra avløpsnett (Lindholm et al. 2007)

Utslipp fra avløpsledningsnett	
Utslippspunkt	Kilde
Regnvannsoverløp	Spillvann
	Forurensninger i overvann
	Utspylte slamavsetninger
Overvannsledninger	Forurensninger fra tette overflater for trafikk, boliger, næring etc.
	Feilkoblinger fra spillvann til overvann
	Lekkasjer fra ovenforliggende spillvannsledning eller fra åpen spillvannsrenne i felles kum
Lekkasjer fra avløpsledninger til grunnen	Spillvannsledninger i separatsystemet eller fellesavløpsledninger
Nødoverløp	Pumpestasjoner for spillvann eller fra andre problempunkter i spillvannsnett

I følge Lindholm et al. (2007) vil de følgende fenomener være de viktigste med tanke på økte utslipp i områder med fellesavløpssystem:

- Økt regnvarighet gir økte overløpsutslipp.
- Økt regnintensitet gir økte overløpsutslipp.
- Hyppigere regn gir økt utspyling av rørsedimenter, sandfang og overflater.
- Økt hydraulisk belastning på renseanleggene gir større utslipp fra renseanlegg
- Hyppigere, lengre og kraftigere regn gir økt vannføring over en lengre tidsperiode som kan gi mer erosjon av partikler fra permeable flater, grøfter, bekkeleier etc.

I følge Lindholm et al. (2007) vil de følgende fenomener være de viktigste med tanke på økte utslipp i områder med separatavløpssystem:

- Deponiene på overflaten og sandfang vil oftere spyles ut.
- Selv om renseanlegget teoretisk ikke burde bli påvirket av overvann i et separatsystem, ser man at renseanlegg nesten alltid får økte fremmedvannsmengder under regn, noe som øker belastningen på anlegget. På grunn av sedimenteringstankenens begrensende kapasitet kan utslippene øke fra renseanleggene.

Kort oppsummert kan man si at urbane oversvømmelser forventes å øke i antall og størrelse grunnet:

- 1) Overflater som ikke er formet for bortledning av overvann med impermeable flater, få sikre flomveier og liten flomdempingsevne, og
- 2) Underdimensjonerte ledninger i dårlig stand som ikke innehar kapasitet til å håndtere den økte overflateavrenningen som oppstår grunnet en økt urbaniseringsgrad og effektene av klimaendringer.

I tillegg til dette vil klimaendringer føre til økt forurensning av resipienter, særlig i form av økte overløpsutslipp.

5 Klimatilpasset overvannshåndtering

En klimatilpasset utvikling av eksisterende og nye avløpssystemer er nødvendig for at systemet skal kunne takle de endrede forutsetninger som gjør seg gjeldende. Klimahensyn i avløpsplanlegging er viktig for å kunne prioritere fremtidsrettede tilpasninger og tiltak. For dimensjoneringen av avløpsledninger er det i hovedsak tre bestemmende faktorer; 1) nedbørintensitet, 2) avrenningskoeffisient og 3) eventuelle LOD-tiltak (Fylkesmannen i Oslo og Akershus 2011). En strategi for hvordan man kan planlegge for klimaendringer og analysere mottiltak mot klimaeffekter, er gitt i veiledningen for klimatilpasset overvannshåndtering (Lindholm et al. 2008):

A) Målinger og innsamling av informasjon.

Nødvendige målinger bør settes i gang så fort som mulig, spesielt gjelder dette målinger av korttidsnedbør i tettsteder. Hvis avløpsmodeller skal benyttes trengs det også målinger av nedbør og avrenning for å kunne kalibrere modellene.

B) Dokumentasjon av nåsituasjonen.

En analyse av dagens risikonivå for flomskader og overløpsutslipp vil være viktig for å finne eventuelle flaskehals, problemområder og soner i et område der det er behov for en grundigere planlegging av mottiltak mot klimaendringene eller nåværende overvannsproblemer.

C) Analyser av klimaendringenes virkninger.

Det må foretas et valg av scenarioer for nedbør, avrenning, havnivå og stormflo da dette er inngangsdata i beregninger av fremtidige konsekvenser. Man kan gjøre grove konsekvensanalyser ved bruk av en enkel terrengmodell eller kart, og se på oppstuvingsnivå, flomskader eller overløpsutmengder, hvor alvorlige tilfellene er og hvor ofte de oppstår. Videre vil det være riktig å gjøre grundigere analyser ved bruk av hydrodynamiske avløpsmodeller der hvor det åpenbart blir nødvendig med kompenserende tiltak.

D) Tiltak for kompensasjon av fremtidige økninger i forurensningsutslipp og flomskader.

I områder hvor det er nødvendig med kompenserende tiltak, bør ulike typer tiltak vurderes opp mot hverandre i henhold til funksjonsoppnåelse og kostnader, og prioriteres deretter. Ulike tiltak som gjerne er aktuelle vil presenteres senere i kapittelet.

E) Planer hvor hensynet til klimaendringer bør inn.

Via plan- og bygningsloven kan man nedfelle prinsipper om klimatilpasset bruk av arealer i blant annet kommuneplan, hovedplaner for vann- og avløp, reguleringsplaner og bebyggelsesplaner. I tillegg til beredskapsplan for flom og flomrelaterte hendelser vil en samlet kommunal klimaplan være viktig, spesielt for VA-sektoren.

En klimatilpasset overvannshåndtering vil søke å redusere risikoen for flom og oversvømmelser – som forventes å øke med klimaendringene. Før man kan analysere effektene av klimaendringene på avløpsnett og mulige tiltak for å kompensere mot dette, må man (som vist i strategien ovenfor) ha informasjon om hvilke nedbørintensiteter, avrenningsforhold, havnivå og stormflonivå som vil være gjeldende. Dette kan estimeres ved bruk av ulike utslippsscenarioer og resultater fra klimamodellering. Spesielt er regndata svært viktige i forhold til dimensjoneringen av avløpsnett, og en økning i nedbør som følge av klimaendringer vil ha stor påvirkning på avløpsnettets funksjon. Dette er noe man må ta

høyde for i utforming og dimensjonering av avløpsnett. Dagens IVF-kurver er basert på data fra flere år tilbake og anses allerede som usikre i representasjonen av nåværende nedbørforhold (Lindholm 2011b). Det foreligger ingen retningslinjer på nedbørintensitet fra norske myndigheter, og man har i stor grad sett mot andre nordiske land som Sverige og Danmark som har gått ut med nasjonale anbefalinger om klimafaktorer som kan multipliseres med nåværende intensiteter for å beregne fremtidig dimensjonerende regnintensitet.

5.1 Klimafaktor

IDA Spildevandskomiteen (Arnbjerg-Nielsen 2008) har blant annet benyttet seg av en enklere DCM ved bearbeiding av data fra klimamodell med hensikt å finne frem til gjeldende klimafaktorer som kan benyttes. Det er diskutert klimafaktorer basert på tre ulike metoder; metode 1) hvor klimafaktorene beregnes ut fra en modell for historiske dimensjoneringsregn, metode 2) med bestemmelse av syntetiske regnserier i fremtidsscenario og metode 3) hvor man bestemmer en klimafaktor basert på aktuelle ekstremregn i et analogt klimaområde og aktuelle ekstremregn i Danmark. Klimafaktoren omtales av IDA Spildevandskomiteen som et sikkerhetstillegg som uttrykker scenariosikkerheten og defineres som «den faktor som skal ganges på nåværende dimensjonerende regnintensitet for å få den ønskede fremtidige dimensjonsgivene regnintensitet». Klimafaktoren skal ikke benyttes på hele regnserier, men på intensiteter knyttet til ekstremregn. Klimafaktoren bestemmes av følgende formel (Arnbjerg-Nielsen 2008):

$$k_{T,d,\Delta t} = \frac{i_{T,d,t+\Delta t}}{i_{T,d,t}}$$

Formel 3: Klimafaktor (Arnbjerg-Nielsen 2008)

hvor

i er den dimensjonsgivende regnintensitet for gjentakelsesperiode T med varighet d ,

t er nåtid, og

Δt er den periode som omfattes av scenariosikkerheten

Estimeringen av klimafaktorene fra IDA Spildevandskomiteen er basert på gjentakelsesperioder mellom 2 til 100 år, regnvarigheter mellom 5 minutter og 24 timer, og SRES' scenario A2 (Arnbjerg-Nielsen 2008). Med bakgrunn i de tre metodene sammenstilles resultatene og det konkluderes med at det er rimelig sikkert at en klimafaktor vil ligge i intervallet mellom 1,1 – 1,5 for gjentakelsesperioder mellom 2 og 100 år og varigheter mellom 10 minutter og 24 timer (Arnbjerg-Nielsen 2008). Rapporten munner ut i et forslag til klimafaktorer ved dimensjonering og analyse av avløpssystemer, som av DANVAs *Klimakogebog* omtales som de anbefalte klimafaktorer som benyttes ved avløpstekniske beregninger i Danmark:

Tabell 5: Anbefalte klimafaktorer (DANVA 2011).

Gjentaksperiode:	2 år	10 år	100 år
Klimafaktor:	1,2	1,3	1,4

I Klimakogebogen (DANVA 2011) vises også en lineær framskrivning av 10-års regnet. En lineær framskrivning er benyttet siden den tidsmessige utviklingen i klimascenarioene ennå ikke er fullt ut beskrevet. Det anbefales å analysere virkningene av klimaendringene trinnvis, slik at man på den måten kan se når systemet vil svikte funksjonskravene:

Tabell 6: Lineær framskrivning av 10-års regn (DANVA 2011).

Tidshorisont	Forventet økning i regnmengde
10-års regn i dag	0 %
10-års regn om 10 år	3 %
10-års regn om 25 år	7,5 %
10-års regn om 50 år	15 %
10-års regn om 100 år	30 %

Spildevandskomiteen i Danmark har gjennomført en undersøkelse av regnintensiteter fra 1997 – 2005 ved å sammenligne regnserie 1979 – 1997 og 1979 – 2005 ved 41 målestasjoner. Undersøkelsen viste at på de 8 årene 1997 – 2005 er økningen i intensitet hos sterke regn større enn 20 %. For målestasjonen på Blindern i Oslo er det vist at intensiteten for regn med 45 minutters varighet har økt med 45 % i årene mellom 1968 og 2000 (Lindholm 2011b). I den nye veilederen for klimatilpasset overvannshåndtering som er under utarbeidelse vil Norsk Vann anbefale at en klimafaktor mellom 1,3 – 1,5 legges til dagens nedbørintensiteter ved beregninger av regnvannsavrenning (Lindholm 2012a).

5.2 Generelt om kompenserende tiltak mot klimaendringenes effekt

Tiltaksprinsippene for reduksjon av flomskader og overløpsutslipp handler hovedsakelig om å redusere tilrenningen av overvann til avløpssystemet og forsinke og dempe flomtoppene før vannet tilføres avløpssystemet, for å hindre belastningen på avløpsnett og renseanlegg.

Mulige mottiltak sorteres gjerne etter følgende hovedprinsipp (Lindholm et al. 2008):

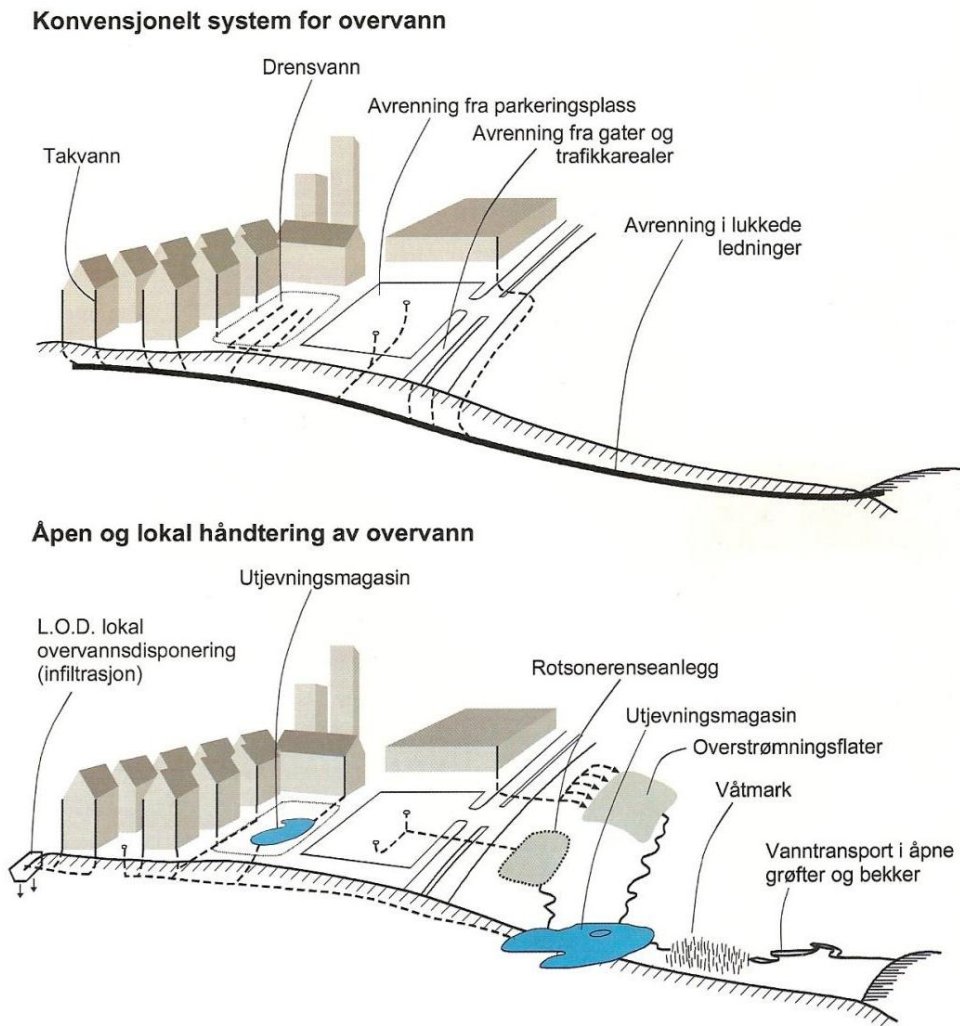
- Reduksjon av tilrenning til avløpsnettet. Dette kan gjøres ved infiltrasjon til grunnen eller til lukkede magasiner i grunnen. Man bør koble bort overvannet fra avløpsnettet i eksisterende system og praktisere ikke-tilkobling i nye utbygginger dersom det er mulig. Tiltak som dette går under fellesbetegnelsen LOD (lokal overvannshåndtering/disponering).
- Forsinkelse og demping av flomtoppene før overvannet tilføres avløpsnettet. Dette kan gjøres ved blant annet strupeplater på gatesluk, åpne dammer eller våtmarker. LOD-tiltak.
- Fordrøyningsiltak i avløpsnettet. Fordrøyningsbasseng av rørpakker eller i plasstøpt betong, heving av overløpskanter eller bevegelige overløpskanter til et passende nivå som ikke øker flomskader for rørsystemet oppstrøms, er eksempler på tiltak som faller inn under denne kategorien.

- Økning av rørkapasitet nedstrøms overløp eller flaskehalsen ved utskiftning til ledninger med større dimensjon, rehabilitering av rør med høy rørfriksjon eller kummer med høy linjeføring. Dersom det er mulig anbefales det å benytte LOD-løsninger før en økning i rørkapasitet.
- Omdirigering, som å føre avløpet fra flaskehalsen og kritiske overløp til områder i avløpsnett med bedre kapasitet.
- Rensende overløp i fellesavløpssystem som oppkonsentrerer forurensningene og sender dem til rensenanlegg.
- Separering av fellesavløpssystem er et kostbart og langsiktig tiltak, som gjøres i økende grad i mange kommuner. Nye utbygginger legges gjerne som separatsystemer, men ofte vil systemene ikke kunne utnyttes til det fulle da mange kommuner benytter en blanding av separatsystem og fellessystem.
- Fordrøyningsvolum i rensenanlegg. Et fordrøyningsvolum i avløpsrensanlegget kan jevne ut flomtoppene i vannføringen og minke forurensningsutslipp fra overløp umiddelbart før rensenanlegget og utløpet.

5.3 Åpne og lokale overvannsløsninger

Det gamle avløpssystemet er ikke planlagt for en økt fortetting i byer og klimaendringer. Konvensjonell overvannshåndtering hvor overvannet ledes raskest mulig bort i lukkede ledningsnett var ment å gi gode urbane miljøer og sikkerhet mot oversvømmelser (Lindholm et al. 2008), men har vist seg å være sårbar for klimaendringenes effekt. En konvensjonell overvannshåndtering er et radikalt inngrep i den naturlige vannbalansen, hvor det naturlige dreneringssystemet i stor grad forblir ubenyttet. Nye løsninger for overvannshåndtering har satt det hydrologiske kretsløpet i fokus, og søker i størst mulig grad å opprettholde den naturlige vannbalansen. Løsninger som dette anses å være meget bærekraftige (Stahre 2008) og betegnes gjerne under begrepene lokal overvannshåndtering (LOD – lokal overvannsdiskontering/håndtering²⁰) og åpen overvannshåndtering. Ved å la naturlige systemer, eller løsninger som simulerer det naturlige avrenningssystemer, fungere som primærsystem og ledningsnett som sekundærsystem, vil man få en mer økologisk og bærekraftig håndtering av overvann. Lokale overvannsløsninger plasseres nær overvannskilden, og vil da gjerne ligge oppstrøms i nedbørsfelt hvor vannføringene er små og hastighetene er lave. Slike lokale overvannsløsninger, eventuelt i kombinasjon med andre åpne løsninger og/eller et konvensjonelt rørsystem, antas å være effektive og bærekraftige mottiltak mot effekten av klimaendringene, og gi en bedre funksjonsoppnåelse (Lindholm et al. 2008; Stahre 2004).

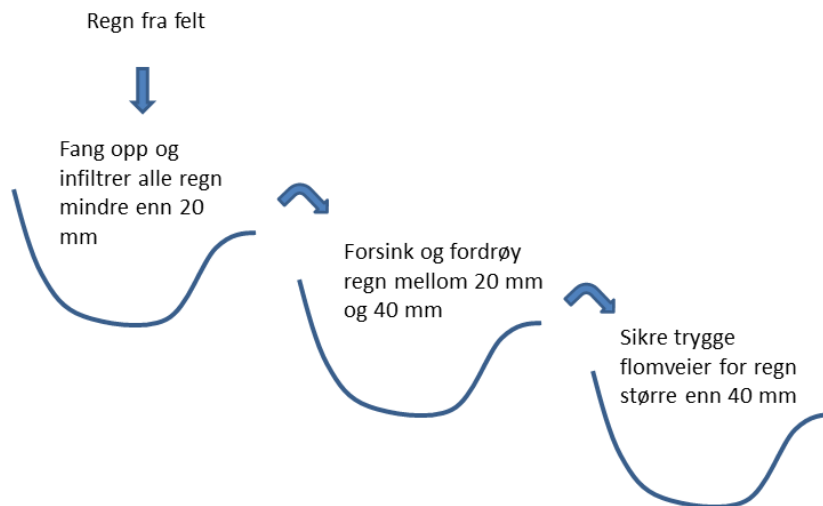
²⁰ LOD-begrepet hadde tidligere en videre definisjon, og omfattet da alle alternativ til konvensjonell håndtering av overvannet. I dag brukes LOD-begrepet om løsninger med reduksjon av avrenning og demping og forsinkelse av flomtopper nær kilden.



Figur 19: Illustrasjon av forskjellen mellom konvensjonell overvannshåndtering og overvannshåndtering ved bruk av åpne og lokale løsninger i samme område (Lindholm et al. 2008).

Lokale og åpne overvannsløsninger er en naturlig del av en helhetlig og klimatilpasset overvannshåndtering, hvor overvannet sees på som en ressurs og ikke et problem. I en helhetlig overvannshåndtering fokuseres det på å håndtere overvannet i størst mulig grad på overflaten som en synlig del av vassdraget og bybildet. Man ønsker å håndtere overvannet på en slik måte at man forebygger skader med en tilfredsstillende sikkerhet for liv, helse og miljø. Synlige, åpne vannflater er et positivt landskapselement og et ettertraktet naturelement i byer og tettbygde strøk, samtidig som det styrker det biologiske mangfoldet (Lindholm et al. 2008).

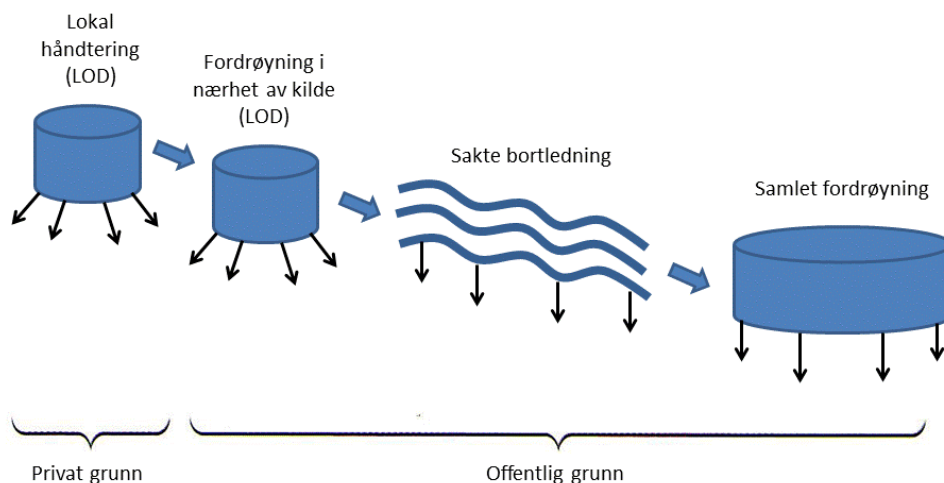
En bærekraftig overvannshåndtering med utstrakt bruk av lokale og åpne løsninger, bygger på et prinsipp som kalles «treleddsstrategien» som forklarer tankegangen for infiltrasjon, forsinkning, fordrøyning og trygge flomveier.



Figur 20: Treleddsstrategi for håndtering av nedbør med eksempeltall som må tilpasses lokalt, etter Lindholm et al. (2008).

Som vist i figuren 20, ønsker man å holde tilbake og infiltrere nedbør av mindre størrelser for å redusere tilrenningen til et eventuelt ledningsnett. Her benyttes ofte lokale løsninger. Nedbør med større volum vil kunne renne videre til åpne overvannsanlegg med formål om å forsinke og fordrøye overvannsavrenningen. Noen nedbørstilfeller har et så stort regnvolum at det normale systemet ikke har kapasitet til å håndtere avrenningen. For i størst mulig å grad unngå skader og ulemper ved slike tilfeller, må det anlegges flomveier på overflaten som kan avlede overvannet på en trygg og sikker måte (Lindholm et al. 2008).

Åpne overvannsløsninger inndeles gjerne i fire kategorier, som vist i figuren nedenfor:



Figur 21: Illustrasjon av ulike kategorier åpne overvannsløsninger, etter Stahre (2004).

Denne inndeling i kategorier er ikke basert på overvannsanleggenes tekniske utforming eller funksjon, men på plassering i avrenningssystemet og ansvarsfordeling. Lokal overvannshåndtering (LOD) er, som tidligere forklart, en samlet betegnelse på løsninger med hensikt å redusere og/eller fordrøye overvannsavrenningen nær kilden. Fordrøyning av overvann nær kilden omhandler løsninger som søker å minimere og/eller fordrøye overvann i

de øverste deler av et overvannssystem. En sakte bortledning av overvann kan defineres som ulike avledningssystem for sakte transport av overvann fra de øvre delene av avrenningsområdet. Samlet fordrøyning er den siste av de fire kategoriene og kan forklares som større anlegg med formål å redusere og/eller fordrøye avrenning fra større avrenningsområder – slike anlegg integreres ofte i natur- eller parkanlegg og plasseres gjerne i nedre deler av avrenningsområdet (Stahre 2004). Flere overvannsløsninger kan være plassert i flere kategorier, og i tabellen under beskrives løsningene som de vil opptre i de ulike kategoriene. Tabellen er utformet etter Lindholm et al. (2008) og Stahre (2004).

Tabell 7: Ulike lokale og åpne løsninger for overvannshåndtering

Kategori	Løsning for overvannshåndtering	Kort beskrivelse av løsning
Lokal håndtering (LOD) på privat mark	<i>Grønne tak</i>	Et tynt vegetasjonsdekke på tak som holder noe av nedbøren fra mindre regn tilbake. Ved lengre regn vil dekket mettes og fordrøyningseffekten blir liten.
	<i>Infiltrasjon av takvann på gresskledd flater</i>	Overvann fra tak ledes via nedløpsutkaster ut på en renne av betong eller naturstein og videre til en hensiktsmessig infiltrasjonsflate, muligens et regnbed. Ved infiltrasjon av takvann bør infiltrasjonsflaten være 1-2 ganger større enn takareal. Eventuelt overskuddsvann som ikke infiltreres må tas hånd om.
	<i>Porøse dekker</i>	Permeable dekker på hustomt i stedet for tette flater. Eksempler er singel, grusflater, naturstein, hulstein av betong eller porøs asfalt. Underbygges av grovere vanngjennomtrengelig materiale som transporterer vannet videre ned i grunnen eller videre bort via et dreneringssystem. Mye vann vil også fordampe. De permeable dekkene kan tettes igjen av finstoff.
	<i>Infiltrasjon i steinfyllinger</i>	Et magasin i marken fylt med singel eller annet grovt materiale. Porevolumet i magasinet gir mulighet for perkolasjon. Vannet vil videre perkolere ut i omgivelsene eller dreneres via et dreneringssystem. Magasinet kan tettes igjen av finstoff.
	<i>Gresskledd forsengkninger</i>	Overvannet samles opp i et grunt

		grøftesystem, gjerne en gresskledd forsenkning som kombinerer infiltrasjon og sakte bortledning. Vannet bør renne med selvføll til forsenkningen. Vannet som ikke infiltreres føres videre til en kuppelbrønn ved selvføll.
	<i>Fordrøyningsdammer</i>	En fordrøyningsdam med permanent vannspeil vil forsinke avrenningen. Det må være mulig å rense dammen. For å unngå ulykker bør dammene ha slake skråninger og bunn.
	<i>Oppsamling og gjenbruk av overvann</i>	Takvann kan samles opp i oppsamlingstanker for så å brukes igjen til plantevanning eller annet.
Fordrøying nær kilden på offentlig grunn	<i>Porøse dekker</i>	Permeable dekker på veg, fotgjengerfelt og parkeringsplasser i stedet for tette flater. Ellers likt som tidligere beskrevet.
	<i>Tilfeldig oppdemning på gatedekket</i>	Kortvarig oppdemning i rennestein og på omkringliggende gatemark. Dette kan skje gjennom en struping eller tetting av sluk. Vannet bør da kunne renne videre til neste sluk.
	<i>Tilfeldig ansamling av overvann på spesielle flater for oversvømmelse</i>	Struping av ledningssystemet stilles inn til en gitt vannføring og fører til oppstuvning i et gitt punkt. Oppstuvning og oversvømmelse legges til spesielle forsenkede oversvømmelsesflater. Anleggene bør også være i bruk i tørrvær, og målet er anlegg med parkmessig preg tilgjengelig for publikum.
	<i>Fordrøyningsdammer</i>	Ved store dammer bør det vurderes å sette opp gjerder eller beplantning for å gjøre dammen mindre tilgjengelig. Ellers som tidligere beskrevet.
Sakte bortledning	<i>Gresskledd forsenkninger</i>	Som beskrevet tidligere.
	<i>Kanaler</i>	Åpne kanaler for bortledning av overvann i bebyggelse kan være et spennende blått element, men er sjelden rimeligere enn konvensjonelle løsninger. Man må være oppmerksom på ulykkesrisiko, tilgjengelighet og problem med søppel.

	<i>Bekker/grøfter</i>	Ved utbygging av nye områder bør det undersøkes om det finnes bekker, grøfter eller andre vassdrag i området som kan utnyttes for bortledning av overvann, særlig er gjenåpning av lukkede vassdrag interessant. En ukontrollert tilkobling av overvann fra nye områder kan gi erosjonsskader og oversvømmelser.
	<i>Filtervoller</i>	Filtervoller er en del av damkonstruksjoner. Består av drenerende materiale og filtrerer utstrømmende vann ved et visst vannstands nivå.
Samlet fordrøyning	<i>Oversvømmelsesflater</i>	Tilførselen av overvann styres gjerne av reguleringsanordninger i overvannssystemet og bestemmes av oppstuvingsnivå i ledningsnett. Oversvømmelsesflaten bør dreneres tom når den ikke er i bruk for å unngå forsumping. Løsningen krever store arealer og mye vedlikehold dersom oversvømmelsesflaten ligger i bebygde område.
	<i>Store fordrøyningsdammer</i>	Store fordrøyningsdammer i park- eller naturområder driftes sammen med området rundt. Strømningsforholdene gjennom anlegget må tas hensyn til. Man ønsker også å rense overvannet og det kan vurderes å anlegge en innløpsdam hvor grovere material kan sedimentere. Vannivået reguleres ved utløp.
	<i>Våtmarksområder</i>	Vannstanden ligger i overflaten eller umiddelbart under eller over overflaten. Våtmarken er i større grad dekket av vannvekster. Våtmarker anlegges gjerne for både fordrøyning og rensing. Innløpsdam for sedimentering, regulering ved utløp.

Flere åpne og lokale overvannsløsninger har, i tillegg til god hydraulisk funksjon, en betydelig renseseffekt på overvannet. Dette er særs gunstig ved avrenning fra trafikkerte områder eller

landbruksområder, hvor forurensningene i overvannet gjerne er omfattende. Slike løsninger vil være særs aktuelle i separatsystem hvor overvannet ikke renses i renseanlegg før det går ut i resipient.

Når åpne og lokale overvannsløsninger skal benyttes, er det viktig å gjøre en vurdering av faren for vannskader. Det bør undersøkes om infiltrasjonskapasiteten²¹ i grunnen er god nok, om det er en tilfredsstillende drenering av områder rundt bygninger og veger, om det er fare for erosjon og om løsningene vil ha tilfredsstillende funksjon i vintersituasjoner (Lindholm et al. 2008).

6 Matematisk modellering av urbanhydrologiske avløpssystem

I hovedsak benyttes databaserte matematiske modeller ved beregninger av større og mer komplekse urbane avløpssystemer. Slike matematiske modeller kalles gjerne urbanhydrologiske avløpsmodeller, og de fleste modellene som brukes er dynamiske og deterministiske simuleringssystemer²². Urbanhydrologiske avløpsmodeller gir raskere, enklere og billigere muligheter for eksperimentering og prøving og feiling enn fullskala systemer. Slike modeller vil også beregne, analysere og simulere mange flere ganger raskere enn man har mulighet til ved bruk av manuelle metoder, og er derfor effektive verktøy i planlegging, prosjektering og dimensjonering av urbane avløpssystemer (Lindholm 2011e). Bruken av urbanhydrologiske avløpsmodeller kan gjerne knyttes til tre formål: 1) modellene er et verktøy for forståelsen av det urbanhydrologiske/hydrologiske system og hvordan systemet oppfører seg i ulike situasjoner, 2) modellene kan brukes som et verktøy for å teste data og de gir oss mulighet til å utforske våre målingers betydning og viktige detaljer i våre observasjoner av systemet, og til slutt 3) modellene gir oss mulighet til å simulere ulike scenarioer og alternativer (som for eksempel ulike klimascenarioer for regnintensitet og dets effekt på avløpssystemet) (Silberstein 2006).

Det finnes to ytterpunkter av hydrologiske modeller. I den ene enden finner man de *systemanalytiske modellene* som hovedsakelig baseres på sammenhenger mellom inngangs- og utgangsdata knyttet til det hydrologiske systemet som ønskes beskrevet. Systemanalytiske modeller søker ikke å beskrive prosessene som skjer inne i systemet eller de fysiske lovene som styrer dem. *Fysikalske modeller*, som baseres på kunnskap om prosessene som inngår i systemet, finner man i den andre enden av skalaen. Fysikalske modeller kan generelt beskrives som en modell hvor systemets fysiske oppførsel beskrives av matematiske ligninger som løses ved hjelp av modellens beregningsmotor og dens regnemaskinkode (Sælthun 2001). De fleste hydrologiske modeller er såkalte *begrepsmessige/konseptuelle modeller* som

²¹ Infiltrasjonskapasitet defineres som den øvre hastighet vann kan infiltreres i en jordart ved gitt fuktighetsforhold. Infiltrasjonskapasitet påvirkes av flere elementer som jordart, struktur (porøsitet), helning, vegetasjon.

²² *Dynamiske/transiente* modeller er tidsavhengige, *deterministiske* modeller gir alltid samme svar ved en gitt input (motsatt av stokastiske modeller som gir svar med en viss sannsynlighet) og *simuleringssystemer* gir bare modellens resultat som respons til en gitt input (motsatt av optimaliseringsmodeller som gir beslutningsvariable) (Lindholm 2011e).

befinner seg mellom de to ytterpunktene. Konseptuelle modeller er basert på fysikalsk hydrologisk kunnskap som kombineres med forenklete sammenhenger mellom inngangs- og utgangsdata. Generelt kan konseptuelle hydrologiske modeller forklares som et nedbørsfelt representert ved flere lagringsenheter for vann/fukt og strømminger mellom enhetene og ut av feltet beskrevet av parametriserte likninger. De ulike enhetene og strømmingene mellom dem kan som regel identifiseres med virkelige egenskaper og prosesser i systemet (fysikalsk beskrivelse), men kan ofte ikke måles og parameterne er derfor gjerne estimert fra inngangs- og utgangsdata (systemanalytisk del) (Silberstein 2006; Sælthun 2001)

Modeller er alltid en forenkling av virkeligheten og vil aldri kunne beskrive virkeligheten fullt ut. Resultater fra urbanhydrologiske modeller vil alltid ha i seg en iboende usikkerhet grunnet dette. Usikkerheten er i stor grad knyttet opp mot om vår forståelse og kunnskap om de fysiske prosessene i systemet som beskrives er god nok, og om vi klarer å gi systemet en tilnærmet korrekt matematisk beskrivelse. Løsningsmetodene vil være basert på diskretisering av romlig og tidsmessig oppløsning, noe som igjen gir grunnlag for usikkerhet. Til slutt er det også knyttet usikkerhet til eventuelle feil i modellens observerte inngangsdata (Bjerkholt 2011).

En hydrologisk-hydraulisk modell bør oppfylle følgende krav, som presentert av Nilsen (2008):

- De matematiske likningene og prosessbeskrivelsene i modellen må være fysikalsk solide.
- Det fysiske system må bli korrekt representert med en tilstrekkelig høy detaljeringsgrad.
- Modellparameterne må bestemmes ved kalibrering for det spesifikke nedbørsfelt og ideelt sett verifiseres med et annet datasett enn det som er brukt i kalibreringen.
- Modellene må kjøres med riktige inngangsdata og korrekte initial- og grensebetingelser.

Nilsen (2008) argumenterer for at de ovennevnte punkter må være usikre og antas å endres dersom modellens hensikt er å vurdere fremtidig oppførsel av et urbanhydrologisk system, grunnet:

1. Klimaendringer kan resultere i endringer i relevante prosessbeskrivelser.
2. Endret arealbruk og endringer i ledningsnett/avløpssystemet vil også kunne føre til endringer i prosessbeskrivelser.
3. Kalibreringen som i dag er gyldig er knyttet opp mot dagens klima og system, og vil derfor nødvendigvis ikke være gyldig i fremtiden.
4. Inngangsdataene vil kunne endres grunnet klimaendringer, endringer i arealbruk, endringer i husholdningenes vannforbruk etc.

Punkt 1 og 3 er umulige å vurdere med sikkerhet, og holdes derfor slik som de er i dagens modeller ved vurdering av fremtidig systemytelse. Dersom man ønsker å se på effekten av klimaendringene isolert, kan man også utelate punkt 2. Det er derfor vanlig i vurdering av klimaendringenes konsekvens på urbanhydrologiske system, kun å endre inngangsdata i henhold til punkt 4, og la resten være uberørt (Nilsen 2008).

6.1 Modellmiljø Mike Urban og ROSIE

I denne oppgaven er det benyttet to programverktøy ved beregninger i den urbanhydrologiske avløpsmodellen; Mike Urban og ROSIE, som vil beskrives nærmere i dette kapittelet.

6.1.1 Mike Urban/MOUSE

Mike Urban er en programvare utviklet av DHI. Mike Urban er et hydrodynamisk simuleringsverktøy for modellering av vannkvalitet- og kvantitet i urbane avløps- og vannforsyningssystemer. Mike Urban er bygget opp av tre hovedmoduler; Model Manager, Collection System (CS) moduler og Water Distribution (WD) moduler. I Model Manager finner man blant annet programmets GIS-funksjonalitet med komponenter fra ESRI's GIS-program ArcObject. Det er hovedsakelig CS moduler som er relevante ved modellering av avløpsnett. CS modulene er basert på DHIs egen MOUSE beregningsmotor, og består av moduler for både vannkvalitet- og kvantitet. Nedenfor presenteres de moduler/modeller som er mest relevante for mengdeberegning av avrenning (DHI 2011; DHI c):

MOUSE Pipe Flow Module

Denne modulen kan simulere turbulente strømninger i rør- og kanalnettverk ved bruk av Saint Venants likninger som beskriver massebevaring og momentbevaring.

Massebevaring beskrives av Saint Venants kontinuitetslikning:

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

Formel 4: Saint Venants kontinuitetslikning (DHI a)

Momentbevaring beskrives av Saint Venants momentlikning:

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

Formel 5: Saint Venants momentlikning (DHI a)

hvor

Q = vannføring

A = strømningsareal

x = avstand i strømningsretning

t = tid

α = hastighets distribusjonskoeffisient

y = strømningsdybde

g = tyngdeakselerasjon

I_0 = bunnhelning

I_f = friksjonshelning

Saint Venants momentlikning har ulike forenklete former, som hver og en beskriver en endimensjonal distribuert routingmodell. Dersom likningen løses på sin fulle form har man en dynamisk bølgemodell. Dersom ledd 1 og 2 utelates vil man få en diffus bølgemodell og dersom det tredje leddet også utelates, så har man en kinematisk bølgemodell (Holvik 2010). For å beregne oppstuvingssituasjoner bør det benyttes en dynamisk bølgemodell, altså en komplett Saint Vernants likning. (Lindholm et al. 2008). Den komplette likningen løses numerisk for hele nettverkssystemet og gir resultater i form av vannstand og vannføring i rørene. Hydrografene²³ som dannes i MOUSE Surface Runoff Module og MOUSE Rainfall Dependent Infiltration Module beskriver hvordan vann entrer nettverket på ethvert punkt til enhver tid og gir altså grensebetingelsene for beregning av rørstrømning (Olsen 2011).

CS-Pipeflow simulerer subkritiske og superkritiske tilstander i delfylte, fulle og trykksatte rør. Flere komponenter kan simuleres, som for eksempel fordrøyningsbassenger, overløp, pumper, strømningsregulatorer og overvannsinnløp. Det finnes fem standard rørutforminger. Modulen inneholder også et verktøy for simulering av lange tidsserier og et optimaliseringsverktøy brukt for automatisk generering av rørdiametre (DHI 2011; DHI a).

MOUSE Surface Runoff Module

Modulen for regnvannsavrøpning inneholder flere modeller for beregning/simulering av overvannsavrøpning. Nedenfor presenteres modellene knyttet til avrøpning fra tette flater (DHI 2011; DHI b):

- Modell A: Tid-areal metoden
- Modell B: Metode for et ikke-lineært reservoar (kinematisk bølgemodell)
- Modell C: Metode for lineært reservoar
- Modell D: Enhetshydrogram

Modell A, B og C kan kombineres med en modul for sakte avrøpning (MOUSE RDI modell) (DHI b). Hydrografene som dannes i beregningene brukes til input i MOUSE Pipe Flow modellen (DHI c). Tid-areal metoden (modell A) benytter nedbørsfeltdata og hydrologisk informasjon som input i avrøpningsberegninger fra det modellerte felt, som blant annet (DHI b):

Feltparametere:

- Catchment ID – Unik identifikasjon av delfelt
- Beliggenhet – Beskriver hvor delfeltet kobles til avløpssystemet
- Delfeltets areal – Delfeltets horisontale overflateareal

Modellspesifikke parametere:

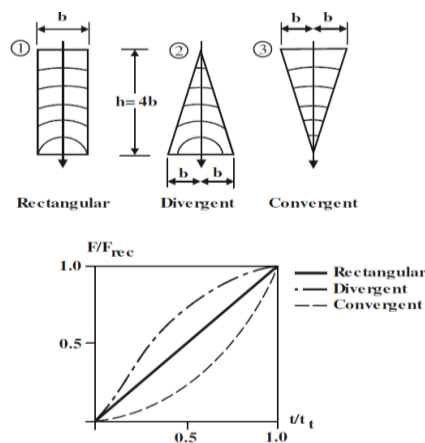
²³ Enhetshydrograf /hydrograf/hydrogram er et mye brukt begrep i hydrologien og urbanhydrologien. En hydrograf kan forklares som et grafisk bilde av flomtøppen som dannes av et regn med en gitt størrelse over et gitt avrøpningsområde. Denne hydrografen/hydrogrammet antas å være konstant i tid og proporsjonal (ordinatene er direkte proporsjonale med volumet til den effektive nedbøren). Det antas også at hydrografen følger prinsippet om superposisjon; at effekten av nedbørshendelser på bestemte tider er lik summen av de individuelle hydrografer. Når enhetshydrografen er dannet kan den videre benyttes til å lage nye hydrografer for andre nedbørshendelser, grunnet prinsippene ovenfor (Butler & Davies 2000).

- Andel tette flater – Prosentandel av delfeltets overflate som antas å bidra til den raske avrenningen

Hydrologiske parametere:

- Overflatemagasinering – En viss nedbørsmengde vil gå med til å fukte overflaten og fylle små forsenkninger og ujevnheter på den tette overflaten. Denne nedbørsmengden vil ikke nå rørnett. Standardverdien på overflatemagasineringen er satt til 0,6 mm.
- Hydrologisk reduksjon – Det benyttes en reduksjonsfaktor som reduserer avrenningen med hensyn til vanntap forårsaket av blant annet evaporasjon, uperfekt permeabilitet i det bidragende areal. Standard reduksjonsfaktor er 0,9.
- Feltets konsentrasjonstid – Tiden det tar før hele delfeltet bidrar med avrenning til ledningsnett. Standard konsentrasjonstid er satt til 7 minutter.
- Tid-arealkurve – Kurven redegjør for delfeltets geometri og hvordan det bidragende arealet endrer seg over tid.

Formen til modell A sin avrenningshydrograf kontrolleres av konsentrasjonstiden og tid-arealkurven som til sammen beskriver feltets reaksjonshastighet og utforming. Det finnes tre definerte tid-arealkurver tilgjengelig i MOUSE; rektangulært felt, divergent (ikke-lineært) felt, konvergent (lineært) felt (DHI b).



Figur 22: Beskrivelse av modell A (tid-areal) (DHI b)

MOUSE Rainfall Dependent Infiltration Module

Denne modulen gir muligheten for detaljert modellering av den andelen nedbør som rutes gjennom lagringsenheter som snø, overflate, rotsone og grunnvann for deretter å infiltrere og strømme inn i ledningsnettverket (RDII). Denne komponentens størrelse er ikke kun avhengig av den aktuelle nedbøren, men også områdets hydrauliske tilstand, for eksempel jordsmonnets fuktighetsinnhold. Ved bruk av denne modulen får man mer nøyaktige hydrografer som input i MOUSE Pipe Flow (DHI c).

MOUSE Long-Term Statistics Module

Denne modulen benyttes gjerne dersom man kjører langtidssimulering med kontinuerlige historiske data. Systemet kombinerer automatisk dynamiske rørstrømmingssimuleringer i

våtværssituasjoner og enkle hydrologiske simuleringer ved tørrvær. Resultatene presenteres i form av tidsserier (DHI c).

6.1.2 Rosie Mouse

Rosie er en tilleggsapplikasjon til Esris standard produkter laget av det norske selskapet ROSIM AS (Esri er en av verdens ledende produsenter av GIS-verktøy). ROSIE gir tilleggsfunksjoner spesielt utviklet for å forenkle prosessen med modelloppbygning, beregninger, resultatpresentasjon og vedlikehold av matematiske vann- og avløpsmodeller. Rosie er en ArcGIS-utvidelse, noe som vil si at brukeren arbeider i et ArcGIS brukergrensesnitt med alle funksjoner fra ArcGIS tilgjengelig. Programpakken Rosie består av Rosie Mouse og Rosie Epanet, og har et tilnærmet komplett brukergrensesnitt for de hydrauliske beregningsmotorene MOUSE og EPANET (beregningmotor for vannforsyning utviklet av US Environmental Protection Agency) (ROSIM).

Del 3: Casestudie

7 Innledende om casestudiet

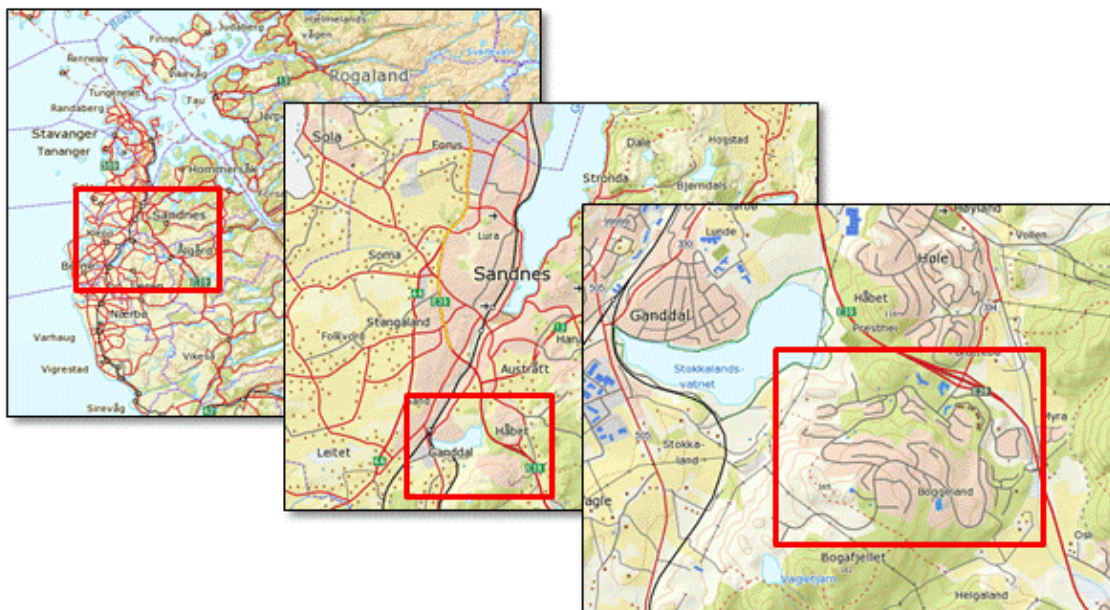
Formålet med casestudiet er å se nærmere på klimatilpasningstiltak som effektivt avbøter skadene forårsaket av klimaendringer. Dette gjøres ved bruk av en urbanhydrologisk modell av Bogafjellfeltet i Sandnes kommune. I tillegg til hydrauliske vurderinger inkluderes også økonomiske vurderinger av tiltakene, etter ønske om å undersøke hvorvidt tiltakenes kostnader kan oppveies av tiltakenes fordeler, og om de til slutt vil utgjøre en samlet gevinst eller kostnad for samfunnet.

7.1 Presentasjon av caseområdet; Bogafjellfeltet i Sandnes kommune

Sandnes kommune ligger i Rogaland fylke, og er med sine 66 000 innbyggere den største kommunen i fylket etter Stavanger kommune. Sandnes kommune er den 9. største kommunen i Norge, og har hatt en gjennomsnittlig vekst på mer enn 2 % de siste 20 årene. Veksten er forventet å øke i samme tempo de neste årene (Sandnes kommune 2010).

Rogaland grenser mot de mer ensartede klimaforholdene som preger Agder-forholdene i sør, men har likevel et typisk vestlandsk kystklima hvor høye fjell, dype fjorder og daler skaper store kontraster. Vindforholdene er variable og preges av de store temperaturvariasjonene over Sør-Norge; om vinteren blåser det oftest fra sørøst og om sommeren fra nordvest. Middelsestemperaturen for kaldeste måned er rundt 1 °C. Middelsestemperaturen for varmeste sommermåned er 14-15 °C. Langs kysten og i fjellet ligger årssummen for nedbør mellom 1000-2000 mm, og i visse områder ligger nedbøren opp mot 2500 mm i året (Dannevig 2009).

Bogafjell er en bydel/bebyggelse i Sandnes kommune, med beliggenhet rett sør-øst fra Sandnes sentrum. Bogafjell bydel er oppkalt etter *Bogafjellet* og er bygd rundt *Litla Bogafjellet* og *Stora Bogafjellet* og *Stokkelandsfjellet* i Sandnes. Bogafjell bydel består av flere områder; Håbet, Håbafjell, Bogafjell senter, Koppåsen, Buggeland, Stokkelandsfjellet, Vagletjørn og Høyland. I denne oppgaven er det boligområdet nord for selve Bogafjell (Bogafjell senter, Koppåsen og Buggeland) som skal beskrives. Bogafjell har siden rundt år 2000 vært det største boligutbyggingsfeltet i Sandnes og består av flere nabolag som er bygd ut etappevis (Wikipedia 2011).



Figur 23: Bogafjellfeltet, kart hentet fra Statens kartverk (2012)

Bogafjell og store deler av området rundt Stokkelandsvannet har status som båndlagt område for friluftsliv i offentlig eie, og inngår som overordnet grøntstruktur i kommuneplan/fylkesdelplan. Bogafjell er et mye benyttet friluftsområde i nærmiljøet, men også regionalt, med flere turstier og veger gjennom skogsterreng. Området er også et viktig viltområde, spesielt for elg og rådyr (Sandnes kommune 2006).

Caseområdet er en del av Storånavassdraget, som består av Storåna, Stokkelandsvannet, Høylandsåna og Svebestadkanalen.

Ifølge Adrianov og Vagle (2011) har Sandnes kommune ingen oversikt over tidligere flomhendelser eller skader for Bogafjellfeltet. Kommunen har tidligere ikke hatt store problemer med oversvømmelser, men har de siste år merket en økning i korte intense regn og kalde vintre med mer snø. Kommunen har ingen overvannsrammeplan, flomplan eller gyldig hovedrammeplan for avløp.

7.2 Landskapets karakter

Som vist i figur 24 består caseområdet av sentrert bebyggelse opp mot Stora og Litla Bogafjell. Landskapsarealene preges av skogkledd åser og skråninger mellom bebygde områder.



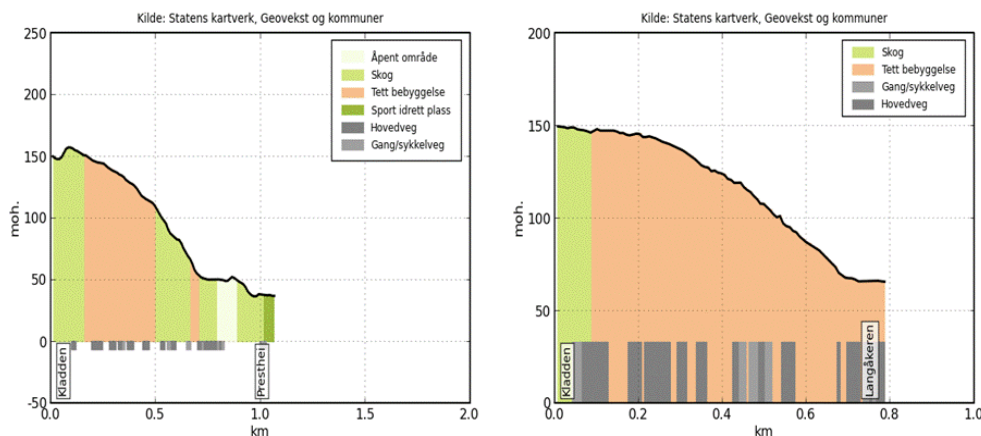
Figur 24: Bogafjell (caseområdet innrammet), bearbeidet kart fra Sandnes kommune (2010)



Figur 25: Til venstre; Bogafjell i froskeperspektiv og til høyre; fra toppen av Kladden og nedover Bogafjell

7.2.1 Topografi

Caseområdets terreng er nordvendt og heller ned mot Stokkelandsvannet og E39 i nord. Caseområdets høyeste punkt (Kladden) ligger rundt 160 moh. Et av de laveste punkt er ved steinfyllingsmagasinet, 30 moh. Terrenget ligger med et fall tilsvarende 1:6 nord og nord-vest fra Kladden. I nord-østlig retning er fallet fra Kladden rundt 1:10. På neste side vises to terrengprofiler fra henholdsvis nordlig og nord-østlig retning. Området er generelt lett kupert.



Figur 26: Terrengprofil, henholdsvis i nordlig og nord-østlig retning (Statens Kartverk 2012).

Områdets avrenning dreneres til Stokkelandsvannet, både ved kunstig og naturlig drenering. Caseområdet deles av et vannskille som vist på figur 24. Den sør-vestlige delen av utbyggingsområdet på Bogafjell dreneres til Lonabekken som fører vannet mot Stokkelandsvannet. Det resterende området dreneres via kunstig dreneringsssystem til Stokkelandsvannet via utløp og overløp rundt det tidligere steinfyllingsmagasinet. Steinfyllingsmagasinet ble for noen år siden tatt ut av drift da det var tettet av finstoff og over magasinet er det nå bygd en fotballbane. Mindre deler av området dreneres også naturlig via mindre bekker som munnar ut i Stokkelandsvannet.

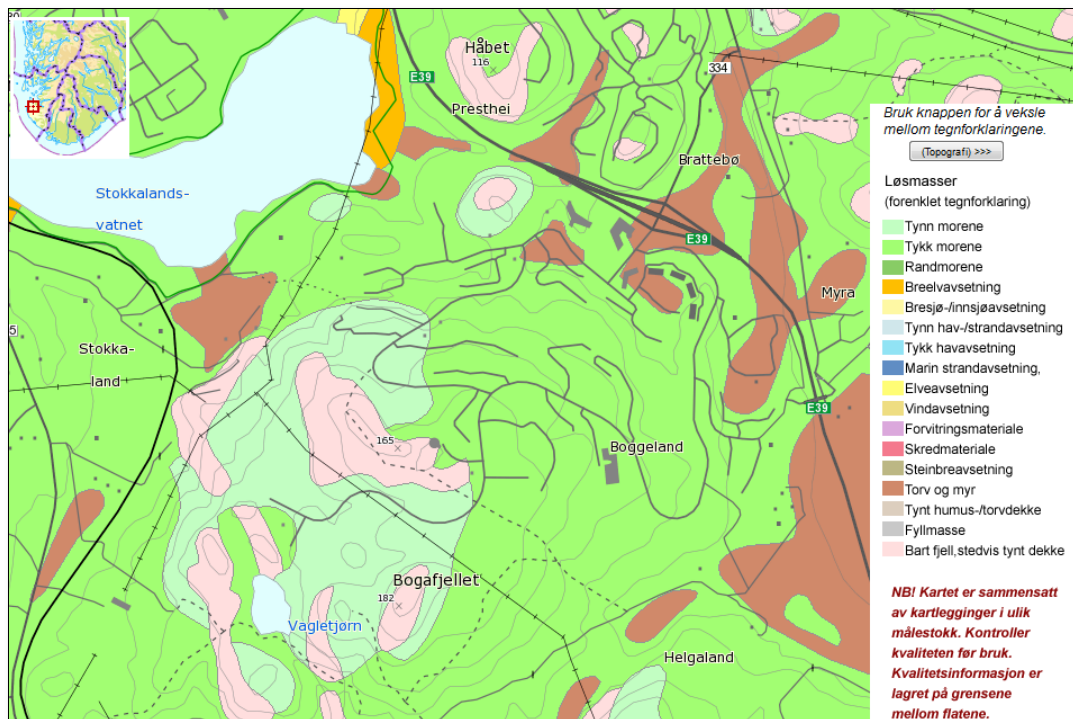
Stokkelandsvannet er et viktig utjevningmagasin, som demper og begrenser flommer i Storåna som renner fra Stokkelandsvannet, via Sandveparken og Sandnes sentrum, og videre ut i Gandsfjorden. De nyere utbyggingene på Bogafjell, Sørbø-Hove og Austrått gir økt tilrenning til Stokkelandsvannet og forventes å øke vannstanden med noen cm. Vannføringen ut av Stokkelandsvannet er estimert å øke med 0,4 % grunnet utbygging i områdene som drenerer til vannet. Storåna vil i liten grad påvirkes av utbyggingen oppstrøms Stokkelandsvannet, men påvirkes i stor grad av utbyggingen langs selve vassdraget fra Stokkelandsvannet og til Gandsfjorden (SINTEF 2011).

Vegetasjonen i caseområdet utgjøres hovedsakelig av barskog og åpen fastmark. Innimellom boligbebyggelsen finnes flere små grøntområder og lekeplasser. Området vest for bebyggelsen er preget av innmarksbeite. Bebyggelsen består av eneboliger, rekkehus og mindre leilighetskomplekser. Store deler av bebyggelsen er tilknyttet grøntarealer som hage eller felles uteareal. Veiene i caseområdet dreneres ved gatesluk som fører vannet til nærmeste overvannsledning (Adrianov 2012). Det antas også at de resterende tette overflater hovedsakelig dreneres via gatesluk som fører til overvannsledninger.

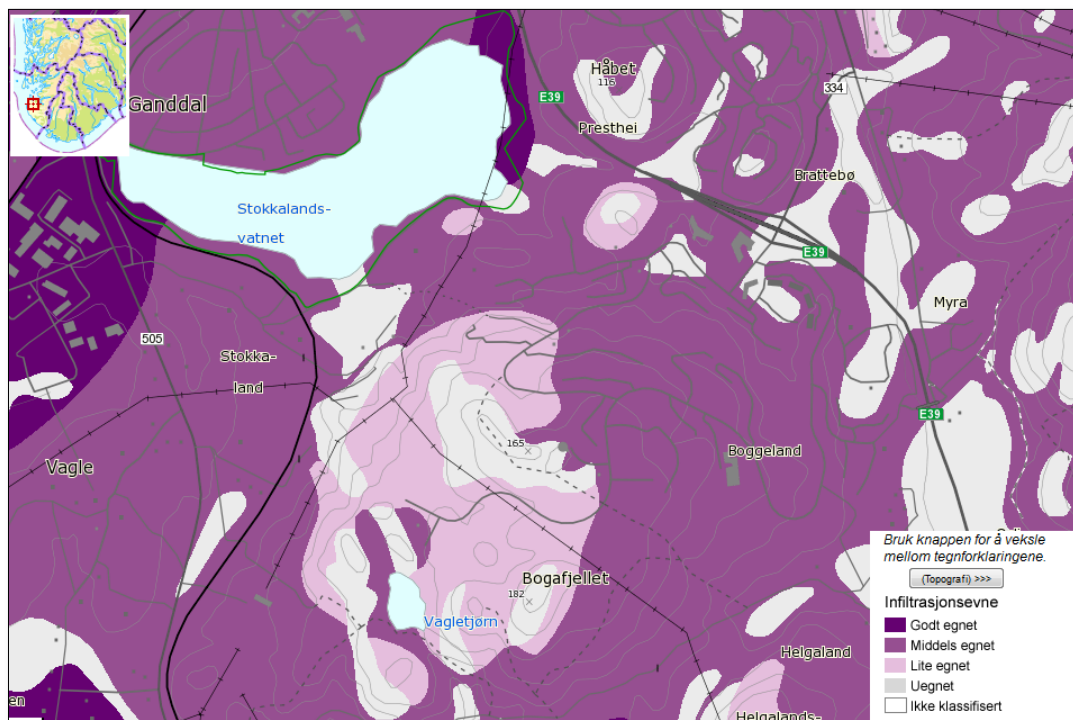
7.2.2 Grunnforhold, løsmasser og infiltrasjonsevne

Jæren generelt har en særpreget geologi med store flate områder og avrundede heier med store løsmasseavsetninger, formet av flere perioder med isbreer. Berggrunnen i caseområdet er grunnfjell bestående av gneis (Norges geologiske undersøkelse 2012a). Løsmassene i

caseområdet er stort sett tykk morene med stedvis områder med tynn morene og bart fjell. Noe torv- og myrområder finnes helt nord i caseområdet (Norges geologiske undersøkelse 2012b).



Figur 27: Løsmassekart av caseområdet (Norges geologiske undersøkelse 2012b).



Figur 28: Infiltrasjonsevne i caseområdet (Norges geologiske undersøkelse 2012b)

Jordmassenes infiltrasjonsevne er vist i løsmassekartet i figur 28. Som vi ser er store deler av caseområdet klassifisert med *middels egnet* infiltrasjonsevne. Dette er områdene med tykk morene. Områdene med tynn morene og bart fjell er klassifisert som områder henholdsvis *lite egnet* og *uegnet* for infiltrasjon.

7.3 Ledningsnett

Ledningsnett i feltet er bygd som separatsystem med et spillvannsnett og et overvannsnett, og i denne oppgaven er det følgelig overvannsnett som undersøkes for å finne optimale tiltak mot klimaeffektene.

Overvannsnett består av ledninger i betong, kummer, overløp og utløp (Adrianov & Vagle 2011; Vike 2010). Overløpene, og nye utløp, er en del av en nødløsning som ble anlagt etter at det tidligere steinfyllingsmagasinet ble tatt ut av drift grunnet gjentetting (Adrianov & Vagle 2011). Fra utløpene renner vannet i bekker ned til Stokkelandsvannet. Sandnes kommune har gjort mindre tiltak for å hindre erosjon i bekkene som tar i mot vannet som tidligere gikk gjennom steinfyllingsmagasinet.



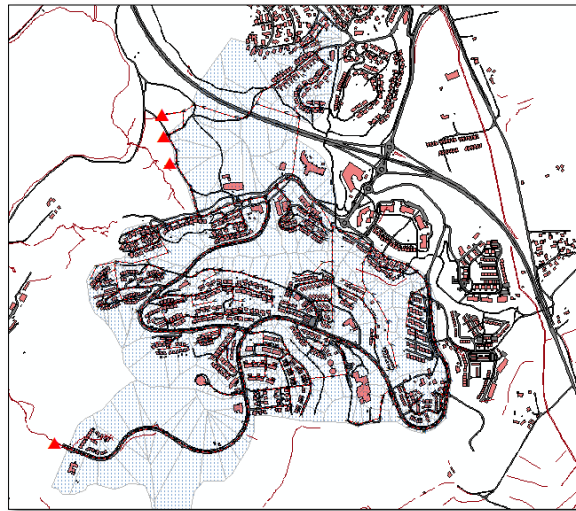
Figur 29: Nye utløp på Bogafjell

7.3.1 Urbanhydrologisk modell av caseområdet

Den hydrologisk-/hydrauliske modellen av overvannsnett på Bogafjell ble etablert av DHI i 2010 på bakgrunn av data fra Sandnes kommunes Gemini VA-database og digitale kart over Sandnes omhandlende høydekurver, bygg, veger og vannforekomster. Modellen ble bygget i Mike Urban. Modellen er ikke kalibrert (Vike 2010).

Modellen består originalt av omtrent 425 ledningsstrek og kummer/sluk, to utløp og et basseng med det ene utløpet i tillegg til et overløpsutslipp. Bassenget representerer det tidligere fordrøyningsvolumet i steinfyllingsmagasinet. Der det ikke foreligger informasjon om høyder for topp og bunn kum fra Sandnes kommune, er dette interpolert ut fra høydekurver eller nærliggende kummer i modellen (Vike 2010). For å etterligne dagens

situasjon er modellen endret. Bassenget som representerer steinfyllingsmagasinet som ikke er i drift er tatt bort, og det er satt inn to nye utløp i modellen etter skisser fra Sandnes kommune.

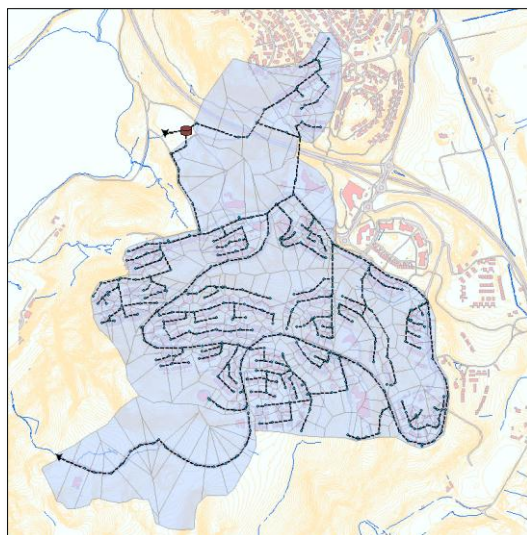


Figur 30: Modell etter endring, med to nye utløp

Det totale tilrenningsarealet på 115 ha er delt inn i 421 delfelt ved bruk av en automatisk funksjon som definerer polygoner for tilrenningsareal rundt hver kum. Yttergrensene for hele nedslagsfeltet er tegnet inn manuelt basert på informasjon om ledningsnett og kotehøyder. Andelen tette flater er basert på digitale data for bygninger og veier og gir et totalt areal for tette flater på ca 19 ha for hele området. Dette tilsvarer en andel tette flater på ca 17 % for hele feltet (Vike 2010).

I modellen benyttes standardverdiene for overflatemagesinering, hydrologisk reduksjonsfaktor og konsentrasjonstid på henholdsvis 0,6 mm, 0,9 og 7 minutter (Vike 2010). Det er usikkert hvor godt disse verdiene beskriver virkeligheten på Bogafjell, men verdiene benyttes videre på grunn av manglende grunnlag for å velge andre verdier.

I modellen er det fra DHI antatt en *pervios factor* 0. Dette betyr at ingenting av vannet som treffer de permeable flatene renner av. Dette er lite realistisk ved intense regn, særlig langvarige intense regn, hvor jorden etter hvert vil mettes og vann vil renne av. Faktoren beholdes likevel, grunnet manglende forutsetninger for å velge en annen faktor.



Figur 31: Planskisse over den originale hydrologisk-hydrauliske modellen over Bogafjell fra DHI, hentet fra Vike (2010)

8 Hydraulisk analyse

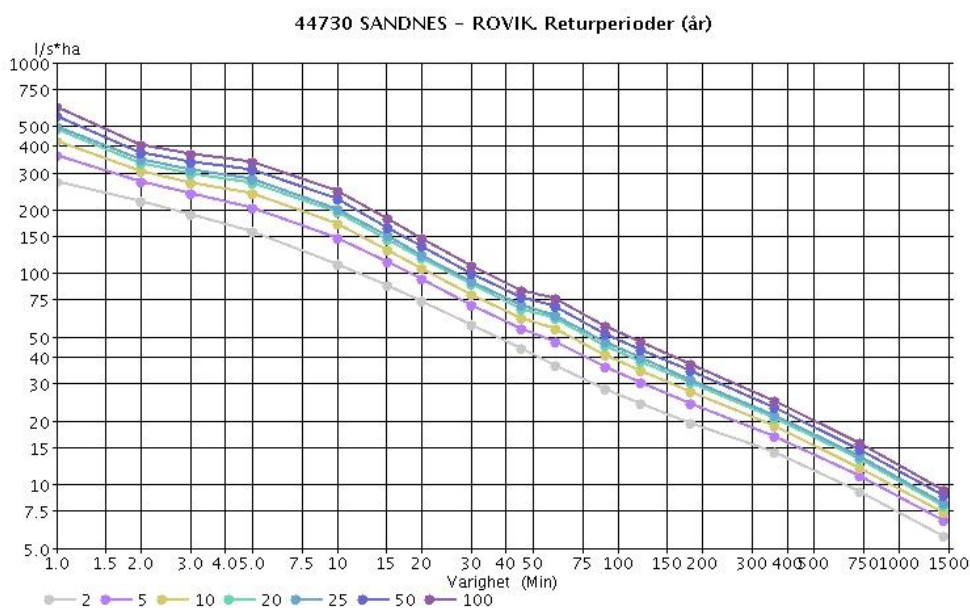
Resultatet fra den hydrauliske analysen ved simulering av regn i modellen over ledningsnettets med ulike klimatilpasningstiltak, vil danne utgangspunktet for en økonomisk analyse av de ulike tiltakene.

I denne oppgaven er det kun gjort simuleringer av enkeltregn. Regnene som legges inn i modellen er i form av symmetriske regnhyetogram. Hyetogrammene er konstruert etter informasjon fra IVF-kurver basert på nedbørsdata fra Rovik i Sandnes. For å simulere de forventede økte nedbørintensiteter som følge av klimaendringene legges det til et klimatillegg på hyetogrammenes intensiteter. Resultatet fra simuleringen av regnhyetogrammene gir oss overvannsnettets respons på dagens nedbørintensiteter og på de økte intensiteter som forventes ved klimaendring. Skadebildet forverres med økte intensiteter. Det ønskes ved simulering av ulike klimatilpasningstiltak å finne tiltak som kan avbøte skadene oppstående som følge av dette, og som kan føre skadenivået tilbake til tilnærmet det skadeomfanget vi finner ved dagens intensiteter. Skadeomfanget ved dagens 100-års regn og dagens utforming på overvannsnettets blir referansesituasjonen i analysen. I VA-sektoren benyttes ofte en antatt levetid for ledningsanlegg på omkring 100 år, og analysen gjøres derfor over en tidsperiode/tidshorisont på 100 år fra i dag. Dette samsvarer også med klimaframskrivingenes tidshorisont, som strekker seg fra i dag og frem til normalperioden 2071 – 2100.

Det ville vært ønskelig å gjennomføre langtidssimulering med observert tidsserie for en grundigere og mer realistisk hydraulisk og økonomisk analyse av ledningsnettets på Bogafjell og mulige klimatilpasningstiltak. Nedbørsmålingene for Rovik i Sandnes startet opp i 1974, og man kan maksimalt hente ut en tidsserie på rundt 35 år. Fra simulering av tidsserien kunne man hentet ut de største regnhendelser og knyttet dem opp mot gjentaksintervall ved hjelp av bestemte formler for dette. Skadene korresponderende med de utvalgte hendelser og kostnadene knyttet til disse skadene, ville dannet grunnlaget for en økonomisk analyse hvor

man får en mer realistisk beskrivelse av dagens skadeomfang- og kostnad. For å estimere klimaendringenes virkning kunne man brukt en DCM utviklet av Olsson et al. (2009) (beskrevet i kapittel 3.4.3) for å generere en tidsserie justert for klimaendringer. En slik analyse vil være meget krevende i forhold til tidsbruken ved modellkjøringer og innhenting av data/informasjon. Simulering av enkeltregn er valgt fremfor simulering av lange kontinuerlige tidsserier grunnet tidsbegrensning og manglende data (modellen har blant annet ingen RDII-data og det vil bli problematisk å lage et riktig utgangspunkt (hotstart-fil) for den hydrologiske tilstanden i feltet ved modellkjøringer).

IVF-kurvene som benyttes er laget av Meteorologisk Institutt på bakgrunn av nedbørsmålinger fra Rovik i Sandnes i årene 1974-2008. Det er valgt IVF-kurver uten krav om sammenhengende nedbør, etter anbefalinger fra Meteorologisk Institutt (COWI 2010).



Figur 32: IVF-kurver, Rovik (Meteorologisk institutt 2012)

8.1 Konstruksjon av symmetriske hyetogram

Regnets varighet er en viktig faktor for at man skal få riktige verdier for tilrenning i ledningsnett. Dersom regnets varighet er kortere enn feltets konsentrasjonstid vil ikke delfeltene lengst borte fra målepunktet bidra med avrenning før regnets slutt og man vil ikke kunne beregne maksimal avrenning/tilrenning. Det lengste ledningsstrekket i modellen er omkring 2800 meter. Med en antatt hastighet på 1,5 m/s og en konsentrasjonstid for tilrenning til ledningsnett i hvert delfelt på 7 minutter gir dette en konsentrasjonstid for hele feltet på ca. 40 minutter:

$$\text{Konsentrasjonstid ledningsnett} = \frac{2800 \text{ m}}{\frac{1,5 \text{ m/s}}{60}} = 31 \text{ minutter}$$

$$\text{Total konsentrasjonstid} = 31 \text{ minutter} + 7 \text{ minutter} = 38 \text{ minutter}$$

På bakgrunn av dette er det valgt symmetriske regnhyetogram med 60 minutters varighet. Dette er også «vanlig varighet» for gjeldende beregninger (Køste & Hval 2011). Beregningssteget er 5 minutter, noe som antas å være passende. Kortere beregningssteg vil gi svært høye toppintensiteter (Holvik 2010).

De symmetriske regnhyetogrammene er konstruert etter metoden forklart av Lindholm et al. (2003). Nedenfor vises et eksempel på beregningsmetoden med et regn med 20 års gjentakintervall og 60 minutters varighet

Intensitet for ulike varigheter fra 10 – 60 minutter ble lest av IVF-kurve og tilhørende tabell. Verdiene for varighet 40 og 50 minutter er ikke oppgitt i tabellen, og er derfor interpolert mellom nærliggende varigheter (30, 45 og 60 minutters varighet). Følgende verdier ligger til grunn for konstruksjon av hyetogram med 20 års gjentakintervall og 60 minutters varighet:

Tabell 8: Verdier fra IVF-kurve

Varighet (min)	Intensitet (l/s·ha)
10	193,6
20	118,1
30	88,3
40	74,8
50	65,4
60	60,7

For å finne de ulike beregningsstegene gjøres følgende utregning:

$$I_{10} = 193,6 \frac{l}{s} * ha$$

$$I_{20} - I_{10} = \frac{118,1 * 20 - 193,6 * 10}{10} = 42,6 \frac{l}{s} * ha$$

$$I_{30} - I_{20} = \frac{88,3 * 30 - 118,2 * 20}{10} = 28,7 \frac{l}{s} * ha$$

$$I_{40} - I_{30} = \frac{74,8 * 40 - 88,3 * 30}{10} = 34,3 \frac{l}{s} * ha$$

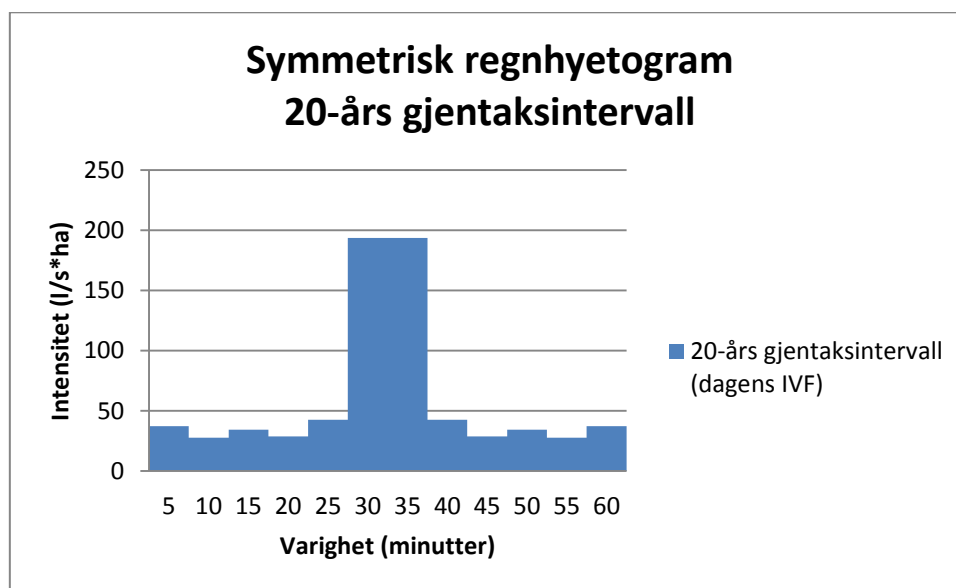
$$I_{50} - I_{40} = \frac{65,4 * 50 - 74,8 * 40}{10} = 27,8 \frac{l}{s} * ha$$

$$I_{60} - I_{50} = \frac{60,7 * 60 - 65,4 * 50}{10} = 37,2 \frac{l}{s} * ha$$

Dette gir følgende beregningssteg med tilhørende intensitet:

Tabell 9: Verdier for symmetrisk regnhyetogram

Varighet etter regnets start (min)	Intensitet (l/s·ha)
5	37,2
10	27,8
15	34,3
20	28,7
25	42,6
30	193,6
35	193,6
40	42,6
45	28,7
50	34,3
55	27,8
60	37,2



Figur 33: Symmetrisk regnhyetogram med 60 minutters varighet og 20 års gjentaksintervall

Alle konstruerte hyetogram som benyttes i studiet sees i vedlegg B.

8.2 Valg av klimafaktor:

I sin masteroppgave omhandlende klimaendringer har Holvik (2010) utviklet DCF for Sandnes for ulike årstider. Disse faktorene ble utviklet på bakgrunn av klimaframskrivninger (scenario A2 og B2) for Sola i perioden 2071-2100 og en tidsserie (kontrollserie) med 30 års varighet (1961-1990) utviklet på bakgrunn av følgende nedbørsmålinger:

- 15 år fra Rovik (1989-2003)
- 14 år fra Lye (1992, 1993 og 1996-2003)

- 1 år fra Hundvåg (1988)

DCF ble beregnet på bakgrunn av følgende, for en gitt sesong, et gitt år og scenario:

$$DCF = \frac{\text{Scenario volum}}{\text{Kontrollvolum}}$$

De ulike faktorene vises i figur 34. Disse faktorene ble implementert i de konstruerte nedbørsseriene for 2071-2100 ved at alle nedbørsverdier for det gitte år og den gitte sesong ble multiplisert med korresponderende faktor. Dette gav tidsserier med estimater for scenario A2 og B2.

Mean delta change factors					
	Winter	Spring	Summer	Autumn	Year
A2	1.59	1.32	0.92	1.03	1.22
B2	1.56	1.33	1.11	1.28	1.32

Figur 34: Tabell hentet fra Holvik (2010)

I tillegg til å kjøre simuleringer med lengre tidsserier ble det av Holvik (2010) konstruert symmetriske regnhyetogram med 60 minutters varighet og 100 års gjentakintervall for simulering av enkelthendelser. Med utgangspunkt i et symmetrisk regnhyetogram (60 minutters varighet, 100 års gjentakintervall) ble det konstruert symmetriske regnhyetogram for A2, B2- og kontrollscenarioet, som vist nedenfor:

Scenario	Rainfall volume T =100 years d= 60 min.	Box rain intensity	Hyetograph peak intensity	Percentage increase from CONTROL
	<i>mm</i>	<i>l/s*ha</i>	<i>l/s*ha</i>	
A2	45	126.23	828.71	61 %
B2	50	139.16	913.58	77 %
CONTROL	28	78.64	516.29	

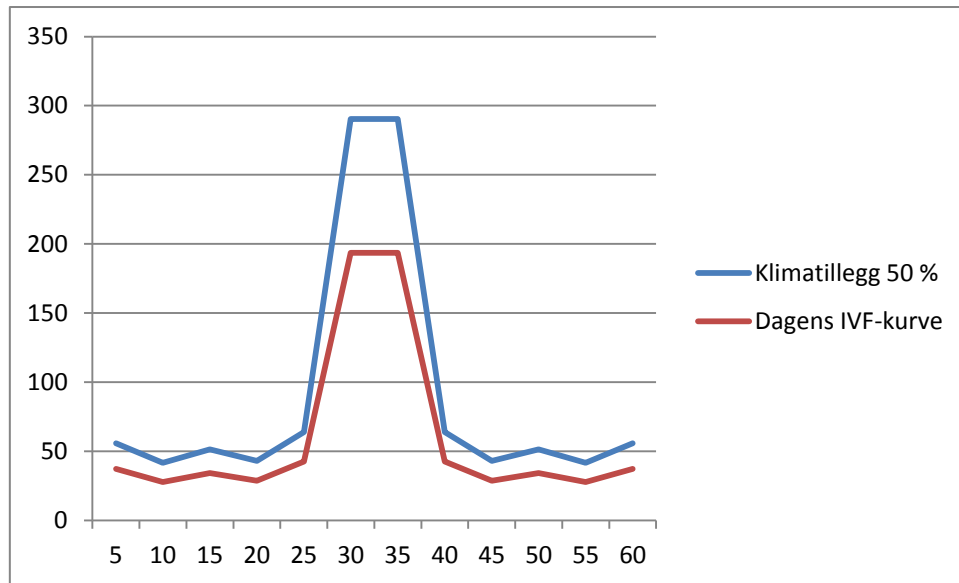
Figur 35: Tabell hentet fra Holvik (Holvik 2010)

Holvik estimerte meget høye økninger på henholdsvis 61 % og 77 % i hyetografens toppintensitet i henholdsvis scenario A2 og B2 i forhold til kontrollserien²⁴. Kontrollserien var en tidskjøring med nedbørsdata fra 1961-1990. Det bemerkes at Holvik i tabellene vist i figur 34 og 35 presenterer en høyere DCF, og større prosentvis intensitetsøkning, i scenario B2 enn A2. Med bakgrunn i litteraturen, hvor scenario A2 presenteres som et «verre» klimascenario, ville man muligens forventet det motsatte. Resultatene antas i det minste å gi en indikasjon på forventet økning i intensitet.

I denne oppgaven er det på bakgrunn av Holviks arbeid, nedbørsframskrivninger for Vestlandet, anbefalinger fra DANVA, informasjon om fremtidige anbefalinger fra Norsk Vann og personlige anbefalinger fra Lindholm (Lindholm 2012b) valgt et klimatillegg på 50

²⁴ Som Holvik påpeker i oppgaven er det flere usikkerhetsmomenter knyttet til disse estimatene.

% . Det vil si at dagens nedbørintensiteter multipliseres med en klimafaktor på 1,5 for å simulere antatt økning i nedbørens intensitet, som vist i figur 36 nedenfor:



Figur 36: Regnhyetogram, 20 års gjentaksintervall, dagens intensitet og 50 % klimatillegg

Intensiteten tilknyttet regn med 20 års gjentaksintervall og 50 % klimatillegg er større enn dagens intensiteter for regn med 100 års gjentaksintervall.

8.3 Forutsetninger, antagelser og innstillinger ved simulering og hydraulisk analyse

8.3.1 Tid-areal metoden

I simuleringene blir bare tid-areal metoden i MOUSE benyttet. Dette grunnet manglende RDII-data og tidsbegrensinger i forhold til langtidssimuleringer. Avrenningen antas å være lineær og delfeltene antas å være rektangulært. Da delfeltene er små, er det rimelig å anta at de er tilnærmet rektangulære. Det vil være meget tidskrevende og utfordrende å klassifisere og endre innstillinger for hvert enkelt delfelt i modellen (Haga 2011).

8.3.2 Kumegenskaper

I programmet er det flere mulige innstillinger for hvordan kummene skal oppføre seg ved simulering av regn («spilling type»). Standard innstilling i modellen er *normal*, og vil benyttes i studiet. I denne innstillingen vil det ved oppstuvning over topp kum dannes et «magasin» med et overflateareal som gradvis øker i størrelse opp til 1000 ganger større enn kummens areal. Vannet lagres i dette magasinet og vil renne tilbake i kummen når vannivået i nettet synker. Den praktiske betydningen av dette er at vannet holdes i modellen gjennom hele beregningen, og ikke forsvinner ut av beregningen (DHI a; Haga 2011).

De andre innstillingene for kummenes oppførsel er *sealed* og *spilling*. Når kummene er *sealed* vil det ikke renne noe vann ut av kummene, og det vil bygge seg opp et trykk i systemet. Når kuminnstillingene defineres som *spilling* vil vann som går over topp kum renne ut av systemet og ikke komme tilbake igjen.

8.3.3 Tidssteg

Tidssteget i beregningene angir hvor lang tid det går mellom hver beregningssekvens, eller iterasjon. Jo mindre beregningssteg, jo mer stabil beregning får man. Modellen kan selv velge tidssteg og kan også veksle mellom lave og høye tidssteg. Tidssteget er i modellsimuleringene satt til Min: 3, Max: 3, Factor: 1. Dette tilsier at modellen tvinges til å kjøre tidssteg 3 hele tiden (Lindholm 2012).

8.3.4 Oversvømmelse fra kum

Urban oversvømmelse med mulige skader på bygninger, infrastruktur og annet vil forårsakes av overvannsnett, dersom det oppstår oppstuvinger i ledningsnett av en slik størrelse at vannets energilinje står over terreng høyde. Vann vil da flomme opp av kummer og/eller gatesluk og ut på området rundt. Det antas at markoverflaten vil være mettet med vann og at det som flommer ut av kummen vil renne av på overflaten og ikke infiltreres. Ved vurdering av separate ledningsnett er det vanlig å vurdere markoverflaten som kritisk nivå for overvannsoversvømmelse (Lindholm 2012c). Oversvømmelse fra kum vises som et eget resultatlag i modellen, hvor det etter egendefinerte nivåer er bestemt at de kummer som har en oversvømmelse over kummens topp («above manhole level») vises med rød prikk.

Da det kun kjøres kortvarige regn (60 minutters varighet) i analysen utelates kummer med oppstuvning over 20 cm under grunnmurens nivå²⁵, som muligens kunne gitt skader til bygningers fundament eller kjellere ved inntrengning i bygning. Dette fordi slike skader gjerne krever at vannet står rundt bygningen over en lengre periode, noe som antas å ikke være tilfelle ved slike regn som simuleres. Det utelates også kummer med oppstuvning over 90 cm topp rør²⁶, da det antas at overvannsnett ikke har noen direkte kobling til åpne sluk i kjellere.

8.3.5 Antall antatt skadede hus/bygninger

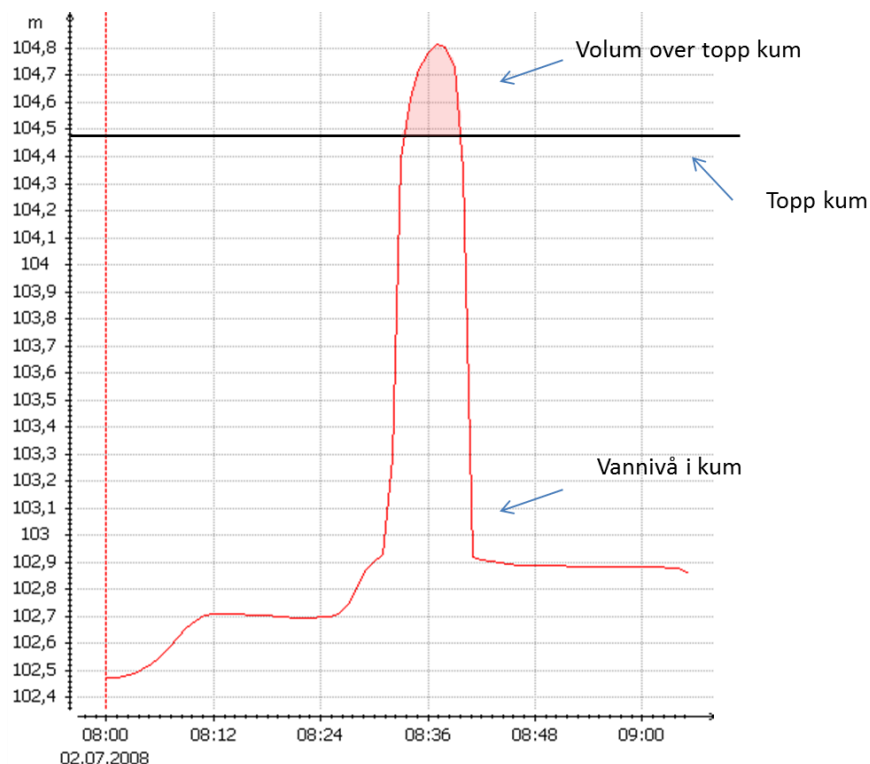
Det antas at skade på hus og bygninger kan forekomme når vannet når markoverflaten og kan renne fritt etter overflatens topografi.

²⁵ Mye brukt referansenivå i forbindelse med inntrenging av vann gjennom utettheter i grunnmur/fundament.

²⁶ Mye brukt referansenivå i forbindelse med inntrenging av vann gjennom avløpsrør som er direkte koblet til åpne sluk etc. i kjellere. Mest vanlig i forbindelse med vurdering av fellessystem.

Da Sandnes kommune ikke har oversikt over eventuelle tidligere skader eller hendelser må antall skadehendelser estimeres ved hjelp av skjønn. Det er gjort en enkel forutsetning for estimering av skadeomfang hvor det antas at 50 % av de bygninger som ligger nærmere enn 50 meter en kum hvor oversvømmelse inntreffer, kan få skader som følge av vanninntrenging gjennom dører, garasjenedfart, kjellerinnganger etc. dersom topografien og flomvolum tillater det. Det antas, etter samtale med Oddvar Lindholm (Lindholm 2012e), at et flomvolum på 3000 l gir skade på 1 hus, 6000 l gir skade på 2 hus etc.

For å finne oversvømmelsesvolum ut av kum benyttes resultatkurver som viser vannivå i kum (manhole level). Fra denne kurven beregnes volumet over kummens topp, som vist i figur 37 nedenfor:



Figur 37: Beregning av oversvømmelsesvolum fra kum/sluk

8.4 Simulering av klimatilpasningstiltak

Som tidligere nevnt er målet med analysen å finne klimatilpasningstiltak som effektivt avbøter klimaendringenes negative konsekvens og bringer skadenivået ned til et nivå tilnærmet dagens skadenivå. Resultatene fra simulering av nedbørshendelser med dagens regnintensitet representerer dagens skadenivå. Disse sammenlignes med resultatene fra simulering med klimajustert regnintensitet. Ved simulering av de ulike tiltakene etterstrebes det at volum ut av kummer i modellen ved 50 % klimatillegg skal være tilnærmet likt som volum ut av kummer i modellen ved dagens regnintensiteter for de ulike gjentakintervall.

De ulike klimatilpasningstiltakene som skal simuleres er:

- Økning av ledningsdiameter
- Fordrøyning av overvann på overflaten
- Frakopling og infiltrasjon av overvann fra takarealer

Da deler av Bogafjellfeltet ikke er egnet for infiltrasjon (som vist i figur 28) vil to tiltakskombinasjoner simuleres for å bringe skadenivået tilbake til dagens nivå:

- Frakopling og infiltrasjon av takvann i deler av feltet kombinert med økning av ledningsdiameter i andre deler av feltet
- Frakopling og infiltrasjon av takvann i deler av feltet kombinert med fordrøyning av overvann på overflaten i andre deler av feltet

Det er ett konvensjonelt tiltak (økning av ledningsdiameter), og to åpne og lokale løsninger, som simuleres. Den nøyaktige utformingen på de åpne og lokale løsningene tas det ikke hensyn til, men det fokuseres på de hydrauliske prinsippene knyttet til infiltrasjon og fordrøyning (jfr. treleddsstrategien og de ulike kategorier åpne løsninger beskrevet i kapittel 5.3). For å beskrive løsningenes eventuelle utforming ville det krevd mer inngående kunnskap om blant annet feltets topografi og foreliggende planer for arealutnyttelse.

8.4.1 Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

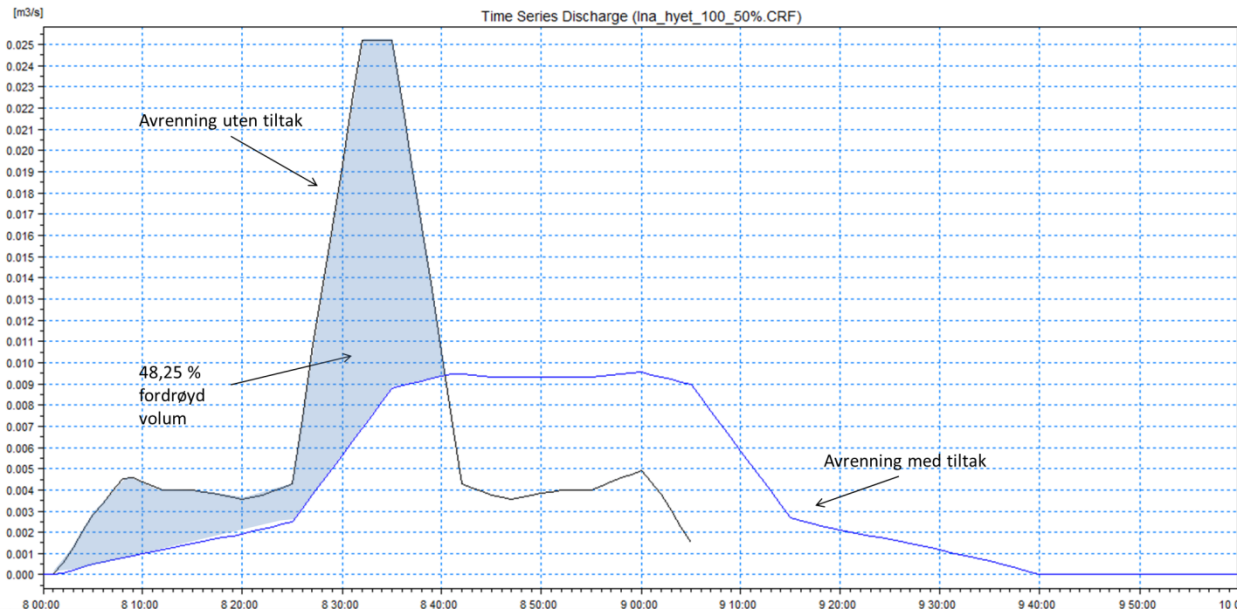
Simulering av økt ledningsdiameter er et konvensjonelt tiltak. Tiltaket simuleres ved at ledningsdiameterer rundt og eventuelt oppstrøms/nedstrøms kummer med oversvømmelse økes slik at oversvømmelsens volum føres tilbake til tilnærmet volum ved dagens regnintensiteter ved 100-års regn. Det etterstrebes å øke kun et minimalt antall nødvendige ledningsdiameterer og også øke diameteren så lite som mulig. Dette slik at tiltakets kostnader ikke overvurderes i forhold til hva det ville vært i realiteten. Totalt økes 50 ledningers diameter. For å finne total ledningslengde som endres summeres de enkelte lengdene. De endrede ledninger vises i figur 45 i kapittel 8.5.2 og mer detaljert i vedlegg D.

8.4.2 Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Fordrøyning av overvann på overflaten er et åpent og lokalt tiltak som forsinkes avrenningen på overflaten og gir lengre tilrenningstid til ledningsnett. Da det kun er avrenning fra tette flater til ledningsnett i modellen vil det være avrenningen fra hus og veg som skal fordrøyres. Dette tiltaket simuleres ved å øke konsentrasjonstiden til utvalgte delfelt fra 7 til 40 minutter. De utvalgte delfelt er valgt ut fra deres beliggenhet rundt eller oppstrøms kummer/sluk som får oversvømmelse ved simulering av 100-års regn med 50 % klimatillegg. Det etterstrebes å endre konsentrasjonstiden (legge inn fordrøyning) i et minimalt antall delfelt.

Totalt endres 88 delfelt, med et samlet avrenningsareal tette flater (hus og veg) på ca 43 000 m², som vist i figur 47 og mer detaljert i vedlegg E.

Som vist i figur 38, ser vi at når konsentrasjonstiden i feltet økes så reduseres flomtoppen i størrelse i tillegg til at den forskyves i tid.



Figur 38: Beregning av fordrøyningsvolum

Fordrøyd volum finnes ved å sammenligne avrenning fra de aktuelle delfeltene ved 100-års regn med 50 % klimatillegg uten fordrøyning på overflaten med avrenning ved samme regnhendelse, men hvor konsentrasjonstiden i delfeltene er økt. Avrenningskurvene, uten tiltak og med tiltak, kan antas å være henholdsvis innløps- og utløpskurvene til et fordrøyningsmagasin uten justert videreført vannmengde. Denne antagelsen gjør at vi kan bruke kurvene til å finne ut hvor mye som «fordrøyes» ved økning av konsentrasjonstiden fra 7 til 40 minutter.

I løpet av volumberegninger viste det seg at hvert delfelt fordrøyer omtrent 48,25 % av avrenningen ved 100-års regn med 50 % klimatillegg uten tiltak, og fordrøyd volum ble da beregnet ved å finne 48,25 % av avrenningsvolumet til de enkelte delfelt ved dette regnet. Avrenningsvolumet hentes ut fra resultatfilen som dannes ved modellkjøring av regn og avrenning (catchment computation). Totalt fordrøyd volum ble funnet ved å summere fordrøyd volum for hvert delfelt.

8.4.3 Fremgangsmåte ved simulering av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Frakopling av overvann fra takarealer er et lokalt klimatilpasningstiltak hvor man fjerner avrenningen fra tak til ledningsnett, og infiltrerer/fordrøyer vannet ved kilden. Her er det heller ikke nevnt noen spesifikk utforming av tiltaket, og det fokuseres på det hydrauliske

prinsippet. Det antas at vannet som fjernes infiltreres ved kilden, og det er derfor kun frakoblet takvann der hvor grunnforholdene egnes til dette (se figur 28, kapittel 7.2.2). Tiltaket simuleres ved at bygningsfaktoren (Building Factor) i Rosie endres fra 1 til 0. Når bygningsfaktoren er 1 antas det at alt vann som genereres på bygningsarealet renner til ledningsnett. Når faktoren settes til 0 antas det at alt vannet fjernes fra ledningsnett.

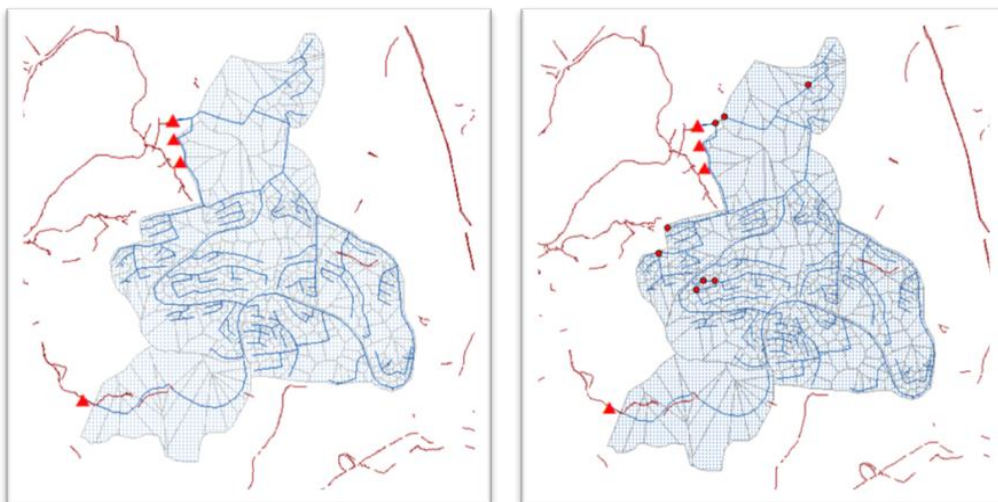
De to resterende klimatilpasningstiltakene er en kombinasjon av *frakopling av overvann fra takarealer* og *økt ledningsdiameter* eller *fordrøyning av overvann på overflaten* der hvor feltet er lite egnet for infiltrasjon. For mer detaljer omkring alle tre tiltakene omhandlende frakopling av overvann fra takarealer vises det til figur 49, figur 51, figur 53 og vedlegg F, G og H.

8.5 Resultater fra hydraulisk analyse

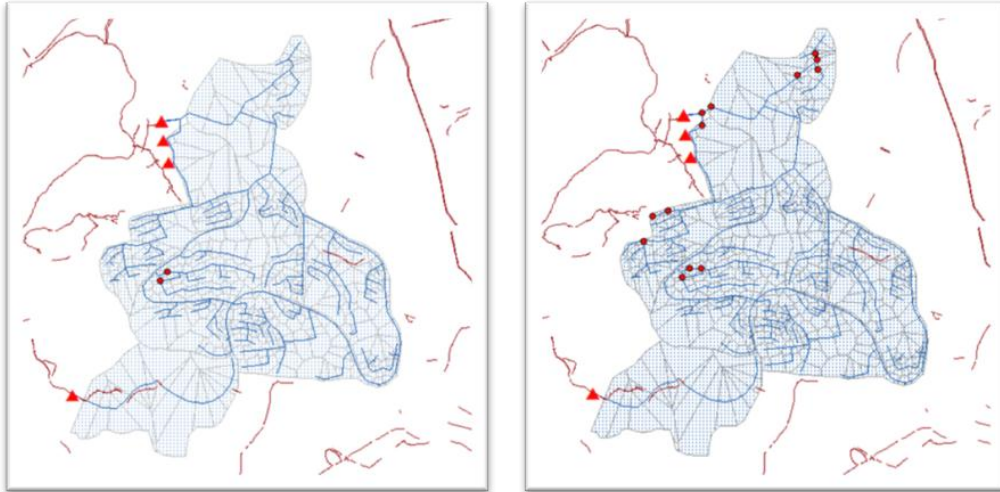
8.5.1 Sammenligning av systemets respons ved dagens regnintensiteter og klimajusterte regnintensiteter

Nedenfor presenteres resultatene til første del av den hydrauliske analysen som viser responsen til det opprinnelige overvannsnett (uten klimatilpasningstiltak) av regn med gjentaksintervall 5, 10, 20, 50, og 100 år, med og uten klimatillegg. Alle regn har en varighet på 60 minutter. De symmetriske regnhyetogrammene representerer dagens intensiteter ved de ulike gjentaksintervall. For å se klimaendringenes mulige effekt er alle regnene også kjørt med et tillegg på 50 %.

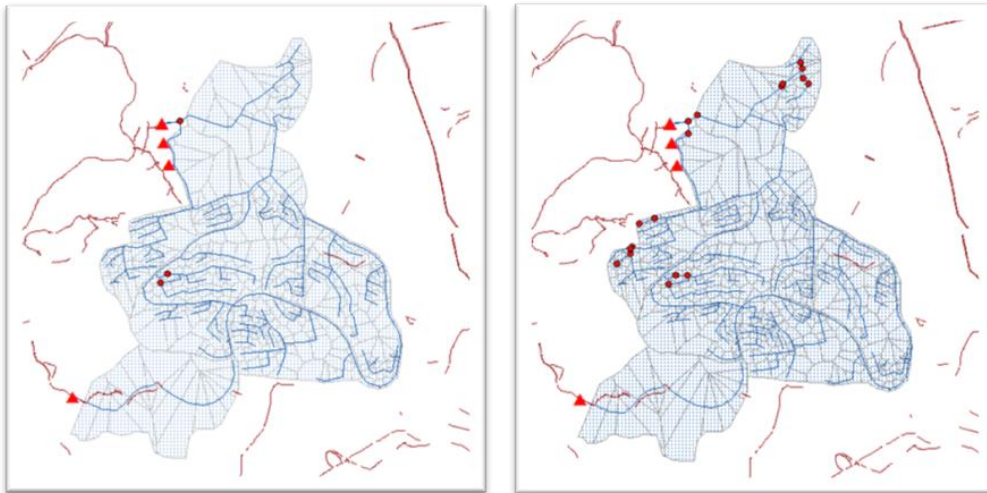
I figur 39 – 43 vises antall oversvømmelser fra kummer/sluk som ifølge modellen oppstår ved de ulike gjentaksintervallene. Disse er merket med rødt.



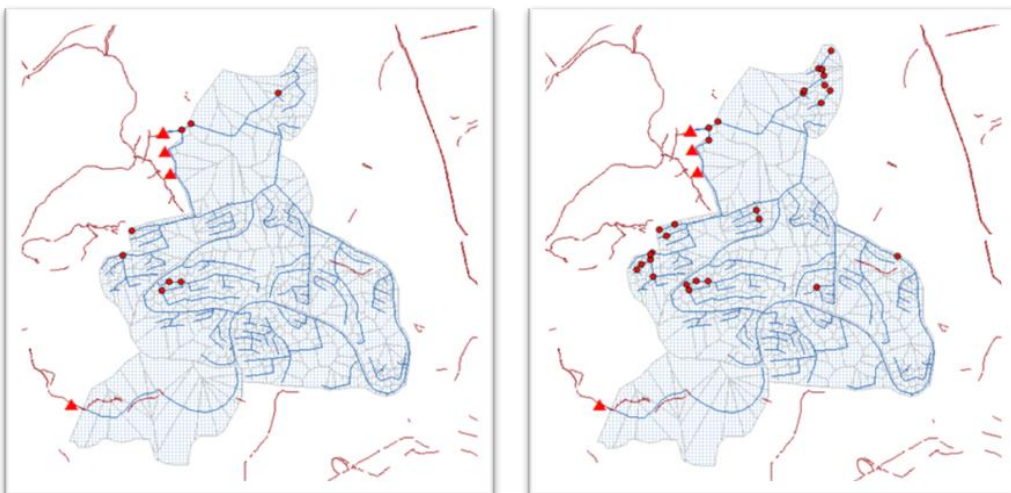
Figur 39: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 5 års gjentaksintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %



Figur 40: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 10 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %



Figur 41: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 20 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %



Figur 42: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 50 års gjentakintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %



Figur 43: Simulering symmetrisk regnhyetogram med 100 års gjentaksintervall og 60 minutters varighet. Til venstre; dagens IVF-verdier, til høyre: Klimatillegg 50 %

I tabell 10 vises antall oversvømmelser fra kum for regn ved ulike gjentaksintervall, med verdier fra dagens IVF-kurver og regn justert for klimaendringer med 50 % økte intensiteter, som vist ved røde merker på figur 39 – 43. Som vist øker antall oversvømmelser ved 50 % klimatillegg med større sprang mellom gjentaksintervallene, enn antall oversvømmelser ved dagens regnintensiteter. Fra 50-års gjentaksintervall til 100-års gjentaksintervall med dagens intensiteter øker antall oversvømmelser med 1, mens økningen oversvømmelser mellom samme gjentaksintervall med 50 % klimatillegg er 18. Ved 100-års regn med 50 % klimatillegg er oversvømmelsene over 5 ganger flere enn ved samme gjentaksintervall med dagens intensiteter.

Tabell 10: Sammenligning av antall oversvømmelser ved dagens regnintensiteter og med 50 % klimatillegg

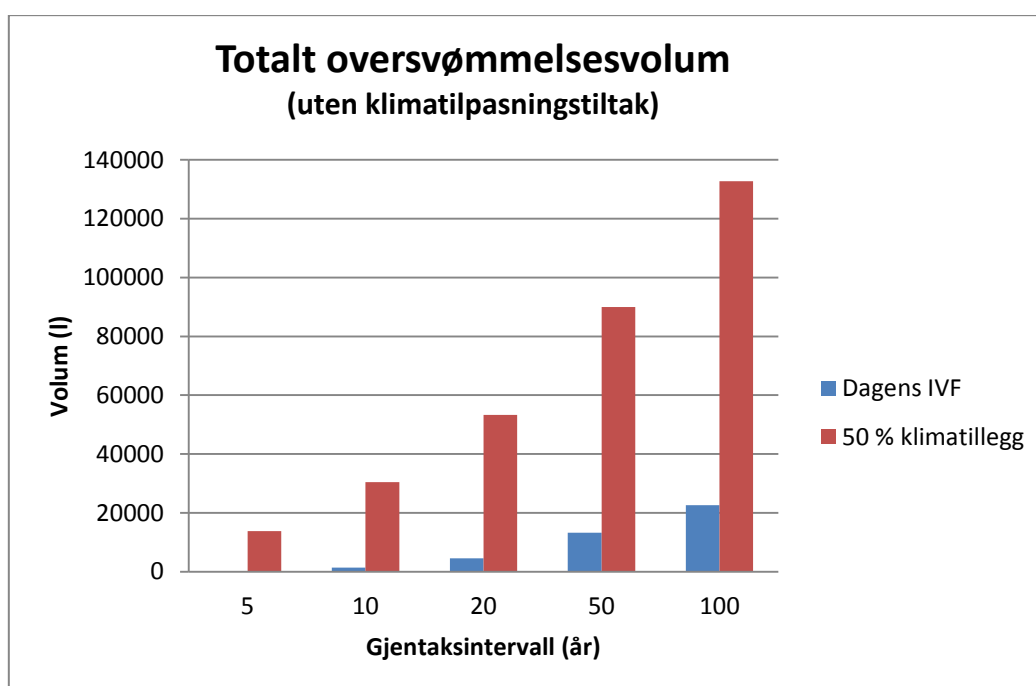
Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)
5	0	8
10	2	13
20	3	18
50	8	29
100	9	47

For mer informasjon om oversvømmelse fra ledningsnett på Bogafjell vises det til vedlegg D hvor alle kummer med oversvømmelsens volum ved ulike gjentaksintervall er nærmere beskrevet. I masteroppgaven til Haga (2011) finner man også mer informasjon om resultater fra hans simuleringer av både historiske og konstruerte regn.

Tabell 11: Sammenligning av skadenivå ved dagens regnintensiteter og med 50 % klimatillegg

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)
5	0	2
10	0	4
20	1	6
50	2	12
100	3	18

Antall antatt skadede bygninger, vist i tabell 11, øker også ved økte regnintensiteter. Antall skadede hus er ved 100-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg 6 ganger større enn ved referansesituasjonen. I figur 44 vises det totale oversvømmelsesvolum fra kummene som oversvømmes ved ulike gjentaksintervall. De røde søylene representerer et klimascenario hvor nedbøren er økt med 50 %, mens de blå søylene representerer regn ved intensiteter hentet fra dagens IVF-kurver. Som forventet øker oversvømmelsesvolumet kraftig ved regnhendelser med 50 % klimatillegg.

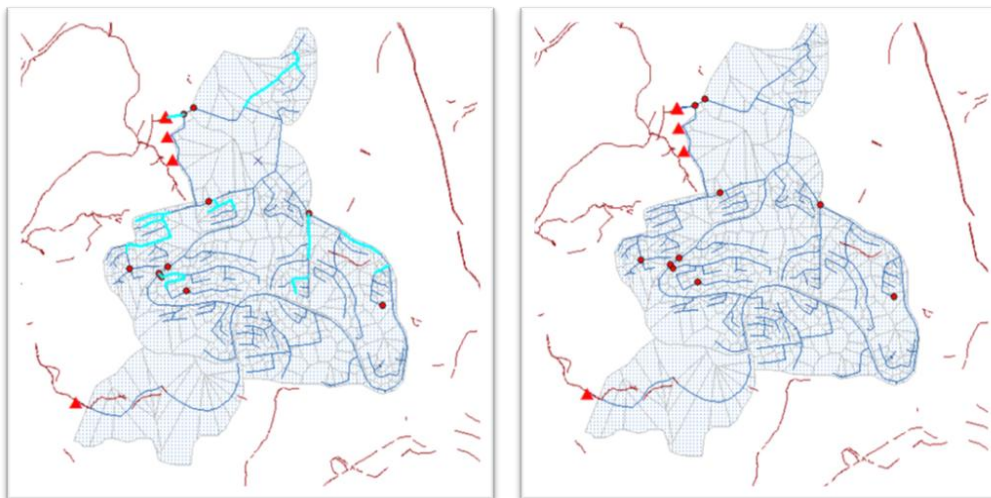


Figur 44: Totalt oversvømmelsesvolum ved ulike gjentaksintervall, uten klimatilpasningstiltak

8.5.2 Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Nedenfor presenteres resultatene fra hydraulisk analyse/modellsimulering av økte ledningsdiameterer som klimatilpasningstiltak.

I figur 45 vises de endrede ledninger og antall kummer med oversvømmelse etter at ledningsdiameteren er endret, ved et klimajustert 100-års regn. Oversvømmede kummer/sluk vises med rød prikk. Total ledningslengde som endres er 1906 m.



Figur 45: Ledninger med endret diameter og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg

I tabell 12 vises sammenligningen av antall oversvømmelser ved dagens regnintensiteter uten klimatilpasningstiltak (referansesituasjon) og ved klimajusterte regnintensiteter med og uten klimatilpasningstiltak. I tabell 13 vises antall antatt skadede hus/bygninger for samme situasjoner som ovenfor.

Tabell 12: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg, diameterøkning)
5	0	8	0
10	2	13	0
20	3	18	2
50	8	29	5
100	9	47	9

Tabell 12 viser at antall oversvømmelser ved 100-års gjentaksintervall er det samme med 50 % klimatillegg og klimatilpasningstiltak som ved dagens regnintensiteter, mens ved de andre gjentaksintervallene er antall oversvømmelser noe under referansenivået.

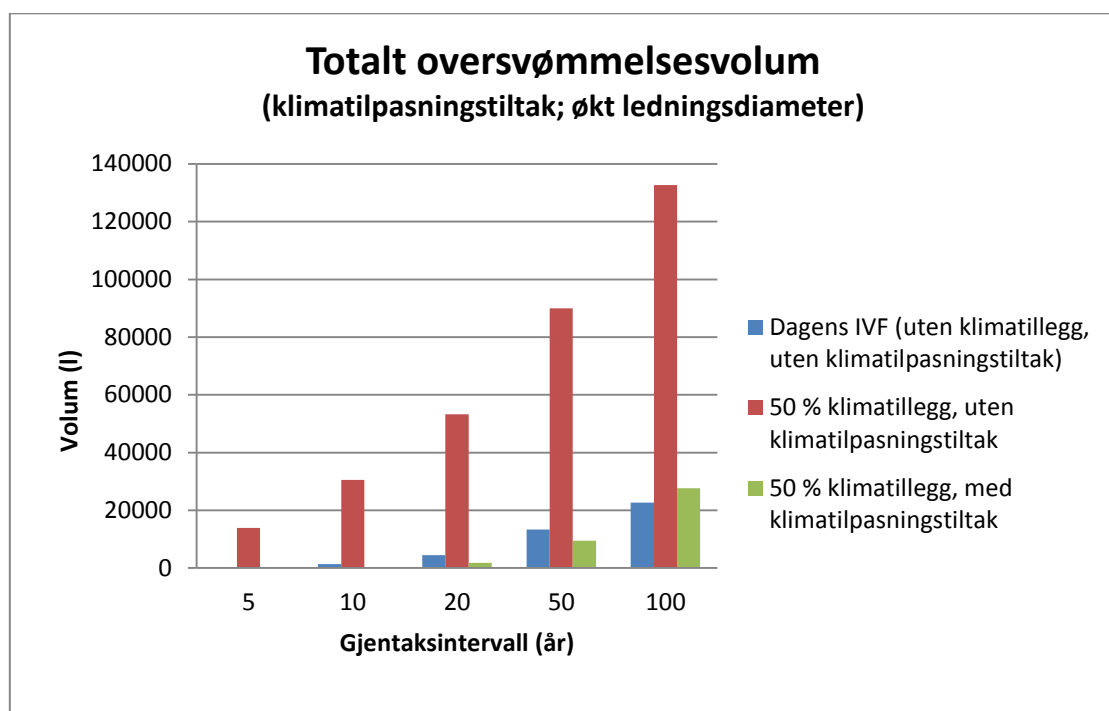
Tabell 13: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, diameterøkning)
5	0	2	0
10	0	4	0
20	1	6	0
50	2	12	1
100	3	18	2

Som vist i tabell 13 er skadenivået ved 50 % klimatillegg og klimatilpasningstiltak noe undervurdert i forhold til antall skadede bygninger ved referansesituasjonen. Som vist i

vedlegg D er det andre kummer som oversvømmes etter at tiltaket er innført, noe som gir et litt annerledes skadebilde.

I figur 46 vises det totale oversvømmelsesvolum ved ulike gjentaksintervall ved de ulike situasjonene. De røde søylene viser oversvømmelsesvolum ved økte regnintensiteter, de blå søylene viser oversvømmelsesvolum ved dagens intensiteter, mens de grønne søylene viser oversvømmelsesvolum ved økte regnintensiteter med gjennomført klimatilpasningstiltak. Det er ønskelig at de grønne og de blå søylene skal vise tilnærmet samme oversvømmelsesvolum, da målet med tiltaket er å få skadenivået ned til dagens nivå. Som også vist i tabell 12 og 13 er tiltaket noe mer effektivt ved lavere gjentaksintervall. Dette gjør at det totale oversvømmelsesvolumet er noe mindre ved klimajusterte regnhendelser og klimatilpasningstiltak enn referansesituasjonen.



Figur 46: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

8.5.3 Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

I dette underkapittel presenteres resultatene fra simuleringen av *fordrøyning av overvann på overflaten*. Totalt fordrøyd volum er rett under 825 m³.

I figur 47 vises delfeltene hvor konsentrasjonstiden er endret fra 7 til 40 minutter og antall oversvømmelser ved simulering av tiltaket med klimajustert 100-års regn.



Figur 47: Delfelt med endret konsentrasjonstid og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg

I tabell 14 vises en sammenligning av antall oversvømmelser ved dagens regnintensiteter uten klimatilpasningstiltak (referansesituasjon) og ved klimajusterte regnintensiteter med og uten klimatilpasningstiltak. I tabell 15 vises antall antatt skadede bygninger for samme situasjoner som nevnt ovenfor.

Tabell 14: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg, fordrøyning)
5	0	8	1
10	2	13	2
20	3	18	3
50	8	29	6
100	9	47	14

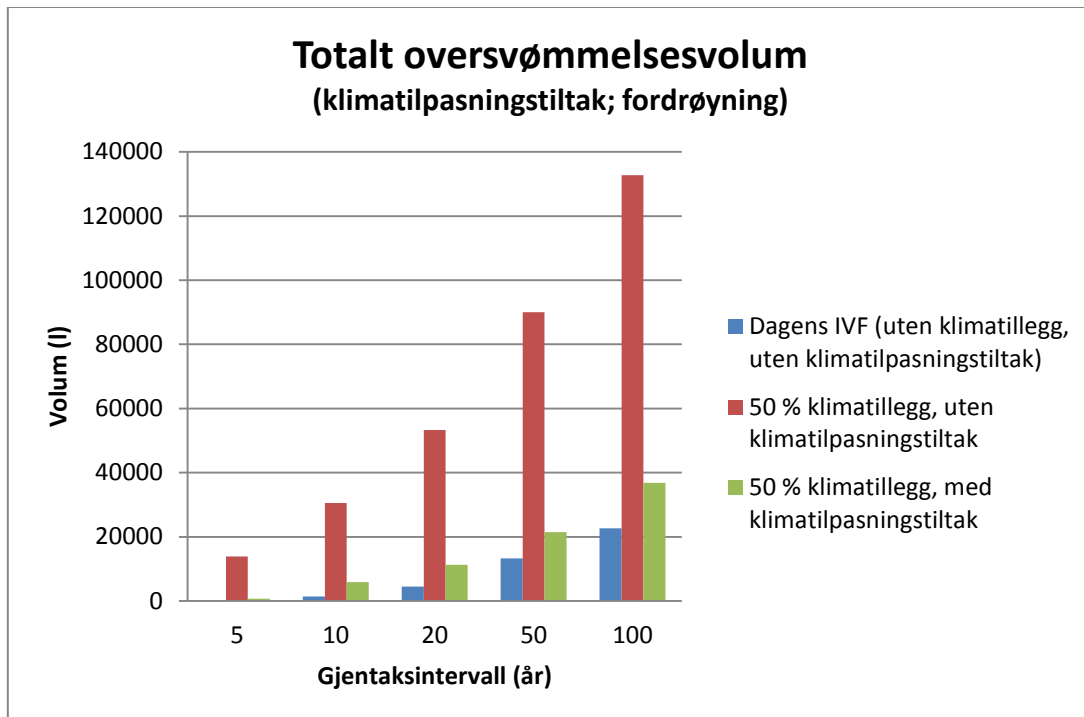
Resultatene presentert i tabellen viser at tiltaket ikke får antall oversvømmelser helt ned til referansesituasjonens nivå ved gjentaksintervall 100, mens det ved de andre gjentaksintervallene er tilnærmet samme antall oversvømmelser.

Tabell 15: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygnigner (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, fordrøyning)
5	0	2	0
10	0	4	0
20	1	6	0
50	2	12	0
100	3	18	2

I tabell 15 vises det at antall skadede bygninger er, som ved forrige tiltak lavere ved alle gjentaksintervall. Tiltaket er mer effektivt ved lavere gjentaksintervall.

I figur 48 vises totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak sammenlignet med referansesituasjonen ved dagens regnintensiteter og uten klimatilpasningstiltak. De blå søylene representerer referansesituasjonen, de røde søylene representerer en situasjon med 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, og de grønne søylene viser oversvømmelsesvolumet ved gjennomført klimatilpasningstiltak i et klimascenario med 50 % klimatillegg. Som vist i figuren ser vi at det totale oversvømmelsesvolumet med klimatilpasningstiltak er noe større enn referansesituasjonen ved alle simulerte gjentaksintervall.



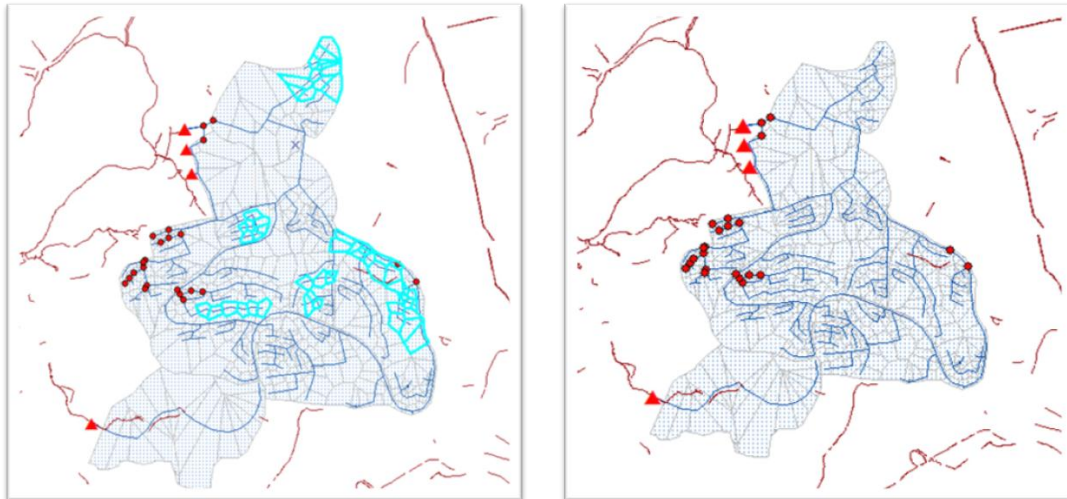
Figur 48: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Vedlegg E viser oversvømmelsesvolum ved 100-års gjentaksintervall i de ulike situasjonene. Det er i stor grad kummene ved utløpet av feltet (Node_1 og 17113) som preges av særs store oversvømmelsesvolum. Da det ikke er noen bygninger i nærheten av disse kummene får det store oversvømmelsesvolumet ingen virkning på skadenivået.

8.5.4 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Nedenfor vil resultatene knyttet til *frakopling av overvann fra takflater* representeres. Som tidligere vist er det deler av Bogafjell med grunnforhold som gir lite egnede infiltrasjonsforhold. Derfor er deler av feltet utelatt i dette tiltaket, og disse deler vil få andre klimatilpasningstiltak, som vist i de to neste underkapitler.

I figur 49 vises delfelt hvor takflater er koblet fra, og antall oversvømmelser ved simulering av 100-års regn med 50 % klimatillegg. Totalt areal frakoblede takflater utgjør 16 213 m².



Figur 49: Delfelt med frakoblet takvann og antall oversvømmelse i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg

I tabell 16 og 17 vises henholdsvis antall oversvømmelser og antall antatt skadede bygninger i referansesituasjonen, samt med og uten klimatilpasningstiltak ved klimajusterte regn.

Tabell 16: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg, frakobling takflater)
5	0	8	4
10	2	13	7
20	3	18	12
50	8	29	16
100	9	47	23

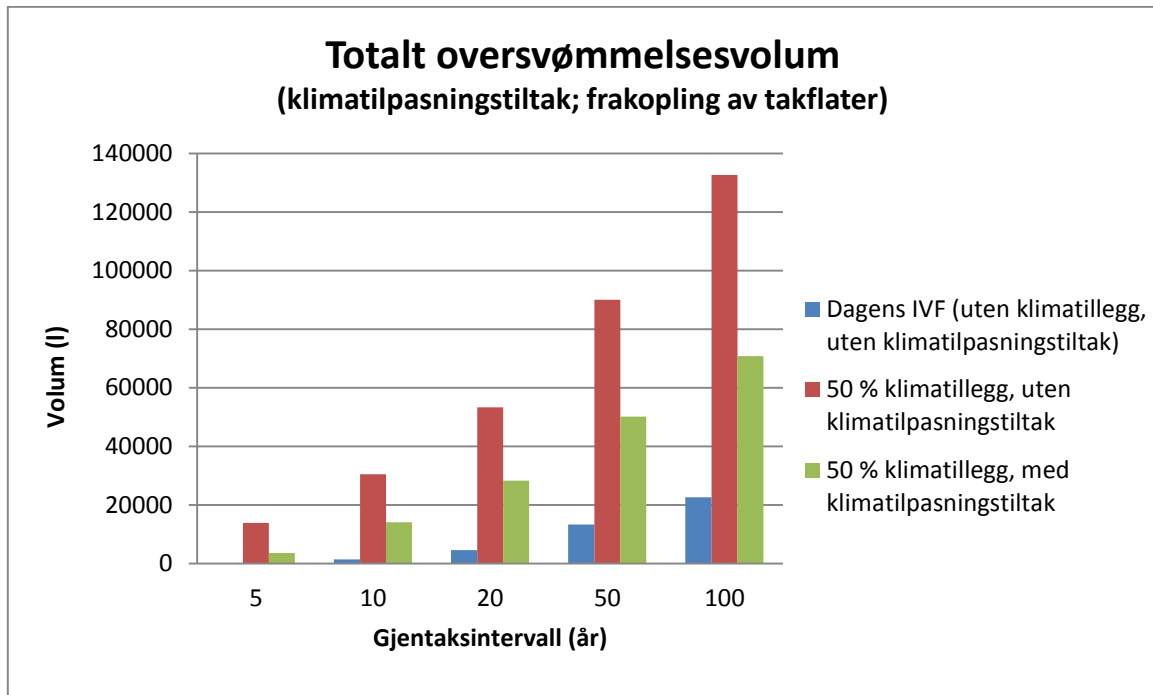
Som vist i tabell 16 vil ikke tiltaket få antall oversvømmelser ned på et akseptabelt nivå. Dette er som forventet da tiltaket kun dekker halve feltet, og da ikke de delene av feltet hvor det er kummer som oftest får oversvømmelser (se vedlegg C, kummer 100, 419, 420, 15579, 5097, 2330).

Tabell 17: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakobling takflater)
5	0	2	0
10	0	4	1
20	1	6	2
50	2	12	5
100	3	18	9

Resultatene presentert i tabell 17 viser også at tiltaket alene ikke er effektivt i forhold til å få skadenivået ned på dagens nivå ved et 100-års gjentaksintervall.

I figur 50 vises totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak, sammenlignet med referansesituasjonen ved dagens regnintensiteter og uten klimatilpasningstiltak. De blå søylene representerer referansesituasjonen, de røde søylene representerer en situasjon med 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, og de grønne søylene viser oversvømmelsesvolumet ved gjennomført klimatilpasningstiltak i et klimascenario med 50 % klimatillegg.

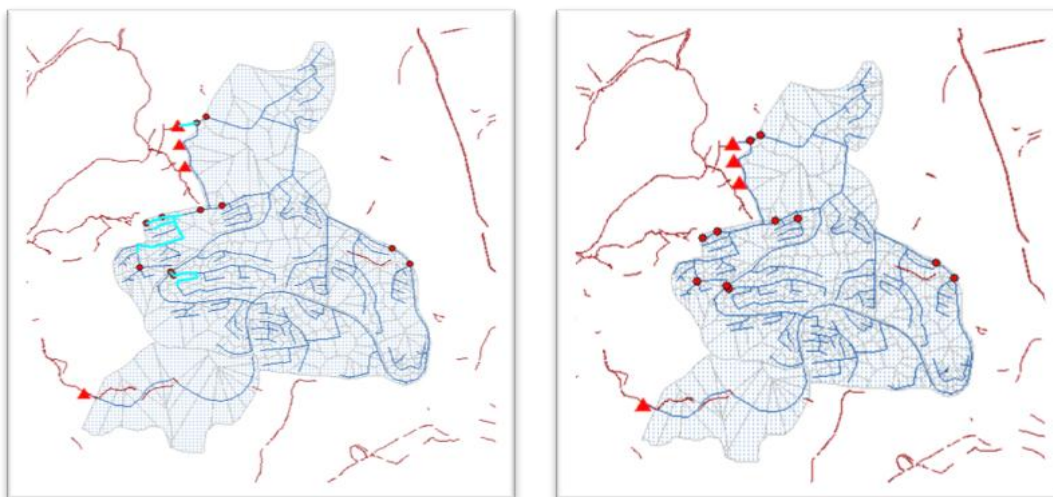


Figur 50: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Sammenligningen av det totale oversvømmelsesvolumet, vist i figur 50, gir oss samme bilde av tiltakets effektivitet som resultatene presentert i tabell 16 og 17. Tiltaket alene er ikke effektivt nok til å redusere skadenivået fra 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak ned til referansenivå. Som vist i figur 50 vil frakoplingen av takvann halvere det totale oversvømmelsesvolumet ved de ulike gjentaksintervall.

8.5.5 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

I dette tiltaket frakobles takvann fra de samme delfeltene som vist i figur 49. Da dette tiltaket ikke er gjennomførbart over hele Bogafjell legges økte ledningsdiameterer inn som tiltak i de deler av feltet som er lite egnet for infiltrasjon, som vist i figur 51. Den totale lengden på ledningene som endres er 822 m.



Figur 51: Ledninger med endret diameter ved frakopling av takvann og antall oversvømmelser i kummer ved 100-års regn med 50 % klimatillegg

I tabell 18 og 19 vises henholdsvis antall oversvømmelser og antall antatt skadede bygninger i referansesituasjonen, samt med og uten klimatilpasningstiltak ved klimajusterte regn.

Tabell 18: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

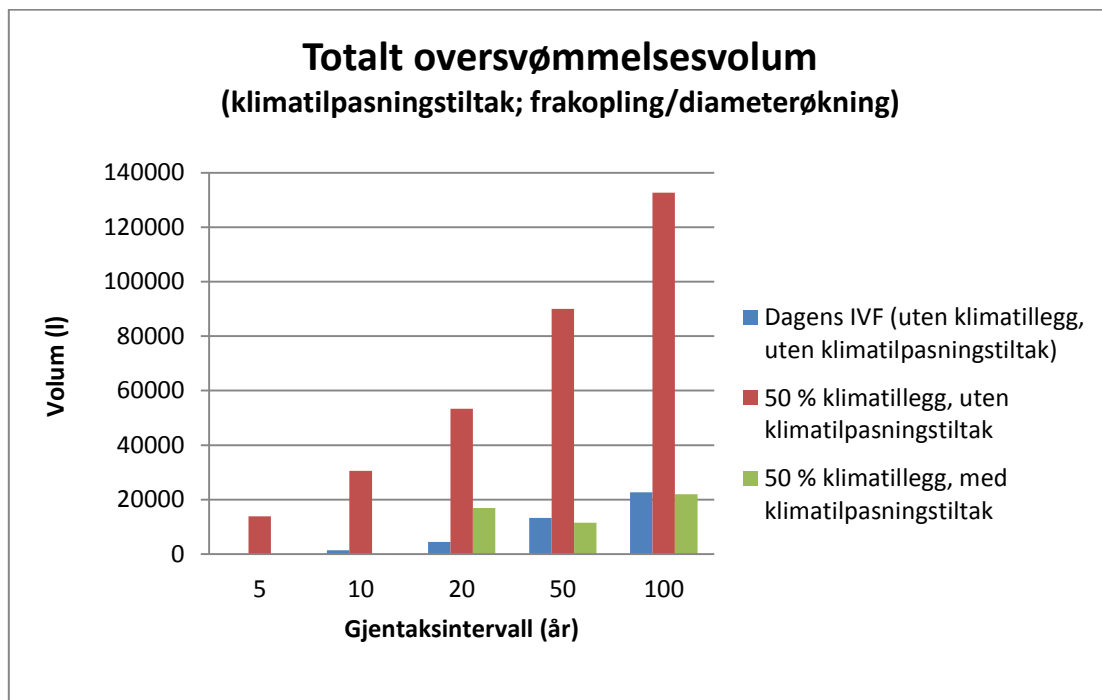
Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg, frakopling/diameterøkning)
5	0	8	0
10	2	13	1
20	3	18	4
50	8	29	4
100	9	47	10

Frakopling av overvann fra takarealer, kombinert med økte ledningsdiameter i de deler av feltet med lav infiltrasjonskapasitet, fungerer godt som avbøting av klimaendringenes negative konsekvens på ledningsnettet. Dette vises i tabell 18, hvor antall oversvømmelser ved 100-års gjentaksintervall er på tilnærmet samme nivå ved gjennomført tiltak som referansesituasjonen. Som vist i tabell 19, er antall skadede bygninger ved gjennomført tiltak er på tilnærmet samme nivå som i referansesituasjonen.

Tabell 19: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakobling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakopling/diameterøkning)
5	0	2	0
10	0	4	0
20	1	6	1
50	2	12	1
100	3	18	3

I figur 52 vises totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak sammenlignet med referansesituasjonen ved dagens regnintensiteter og uten klimatilpasningstiltak. De blå søylene representerer referansesituasjonen, de røde søylene representerer en situasjon med 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, og de grønne søylene viser oversvømmelsesvolumet ved gjennomført klimatilpasningstiltak i et klimascenario med 50 % klimatillegg.



Figur 52: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

Som vist i figur 52 reduserer det totale oversvømmelsesvolumet ned til tilnærmet likt som dagens nivå for de høyeste gjentaksintervall, før volumet øker noe ved gjentaksintervall 20 år, for deretter å synke ved 10-års gjentaksintervall.

8.5.6 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og fordrøyning av overvann på overflaten

I dette tiltaket frakobles takvann fra de samme delfeltene som vist i figur 49. Da dette tiltaket ikke er gjennomførbart over hele Bogafjell økes konsentrasjonstiden fra 7 til 40 minutter som tiltak i de deler av feltet som er lite egnet for infiltrasjon, som vist i figur 53. Det totale fordrøyningsvolumet er 256 m³.



Figur 53: Delfelt med økt konsentrasjonstid og antall oversvømmelser ved 100-års regn med 50 % klimatillegg

I tabell 20 og 21 vises antall oversvømmelser og antall antatt skadede bygninger i referansesituasjonen, samt med og uten klimatilpasningstiltak ved klimajusterte regn.

Tabell 20: Sammenligning av antall oversvømmelser med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

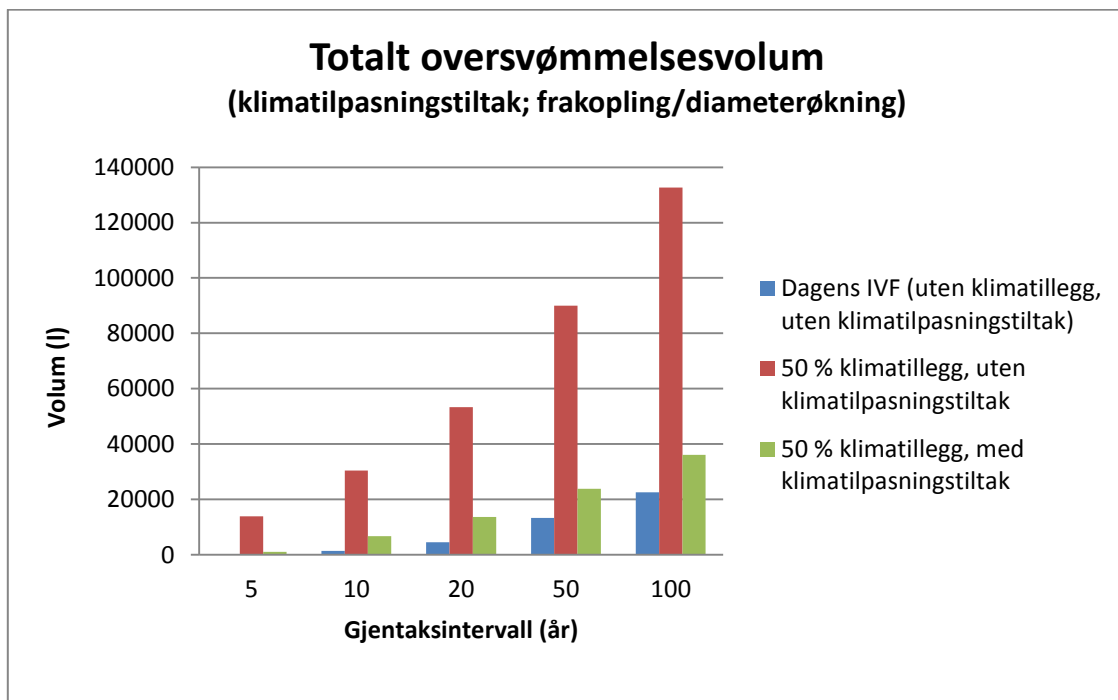
Regn (Gjentaksintervall)	Antall oversvømmelser (Dagens IVF)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg)	Antall oversvømmelser (50 % klimatillegg, frakopling/fordrøyning)
5	0	8	2
10	2	13	3
20	3	18	4
50	8	29	6
100	9	47	13

Tabell 21: Sammenligning av skadenivå med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

Regn (Gjentaksintervall)	Skadede bygninger (Dagens IVF)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg)	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakopling/fordrøyning)
5	0	2	0
10	0	4	0
20	1	6	0
50	2	12	2
100	3	18	4

Som vist i tabell 20 er antall oversvømmelser noe større ved alle gjentaksintervall enn i referansesituasjonen. Tiltaket er mer effektivt ved de lavere gjentaksintervall. I tabell 21 vises det at antall antatt skadede bygninger er noe større enn i referansesituasjonen ved 100-års gjentaksintervall, deretter tilsvarende eller lavere ved de gjenværende gjentaksintervall.

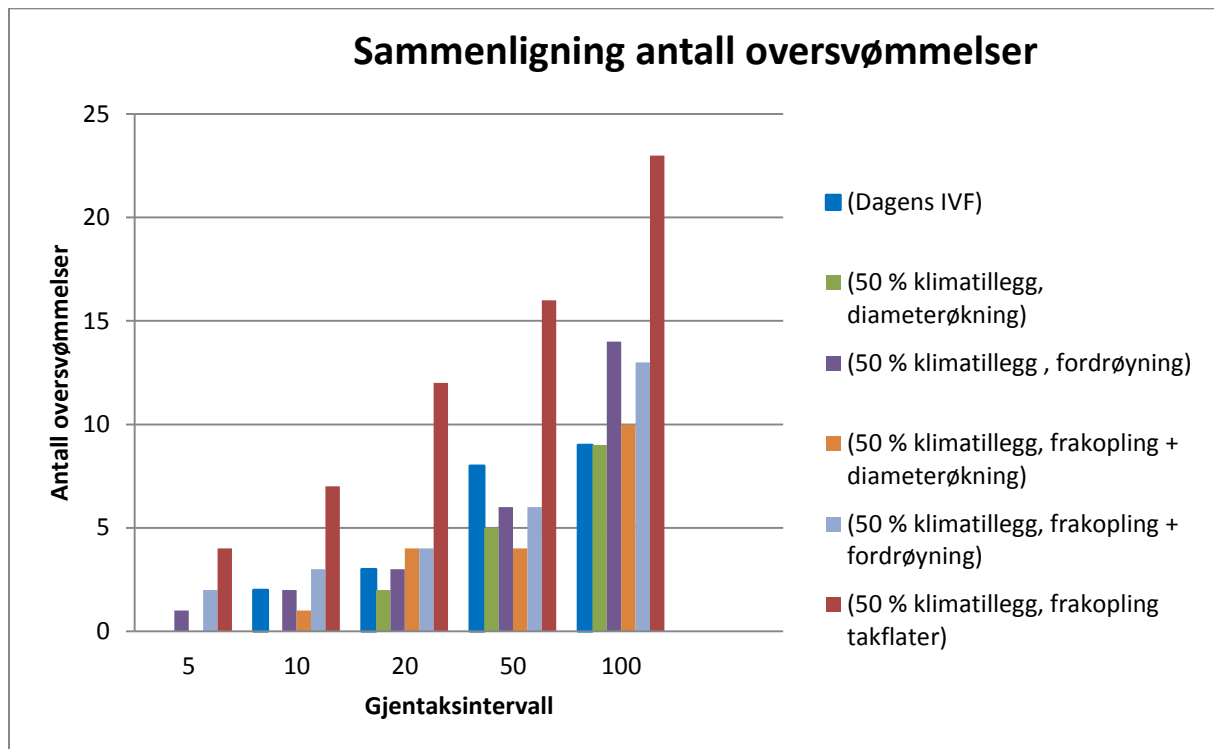
I figur 54 vises igjen totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak sammenlignet med referansesituasjonen ved dagens regnintensiteter og uten klimatilpasningstiltak. De blå søylene representerer referansesituasjonen, de røde søylene representerer en situasjon med 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, og de grønne søylene viser oversvømmelsesvolumet ved gjennomført klimatilpasningstiltak i et klimascenario med 50 % klimatillegg.



Figur 54: Sammenligning av totalt oversvømmelsesvolum med og uten klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

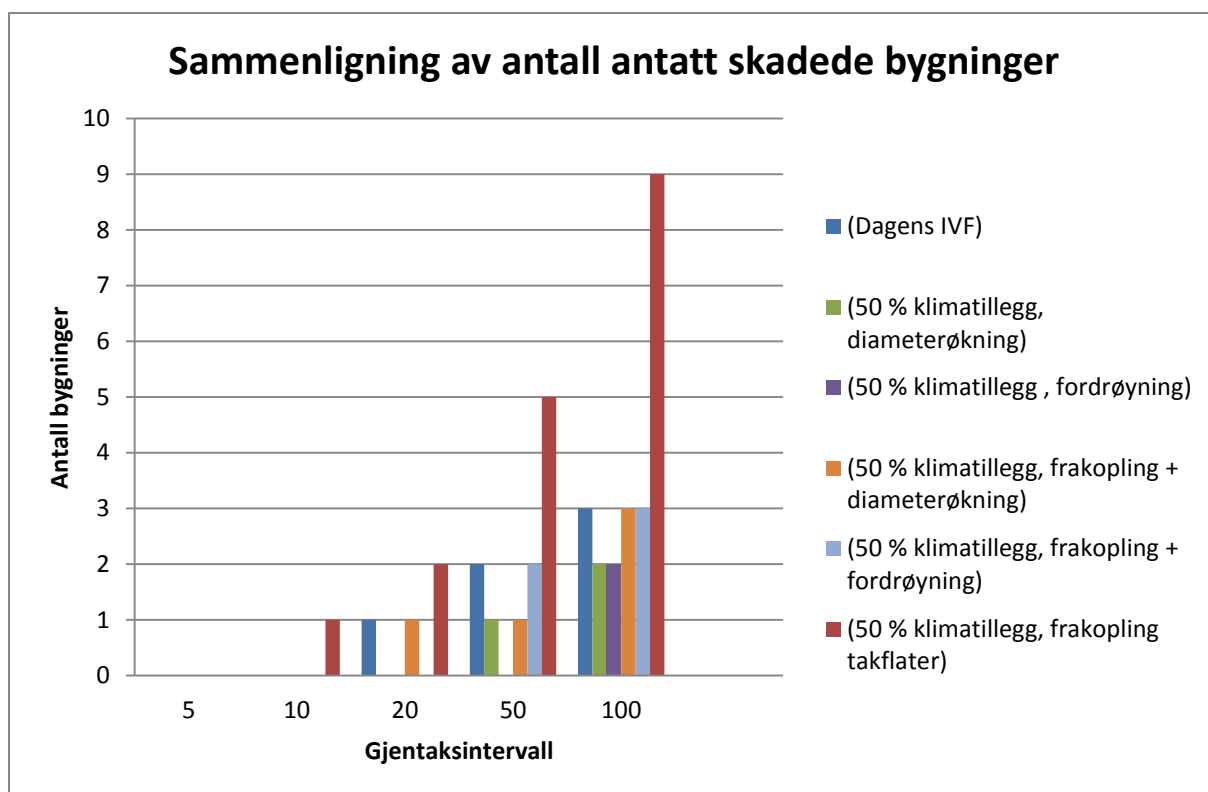
Som vist i figur 54 vil oversvømmelsesvolumet ved 50 % klimatillegg og etter gjennomført tiltak holde seg på et noe høyere nivå enn referansesituasjonen. Også her er oversvømmelsesvolumet ut fra Node_1 og 17113 meget høyt i forhold til referansesituasjonen, og drar nivået på det totale oversvømmelsesvolumet opp uten at det påvirker skadenivået.

8.6 Oppsummering og sammenligning av klimatilpasningstiltakenes effekt



Figur 55: Sammenligning av antall oversvømmelser ved ulike klimatilpasningstiltak

I figur 55 vises en grov sammenligning av klimatilpasningstiltakenes avbøtende virkning, med hensyn på antall oversvømmelser, ved de ulike gjentaksintervall som simuleres i analysen. De blå søylene viser antall oversvømmelser i referansesituasjonen, mens de andre søylene viser antall oversvømmelser ved 50 % klimatillegg og gjennomførte tiltak. Som vi allerede vet vil ikke *frakopling av overvann fra takarealer* alene oppnå den ønskede effekt, og som figuren viser ligger antall oversvømmelser over dagens nivå for alle gjentaksintervall. De andre tiltakene ligger på tilnærmet samme nivå som referansesituasjonen, men litt over eller under ved visse gjentaksintervall.



Figur 56: Sammenligning av antall antatt skadede bygninger ved ulike klimatilpasningstiltak

I figur 56 vises samme sammenligning av klimatilpasningstiltakenes avbøtende virkning, men med hensyn på antall antatt skadede bygninger. De blå søylene viser antall antatt skadede bygninger i referansesituasjonen, mens de andre søylene viser antall antatt skadede bygninger ved 50 % klimatillegg og gjennomførte tiltak. *Frakopling av overvann fra takarealer* når ikke ned til dagens skadenivå. De resterende klimatilpasningstiltak gir et skadenivå tilnærmet tilsvarende referansesituasjonen, med variasjoner over og under antall antatt skadede hus/bygninger ved de ulike gjentaksintervall.

8.7 Følsomhetsanalyse

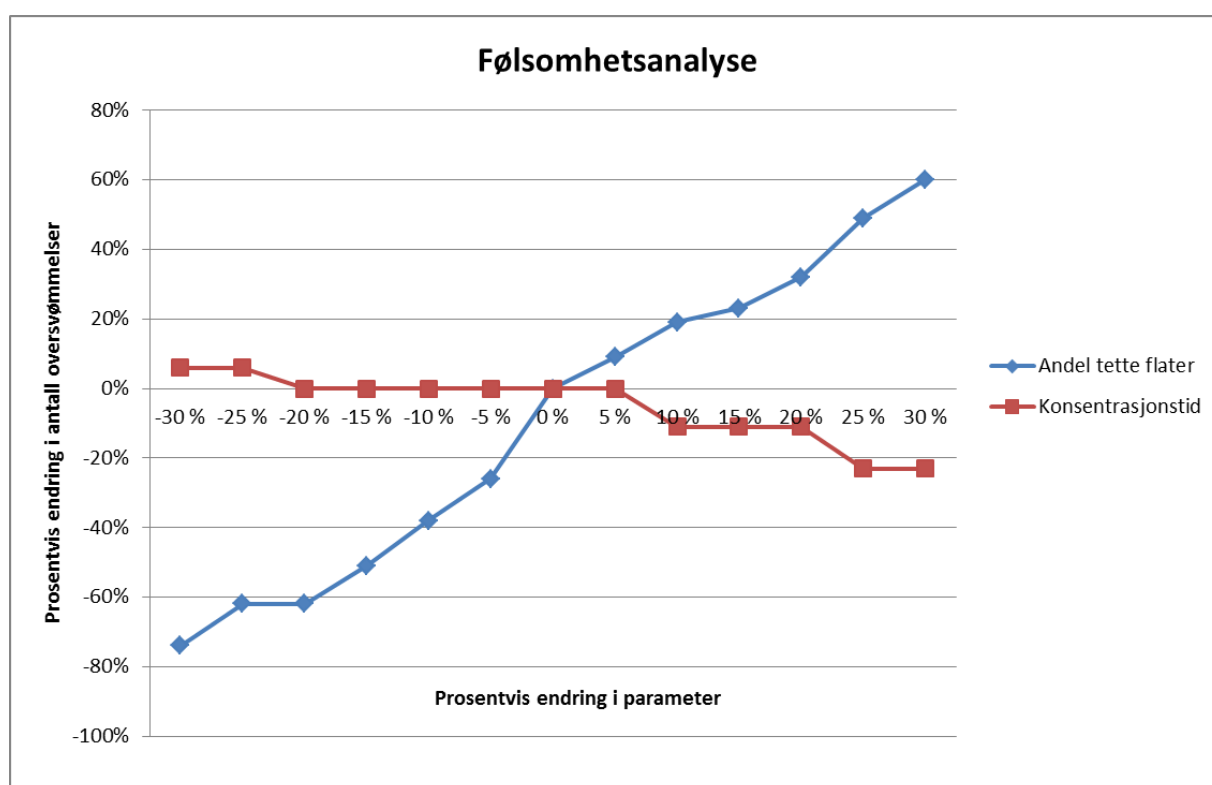
I kapittel 6.1.2 er det nevnt noen parametere som fungerer som inputdata i avrenningsberegningene ved bruk av tid-areal metoden. Dette vil si at parameternes størrelse påvirker beregningenes resultat, i ulik grad, og det stilles derfor krav til parameternes nøyaktighet for modellens troverdighet.

Det antas at overflatemagasineringsen ikke påvirker resultatene i særlig stor grad, da det kun er snakk om meget små mengder vann som deponeres på de tette flatene. Den hydrologiske reduksjonsfaktoren er svært vanskelig å bestemme da dette i stor grad er en oppsamlingsparameter. Det antas at evaporasjonsdelen er neglisjerbar ved norske forhold under korte regnhendelser, og spiller liten rolle i resultatene. Det er i analysen antatt at feltene kan beskrives ved en rektangulær tid-areal kurve. Det kan være at en annen form ville vært mer korrekt, men det antas at dette ikke har noen stor effekt på resultatene i analysen.

I den aktuelle modellen av Bogafjell er det kun de tette flatene som bidrar til avrenning, og parameteren antas følgelig å være av stor relevans for resultatet. Andel tette flater kan generelt avgjøres nokså nøyaktig, men det kan være problematisk å estimere hvor stor del av de tette flatene hvor avrenningen bidrar med avrenning til ledningsnett.

Konsentrasjonstiden er avhengig av flere forhold i feltet, som terrengets helning, feltets geometri og overflatens tekstur. Det antas at konsentrasjonstiden har betydnings for avrenningen, spesielt avrenningstoppen og når denne oppstår.

Av parameterne i kapittel 6.1.2 er det, som forklart ovenfor, antatt at det er andelen tette flater og konsentrasjonstiden som påvirker resultatene mest. Det er derfor gjort en følsomhetsanalyse av disse parameterne med endring av de ulike parameterne ved et 100-års regn med 50 % gjentaksintervall.



Figur 57: Følsomhetanalyse andel tette flater og konsentrasjonstid

Som vist i figur 57 har modellens resultater en intuitiv respons på andelen tette flater. En økning i andelen tette flater gir kontinuerlig økning i antall oversvømmelser, og likedan gir en reduksjon i andelen tette flater en reduksjon i antall oversvømmelser. Forholdet mellom antall oversvømmelser og andelen tette flater kan antas å være tilnærmet lineært.

En endring i konsentrasjonstiden har ikke like stor påvirkning på modellens resultater som en endring i andel tette flater. Det vises at økning i konsentrasjonstiden gir mer respons fra systemet enn en reduksjon i konsentrasjonstiden.

9 Økonomisk analyse

Den økonomiske analysen søker å finne klimatilpasningstiltakenes kostnadseffektivitet ved en kost-effekt analyse av tiltakene. Tiltakenes kostnader vurderes i forhold til oppnåelse av ønsket effekt og klimatiltakene rangeres dermed etter kostnadseffektivitet.

Klimatilpasningstiltakenes kostnader sees også opp mot kostnadene knyttet til referansesituasjonen, i tillegg til kostnadene ved å ikke gjøre noen tilpasninger til de negative konsekvensene som oppstår som følge av klimaendringene. For at klimatilpasningstiltakene skal være tilnærmet samfunnsøkonomisk optimale, må tiltakenes kostnader oppveies av tiltakenes gevinst. Dette tilsier at tiltakenes kostnader må være mindre enn kostnadene ved å ikke gjøre noen ting. Tiltakene må gi en økonomisk besparelse, eller i det minste føre til en situasjon hvor man er «break-even», hvor investeringen er lik besparelsen.

Den økonomiske analysen vil, som den hydrauliske analysen, spenne seg over en tidsperiode på 100 år – antatt levetid på ledningsanlegg. Siden ledningsanlegget på Bogafjell ble anlagt i årene rett før 2000 kan man anta at det ikke vil være aktuelt å totalrehabiliterer ledningsanlegget før om omtrent 100 år, og man kan dermed utelukke denne kostnaden i analysen.

9.1 Totale skadekostnader

Et viktig moment i den økonomiske analysen er å vite hvor mange ganger regnhendelser med de ulike gjentaksintervallene vil opptre i løpet av 100 år. Dette er nødvendig å vite for å kunne summere skadekostnadene ved de enkelte gjentaksintervall til å utgjøre en total skadekostnad for analyseperioden på 100 år. For å finne et mål på antatt samlede skadekostnader for overvannsnett på Bogafjell, med og uten klimaendring, er metoden forklart nedenfor benyttet. Metoden baserer seg på IVF-kurvenes oppbygning og er utarbeidet og funnet relevant i samarbeid med Oddvar Lindholm.

Fra IVF-kurvens oppbygging (se beskrivelse i kapittel 4.2.3) antas det at det i løpet av en 100-års periode er 100-års regnhendelsen som er den største nedbørshendelsen, og som statistisk sett opptrer i gjennomsnitt én gang i løpet av 100 år. Dette støttes opp av frekvensen på 0,01 (1/100) som i løpet av 100 år gir oss 1 (0,01·100) hendelse større eller lik en regnhendelse med 100-års gjentaksintervall. Dette tilsier at det, statistisk sett, er én hendelse som er større eller lik dette regnet. En 50-års hendelse har en frekvens på 0,02 (1/50) noe som tilsier at det i løpet av en 100-års periode vil være 2 regnhendelser større eller lik 50-års regnet (0,02·100). Videre har en 20-års hendelse en frekvens på 0,05 (1/20) og i løpet av analyseperioden vil man anta at det forekommer 5 hendelser større eller lik en regnhendelse med 20-års gjentaksintervall (0,05·100). En regnhendelse med 10-års gjentaksintervall har en frekvens på 0,1 (1/10) og det vil følgelig da være 10 hendelser større eller lik en slik hendelse i løpet av en 100-års periode (0,1·100). En regnhendelse med 5-års gjentaksintervall er hendelsen med lavest intensitet som vurderes i analysen. Frekvensen til en slik hendelse er 0,2 (1/5) og man

kan da anta at det i løpet av en 100-års periode vil være 20 hendelser større eller lik en regnhendelse med 5-års gjentaksintervall ($0,2 \cdot 100$).

På bakgrunn av sammenhengene forklart ovenfor gis følgende resultater, vist i tabell 22:

Tabell 22: Metode for beregning av antall regnhendelser for hvert gjentaksintervall gjennom analyseperiode

Gjentaksintervall	Antall regnhendelser med gjeldende gjentaksintervall i løpet av perioden	Akkumulert antall regnhendelser lik eller større gjeldende gjentaksintervall i løpet av perioden
100 år	1	1
50 år	1	2
20 år	3	5
10 år	5	10
5 år	10	20
Sum	20	20

Ved å benytte seg av denne metoden finner man et estimat for hvor mange ganger de ulike regnhendelsene kommer til å opptre i løpet av en 100-års periode. Dette gir oss mulighet til å beregne skadekostnader knyttet til de ulike gjentaksintervallene gjennom perioden som deretter kan summeres for totale skadekostnader gjennom hele perioden. 5-års-hendelsen er den laveste hendelse hvor oversvømmelse av relevant størrelse oppstår ved klimajustert regn.

9.2 Nåverdimetoden

Man kan anta at det i løpet av en 100-års periode vil forekomme et visst antall skadeforvoldende regnhendelser (som vist i tabell 22), men man kan ikke anta når i perioden disse hendelsene vil forekomme. Da man derfor ikke vet når skadekostnader vil oppstå, må man ved sammenligning av kostnader benytte seg av årlige oppsummerte gjennomsnittskostnader. For at man skal sammenligne kostnads- og nytteelementer som opptrer ved ulike tidspunkt benyttes nåverdimetoden.

Nåverdimetoden er en metode hvor fremtidige kontantstrømmer neddiskonteres slik at man finner nåverdien. Nåverdien er verdien i dag av de fremtidige kontantstrømmer.

Nåverdimetoden innebærer at en investerings, eller et prosjekts, årlige nytteoverskudd neddiskonteres til investeringstidspunktet og summeres til netto nåverdi. Netto nåverdi er nettoverdien i basisåret (utgangspunktet) av alle de verdsatte nytte- og kostnadselementene ved investeringen eller prosjektet (Finansdepartementet 1997).

Den generelle formel for beregning av netto nåverdi er:

$$NNV = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{U_t}{(1+k)^t}$$

Formel 6: Netto nåverdi (Finansdepartementet 1997)

NNV = netto nåverdi

I_0 = investeringsutgift som påløper i år 0

U_t = nytteoverskudd i år t

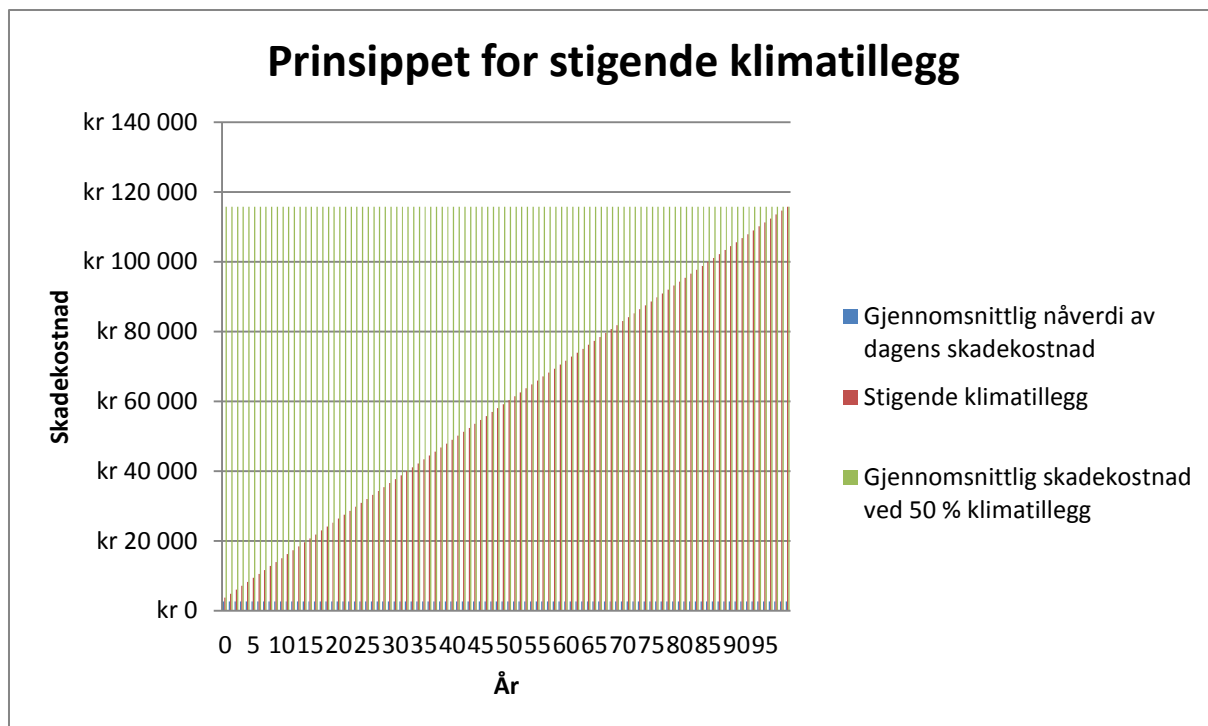
k = diskonteringsrenten

Netto nåverdi må være null eller positiv for at investeringen skal anses som lønnsom. Det vil si at nytten av å investere må være lik eller større enn investeringsutgiften.

I denne økonomiske analysen vil investeringsutgiften være tiltakenes anleggskostnad i år 0, mens nytteoverskuddet vil være en eventuell besparelse i form av lavere skadekostnader fra år 1 til år 100. Det beregnes nåverdi av de årlige gjennomsnittlige skadekostnader med og uten klimatilpasningstiltak i et klima med stigende klimatillegg fra 0 – 50 % for å finne det eventuelle nytteoverskuddet ved gjennomføring av tiltak.

9.2.1 Stigende klimatillegg

Da analysen baserer seg på at investeringene gjøres i dag, er det valgt å gjennomføre analysen av tiltakenes kostnadseffektivitet med et stigende klimatillegg. Et stigende klimatillegg etterrapes i kostnadsanalysen ved at man finner kostnadsforskjellen mellom nåverdien av de gjennomsnittlige årlige skadekostnadene ved gjennomført tiltak med dagens 100-års regnintensitet og ved gjennomført tiltak med 100-års regnintensitet med 50 % klimatillegg. Deretter økes de gjennomsnittlige årlige skadekostnader fra år 1 til 100 med én prosent av denne forskjellen for hvert år, noe som etteraper effekten av en økning i regnintensitet som følge av klimaendringer. Skadekostnadene stiger da følgelig med stigende klimatillegg. Oppsummerte skadekostnader med stigende klimatillegg deles på 100 år og gir en ny gjennomsnittlig årskostnad som det beregnes nåverdi av.



Figur 58: Prinsippet for stigende klimatillegg

9.2.2 Diskonteringsrente

Diskonteringsrenten er den renten som de fremtidige kontantstrømmene neddiskonteres med. Denne er meget avgjørende for prosjektets lønnsomhet. Jo lavere diskonteringsrenten er, jo større vil nåverdien bli og omvendt. Da analysen går over 100 år vil valg av rentefot ha stor påvirkning på analysens resultater, og det bemerkes at analyseperioden er meget lang i forhold til hva som er vanlig ved slike beregninger.

Diskonteringsrenten på 4 % brukt i analysen er valgt på bakgrunn av dagens rentenivå, med et lite tillegg grunnet de spesielt lave rentene på nåværende tidspunkt. Det er funnet lite litteratur med konkrete forslag til rentenivå, og det er derfor tatt utgangspunkt i styringsrenten på 1,5 % pr. 15.mars 2012 og andre renter (bl.a. norske pengemarkedsrenter) hentet fra Norges Banks rentestatistikk (Norges Bank 2012).

9.3 Kostnader vurdert i analysen

Som vist i eksempel fra kapittel 4.1 oppstår det flere ulemper og skadekostnader ved urban oversvømmelse og flom. Da Sandnes kommune oppgir at de ikke har noen registrerte skader i forbindelse med regn, er det vanskelig å si noe om skader som mulig oppstår ved ekstreme regnhendelser på Bogafjell. Det finnes ingen tall på eventuelle skader i kummer, på vegger eller kjellere, bygninger og innbo/interiør i boligbebyggelsen. Ved simulering av regn i Rosie kan man vise resultatene i form av blant annet oppstuvning i ledning og oversvømmelse i kummer. Ut fra disse resultater er det nærliggende å finne antall hus/bygninger som antas

skades som følge av regnet (som vist i kapittel 8.5.1), da bygninger er et eget datalag i modellen.

Det ville selvsagt være ønskelig med mer informasjon om skader og skadeomfang ved ulike regnhendelser slik at man kunne fått en mer realistisk økonomisk analyse med flere parametere enn skade på hus/bygninger. Grunnet tidsperspektiv og manglende informasjon velges det å utføre en økonomisk analyse basert på *kostnader ved vannskader på/i bygninger* og *anleggskostnader for ulike klimatilpasningstiltak*. Driftsutgifter knyttet til de ulike løsningene utelates som følge av mangelfull informasjon. De økonomiske resultatene som presenteres er følgelig sterkt forenklet, og gir et feilaktig og undervurdert kostnadsbilde med tanke på totale skadekostnader ved nedbørshendelser og totale utgifter knyttet til de ulike tiltak.

9.3.1 Skadekostnader på bygninger/hus

Skadekostnader for vannskader på/i bygninger er i all hovedsak hentet fra FNOs vannskadestatistikk (VASK) (FNO 2012). Kun skader som er tilstrekkelig godt kodet, og som har resultert i erstatning, er inkludert i denne statistikken. Erstatningsbegrepet som benyttes i VASK er *anslått erstatning*. Med anslått erstatning menes utbetalte erstatninger, og erstatningsavsetninger, for de skader som er inntruffet i den aktuelle tidsperiode statistikken omfatter. Grunnlaget for dataene er skader meldt til de større skadeforsikringsselskapene, som dekker omtrent 80 % av det norske markedet. Disse har siden juli 2007 levert data til VASK (FNO 2012). I følge Harald Moseby i FNO vil skadekostnadene fra VASK kun utgjøre omtrent 50 % av de totale vannskadekostnadene i Norge (Moseby 2012).

Ved hjelp fra Harald Moseby i FNO (Moseby 2012) er det valgt ulike filtre for å finne mest mulig beskrivende kostnader for skade.

Kostnadstallene brukt i analysen er hentet i to omganger. Den ene serien representerer skader i bygg grunnet inntrengning av vann utenfra. Det er valgt følgende filter:

- Gruppe: Bygg
- Kategori: Inntrengning utenfra²⁷
- Installasjon: Vanninntrengning utenfra gjennom bygg. Vanninntrengning utenfra over grunn
- Kilde: Nedbør. Smeltevann. Grunnvann²⁸
- Årsak: Drenering

Forklaring til kodene i VASK (FNO 2012):

- Vanninntrengning utenfra gjennom grunn: «*Vanninntrengning gjennom de delene av bygget som er under terrenget, dvs. gjennom grunnmur under bakkenivå. Omfatter*

²⁷ Her kommer begge installasjoner *vanninntrengning utenfra gjennom bygg* og *vanninntrengning utenfra over grunn* opp og det er ikke mulig å velge kun én installasjon.

²⁸ Det er ikke mulig å velge en annen kilde enn dette.

også inntrengning fra avløpsrør for overflatevann, avløpsrør fra taknedløp og drenerør»

- Vanninntrengning utenfra over grunn: «Vanninntrengning gjennom de delene av bygget som har en ytterside mot friluft over terrenget, dvs. gjennom yttertak og yttervegger. Omfatter også inntrengning fra takrenner, utvendig og innvendig taknedløp»
- Nedbør. Smeltevann. Grunnvann: «Inntrengning av regnvann, smeltevann fra snø eller is, flomvann / overflatevann i terrenget og grunnvann»
- Drenering: «Tett drenering, ekstraordinær nedbør eller snøsmelting eller større mengder overflatevann enn det dreneringen er dimensjonert for»

VASK gir følgende tall for de valgte filter og koder for de fire siste år:

Tabell 23: Resultater fra VASK; årsak "Drenering".

Årstall	Antall skader	Erstatningsbeløp (1000 kr)	Gjennomsnittlig erstatningsbeløp/skade (kr)
2011	1689	80959	47933,09651
2010	1268	69789	55038,64353
2009	643	29554	45962,67496
2008	993	45765	46087,61329
Gjennomsnittlig erstatningsbeløp			48755,50707

Den neste serien fra VASK representerer skadetall fra samme gruppe, kategori, installasjon og kilde, men med følgende årsak:

- Årsak: Stopp i avløp. Tilbakeslag: «Oversvømmelse i bygningen fordi vann trenger inn gjennom avløpsnettlet eller pga. tett sluk, vannlås eller sanitærutstyr».

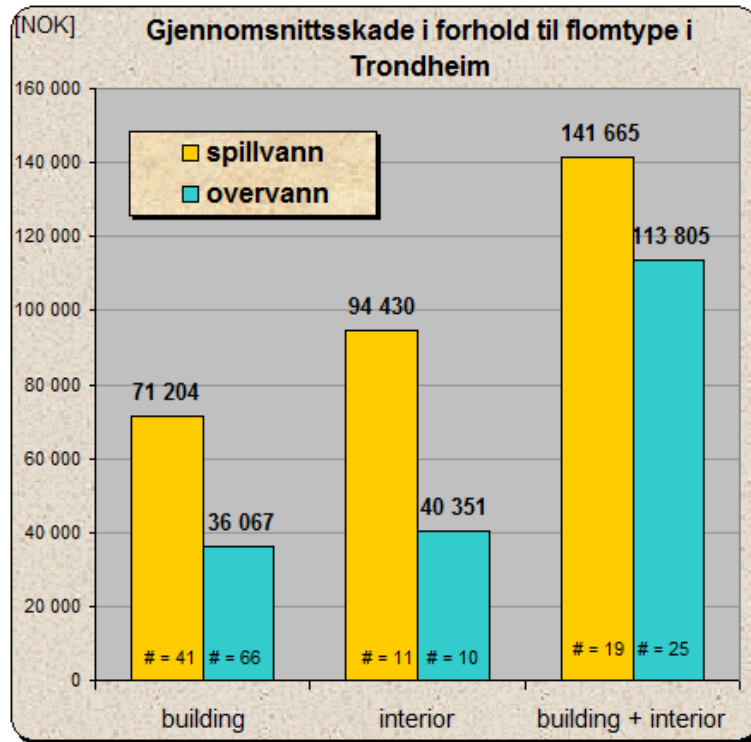
Tabell 24: Resultater fra VASK; årsak "Stopp i avløpet. Tilbakeslag".

Årstall	Antall skader	Erstatningsbeløp (1000 kr)	Gjennomsnittlig erstatningsbeløp/skade (kr)
2011	224	25034	111758,9286
2010	190	17508	92147,36842
2009	205	16225	79146,34146
2008	372	32260	86720,43011
Gjennomsnittlig erstatningsbeløp			92443,26714

Den gjennomsnittlige erstatningsutbetaling på **48 756 kr + 92 334 kr = 141 090 kr** fra VASK representerer både erstatningsutbetalinger ved skade på bygning og innbo/interiør.

I VASK er det ikke mulig å skille skader mellom overvann og spillvann. Ovennevnte skadekostnad representerer således gjennomsnittet av skader forårsaket av overvann og/eller spillvann.

NORVAR (NORVAR 2004) har funnet frem til følgende tall for skadekostnader/erstatningsutbetalinger som funksjon av spillvann og overvann for Trondheim:



Figur 59: Skadekostnader som funksjon av flomtype i Trondheim (NORVAR 2004)

I figur 59 vises det at gjennomsnittlig skadekostnad på interiør og bygning knyttet til 19 spillvannsskader hadde en verdi på **141 665 kr**, mens gjennomsnittlig skadekostnad på interiør og bygning knyttet til 25 overvannsskader hadde en verdi på **113 805 kr**. Gjennomsnittlig skade uten hensyn til flomtype kan da antas å være **127 735 kr**. Det vises at overvannsskadene verdi er rundt 90 % av gjennomsnittlig skadeverdi. Dersom vi overfører dette forholdet fra Trondheim til gjennomsnittlig erstatningsutbetaling fra VASK, kan man estimere gjennomsnittlig erstatning for overvannsskader til å være **141 090 kr · 90 % = 125 570 kr**.

Da kostnadene fra VASK kun representerer erstatningskostnadene legges det til en egenandel på **6000 kr**. På bakgrunn av dette estimeres total gjennomsnittlig skadekostnad for overvannsskader til å være **131 570 kr**.

Tallene fra Trondheim er fra 1995 – 2000. Ved å benytte Statistisk Sentralbyrås kalkulator for Konsumprisindeks (KPI)²⁹ (SSB 2012) beregnes den gjennomsnittlige skadekostnaden knyttet til overvannsskader i Trondheim på 113 805 kr til å bli 132 790 kr, 135 595 kr, 138 939 kr og 140 665 kr i henholdsvis 2008, 2009, 2010 og 2011. Dette gir en gjennomsnittlig skadekostnad på 136 997 kr. Det antas derfor at skadekostnaden fra VASK, justert etter forholdet mellom skader som funksjon av spillvann og overvann fra Trondheim på **131 570 kr**

²⁹ Konsumprisindeksen brukes gjerne som et mål på inflasjon i økonomien.

er et noenlunde realistisk tall for gjennomsnittlig skadekostnad for overvannsskader, og vil følgelig benyttes videre i oppgavens økonomiske analyse.

9.3.2 Tiltakskostnader

For å vurdere de ulike klimatilpasningstiltakenes anleggskostnader er det hentet inn kostnadstall fra ulike aktører. For at kostnadsvurderingen skal være så enkel gjennomførbar som mulig er det benyttet enhetskostnader for tiltakene på formen *kr/enhet*. Nedenfor presenteres de benyttede kostnader.

For alle kostnader er det hovedsakelig tatt utgangspunkt i opplysninger fra VAV, oversendt av Oddvar Lindholm (Lindholm 2012d). Ved bruk av Statistisk Sentralbyrås kalkulator for konsumprisindeks (SSB 2012) er kostnadene justert for prisveksten.

Tabell 25: Enhetskostnader for tiltak

Tiltak	Gammel enhetskostnad	Kilde	År	Ny enhetskostnad
Økning av ledningsdiameter (omlegging)	8 956 kr /m	VAV	2006	9 922 kr/m
Økning av ledningsdiameter (utblokking)	7 069 kr/m	VAV	2006	7 832 kr/m
Fordrøyning av overvann på overflaten	3 000 kr/m ³	VAV	2002	3 553 kr/m ³
Frakopling av takvann	20 kr/m ²	VAV	2002	23,69 kr/m ²

For de to siste tiltakene i tabellen, *fordrøyning av overvann på overflaten* og *frakopling av takvann*, var det ikke oppgitt noen konkrete kostnadstall. Kostnaden for *fordrøyning av overvann på overflaten* er hovedsakelig basert på kostnader for lukkede betongbasseng med oppgitt kostnad på 3 000 kr/m³ av Terje Nordeidet i VAV i 2002. Dette støttes av DANVA som i 2006 oppga kostnader mellom 3 000 – 15 000 DKR/m³ i 2006. I materialet oversendt var det kun oppgitt ulike kostnader for frakopling av vann fra gateflater; 50 kr/m² hvor det forutsettes at tiltaket er lett gjennomførbart, erfaringer med kostnader mellom 40-70 og 140 kr/m² i svenske prosjekter og 15 kr/m² fra Fredrikstad. Terje Nordeidet kommenterer at frakopling av takvann kan gjøres meget billig, muligens ned i 10 kr/m². Det antas at dette kun er i spesielle tilfeller, og kostnaden settes derfor til 20 kr i 2002.

9.4 Resultater fra analyse av dagens nett med og uten klimatillegg

Foruten estimatene for antatt antall hendelser med bestemte gjentakintervall vist i tabell 22 baserer kostnadsanalysen av dagens ledningsnett med og uten klimatillegg seg på resultatene presentert i tabell 11 med antall antatt skadede bygninger, og gjennomsnittlig skadeutbetaling på 131 570 kr.

Tabell 26: Totale skadekostnader uten klimatilpasningstiltak

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Enkeltkostnader (Dagens IVF)	Totale skadekostnader (Dagens IVF)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg)
5	10	kr 0,00	kr 0,00	kr 263 140,00	kr 2 631 400,00
10	5	kr 0,00	kr 0,00	kr 526 280,00	kr 2 631 400,00
20	3	kr 131 570,00	kr 394 710,00	kr 789 420,00	kr 2 368 260,00
50	1	kr 263 140,00	kr 263 140,00	kr 1 578 840,00	kr 1 578 840,00
100	1	kr 394 710,00	kr 394 710,00	kr 2 368 260,00	kr 2 368 260,00
Sum			kr 1 052 560,00		kr 11 578 160,00
Nåverdi			kr 257 929,82		kr 5 974 646,06
Nåverdi med stigende klimatillegg					kr 1 464 086,96

Nåverdien av totale skadekostnader med dagens IVF, er skadekostnader som ville oppstått over 100 år dersom klimaendringer ikke inntraff. Nåverdien av totale skadekostnader med 50 % klimatillegg, er de totale skadekostnader som ville oppstått over 100 år dersom klimaet allerede hadde endret seg. Disse verdiene er brukt til å beregne nåverdi med stigende klimatillegg som beskriver de total skadekostnadene med stigende klimatillegg fra 1 til 50 % uten gjennomføring av noen klimatilpasningstiltak.

9.4.1 Alternativ analysemetode

I et prosjekt i regi av danske Miljøstyrelsens klimakontor (COWI/NIRAS 2007) er det utført en økonomisk analyse (kost-effekt og kost-nytte) basert på en enkel modell hvor man skalerer effekten av en 100-års hendelse med en beregnet faktor for å innlemme effektene av hendelser mindre enn 100-årshendelsen i kostnadsberegningene av samlede kostnader over en gitt periode. I modellen antas det at nedbørshendelser med et gjentaksintervall over 10 år vil gi skader. Skader ved 10-års gjentaksintervall ble satt til nivå 0 og skader ved 100-års gjentaksintervall ble satt til nivå 100. I løpet av en observasjonsperiode på 90 år ble det funnet 9 skadeforårsakende hendelser som relateres til et gjentaksintervall og dermed tildeles et forventet skadeomfang i forhold til en 100-års hendelse. Dersom modellen skal benyttes direkte, finner man at de forventede skader i løpet av en 90-års observasjonsperiode kan beregnes som 3,45 ganger skadene av en 100-års hendelse. Rapporten antar at denne faktoren i praksis vil være noe større da de økonomiske konsekvenser i form av ekstra skader som oppstår av en ekstra kraftig hendelse, er større enn de besparelser som oppstår dersom den største hendelsen er mindre enn forutsatt i løpet av beregningsperioden. Det er altså en skjevhet i modellen som undervurderer kostnadene og fører til at faktoren økes med et grovt overslag til 5. De samlede forventede kostnader i løpet av en 90-års periode settes til 5 ganger kostnadene relatert til en 100-års hendelse. I den danske metoden tilsvarer dette 500. I den danske metoden er 500 delt på antall år, for å få skadene per år. Dette gir $500/90 = 5,5$ omkostning per år med indeks 100 for en 100-års hendelse.

Da Sandnes kommune ikke har noen registrerte skader over en tidsperiode eller registrerte skader knyttet til et bestemt gjentaksintervall er det ikke mulig å bruke denne metoden direkte, ei heller å gjøre en direkte sammenligning. Det er likevel en interessant metode som ville gjort grove beregninger enklere. Resultater fra den valgte økonomiske analysemetode og forholdet mellom gjentaksintervall og antall skader vil kort og forenklet sammenlignes med den danske metoden for å se om det kan være interessant å undersøke metoden nærmere.

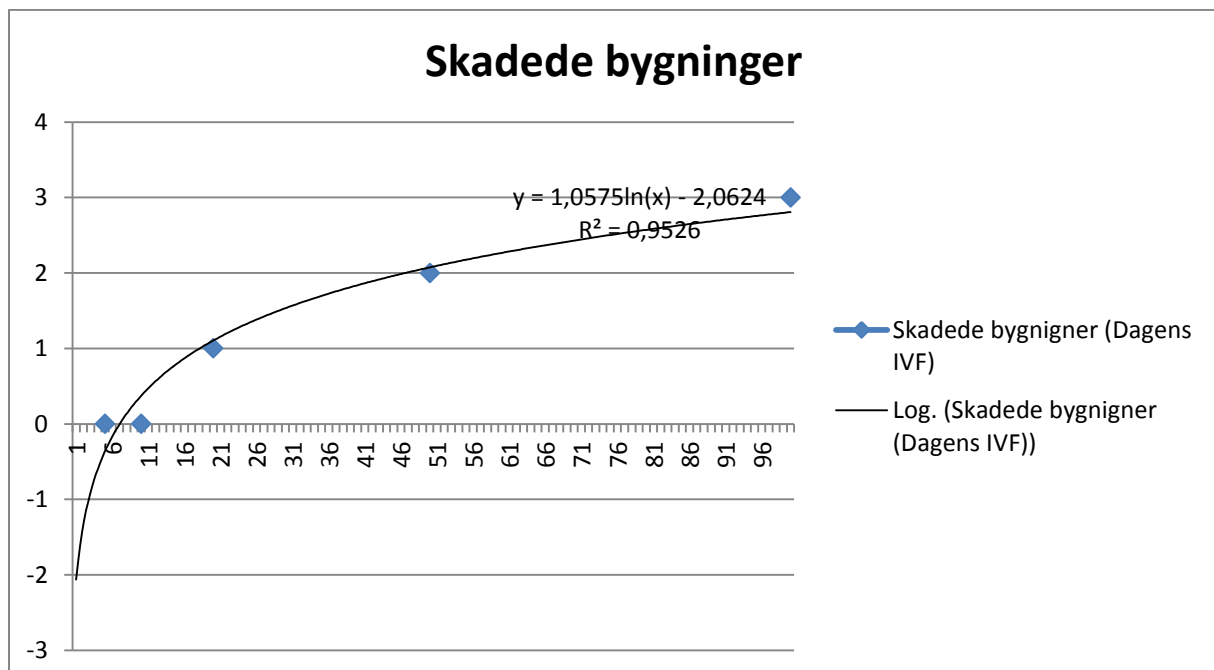
For å kunne sammenligne disse to metoder kan man først sjekke om de årlige skadekostnadene ved 5,5 % ganger kostnadene for en 100-års hendelse oppsummert er tilnærmet like som de totale skadekostnadene. Sammenligningen er gjort med referansescenariot, en 100-års regnhendelse med dagens intensiteter. I den danske undersøkelsen oppgis det at alle kostnader er gitt i nåverdi.

Tabell 27: Sammenligning mellom dansk analysemetode og valgt analysemetode

	Dansk metode	Brukt metode	Differanse
Nåverdi av totale skadekostnader	kr 531 980	kr 257 930	kr 274 050

Som vist i tabell 27 er nåverdiene av den danske metoden og metoden anvendt i denne oppgaven svært ulike.

For å gjøre en sammenligning på noe mer likt grunnlag finnes forholdet mellom gjentaksintervall og antall skader, som vist på figur 60 under.



Figur 60: Forholdet mellom skadede bygninger og gjentaksintervall, for sammenligning med dansk metode

Vi bruker formelen ovenfor for å finne skadene på Bogafjell ved tilsvarende 9 gjentaksintervall som forårsaket de observerte skadeforvoldende regnhendelsene over 90 år brukt i den danske metoden. De totale skadene summeres opp og deles på skadene ved 100-

års regnet (referansesituasjon) som er 3 skader. Dette gir oss et forholdstall som kan sammenlignes med forholdstallet på 3,45 funnet i Danmark, hvor de delte de summerte skadene på 100, som var tallet som beskrev skaden ved et 100-års regn.

Tabell 28: Antall skadede bygninger på Bogafjell ved bruk av "danske gjentaksintervall"

Gjentaksintervall	Skadede bygninger
129,1	3,077671067
53,2	2,140166754
33,5	1,651059302
24,4	1,315871662
19,2	1,06241762
15,9	0,862982458
13,5	0,689944342
11,7	0,5386152
10,4	0,41405964
Sum skader	11,75278805
Forholdstall	3,917596015

I tabell 28 vises det at forholdstallet er noe høyere enn det danske forholdstallet. For å justere for skjevheten påpekt i den danske metoden økes forholdstallet med samme prosent (45 %) som i den danske metoden, og man får et nytt forholdstall på 5,68. 568/90 gir en årlig omkostning på 6,31 % av kostnadene for et 100-års gjentaksintervall. Dette tallet benyttes videre til en ny sammenligning av metodene, som tidligere vist i tabell 27.

Tabell 29: Sammenligning mellom dansk analysemetode og valgt analysemetode etter justering etter forhold funnet fra Bogafjell

	Dansk metode	Brukt metode	Differanse
Nåverdi av totale skadekostnader	kr 610 326	kr 257 930	kr 352 397

I tabell 28 vises det at disse verdiene heller ikke samsvarer, og man kan på bakgrunn av dette anta at denne metoden ikke direkte kan overføres til et annet felt. For å gjøre en grundigere sammenligning ved norske forhold burde observerte tidsserier, og ikke konstruerte regnhendelser, benyttes.

9.5 Resultater fra kostnadsanalyse av klimatilpasningstiltak

Resultatene som presenteres i dette kapittelet er beregnet med 131 570 kr som gjennomsnittlig skadekostnad for hus/bygninger og med enhetskostnadene vist i tabell 25. Alle beregninger er gjort over en periode med 100 år med stigende klimatillegg.

9.5.1 Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

I tabell 30 vises de totale skadekostnadene og bakgrunnsdata nødvendig for beregningene ved innføring av økte ledningsdiameterer som klimatilpasningstiltak. Verdiene i denne tabellen er ikke i nåverdi.

Tabell 30: Totale skadekostnader ved klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, økning av diameter)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg, økning av diameter)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg, økning av diameter)
5	10	0	kr 0	kr 0
10	5	0	kr 0	kr 0
20	3	0	kr 0	kr 0
50	1	1	kr 131 570	kr 131 570
100	1	2	kr 263 140	kr 263 140
Sum				kr 394 710

Tabell 31: Netto nåverdiberegninger av klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Tiltak	Enhetskostnad kr/m	Antall enheter m	Total tiltakskostnad	Nåverdi
Utblokking	7832	1905,68	kr 14 925 286	kr 14 925 286
Omlegging	9922	1905,68	kr 18 908 157	kr 18 908 157
Skaderegnskap				
Total skadekostnad med klimatilpasningstiltak			kr 394 710	kr 48 845
Total skadekostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse ved klimatilpasningstiltak				kr 1 415 242
Netto nåverdi (utblokking)				-kr 13 510 044
Netto nåverdi (omlegging)				-kr 17 492 915

I tabell 31 vises netto nåverdi av tiltaket hvor tiltakets anleggskostnader er investeringsutgiften i år 0, og kostnadsbesparelsen blir nytteoverskuddet over 100 år ved gjennomføring av tiltak. Som vist er netto nåverdi negativ for begge alternativer; utblokking og omlegging, med utblokking som det mer kostnadseffektive tiltaket av de to. En negativ netto nåverdi tilsier at investeringen ikke er lønnsom.

9.5.2 Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

I tabell 32 vises deler av bakgrunnsdataene benyttet i beregning av totale skadekostnader ved gjennomføring av fordrøyning av overvann på overflaten som klimatilpasningstiltak. Verdiene i denne tabellen er ikke i nåverdi.

Tabell 32: Totale skadekostnader ved klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, fordrøyning)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg, fordrøyning)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg, fordrøyning)
5	10	0	kr 0	kr 0
10	5	0	kr 0	kr 0
20	3	0	kr 0	kr 0
50	1	0	kr 0	kr 0
100	1	2	kr 263 140	kr 263 140
Sum				kr 263 140

Tabell 33: Netto nåverdiregning av klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

Tiltak	Enhetskostnad kr/m ³	Antall enheter m ³	Total tiltakskostnad	Nåverdi
Fordrøyning	3 553	824,4260375	kr 2 929 186	kr 2 929 186
Skaderegnskap				
Total skadekostnad klimatilpasningstiltak			kr 263 140	kr 32 544
Total skadekostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse ved klimatilpasningstiltak				kr 1 431 543
Netto nåverdi				-kr 1 497 643

I tabell 33 vises netto nåverdi av tiltaket hvor tiltakets anleggskostnader er investeringsutgiften i år 0, og kostnadsbesparelsen blir nytteoverskuddet over 100 år ved gjennomføring av tiltak. Som vist er netto nåverdi negativ. Investeringen ved gjennomføring av tiltak kan dermed ikke anses som lønnsom på bakgrunn av de forutsetningene som ligger til grunn i beregningene.

9.5.3 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal

I tabell 34 vises deler av bakgrunnsdata benyttet i beregning av total skadekostnad av klimatilpasningstiltaket. Verdiene i tabellen er ikke i nåverdi.

Tabell 34: Total skadekostnad klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakobling takflater)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg, frakobling takflater)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg, frakobling takflater)
5	10	0	kr 0	kr 0
10	5	1	kr 131 570	kr 657 850
20	3	2	kr 263 140	kr 789 420
50	1	5	kr 657 850	kr 657 850
100	1	9	kr 1 184 130	kr 1 184 130
Sum				kr 3 289 250

Tabell 35: Netto nåverdiregning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal

Tiltak	Enhetskostnad kr/m ²	Antall enheter m ²	Total tiltakskostnad	Nåverdi
Frakobling takareal	23,69	16213,79016	kr 384 105	kr 384 105
Skaderegnskap				
Total skadekostnad klimatilpasningstiltak			kr 3 289 250	kr 406 804
Total skadekostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse ved klimatilpasningstiltak				kr 1 057 283
Netto nåverdi				kr 673 178

I tabell 35 vises netto nåverdi av tiltaket hvor tiltakets anleggskostnader er investeringsutgiften i år 0, og kostnadsbesparelsen blir nytteoverskuddet over 100 år ved gjennomføring av tiltak. Netto nåverdi på 673 178 kr er positiv, og investeringen kan dermed anses som lønnsom på bakgrunn av de forutsetningene som ligger til grunn i beregningene.

9.5.4 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og økning av ledningsdiameter

I tabell 36 vises de totale skadekostnadene ved gjennomføring av klimatilpasningstiltaket og deler av bakgrunnsinformasjonen brukt i beregningene. Kostnadene i tabellen er ikke i nåverdi.

Tabell 36: Totale skadekostnader klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakopling + diameterøkning)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg, frakopling + diameterøkning)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg, frakopling + diameterøkning)
5	10	0	kr 0	kr 0
10	5	0	kr 0	kr 0
20	3	1	kr 131 570	kr 394 710
50	1	1	kr 131 570	kr 131 570
100	1	3	kr 394 710	kr 394 710
Sum				kr 920 990

Tabell 37: Netto nåverdiberegning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter

Tiltak	Enhetskostnad kr/m ³	Antall enheter m ³	Tiltakskostnad	Nåverdi
Frakopling	23,69	16213,79	kr 384 105	kr 384 105
	kr/m	m		
Utblokking	7 832	822,94	kr 6 445 266	kr 6 445 266
Omlegging	9 922	822,94	kr 8 165 211	kr 8 165 211
Skaderegnskap				
Total skadekostnad klimatilpasningstiltak (utblokking)			kr 920 990	kr 113 973
Total skadekostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse ved klimatilpasningstiltak			kr 10 657 170	kr 1 350 114
Netto nåverdi (utblokking)				-kr 5 479 257
Total skadekostnad klimatilpasningstiltak (omlegging)			kr 920 990	kr 113 973
Total skadekostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse ved klimatilpasningstiltak			kr 10 657 170	kr 1 350 114
Netto nåverdi (omlegging)				-kr 7 199 201

I tabell 37 vises netto nåverdi av tiltaket hvor tiltakets anleggskostnader er investeringsutgiften i år 0, og kostnadsbesparelsen blir nytteoverskuddet over 100 år ved gjennomføring av tiltak. Netto nåverdi er negativ for begge alternativer og investering ved økning av ledningsdiameter kan ikke anses som lønnsom, på bakgrunn av de forutsetningene som ligger til grunn i beregningene.

9.5.5 Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

I tabell 38 presenteres de totale skadekostnader for klimatilpasningstiltaket og deler av bakgrunnsinformasjonen brukt i beregningene. Kostnadene i tabellen er ikke i nåverdi.

Tabell 38: Totale skadekostnader for klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

Gjentaksintervall (år)	Antall hendelser	Skadede bygninger (50 % klimatillegg, frakobling + fordrøyning)	Enkeltkostnader (50 % klimatillegg, frakopling + fordrøyning)	Totale skadekostnader (50 % klimatillegg, frakopling + frakobling)
5	10	0	kr 0	kr 0
10	5	0	kr 0	kr 0
20	3	0	kr 0	kr 0
50	1	2	kr 263 140	kr 263 140
100	1	4	kr 526 280	kr 526 280
Sum				kr 789 420

Tabell 39: Netto nåverdiregning av klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takareal og fordrøyning av overvann på overflaten

Tiltak kr/m ³	Enhetskostnad kr/m ³	Antall enheter m ³	Tiltakskostnad	Nåverdi
Frakopling	23,69	16213,79016	kr 384 105	kr 384 105
Fordrøyning	3 553	256,152495	kr 910 110	kr 910 110
Skaderegnskap				
Total skadekostnad klimatilpasningstiltak			kr 657 850	kr 81 409
Total kostnad uten klimatilpasningstiltak			kr 11 578 160	kr 1 464 087
Kostnadsbesparelse klimatilpasningstiltak				kr 1 382 678
Netto nåverdi				kr 88 463

I tabell 39 vises netto nåverdi av tiltaket hvor tiltakets anleggskostnader er investeringsutgiften i år 0, og kostnadsbesparelsen blir nytteoverskuddet over 100 år ved gjennomføring av tiltak.

Netto nåverdi er positiv og investeringen kan dermed anses som lønnsom på bakgrunn av de forutsetningene som ligger til grunn i beregningene.

9.6 Tiltakenes kostnadseffektivitet

Ved gjennomføring av en kost-effekt analyse skal tiltakene rangeres etter måloppnåelse og kostnader for å oppnå målet. Målet knyttet til gjennomføring av klimatilpasningstiltakene er i denne oppgaven å se om tiltakene avbøter skadene forårsaket av klimaendringer og bringer skadenivået ned på dagens nivå. Alle tiltak, utenom *frakopling av overvann fra takareal*, får skadenivået ned på tilnærmet dagens nivå. Grunnen til at frakopling som eneste tiltak ikke er effektivt for å avbøte skadene var at det ble vurdert som umulig å gjennomføre i hele feltet.

Tabell 40: Oppsummering av tiltak, oppfyllelse av mål og kostnader for å nå det bestemte mål

Tiltak	Oppfyller tiltaket den ønskede effekt?	Netto nåverdi
Økning av ledningsdiameter (utblokking)	ja	-kr 13 510 044
Økning av ledningsdiameter (omlegging)	ja	-kr 17 492 915
Fordrøyning av overvann på overflaten	ja	-kr 1 497 643
Frakopling av overvann fra takarealer	nei	kr 673 178
Frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter (utblokking)	ja	-kr 5 479 257
Frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter (omlegging)	ja	-kr 7 199 201
Frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	ja	kr 88 463

I tabell 41 vises tiltakene rangert etter kostnadseffektivitet; altså fra de tiltak som ved lavest samlet kostnadsbilde, netto nåverdi, oppnår det bestemte målet om å få skadenivået ved økte intensiteter ned på dagens nivå, til tiltak med høyest netto nåverdi.

Tabell 41: Rangering av tiltakene etter kostnadseffektivitet

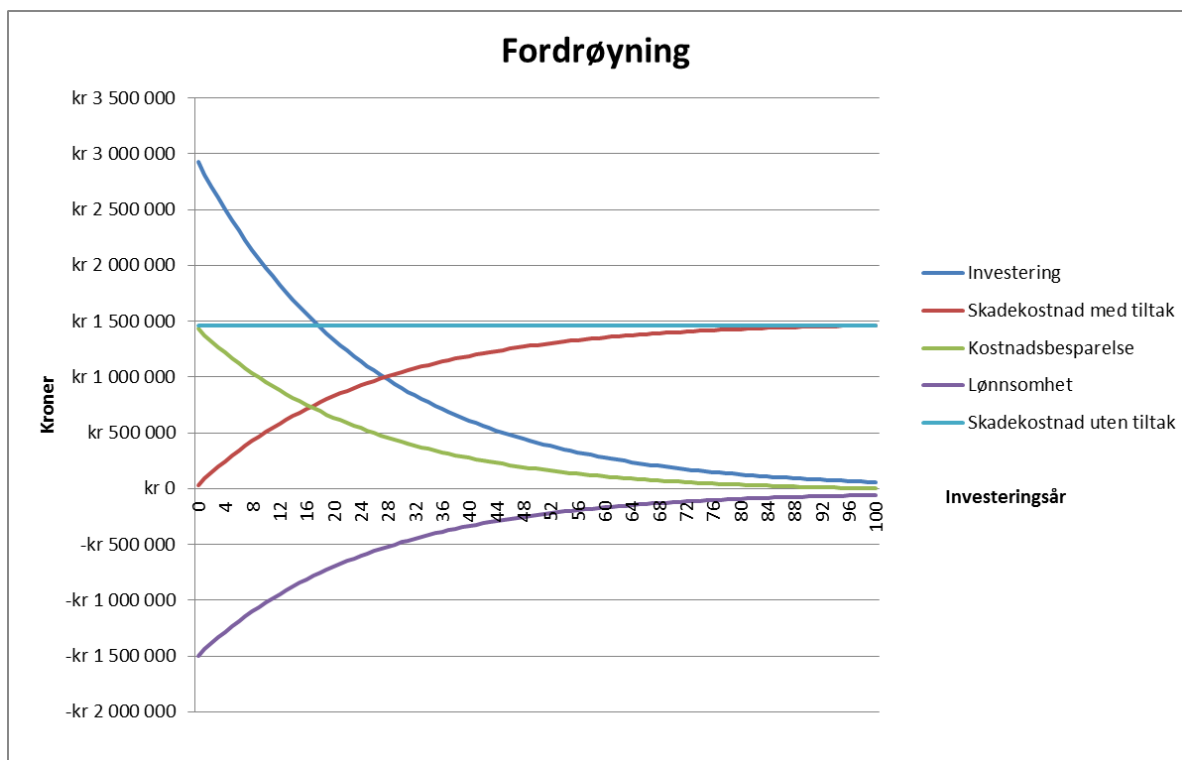
Tiltak	Rangering etter kostnadseffektivitet av netto nåverdi
Frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten	kr 88 463
Fordrøyning av overvann på overflaten	-kr 1 497 643
Frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter (utblokking)	-kr 5 479 257
Frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiameter (omlegging)	-kr 7 199 201
Økning av ledningsdiameter (utblokking)	-kr 13 510 04
Økning av ledningsdiameter (omlegging)	-kr 17 492 91
<i>Frakopling av overvann fra takarealer</i>	<i>kr 673 178</i>

Som vist er det kun klimatilpasningstiltaket med *frakopling av overvann fra takarealer* kombinert med *fordrøyning av overvann på overflaten* som oppfyller både de hydrauliske krav om at skadenivået skal ned på tilnærmet samme nivå som referansesituasjonen samtidig som at de økonomiske krav for lønnsomhet er oppfylt. De andre tiltakene, utenom *frakopling av overvann fra takarealer*, oppfyller det hydrauliske effektivitetsmålet, mens de økonomiske krav om lønnsomhet ikke oppfylles. For klimatilpasningstiltaket med frakopling av overvann fra takarealer er det kun det økonomiske krav om lønnsomhet som er oppfylt.

9.7 Tiltakenes lønnsomhet

Det er kun kombinasjonstiltaket med *frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten* som basert på de gjeldende forutsetninger kan anses som et lønnsomt klimatilpasningstiltak (med forutsetning om at effektivitetsmålet også må oppfylles). På bakgrunn av disse resultatene gjøres en analyse av tiltakenes lønnsomhet relatert til ulike investeringstidspunkt representert ved investeringsår 0 til 100.

I figur 61 presenteres resultatet fra lønnsomhetsanalysen av klimatilpasningstiltak; *fordrøyning av overvann på overflaten*. Resultatgrafene til de resterende klimatilpasningstiltakene er, sammen med dette, presentert i større format i vedlegg J grunnet grafenes plassbehov.



Figur 61: Tiltaketets lønnsomhet relatert til investeringsår, klimatilpasningstiltak; fordrøyning av overvann på overflaten

I figur 61 vises klimatilpasningstiltak; *fordrøyning av overvann på overflaten*, og tiltaketets lønnsomhet relatert til investeringsår. Investeringsår 0 representerer en investering i dag (2012), mens investeringsår 100 representerer en investering gjort i år 2110. Analysen omhandler, som tidligere, de totale kostnadene over 100 år – fra i dag til år 2110. Alle kostnader er totale kostnader i nåverdi med stigende klimatillegg.

Den mørkeblå kurven viser investeringsutgiftene (direkte anleggskostnader ved bygging av tiltaket) relativt til investeringsåret. Som vist i figuren vil investeringens nåverdi synke jo lengre bort vi beveger oss fra år 0. I år 0 er investeringsutgiften på kr 2 929 186, mens nåverdien av en investering som gjøres i eksempelvis investeringsår 40 (år 2052) er 610 117 kr. Den røde kurven representerer de totale skadekostnadene ved gjennomføring av tiltak relatert til investeringsår, regnet som nåverdi. Det vises i figur 61 at de totale skadekostnadene ligger på et lavt nivå på 32 544 kr (som vist i tabell 33) dersom investeringen skjer i år 0, og øker med investeringsåret, opp til samme nivå som de totale skadekostnadene uten gjennomføring av tiltak i løpet av de 100 årene. Krysningpunktet mellom den mørkeblå kurven og den røde kurven viser ved hvilket investeringsår nåverdien av de totale skadekostnadene ved gjennomføring av klimatilpasningstiltaket er like store som nåverdien av investeringen. Dette krysningpunktet finner sted i investeringsår 27, noe som tilsier at en investering før år 27 gir totale skadekostnader mindre enn investeringsutgiften, mens etter år 27 vil skadekostnadene være større enn investeringsutgiften. Dette betyr ikke at prosjektet er lønnsomt før år 27, da tiltaketets lønnsomhet måles etter om kostnadsbesparelsen ved gjennomføring av tiltak er større enn tiltaketets investeringsutgifter.

Den lyseblå linjen viser de totale skadekostnader uten gjennomføring av tiltak, og ligger derfor konstant på 1 464 087 kr (som vist i tabell 26). Krysningpunktet mellom den lyseblå linjen og den mørkeblå kurven viser ved hvilket investeringsår nåverdien av de totale skadekostnadene uten klimatilpasningstiltak er like store som nåverdien av investeringen.

Den grønne kurven viser kostnadsbesparelsen ved gjennomføring av tiltaket, og er i praksis differansen mellom skadekostnad uten tiltak (lyseblå linje) og skadekostnad med tiltak (rød kurve). Dersom tiltaket gjennomføres i år 0 er besparelsen 1 413 543 kr (som vist i tabell 33), mens besparelsen i år 40 er på 275 281 kr, regnet som nåverdi. Det er denne kurven, som sammen med den mørkeblå kurven gir grunnlag for tiltakets lønnsomhetskurve. Den lille kurven viser tiltakets lønnsomhet, netto nåverdi. For at tiltaket skal være lønnsomt må denne kurven være lik eller større enn null. Eller forklart på en annen måte; besparelsen (den grønne kurven) må være større enn investeringen (den mørkeblå kurven). Som vi ser i figuren går lønnsomhetskurven mot null, men er fortsatt negativ ved år 100. Dette forteller oss at tiltaket ikke vil bli lønnsomt i løpet av de neste 100 år ved de forutsetninger som gjelder for analysen.

Fra figurene i vedlegg J vises det at det kun er klimatilpasningstiltaket med frakopling av overvann fra takarealer som er lønnsomt ved alle investeringsår. Tiltaket med frakopling av overvann fra takarealer kombinert med fordrøyning av overvann på overflaten er lønnsomt dersom innvesteringen skjer før år 37 (2049). De resterende klimatilpasningstiltak er negative ved alle investeringstidspunkter fra i dag til år 100 (2112).

Del 4: Diskusjon og konklusjon

10 Diskusjon

10.1 Vurdering av metode

Dersom nødvendige bakgrunnsdata og tilstrekkelig informasjon hadde vært tilgjengelig på et tidlig tidspunkt i arbeidet med oppgaven ville det vært ønskelig å gjennomføre langtidssimuleringer basert på nedskalerte resultater fra en klimamodell. Grunnet det begrensede tidsperspektivet, og manglende data, ble det gjort hydraulisk analyse med enkeltregn med 5-, 10-, 20-, 50-, og 100-års gjentaksintervall og 60 minutters varighet.

Ved simulering av enkeltregn vil blant annet RDII-modulen utelates – det vil si at den detaljerte modelleringen av nedbør som rutes gjennom lagringsenheter som snø, overflate, rotsone og grunnvann for deretter å infiltrere ledningsnettverket ikke tas med i beregningene av overflateavrenning. Ved langtidssimulering med RDII får man mer nøyaktige hydrografer som input i beregning av rørstrømning. Ved langtidssimulering og bruk av RDII-modulen vil man innføre nye usikkerheter i modellen, spesielt med tanke på at parameterne som beskriver RDII-avrenningen til ledningsnett er vanskelige å fastslå uten målinger over lengre tidsperioder.

I praksis kan man si at det kun er regn i sommermånedene som simuleres. I litteraturen omhandlende avrenningsberegninger antas det, som forklart i kapittel 4.2.2, generelt at det for mindre felt er korte nedbørshendelser om sommeren som gir dimensjonerende avrenning. For større felt bør det beregnes vinteravrenning på frossen mark, snødekket mark med snøsmelting og langvarig regn. I tillegg bør høstavrenning med langvarig regn og vår mark beregnes i større felt. Tilrenningsfeltet til avløpsystemet på Bogafjell har et totalt areal rundt 115 ha, og går dermed ikke inn i kategorien lite nedbørsfelt. Dersom man ville tatt hensyn til at det muligens er vinter- og høstavrenningen som er dimensjonerende kunne man oppjustert andelen tette flater i feltet. Dette er ikke gjort i simuleringene, da ExFlood-gruppen har definert Bogafjell som et mindre nedbørsfelt.

Enkeltregnene som simuleres er i form av symmetriske regnhyetogram. Selv om disse regnhyetogrammene gir et mer realistisk bilde av en regnhendelse enn et kasseregner, er de likevel noe stiliserte. Som vist av Lindholm et al. (2003) vil de ulike konstruerte regn (symmetriske regnhyetogram, kasseregner og SIFALDA-regner) gi ulike oppstuvingsresultater i et ledningsnett. I samme studie ble det vist at de symmetriske regnhyetogrammene anbefales der hvor korte intense sommerregn antas som dimensjonerende. Ved slike konstruerte regn får man ikke testet videre Hagas (2011) påstand om at både størrelsen og plasseringen av regnets toppintensitet i regnhendelsen har stor påvirkning på avløpsnettets respons. Til dette burde man gjort en mer systematisk sammenligning av simuleringsresultater basert på ekte nedbørshendelser.

Ved økonomisk analyse etterrapes en langtidssimulering ved å finne forventet antall hendelser ved de ulike gjentaksintervall i løpet av en 100-års periode. Metoden er en statistisk, og ikke fullstendig realistisk, beskrivelse av virkeligheten. Metoden er valgt benyttet da den gir en

beskrivelse av antall hendelser i løpet av 100 år, noe som er nødvendig for å gjøre en økonomisk analyse av nettet.

For å kunne gjøre en sammenligning av klimatilpasningstiltakenes avbøtende virkning er det valgt dagens skadenivå ved 100-års gjentaksintervall som referansesituasjon. Det søkes at tiltakene skal bringe skadenivået ved 100-års gjentaksintervall med 50 % klimatilpassing ned til dagens nivå. Man kunne naturligvis valgt et annet referansenivå, for eksempel 20-års gjentaksintervall, som er dimensjonerende regnhypptighet i forhold til Norsk Vanns anbefalte dimensjonerende normer. Da problemstillingen omhandler avbøting av klimaendringenes negative effekt på avløpssystemet var det enkelt å gjøre en sammenligning basert på 100-års gjentaksintervall, som er den nedbørshendelsen med høyest intensitet som gjennomsnittlig opptrer én gang i løpet av analyseperioden.

I den økonomiske analysen er det benyttet lineært stigende klimatillegg, fra 0 % til 50 % i løpet av 100 år, for å beskrive klimaendringenes effekt på skadekostnadene. Da man ikke har noen forutsetning for å sikkert si hvordan klimaet vil utarte seg, antas det at dette er en relevant måte å beskrive klimaets stigende effekt på avløpssystemet og dermed skadekostnadene. Ved bruk av stigende klimatillegg slipper man å overvurdere kostnadene ved å kun benytte seg av 50 % klimatillegg.

10.1.1 Usikkerhet i hydraulisk modell

Når man benytter seg av en hydraulisk modell introduseres ekstra usikkerheter til datagrunnlaget og informasjonen man bygger resultatene på, siden en modell i seg selv inneholder svakheter og usikkerheter som påvirker modellens resultater.

Det er benyttet en urbanhydrologisk modell utviklet av DHI for Sandnes kommune. Modellen er ikke kalibrert eller verifisert, og kan dermed ikke sies å oppfylle kravene som stilles til en gyldig hydrologisk-/hydraulisk modell (som forklart i kapittel 6). Dette tillegger modellens resultater usikkerheter. I tillegg vil bakgrunns materialet i modellen også representere usikkerheter. En korrekt beskrivelse av blant annet overflatens topografi, andel tette flater, rørhelning og rørdiameter er av ytterste viktighet for beregninger av overflateavrenningen og rørstrømning. Denne informasjonen er hentet fra digitale grunnkart over kommunen og kommunens database i Gemini VA. I rapporten til Vike (2010) forklares det at der hvor Gemini VA hadde mangelfull informasjon om høyder på topp/bunn kum er disse interpolert mellom nærliggende kummer eller høydekurver. Dette vil si at man i deler av modellen ikke har riktig beskrivelse av høydeforhold, noe som gir utslag i rørhelning og som muligens kan påvirke oversvømmelsesforholdene vist i modellen. Inndelingen av delfelt er gjort automatisk ved definering av polygoner rundt kummene. Dette gir et urealistisk bilde av tilrenningen til de ulike kummene/slukene da polygonene ikke er delt inn etter vannets naturlige strømningsveger.

I modellen benyttes også flere standardinnstillinger. Et eksempel på dette er konsentrasjonstid, hvor en standardinnstilling muligens gir et urealistisk bilde av virkeligheten, men som antas å ikke ha meget stor påvirkning på resultatene (jamfør følsomhetsanalyse i kapittel 8.7). Det antas at andelen tette flater er noenlunde korrekt, da disse er beregnet ut fra de digitale grunnkart over kommunen. Som vist i følsomhetsanalysen av andel tette flater vil en liten endring i disse gi utslag på resultatene.

10.1.2 Usikkerhet i bakgrunns materialet

IVF-kurvene som er benyttet for konstruksjon av de symmetriske regnhyetogrammene er fra målestasjonen på Rovik i Sandnes. Dette er omtrent 5 kilometer fra Bogafjell. Nedbøren i et bestemt øyeblikk kan variere mye selv over korte avstander (Lindholm 2011f), og det er dermed ikke gitt at måledata for Rovik også er gjeldende for Bogafjell. Det antas at variasjonene over en såpass kort avstand er tilnærmet neglisjerbare, og at verdiene er representative på tross av variasjonene som kan forekomme. IVF-kurvene fra Rovik er også de regndata målt nærmest Bogafjell, og bør derfor benyttes.

I den hydrauliske analysen gjøres simuleringer av regn med dagens intensiteter, og regn med 50 % klimatillegg. Klimatillegget representerer en stor usikkerhet i resultatene. Fra beregninger for Kalmar for år 2071 – 2100 er det vist at de høye regnintensitetene økte 20-30 % for sommerregn, mens 50 -60 % for høstregn. Et klimatillegg på 50 % representerer et «worst case» scenario. En klimafaktor på 1,5 er muligens noe overvurdert, men likevel innenfor retningslinjene til den nye veiledningen om klimatilpasset overvannshåndtering som er under utarbeidelse.

10.2 Vurdering av resultater

10.2.1 Hydraulisk analyse

For å kunne telle antall skadede hus/bygninger er det antatt at et volum på 3000 l på overflaten gir skade på 1 hus. Dette er et nokså tilfeldig kriterium, som tilfører usikkerhet til resultatene. Dersom man antok at et volum på 2000 liter gir skader på hus ville man ved 100-års regn med 50 % klimatillegg fått skader på 28 hus i stedet for 18 hus. Ved å øke kriteriet for skade til 4000 volum ville man ved et 100-års regn med 50 % klimatillegg fått skader på 11 hus. I virkeligheten vil volumet ut av kummene kunne være større, da IVF-kurvene kan være et utsnitt – et tidsvindu – av et lengre regn (Lindholm 2012e). Skadevolumet antas som mer relevant enn kun antall kummer med oversvømmelse, siden antall kummer med oversvømmelse ikke forteller oss noe om mengden vann på overflaten, og vil således føre til en overvurdering av skadene.

I oppgaven er markoverflaten benyttet som kritisk nivå for oppstuvning. Dette er vanlig ved simulering av separatsystem. Siden det kun er kortere regn som simuleres antas det at man ikke vil få vann stående rundt grunnmur/bygning over lengre tid, og man kan derfor se bort

fra skader ved lavere kritisk nivå for oppstuvning. I praksis vil det mest sannsynlig forekomme skader da noen hus (1-3 %) har feilkoblinger mellom spillvanns- og overvannsledninger og inntrenging av vann via drens-system hvor overvannsledningen er koblet inn (Lindholm 2012e). Dette er ikke tatt hensyn til ved opptelling av skader, og gir følgelig en liten undervurdering av skadenivå.

Resultatene fra den hydrauliske analysen av klimaendringenes effekt på avløpsnett og klimatilpasningstiltakenes avbøtende virkning mot dette er i stor grad preget av flere usikkerheter. Spesielt omhandler usikkerhetene den ukalibrerte modellen av avløpssystemet på Bogafjell og undervurderingen av skadenivå ved at kun skader på bygninger inkluderes. Tiltakenes hydrauliske effekt blir dermed ikke målt opp mot det totale skadenivået hvor skader på blant annet vei, rør og kummer også inkluderes. Som kommentert i resultatdelen, og vist i vedlegg C – H, er det ofte oversvømmelser med store oversvømmelsesvolum ved kummene (Node_1 og 17113) ved utløpet. Dette gjør seg gjeldende i resultatene ved antall oversvømmelser og totalt oversvømmelsesvolum, men påvirker ikke skadenivået. Dette volumet vil mest sannsynlig gjøre skader på områdene rundt og muligens også på selve avløpssystemet. Dette er et eksempel på hvor skadenivået i modellen kontinuerlig undervurderes, da det ikke er hus i området. Det bør bemerkes at disse kummene mest sannsynlig preges av at det gamle fordrøyningsvolumet som opprinnelig finnes i modellen er tatt bort og erstattet med rør og to nye utløp. Det er usikkert hvorvidt den skisserte løsning stemmer med virkeligheten, selv om den er lagt inn etter skisser fra Sandnes kommune.

Som vist i figur 39 – 43, og i vedlegg C og vedlegg I, er de fleste kummene med store oversvømmelsesvolum i området der hvor det antas at infiltrasjon ikke er mulig. Som vist i figur 49 og tabell F2 i vedlegg F, reduserer frakopling av overvann fra takarealet lite skader. Den generelle avbøtingseffekten til det aktuelle klimatilpasningstiltaket antas ikke å være tilstrekkelig testet i casestudiet, grunnet feltets forutsetninger.

Klimatilpasningstiltakene vises å være generelt mer effektive ved lavere gjentaksintervall. I stedet for å vurdere klimatilpasningstiltakenes avbøtende virkning på klimaendringenes negative effekt på avløpssystemet i forhold til en referansesituasjon ved dagens 100-års regn, kunne man vurdert effekten opp mot den dimensjonerende oversvømmelsesfrekvens. Fra Norsk Vanns dimensjonerende normer antas den dimensjonerende frekvensen å være 20 år, da Bogafjellfeltet karakteriseres som et boligfelt. Ved 20-års gjentaksintervall ser man fra tabell 10 at antall oversvømmelser øker fra tre oversvømmelser ved dagens regnintensiteter til 18 ved 50 % klimatillegg. Ved dagens intensiteter antas det at antall skadede hus ved 20-års gjentaksintervall er på ett hus, mens det ved 20-års gjentaksintervall med 50 % klimatillegg er 6 skadede bygninger. Ved 50 % klimatillegg har man allerede ved 5-års gjentaksintervall 8 oversvømmelser, og 2 bygninger som antas skadet. Dette vil si at man i et nytt klimaregime ikke overholder dimensjoneringsnormen, og det kan dermed anses å være nødvendig å gjennomføre klimatilpasningstiltak på Bogafjell innen de neste 100 år. Ved nye beregninger av klimaendringenes effekt på avløpssystemet på Bogafjell bør man vurdere å finne det dimensjonerende regnets nye intensiteter, eller øke gjentaksintervall for dimensjonerende

regn. Man kan også vurdere å teste hvor effektivt tiltaket er per krone ved reduksjon av skadenivå.

10.2.2 Økonomisk analyse

Investeringskostnadene for de ulike tiltakene er hovedsakelig basert på eldre kostnader fra VAV, da dette var noen av de få kostnadstallene tilgjengelig som var i form av enhetskostnader. Tallene er lite spesifisert i forhold til hva som inngår kostnadene, men er antatt å være tilnærmet riktige ved sammenligning av generelle priser og anbudsdokumenter innhentet fra blant andre Norconsult og Oddvar Lindholm. Kostnadene er justert for prisendring ved hjelp av konsumprisindeksen, hvor den prosentvise endringen i regnes å være et mål for inflasjonen. Enhetskostnadene blir noe stiliserte i forhold til virkelighetens kostnadsbilde. I realiteten vil den første enheten som utføres være dyrere enn den neste i samme område, da mange kostnader forbundet med oppstarten av et anleggsarbeid tillegges denne første enheten.

Også skadekostnadene for oversvømmelse av overvann i bygninger kan antas å være usikre. Selv om gjennomsnittlig skadeutbetaling fra VASK er funnet i samarbeid med Harald Moseby i FNO, er det vanskelig å finne de nøyaktige skadekostnadene knyttet til skader ved inntrenging av overvann fra overflaten. Dette hovedsakelig grunnet at kostnadene ikke har nødvendig detaljeringsgrad i registeret. Kostnadene vil også variere stort mellom de ulike skadehendelsene, alt ettersom om det blir stående vann i innredede rom/kjellere, hvor høyt vannet står over gulvet og hvor lenge vannet blir stående. Ved sammenligning med skadekostnadene fra Trondheim (vist i figur 59) antas det likevel at gjennomsnittskostnaden benyttet i oppgaven er på et relevant nivå.

Som for skadenivået (antall antatt skadede hus/bygninger) vil også de totale skadekostnadene i virkeligheten ikke kun omhandle skadekostnader knyttet til bygninger og hus, men også veier, rørsystem, kummer etc. Ved så store vannmengder som presenteres i resultatene vil det også mest sannsynlig oppstå erosjonsskader, ødeleggelse av turområder rundt Stokkelandsvannet og trafikkforstyrrelser. Da det kun er skadekostnader på bygninger som vurderes i denne oppgaven antas skadekostnadene å være meget undervurdert.

Tiltakene som simuleres i den hydrauliske analysen er løsninger som grovt viser et tiltaksprinsipp, mer enn et detaljert og dimensjonert tiltak. Ved en grundigere analyse vil følgelig en mer detaljert tiltaksbeskrivelse være nødvendig.

I kost-effekt analysen av klimatilpasningstiltakene ser vi at det kun er kombinasjonstiltaket med frakopling av overvann fra takareal og fordrøyning av overvann på overflaten som kan anses som en lønnsom investering på Bogafjell, under de gjeldende forutsetninger. Av analysen fremkommer det likevel fra rangeringen at det er klimatilpasningstiltakene som hører til i kategorien *åpne og lokale løsninger* som er mest kostnadseffektive. Dette stemmer med den generelle oppfatning av åpne og lokale løsninger, som gjerne antas som rimeligere

ved investering enn konvensjonelle tiltak som for eksempel kapasitetsøkning i ledningsnettet. Det kan diskuteres om resultatet ville blitt det samme dersom driftskostnadene var inkludert i regnskapet, da disse generelt antas å kunne være noe høyere for åpne og lokale løsninger.

Som vist i rangeringen av klimatilpasningstiltakenes lønnsomhet er det tiltaket som ikke klarer å avbøte skadene som oppstår som følge av klimaendringene, *frakopling av overvann fra takarealer*, som er mest lønnsomt etter forutsetningene i analysen. På bakgrunn av dette kan det se ut som om det muligens er mer lønnsomt for Sandnes kommune å tolerere et høyere skadenivå på Bogafjell. Det må likevel bemerkes at dette tiltaket har de mest usikre investeringskostnadene, som mest sannsynlig vil være mye høyere da det gjerne anlegges regnbed eller infiltrasjonsmagasiner ved gjennomføring av infiltrasjonsløsninger. Det understrekes også at det ble valgt å anlegge et separatsystem ved utbyggingen av feltet på Bogafjell. Separatsystem er et mer kostbart system enn fellessystem, men som antas å redusere skader og skadekostnader, og kan vurderes som et klimatilpasningstiltak i seg selv.

Det ville vært interessant å finne det samfunnsøkonomiske optimale skadenivå, og se om det ved dette feltet vil være mer lønnsomt å reparere skader enn å forebygge dem. Ved en slik analyse burde man kikke på skadekostnader knyttet til alle skader og ulemper som oppstår for samfunnet ved oversvømmelse i tillegg til å ha en grundigere gjennomgang av kostnadene ved gjennomføring av de ulike klimatilpasningstiltakene.

11 Konklusjon

I konklusjonen vil det, grunnet de usikkerheter og svakheter nevnt i diskusjonskapittelet, ikke gis generelle og universelle svar på problemstillingene stilt i oppgaven. Resultatene antas kun å være gyldige under de gjeldende forutsetninger for det relevante studieområdet. Under de antagelser som er benyttet antas det ikke at resultatene alene og direkte kan overføres til generaliteter omhandlende klimatilpasningstiltakenes effektivitet som mottiltak mot klimaendringenes negative effekt på andre avløpssystemer enn det på Bogafjell. Resultatene kan i beste fall sees på som en del av et større regnskap omhandlende klimatilpasningstiltakenes effektivitet for avbøting av skader som oppstår som følge av klimaendringenes konsekvens på avløpssystemet.

Nedenfor vil de viktigste funnene fra arbeidet med oppgaven presenteres kort:

- En økning i nedbørintensitet som følge av klimaendringer vil ha konsekvenser for ledningsnettet på Bogafjell i form av flere oversvømmelser fra kummer og flere skader på hus/bygninger.
- Avløpssystemet på Bogafjell er meget sårbart i forhold til en økning av andelen tette flater, noe som bør tas hensyn til ved videre utbygging av feltet.

- De totale skadekostnadene omhandlende skader på hus/bygninger antas å være omtrent 5 975 000 kr i løpet av de neste 100 årene forutsatt at klimaendringene øker lineært til en 50 % økning i nedbørens intensitet. Dette representerer ikke de totale skadekostnadene for feltet, som også antas å inkludere skader på blant annet veg, avløpssystem og rekreasjonsområder.
- Det er kun klimatilpasningstiltakene med kombinasjon av *frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten*, og *frakopling av overvann fra takarealer*, som etter gjeldende forutsetninger som kan anses som lønnsomme investeringer. Av disse to tiltakene er *frakopling av overvann fra takarealer* mest lønnsom. Dette tiltaket oppfyller ikke det gitte effektivitetsmålet om å bringe skadenivået ved 50 % klimatillegg ned til dagens nivå. Dette bringer opp spørsmålet om det er samfunnsøkonomisk lønnsomt med et høyere skadenivå i et nytt klimaregime, og om det vil være mer gunstig å reparere skader enn å forebygge dem på Bogafjell.
- Avløpssystemet på Bogafjell er i følge modellen sårbart for regn med lavt gjentaksintervall, og man har allerede i dag oversvømmelser ved nedbørshendelser med 10-års gjentaksintervall. Med 50 % klimatillegg får man etter gjeldende forutsetninger oversvømmelser ved 2-års gjentaksintervall, og skader på hus/bygninger ved 5-års gjentaksintervall. Systemet kan synes å være noe underdimensjonert i forhold til dimensjonerende norm i dag, og vil med økte klimaendringer ikke overholde dimensjoneringskriteriet uten gjennomføring av tiltak. Likevel antas avløpssystemet å være noenlunde godt rustet til å motstå klimaendringene, mye grunnet at ledningsnett er anlagt som separatsystem, som antas å være robust i forhold til skader.
- En hydraulisk og økonomisk analyse av klimatilpasningstiltak bør gjennomføres med et så detaljert skade- og kostnadsbilde som mulig for å finne det samfunnsøkonomiske optimale skadenivå.

12 Personlige refleksjoner ved avslutning av oppgaven

Gjennom arbeidet med oppgaven sitter jeg igjen med spørsmål knyttet til hvordan Sandnes kommune, og de andre kommunene i Norge, i praksis gjennomfører sine analyser av klimatilpasningstiltak. Hvordan gjøres prioriteringen av tiltak i praksis, og på hvilken bakgrunn og informasjon prioriteres det? Viktigheten av mer tilgjengelig informasjon om skadekostnader og kostnader ved gjennomføring av tiltak er for meg blitt tydeliggjort gjennom arbeidet. Uten nøyaktige grunnlagsdata og tilstrekkelig informasjon er det tilnærmet umulig å få resultater som kan antas å være realistiske og gjeldende for virkeligheten.

De dimensjonerende normene som brukes sier ingenting om antall skader som forekommer og hvilket skadenivå som er samfunnsøkonomisk optimalt, og jeg undrer meg på om man noen

gang undersøker om det dimensjonerende gjentaksintervallet man benytter seg av virkelig er det samfunnsøkonomisk optimale gjentaksintervall for kommunen/feltet. Vann- og avløpsetaten i en kommune burde ha tilgang på, eller i samarbeid med andre undersøke, de dokumenterte skadekostnader ved oversvømmelse for alle sektorer slik at man har muligheten til å finne ut hvilket skadenivå som er samfunnsøkonomisk lønnsomt. Ved slike analyser må også immaterielle skader, som frykten for oversvømmelse, vurderes. I tillegg bør det vurderes om kommunen ønsker å opprettholde et generelt servicenivå for sine innbyggere, som man gjør i Danmark. Ved slike analyser vil det være lettere å gjøre en riktig prioritering av kostnadseffektive klimatilpasningstiltak, og det vil også muligens vil gi større rom for investering i flomforebyggende tiltak.

Det må selvsagt nevnes at problemet ved slike analyser sannsynligvis ikke er at det ikke finnes tilgjengelige kostnadstall for ulike skader, da det finnes flere studier omhandlende skader som følge av klimaendringer i ulike sektorer. Utfordringene ligger gjerne i å finne et tall på hvor mange skader som oppstår relatert til ulike nedbørshendelser i ulike felt.

Med full forståelse for at ovennevnte analyser vil være særs krevende å gjennomføre burde man også undersøke enklere metoder for beregning av skadenivå, som det ble gjort av DANVA, vist og vurdert i kapittel 9.4.1.

Referanser

- Adrianov, A. & Vagle, O. A. (2011). (Personlig meddelelse 07.11.2011).
- Adrianov, A. (2012). *Sandnes kommune - ExFlood* (E-post til Ina Bekkum 27.02.2012).
- Andreassen, A. (2011). *Vassdrag, flom og skred i arealplaner (innlegg på seminar om arealbruk i flom- og skredutsatte områder, Svolvær 4.-5. oktober 2011)*, NVE Region nord.
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2008). Forventede ændringer i ekstremregn som følge af klimaændringer. *Spildevandskomiteen IDA Spildevandskomiteen*. 37 s.
- Bjerkholt, J. T. (2011). *Forelesningsnotater THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Modellering av vannforsyningsnett*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Bjerknessenteret. (2007a). *Klimaleksikon*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/pages.asp?id=209&kat=124&lang=1> (lest 16.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2007b). FNs klimapanelers fjerde hovedrapport, del 1 - Hva skjer med klimaet? Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/551.pdf> (lest 16.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2009a). Klimaendringer i fortiden. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1372.pdf> (lest 16.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2009b). Klimamodeller og fremtidens klima. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1365.pdf> (lest 20.01.2012).
- Bjørnæs, C. (2009). *Klima forklart*. Klima forklart: tilbakekoblinger (red.). Oslo, Unipub.
- Buchdal, J. & Hare, S. (2000a). *Encyclopedia of the Atmospheric Environment - Global Energy Balance*. Tilgjengelig fra: <http://www.ecoca.ro/meteo/tutorial/english.html> (lest 16.01.2012).
- Buchdal, J. & Hare, S. (2000b). *Encyclopedia of the Atmospheric Environment - Climate System*. Tilgjengelig fra: <http://www.ecoca.ro/meteo/tutorial/english.html> (lest 16.01.2012).
- Buchdal, J. & Hare, S. (2000c). *Encyclopedia of the Atmospheric Environment - Causes of Climate Change*. Tilgjengelig fra: <http://www.ecoca.ro/meteo/tutorial/english.html> (lest 16.01.2012).
- Butler, D. & Davies, J. W. (2000). *Urban Drainage*. London, E & FN Spon. 489 s.
- Bøyum, Å. & Thorolfsson, S. (2001). *VA-teknikk del 2 - Avløp*. Trondheim, Norge, Tapir Akademisk Forlag - Kompendieforlaget.

CCSP. (2008). *Climate Models: An Assessment of Strengths and Limitations*. . A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. . Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research.

Cicero. (2009). *Faktaark 4: FNs klimapanel og klimaskeptikerne*. Tilgjengelig fra: <http://www.cicero.uio.no/webnews/index.aspx?id=11148> (lest 18.01.2012).

Cicero. (2010). *Hvorfor endrer klimaet seg?* Tilgjengelig fra: <http://www.cicero.uio.no/abc/klimaendringer.aspx#bm2> (lest 16.01.2012).

COWI. (2010). *Bruk av nedbørdata - Sluttrapport fra pilotprosjekt i Tønsberg*. Tilgjengelig fra: http://www.cowi.no/menu/Prosjekter/vannogmiljo/naturogvannressurs/Documents/Rapport_lav.pdf (lest 08.03.2012).

COWI/NIRAS. (2007). *Klimatilpasning af afløbssystemer og metodeafprøving. Økonomisk analyse. Miljøprojekt*, Miljøstyrelsen.

Dannevig, P. (2009). *Rogaland - klima*. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/Rogaland/klima> (lest 29.02.2012).

Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2009). *Klima*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://www.snl.no/klima> (lest 25.01.2012).

Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2011). *Norge - klima*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://www.snl.no/Norge/klima> (lest 25.01.2012).

DANVA. (2011). *En kokebok for analyser af klimaendringers effekter på oversvømmelser i byer. DANVA F&U rapport DANVA*.

Davies, E. G. R. & Simonovic, S. P. (2005). *Climate change and the hydrological cycle*. 17th Canadian Hydrotechnical Conference - Hydrotechnical Engineering: Cornerstone of a Sustainable Environment.

DHI. (2011). *MIKE by DHI Software Catalogue*. Tilgjengelig fra: <http://www.mikebydhi.com/media/mikebydhi2011/index.html> (lest 16.02.2012).

DHI. (a). *MOUSE Pipe Flow - Reference Manual*.

DHI. (b). *MOUSE Surface Runoff Models - Reference Manual*.

DHI. (c). *MOUSE Short Introduction and Tutorial*.

ExFlood. (2009). *Extreme weather in small catchments: new method for flood protection - ExFlood*. Tilgjengelig fra: [https://fronter.com/umb/links/files.phtml/581669347\\$210501180\\$/Arkiv/Exflood+beskrivelse/Sider+fra+Exflood+proposal_2009_textonly.pdf](https://fronter.com/umb/links/files.phtml/581669347$210501180$/Arkiv/Exflood+beskrivelse/Sider+fra+Exflood+proposal_2009_textonly.pdf) (lest 11.01.2012).

ExFlood. (2010). *Work packages*. Tilgjengelig fra: http://www.bioforsk.no/ikbViewer/page/prosjekt/tema?p_dimension_id=22783&p_menu_id=22793&p_sub_id=22784&p_dim2=22790 (lest 11.01.2012).

Finansdepartementet. (1997). *Nåverdimetoden*. NOU 1997:27 Nytte- kostnadsanalyser. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/fin/dok/nouer/1997/nou-1997-27/3/6/1.html?id=347211> (lest 16.04.2012).

FNO. (2012). *VASK - Vannskadestatistikk*. Tilgjengelig fra: <http://www.fnh.no/no/hoved/statistikk/skadeforsikring/vask/> (lest 16.03.2012).

Forskningsrådet. *Extreme weather in small catchments: new method for flood protection*. Tilgjengelig fra: <http://www.forskningsradet.no/servlet/Satellite?c=Prosjekt&cid=1253953670090&pagename=norklima/Hovedsidemal&p=1226993599906> (lest 11.01.2012).

Forskningsrådet. (2010). Norges nasjonale klimaforskningsprogram - Klimaendringer og konsekvenser for Norge - NORKLIMA, Norges forskningsråd.

Fuglestedt, J. S., Harstveit, K. E. & Benestad, R. (2012). *klima - klimaendringer*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/klima/klimaendringer> (lest 16.01.2012).

Fylkesmannen i Oslo og Akershus. (2011). *Klima i endring - kommunene bør arbeide med klimatilpasninger innen avløpssektoren*. Miljøvernavdelingen.

Fylkesmannen i Rogaland. (2011). *Klimatilpassing i Rogaland - Vedlegg 2 FylkesROS Rogaland: BETRE FØRE VAR...*

Førland, E. J., Alfnes, E., Amundsen, H., Pytte, R., Benestad, R., Debernard, J., Engen-Skaugen, T., Hanssen-Bauer, I., Harstveit, K. E., Haugen, J. E., Hovelsrud, G. K., Isaksen, K., Jaedicke, C., Kronholm, K., Kvambekk, Å. S., LaCasce, J., Roald, L. A., Sletten, K. & Stalsberg, K. (2007). *Climate change and natural disasters in Norway - An assessment of possible future changes. met.no report, 06/2007*.

Haga, I. (2011). *Analyse av klimaendringers virkninger på overvannsnettet i Bogafjellfeltet, Sandnes kommune - en casestudie*. Masteroppgave. Ås, Norge, Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 74 s.

Hambro, E. (2007, 17.01.2012). *Hvorfor er FNs klimapanelers konklusjoner så viktige?* . Pressekonferanse - FNs fjerde klimarapport, Oslo. Statens forurensningstilsyn (SFT).

Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., Sundby, S., Vasskog, K. & Ådlandsvik, B. (2009). *Klima i Norge 2100 - Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing*. Tilgjengelig fra: http://www.dirnat.no/multimedia/1780/Klima_Norge_2100_fUR-M.pdf&contentdisposition=attachment (lest 11.01.2012).

- Hanssen-Bauer, I. (2012). *NOU Klimatilpasning* (E-post til Ina Bekkum 10.02.2012).
- Hay, L. E., Wilby, R. L. & Leavesley, G. H. (2000). A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36 (2): 11.
- Holvik, I. S. (2010). *Impact of storm water runoff from climate change - Example study in Sandnes, Norway*. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering. 136 s.
- IPCC-TGICA. (2007). General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaption Assessment. Version 2. Prepared by T.R Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. Tilgjengelig fra: http://www.ipcc-data.org/guidelines/TGICA_guidance_sdciaa_v2_final.pdf (lest 23.01.2012).
- IPCC. *Organization*. Tilgjengelig fra: <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml> (lest 17.01.2012).
- IPCC. (2000). *Special Report on Emission Scenarios*. UNEP/GRID-Arendal. Tilgjengelig fra: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/?src=/climate/ipcc/emission/ (lest 17.01.2012).
- IPCC. (2007). *Summary for Policymakers*. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Tilgjengelig fra: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm.pdf> (lest 24.01.2012).
- IPCC. (2010). *Greenhouse gas emissions scenarios and surface temperature projections*, UNEP/GRID-A. Tilgjengelig fra: <http://maps.grida.no/go/graphic/greenhouse-gas-emissions-scenarios-and-surface-temperature-projections> (lest 19.01.2012).
- Jansen, E. (2007). *Presentasjon av hovedfunn*. Pressekonferanse - FN's fjerde klimarapport, Oslo. Statens forurensningstilsyn (SFT).
- Kallbekken, S. (2006). Forsterkende og dempende klimaeffekter. *Cicerone* (3). Tilgjengelig fra: http://www.cicero.uio.no/fulltext/index_e.aspx?id=4181 (lest 18.01.2012).
- Kunnskapsforlagets papirleksikon. (2009b). *Albedo - mål for refleksjonsevne*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: http://snl.no/albedo/mål_for_refleksjonsevne (lest 17.01.2012).
- Kunnskapsforlagets papirleksikon. (2011). *Adveksjon*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/adveksjon> (lest 20.01.2012).
- Kunnskapsforlagets papirleksikon & Askheim, S. (2011). *Paleoklimatologi*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: <http://snl.no/paleoklimatologi> (lest 16.01.2012).

Køste, A. & Hval, J. P. (2011). *Modellering av avløpsnettverk med hensyn på klimaendringer i Fredrikstad kommune*. Masteroppgave, Universitetet for miljø- og biovitenskap. 125 s.

Lenart, M. (2011). *Earth System Models Southwest Climate Change Network*. Tilgjengelig fra: <http://www.extension.org/pages/54702/earth-system-models> (lest 08.02.2012).

Lindholm, G. (2012). *ExFlood Masteroppgave* (E-post 14.03.2012).

Lindholm, O., Engan, J. A., Rapp, Ø., Petersen-Øverleir, A. & Markhus, E. (2003). Revurdering av beregningskriterier for avløpssystemer, flom i kommunale avløpssystem. *NIVA rapport*, Norsk institutt for vannforskning (NIVA).

Lindholm, O., Nie, L. & Bjerkholt, J. T. (2007). Klimaeffektens betydning for oppstuvinger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer. *IMT-rapport*, Institutt for matematiske realfag og teknologi, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk Vann Rapport*. 79 s.

Lindholm, O. (2011a). *Forelesningsnotater THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Status og utfordringer for VA-nettet*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O. (2011b). *Forelesningsnotater THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Klimaendringer og effekter*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O. (2011c). *Forelesningsnotater THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Helhetlig urban flomplanlegging*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O. (2011d). *Forelesningsnotater THT 300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Overvannsplanlegging - NORSK VANNS veileder*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O. (2011e). *Forelesningsnotater THT300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Om matematiske modeller for beregning av urbane avløpssystemer*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Lindholm, O. (2011f). *Forelesningsnotater THT300 Vassdragsplanlegging og VA-systemer - Videregående emner om nedbær til bruk i urbanhydrologien*.

Lindholm, O. (2012a). (Personlig meddelelse 06.03.2012).

Lindholm, O. (2012b). *Master* (E-post 12.03.2012).

Lindholm, O. (2012c). (Personlig meddelelse 17.04.2012).

Lindholm, O. (2012d). *Kostnadstall* (E-post 06.03.2012).

Lindholm, O. (2012e). *Masteroppg.* (E-post 10.04.2012).

Meteorologisk institutt. (2009a). *Atmosfæren*. Tilgjengelig fra: <http://metlex.met.no/wiki/Atmosfæren> (lest 16.01.2012).

Meteorologisk institutt. (2009b). *Drivhuseffekten*. Tilgjengelig fra: <http://metlex.met.no/wiki/Drivhuseffekten> (lest 16.01.2012).

Meteorologisk institutt. (2012). *eKlima*. Tilgjengelig fra: <http://eklima.met.no> (lest 29.02.2012).

Meteorologisk institutt. (a). *Klima*, Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: <http://met.no/Klima/> (lest 13.01.2012).

Meteorologisk institutt. (b). *Hva er klima?* Tilgjengelig fra: http://met.no/Klima/Hva_er_klima/ (lest 13.01.2012).

Meteorologisk institutt. (c). *Hva bestemmer klimaet?* Tilgjengelig fra: http://met.no/Klima/Hva_er_klima+/Hva_bestemmer_klimaet/ (lest 16.01.2012).

Meteorologisk institutt. (d). *Norge fra 1900 til i dag*. Tilgjengelig fra: http://met.no/Klima/Klimautvikling/Klima_siste_150_ar/Hele_landet/ (lest 25.01.2012).

Moseby, H. (2012). *Spørsmål til VASK ifbm. masteroppgave ved UMB* (E-post 17.04.2012).

Nie, L. (2003). *Flooding analysis of urban drainage systems*. Trondheim, Norway, Norwegian university of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology. 208 s.

Nilsen, V. (2008). *Urban Drainage in the Face of Climate Change - Adaption of Regional Climate Model Output for Rainfall-Runoff Simulations in Oslo, Norway*. Masteroppgave. Ås, Norway, University of Life Sciences, Department of Mathematical Sciences and Technology. 80 s.

Norges Bank. (2012). *Rentestatistikk*. Tilgjengelig fra: <http://www.norges-bank.no/no/prisstabilitet/rentestatistikk/> (lest 15.04.2012).

Norges geologiske undersøkelse. (2012a). *Berggrunn*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> (lest 24.02.2012).

Norges geologiske undersøkelse. (2012b). *Løsmasser*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/kart/losmasse/> (lest 24.02.2012).

Norges vassdrags- og energidirektorat. (2008). *Hydrologi*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Vann-og-vassdrag/Hydrologi/> (lest 27.01.2012).

NORVAR. (2004). *Kurskompendium etterutdanningskurs "Reduksjon av oversvømmelser - Planlegging, dimensjonering, drift og vedlikehold av overvanns- og avløpsnett"*.

NOU - Klimatilpasning. (2009a). *Nedbørøknning på Sør-Vestlandet*. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/kampanjer/klimatilpasning-norge-2/fylker-2/rogaland.html?ANNOTATIONPAGEID=577709&TAB=3&id=540023> (lest 26.01.2012).

NOU - Klimatilpasning. (2009b). *Temperaturutvikling på Vestlandet mot år 2100*. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/kampanjer/klimatilpasning-norge-2/fylker-2/rogaland.html?ANNOTATIONPAGEID=577621&TAB=3&id=540023> (lest 26.01.2012).

NOU - Klimatilpasning. (2009c). *Mer ekstrem korttidsnedbør på Sør-Vestlandet*. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/kampanjer/klimatilpasning-norge-2/fylker-2/rogaland.html?ANNOTATIONPAGEID=577804&TAB=3&id=540023> (lest 26.01.2012).

Olerud, K. & Fuglestvedt, J. S. (2011). *FNs klimapanel*, Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: [http://snl.no/FNs klimapanel](http://snl.no/FNs_klimapanel) (lest 16.01.2012).

Olsen, M. (2011). *Analyse av klimaendringenes virkninger på avløpsnett i Charlottenlund og Ranheim, Trondheim kommune - Norge*. Masteroppgave. Ås, Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 76 s.

Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M. & Viklander, M. (2009). Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City, Sweden. *Atmospheric Research*, 92 (3): 364-375.

Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichet, S., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R. J., Sumi, A. & Taylor, K. E. (2007). *Climate Models and Their Evaluation*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, M. (red.). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 8. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., Cambridge University Press.

Roosmalen, L. v. (2009). *The effects of future climate change on groundwater and stream discharge in Denmark*, University of Copenhagen, Department of Geography and Geology - Faculty of Science. 30 s.

ROSIM. *ROSIE - modellering av vann- og avløpsnett*. Tilgjengelig fra: www.rosie.no/post6398.tmp/hXGYCSNdHS3G.16.idium (lest 16.02.2012).

Sandnes kommune. (2006). Sandnesmarkå - Markaområder og markagrenser i Sandnes - Grunnlag for arbeid med kommuneplan for Sandnes 2007 - 2020. Tilgjengelig fra: <http://www.sunnby.no/Portals/105/Dokumenter/Sandnesmark%C3%A50206.pdf?t=1> (lest 22.02.2012).

Sandnes kommune. (2010). *Sandnes kommune*. Tilgjengelig fra: <https://sandnes.kommune.no> (lest 16.02.2012).

Silberstein, R. P. (2006). Hydrological models are so good, do we still need data? *Environmental Modelling & Software* 21: 1340-1352

SINTEF. (2011). 200 års flomberegning for Høylandsåna- og Storånavassdraget i Sandnes kommune, SINTEF byggforsk - Vann og miljø. 44 s.

SSB. (2012). *Konsumprisindeksen*. Tilgjengelig fra: <http://www.ssb.no/vis/kpi/kpiregn.html> (lest 23.04).

Stahre, P. (2004). *En långsiktig hållbar dagvattenhantering - planering og exempel*. Stockholm, Sverige, Svenskt Vatten. 79 s.

Stahre, P. (2008). *Blue-green fingerprints in the city of Malmö - Malmö's way towards a sustainable urban drainage*. VA SYD. Tilgjengelig fra: http://www.vasyd.se/SiteCollectionDocuments/Broschyror/Publikationer/BlueGreenFingerprints_Peter.Stahre_webb.pdf.

Statens Kartverk. (2012). *Norgestkart.no*. Tilgjengelig fra: <http://kart.statkart.no/adaptive2/default.aspx?gui=1&lang=2> (lest 21.02.2012).

Stolte, J., French, H. K., Bjerkholt, J. T. & Braskerud, B. (2011). The ExFlood project: Dealing with extreme weather in small catchments. *Vann*, 3 (46).

Svenskt Vatten. (2007). Klimatförändringarnas inverkan på almäna avloppssystem - Underlagsrapport til Klimat- och sårbarhetsutredningen. *Svenskt Vatten Meddelande*.

Sælthun, N. R. (2001). *Kompendie THT300 - Hydroteknikk - Hydrologiske modeller*, Universitetet for miljø- og biovitenskap/Universitetet i Oslo/NIVA.

Sælthun, N. R. (2008). *Hydrologi - flom. Forelesninger i THT 300*, Universitetet for miljø- og biovitenskap.

Universitetet i Oslo. (2011). *Kryosfære*. Tilgjengelig fra: <http://www.mn.uio.no/geo/forskning/grupper/kryosfare/index.html> (lest 13.01.2012).

Vike, K. (2010). Etablering av en hydraulisk modell over overvannsnettet i Bogafjell, DHI.

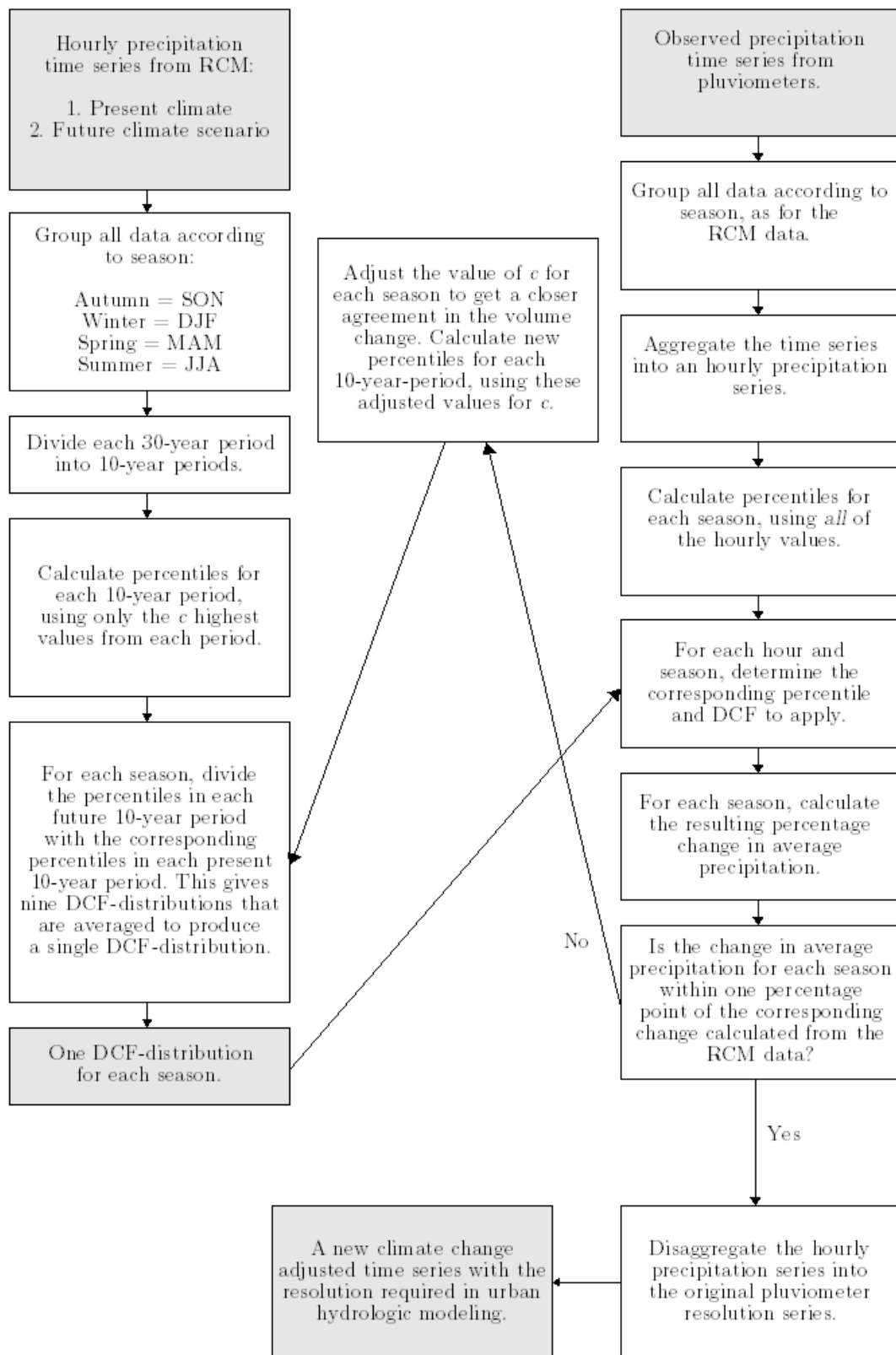
Wikipedia. (2011). *Bogafjell*. Tilgjengelig fra: <https://no.wikipedia.org/wiki/Bogafjell> (lest 17.02.2012).

Winther, L., Linde, J. J., Jensen, H. T., Mathiasen, L. L. & Johansen, N. B. (2011). *Afløbsteknik*. 6 utg. Lyngby, Danmark, Polyteknisk Forlag.

World Ocean Review. *Climate System*. Tilgjengelig fra: <http://worldoceanreview.com/en/climate-system/earth-climate-system/> (lest 25.01.2012).

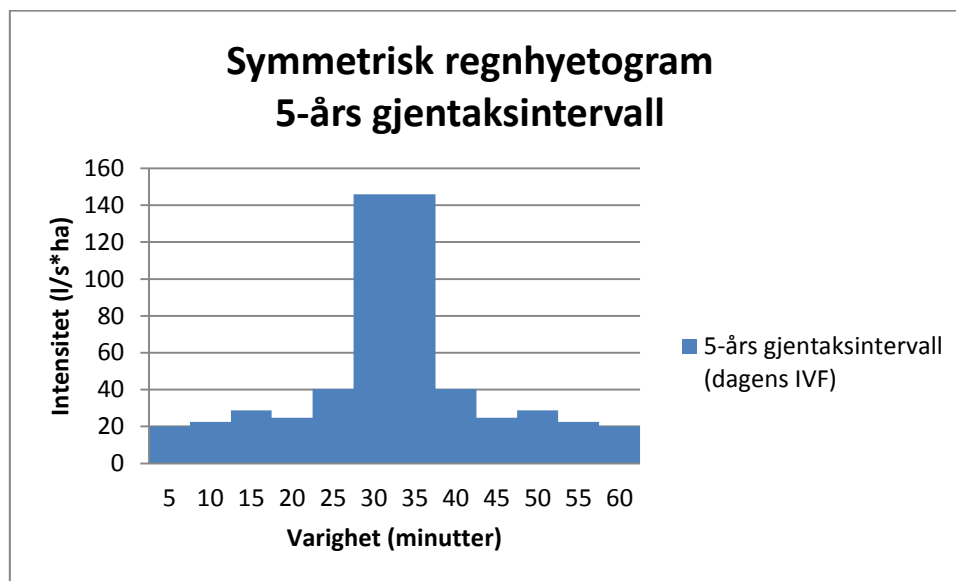
Zero. (2009). *Kunnskap og forskning på klimaendringer*. Tilgjengelig fra: <http://www.zero.no/klima/kunnskap-og-forskning-paa-klimaendringer> (lest 18.01.2012).

Vedlegg A: Delta Change Method

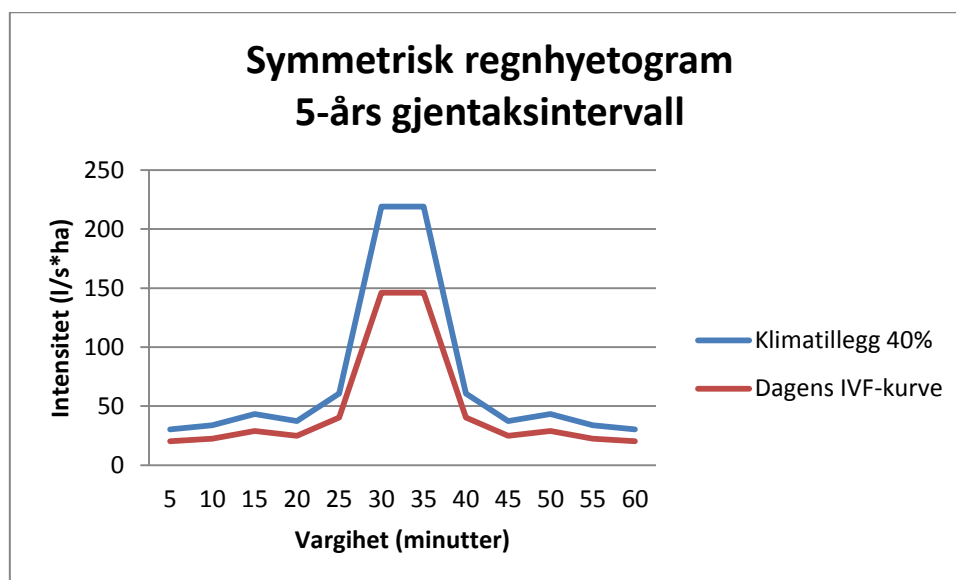


Figur A1: Delta Change Method, som forklart av Nilsen (2008)

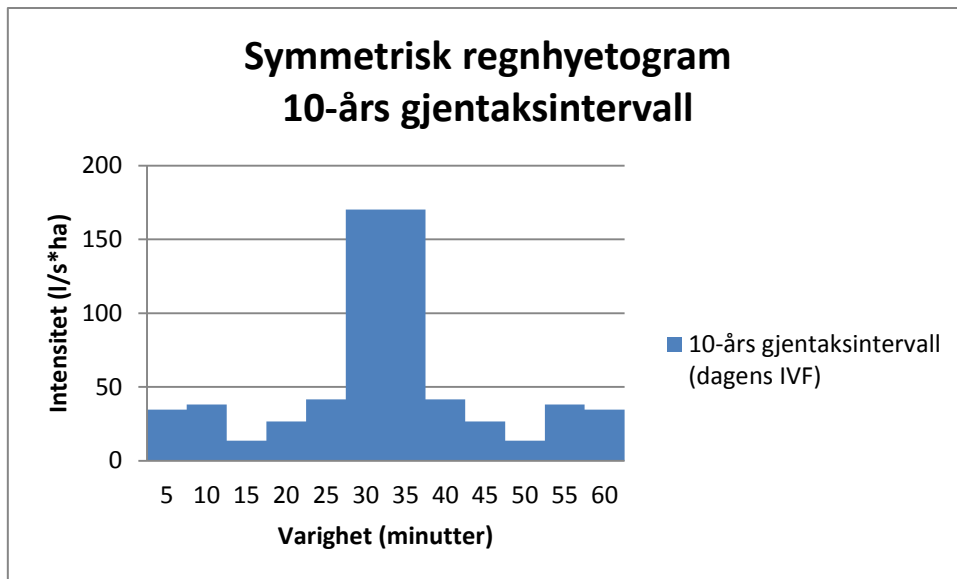
Vedlegg B: Symmetriske regnhyetogram



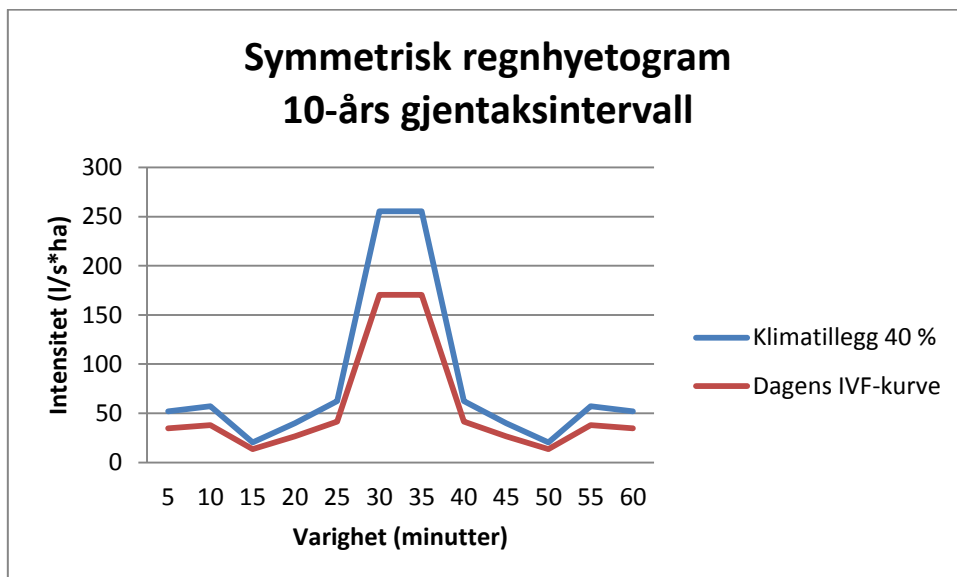
Figur B1: Symmetrisk regnhyetogram; 5-års gjentaksintervall



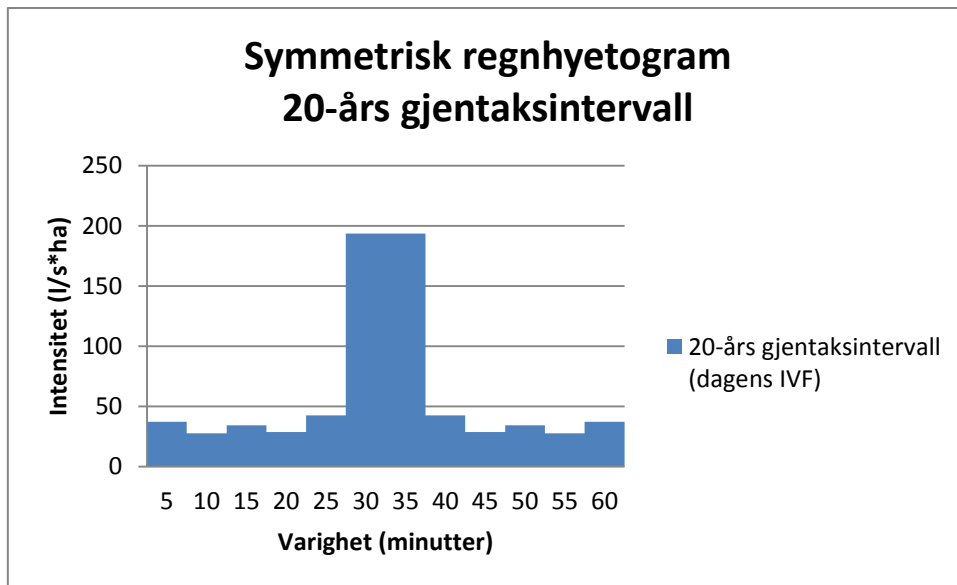
Figur B2: Sammenligning av symmetrisk regnhyetogram med og uten klimat tillegg; 5-års gjentaksintervall



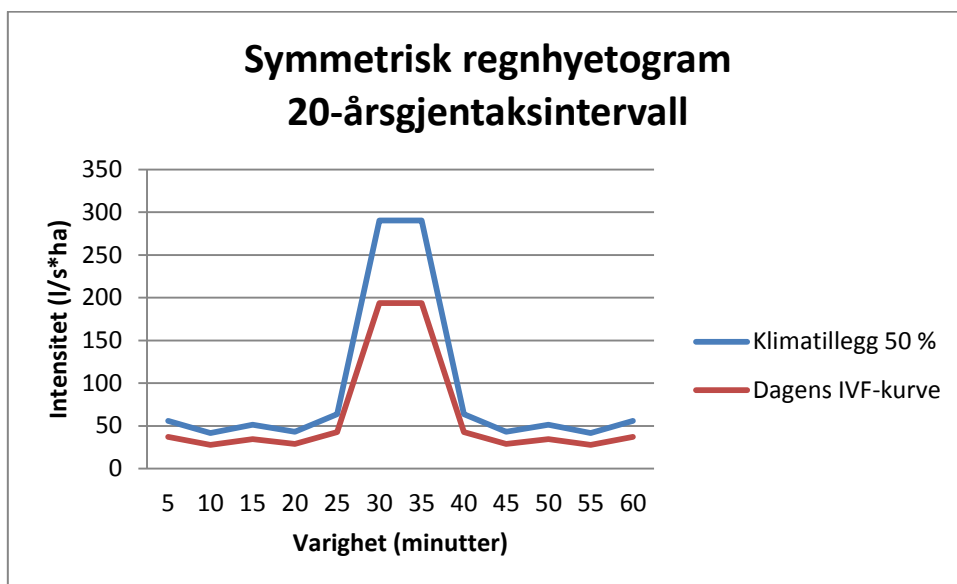
Figur B3: Symmetrisk regnhyetogram; 10-års gjentaksintervall



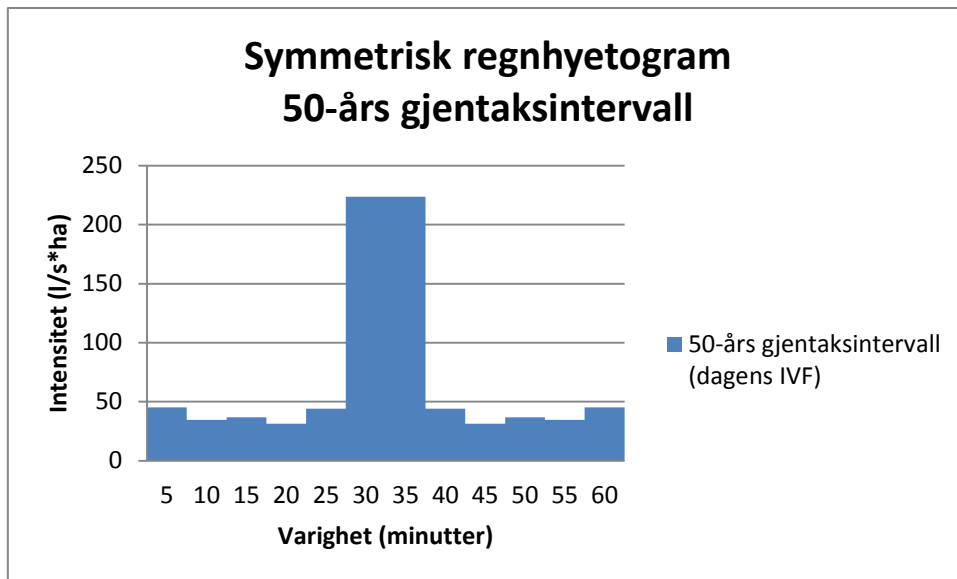
Figur B4: Sammenligning av symmetrisk regnhyetogram med og uten klimatillegg; 10-års gjentaksintervall



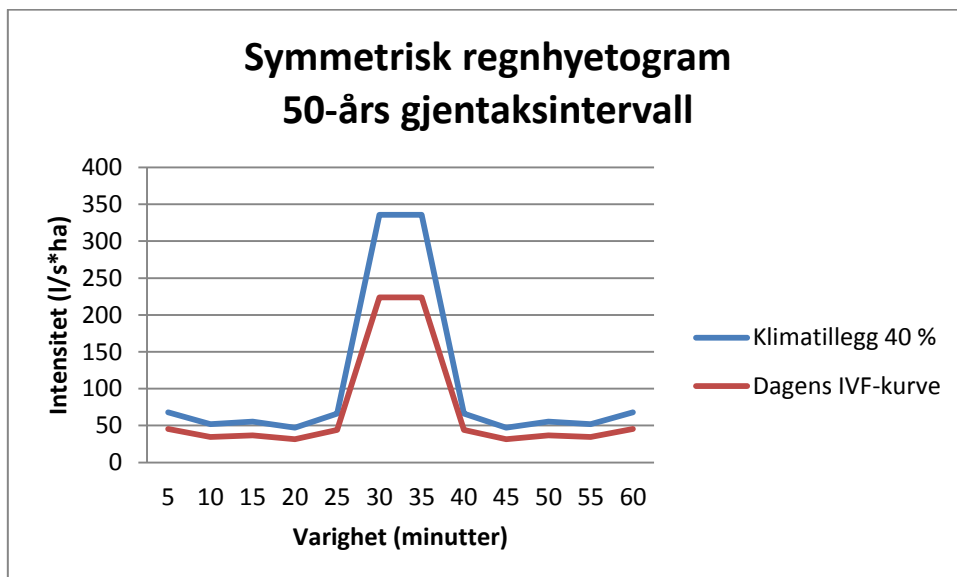
Figur B5: Symmetrisk regnhyetogram; 20-års gjentaksintervall



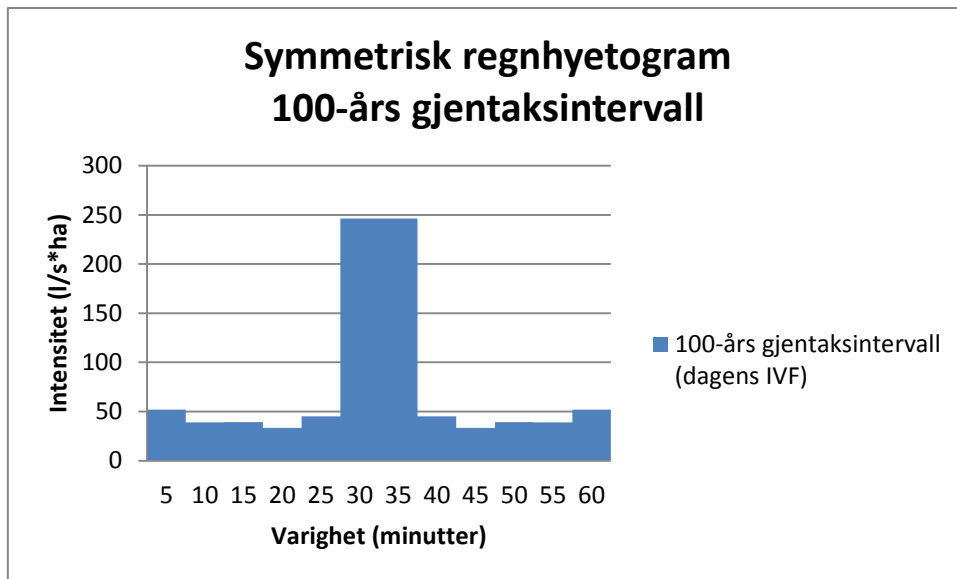
Figur B6: Sammenligning av symmetrisk regnhyetogram med og uten klimatillegg; 20-års gjentaksintervall



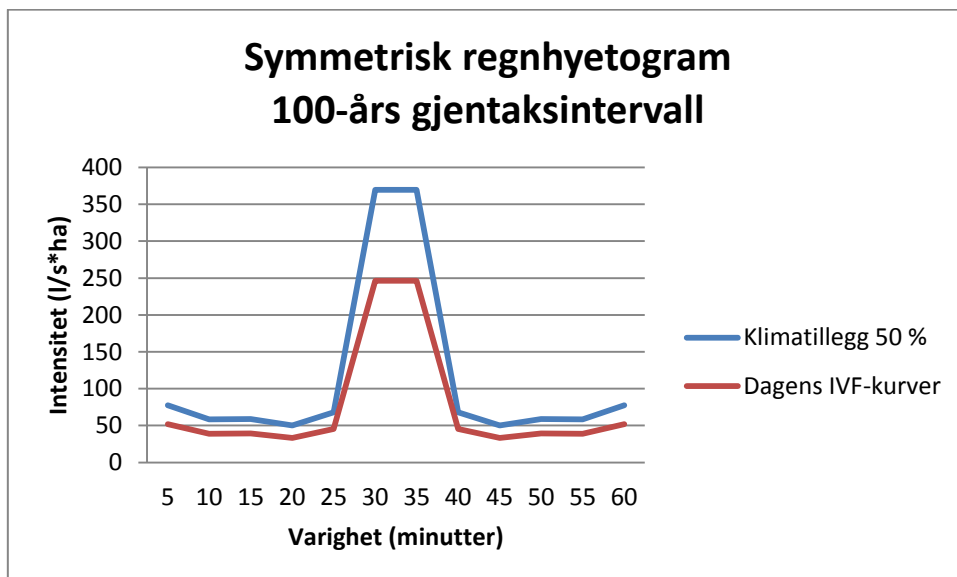
Figur B7: Symmetrisk regnhyetogram; 50-års gjentaksintervall



Figur B8: Sammenligning av symmetrisk regnhyetogram med og uten klimatillegg; 50-års gjentaksintervall



Figur B9: Symmetrisk regnhyetogram; 100-års gjentaksintervall



Figur B10: Sammenligning av symmetrisk regnhyetogram med og uten klimatillegg; 100-års gjentaksintervall

Vedlegg C: Kummer med oversvømmelse ved ulike gjentaksintervall med og uten klimatillegg

Kum ID	100 + 50 %	100	50 + 50 %	50	20 + 50 %	20	10 + 50 %	10	5 + 50 %	5
64	x									
100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
106	x									
416	x		x							
419	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
420	x	x	x	x	x		x		x	
2328	x		x							
2330	x	x	x	x	x		x		x	
3189	x	x	x	x	x				x	
4500	x		x		x					
4503	x		x		x		x			
5089	x									
5095	x									
5097	x	x	x		x		x			
5321	x		x							
5323	x		x							
6585	x		x		x		x			
8400	x		x		x		x			
9202	x		x							
9204	x									
9377	x									
9597	x		x							
9599	x		x		x					
13220	x		x							
13222	x									
13223	x		x							
15577	x		x		x					
15579	x	x	x	x	x		x		x	
15585	x		x		x					
15587	x		x							
15616	x		x		x					
15620	x									
15621	x		x							
15622	x									
17113	x	x	x	x	x		x		x	
18499	x									
18588	x									
18590	x									
18803	x									
23203	x		x							
23209	x									
23252	x									
27694	x									
1_23	x									
1_26	x									
1_41	x		x		x		x			
Node_1	x	x	x	x	x	x	x		x	

Vedlegg D: Klimatilpasningstiltak; økning av ledningsdiameter

Tabell D1: Endrede ledninger ved gjennomføring av tiltak

Ledning ID	Fra node	Til node	Fra høyde	Til høyde	Lengde	Gammel diameter	Ny diameter
3	9200	9197	55,28	55,18	72,56	0,80	1,00
7	18204	18203	90,79	67,43	67,29	0,30	0,40
9	13220	1_41	60,79	59,86	16,52	0,20	0,25
10	1_41	6250	59,86	59,41	7,92	0,20	0,25
11	6250	4503	59,41	57,42	20,98	0,20	0,25
15	8400	4502	57,17	55,68	34,55	0,20	0,25
17	4503	4502	57,42	55,68	18,81	0,20	0,25
18	4502	3189	55,68	53,46	80,86	0,30	0,40
27	5090	5089	56,47	54,30	22,75	0,30	0,40
28	15571	5090	68,54	56,47	55,65	0,30	0,40
29	5088	5086	49,89	49,33	29,21	0,30	0,60
106	4496	4695	51,22	45,33	48,30	0,30	0,40
108	9204	9202	57,71	56,61	38,00	0,80	1,00
115	15585	15579	77,16	72,90	20,20	0,20	0,40
116	15579	15577	72,90	70,35	9,89	0,20	0,40
118	15577	15575	70,35	69,74	51,42	0,30	0,40
119	15575	15573	69,74	69,24	50,89	0,30	0,40
121	23251	18803	59,68	59,17	17,61	0,30	0,40
128	Node_1	Node_3	30,38	28,50	69,61	0,40	0,50
143	18202	18588	58,09	54,24	17,40	0,30	0,40
144	18203	18202	67,43	58,09	32,62	0,30	0,40
145	9202	9200	56,61	55,28	64,99	0,80	1,00
166	18589	18204	94,57	90,79	29,72	0,30	0,40
167	18499	18589	95,67	94,57	22,27	0,30	0,40
270	23201	23198	105,05	102,60	12,30	0,20	0,30
272	23202	23201	110,03	105,05	50,32	0,20	0,30
273	23203	23202	110,41	110,03	9,86	0,20	0,30
275	23209	23203	111,86	110,41	21,88	0,20	0,30
281	23211	23209	114,75	111,86	34,89	0,20	0,30
282	23252	1_26	60,34	59,87	32,36	0,30	0,40
361	5318	10730	53,68	50,06	30,72	0,20	0,30
372	419	416	104,52	102,47	44,23	0,25	0,50
373	420	419	107,52	104,52	45,25	0,30	0,40
377	3189	4500	53,46	52,88	10,42	0,30	0,40
378	4500	4498	52,88	52,18	71,43	0,30	0,40
379	4498	4496	52,18	51,22	58,93	0,30	0,40
380	1_31	5318	54,71	53,68	45,33	0,20	0,30
381	5321	5318	58,07	53,68	60,70	0,20	0,30
382	5323	5321	61,80	58,07	39,85	0,20	0,30
395	100	99	109,64	108,85	76,87	0,25	0,40

397	103	100	113,82	109,64	21,45	0,25	0,30
398	99	420	108,85	107,52	18,49	0,25	0,40
402	416	64	102,47	101,32	17,57	0,30	0,50
413	2328	5095	55,15	54,70	36,56	0,20	0,25
414	5095	5089	54,70	54,30	47,19	0,20	0,25
415	2330	5097	50,95	50,47	67,04	0,20	0,25
416	5089	5088	54,30	49,89	19,74	0,30	0,40
417	5097	5088	50,47	49,89	45,23	0,20	0,25
418	15573	15571	69,24	68,54	73,70	0,30	0,40
424	1_26	23251	59,87	59,68	13,35	0,30	0,40

Tabell D2: Sammenligning av kummer/noder med oversvømmelse ved 100-års gjentaksintervall og 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, med klimatilpasningstiltak og 100-års gjentaksintervall med dagens intensiteter. Situasjon ved klimatilpasningstiltak markert i rødt.

Kum ID	100 + 50 %	Volum (l)	Hus skadet	100 + 50%	Volum (l)	Hus skadet	100	Volum (l)	Hus skadet
64	x	112		x	1885				
100	x	12331	4				x	4705	1
106	x	204		x	196				
416	x	1272		x	3055	1			
419	x	15551	3				x	5160	2
420	x	5184	1				x	730	
524				x	4752	1			
2328	x	1351							
2330	x	5969	2				x	660	
3189	x	6817	2				x	1194	
4500	x	1217							
4503	x	3919							
5089	x	267							
5095	x	275							
5097	x	4555	1				x	338	
5321	x	2388							
5323	x	1123							
6585	x	1484							
8400	x	3629	1						
9202	x	2089							
9204	x	16							
9377	x	361							
9597	x	1123							
9599	x	2937	1						
13220	x	942							
13222	x	204							
13223	x	974							
15577	x	1594							
15579	x	7665					x	2160	
15585	x	3094	1						
15587	x	1940		x	479				
15616	x	2333							
15620	x	16							
15621	x	872							
15622	x	102							
17113	x	14027		x	10430		x	3699	
18499	x	3636	1						
18588	x	620							
18590	x	550		x	2003				
18803	x	448							
23203	x	1673							
23209	x	31							
23252	x	0							
27694	x	110		x	110				
1_23	x	408							
1_26	x	259							
1_41	x	4194	1						
Node_1	x	12833		x	4681		x	3966	

Vedlegg E: Klimatilpasningstiltak; fordrøyning av vann på overflaten

Tabell E1: Endrede delfelt ved gjennomføring av tiltak. Alle delfelt fikk endret konsentrasjonstid fra 7 til 40 minutter.

Delfelt ID	Total areal	Bygningsareal	Vegareal	Permeabelt areal	Konsentrasjonstid
Catchment_26	0,14658524353	0,04815253523	0,01549360198	0,08293910632	40,00
Catchment_27	0,30650585473	0,03560954688	0,03821588583	0,23268042202	40,00
Catchment_28	0,38376746665	0,08492805637	0,04603603424	0,25280337603	40,00
Catchment_29	0,27768253748	0,02044725263	0,04709710880	0,21013817605	40,00
Catchment_31	0,48842612624	0,05347130799	0,04925270440	0,38570211385	40,00
Catchment_33	0,19898465922	0,06101251187	0,01746130500	0,12051084234	40,00
Catchment_34	0,23747807918	0,03604473914	0,01631201081	0,18512132923	40,00
Catchment_35	0,39835678398	0,06702614432	0,02074873387	0,31058190579	40,00
Catchment_37	0,06948186834	0,00010838372	0,00093454947	0,06843893515	40,00
Catchment_39	0,28314826474	0,05303241518	0,02300660062	0,20710924893	40,00
Catchment_40	0,17340173417	0,05407420877	0,02174882309	0,09757870231	40,00
Catchment_41	0,10816914760	0,02623500387	0,01455877343	0,06737537030	40,00
Catchment_42	0,11009991936	0,03189290340	0,01300024341	0,06520677256	40,00
Catchment_43	0,10968486931	0,04473519811	0,00789164059	0,05705803061	40,00
Catchment_44	0,08512539607	0,01396540653	0,00781929311	0,06334069644	40,00
Catchment_45	0,12677225219	0,01221420476	0,00915282159	0,10540522584	40,00
Catchment_46	0,12053215066	0,02063526120	0,01144098401	0,08845590545	40,00
Catchment_49	0,18181374820	0,01328397878	0,01763433432	0,15089543509	40,00
Catchment_52	0,19257194331	0,00587660384	0,05069643402	0,13599890545	40,00
Catchment_75	0,08649034069	0,01819709186	0,02362629111	0,04466695772	40,00
Catchment_76	0,10491097376	0,01130428057	0,04561450982	0,04799218336	40,00
Catchment_86	0,05478862515	0,00466112438	0,00989953831	0,04022796247	40,00
Catchment_105	0,07225571490	0,00000000000	0,01062471149	0,06163100341	40,00
Catchment_121	0,03470351581	0,00000000000	0,00519480053	0,02950871528	40,00
Catchment_242	0,56014596757	0,05421430364	0,00049775343	0,50543391049	40,00
Catchment_254	0,04110976197	0,00000000000	0,02337788107	0,01773188090	40,00
Catchment_259	0,37597283279	0,05480702997	0,02499233717	0,29617346565	40,00
Catchment_262	0,12778634183	0,00000000000	0,01761215435	0,11017418748	40,00
Catchment_264	0,54734526204	0,06536034586	0,21669812596	0,26528679022	40,00
Catchment_266	0,17987870205	0,05074099696	0,02188668794	0,10725101715	40,00
Catchment_267	0,10462355671	0,01726654428	0,01702838584	0,07032862659	40,00
Catchment_268	0,07834325011	0,03064066893	0,01981215979	0,02789042139	40,00
Catchment_271	0,45352467394	0,09323596812	0,12886797886	0,23142072697	40,00
Catchment_273	0,32760904580	0,03123083545	0,01861453232	0,27776367804	40,00
Catchment_276	0,20467326447	0,03342143423	0,05554254610	0,11570928414	40,00
Catchment_277	0,22014559416	0,01416227277	0,01144206122	0,19454126017	40,00
Catchment_278	0,08884832223	0,00012956966	0,01375618856	0,07496256401	40,00
Catchment_280	0,10033205035	0,03010133422	0,01342167986	0,05680903627	40,00
Catchment_283	0,03476567975	0,00909635934	0,00386024331	0,02180907710	40,00
Catchment_285	0,02636145541	0,00072954631	0,00785473432	0,01777717478	40,00

Catchment_286	0,04862503488	0,01134120620	0,00709083634	0,03019299233	40,00
Catchment_288	0,09517148913	0,01447658961	0,02630833669	0,05438656283	40,00
Catchment_289	0,06405511418	0,01144647116	0,01093430609	0,04167433693	40,00
Catchment_314	0,25298147412	0,04057443258	0,00640485365	0,20600218789	40,00
Catchment_320	0,07800333442	0,00000000000	0,04955621985	0,02844711457	40,00
Catchment_331	0,18294283492	0,05119791602	0,02594374523	0,10580117367	40,00
Catchment_334	0,26586950182	0,08456714705	0,02560264128	0,15569971350	40,00
Catchment_335	0,20984104502	0,05396584007	0,01983834607	0,13603685888	40,00
Catchment_337	0,27596968558	0,06531616611	0,05597278114	0,15468073833	40,00
Catchment_339	0,22498607974	0,03324124277	0,01889004026	0,17285479670	40,00
Catchment_340	0,25038776226	0,05029459561	0,01360124832	0,18649191834	40,00
Catchment_342	0,19894878121	0,02220885158	0,00000000000	0,17673992963	40,00
Catchment_356	0,23057521076	0,01546294571	0,00000000000	0,21511226505	40,00
Catchment_357	0,18583404682	0,01647029277	0,01933621431	0,15002753973	40,00
Catchment_358	0,21753964735	0,07137317175	0,02337860546	0,12278787014	40,00
Catchment_359	0,12415074045	0,00036659834	0,03569559815	0,08808854397	40,00
Catchment_360	0,18900681290	0,02628390736	0,05238164515	0,11034126039	40,00
Catchment_362	0,20571845331	0,07156257152	0,01966778952	0,11448809227	40,00
Catchment_366	0,21319172190	0,07405947450	0,02492689130	0,11420535610	40,00
Catchment_367	0,18169748106	0,04308203734	0,01901701983	0,11959842389	40,00
Catchment_368	0,27837846424	0,06859733248	0,02138991439	0,18839121737	40,00
Catchment_369	0,14040795514	0,00739523314	0,02653970612	0,10647301588	40,00
Catchment_384	0,16447748815	0,02616227942	0,02119932195	0,11711588678	40,00
Catchment_385	0,13373313194	0,04056637307	0,01689869466	0,07626806421	40,00
Catchment_386	0,22456414752	0,02646096225	0,00414410887	0,19395907640	40,00
Catchment_389	0,01994549461	0,00613183638	0,00478222601	0,00903143223	40,00
Catchment_390	0,10757618545	0,03151470474	0,01160161504	0,06445986567	40,00
Catchment_393	0,09811491480	0,02938072521	0,01213943758	0,05659475201	40,00
Catchment_394	0,14969185875	0,02692510477	0,00513971225	0,11762704173	40,00
Catchment_395	0,13024346180	0,01785661813	0,01521597284	0,09717087083	40,00
Catchment_396	0,22384471253	0,02115438173	0,04497887455	0,15771145625	40,00
Catchment_397	0,21709601737	0,01624501905	0,04504794617	0,15580305216	40,00
Catchment_400	0,07352644358	0,02366420402	0,01356844860	0,03629379095	40,00
Catchment_401	0,10000371680	0,02804849464	0,01078892700	0,06116629516	40,00
Catchment_407	0,18635382871	0,06584031502	0,01976645620	0,10074705749	40,00
Catchment_408	0,15878394497	0,03981240805	0,01245408206	0,10651745485	40,00
Catchment_409	0,13602666662	0,02264796220	0,03068726706	0,08269143736	40,00
Catchment_411	0,11666715438	0,01042401450	0,02331846379	0,08292467609	40,00
Catchment_415	0,06555232584	0,02230527045	0,00612685404	0,03712020135	40,00
Catchment_416	0,07855648798	0,00000000000	0,00360871069	0,07494777730	40,00
Catchment_419	0,21688640665	0,02779050226	0,01019088378	0,17890502061	40,00
Catchment_420	0,06012531455	0,00000000000	0,00000000000	0,06012531455	40,00
Catchment_425	0,22530506887	0,02540878462	0,00099874999	0,19889753427	40,00
Catchment_426	0,18636127777	0,05725257117	0,03196354941	0,09714515718	40,00
Catchment_427	0,19157557485	0,05191402612	0,02221845301	0,11744309572	40,00

Catchment_428	0,08435625387	0,00856213525	0,01941763279	0,05637648584	40,00
Catchment_431	0,09222656449	0,03696942511	0,00911758887	0,04613955050	40,00

Tabell E2: Sammenligning av kummer/noder med oversvømmelse ved 100-års gjentakintervall og 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, med klimatilpasningstiltak og 100-års gjentakintervall med dagens intensiteter. Situasjon ved klimatilpasningstiltak markert i rødt.

Kum ID	100 + 50 %	Volum (l)	Hus skadet	100 + 50%	Volum (l)	Hus skadet	100	Volum (l)	Hus skadet
64	x	112							
100	x	12331	4	x	1571		x	4705	1
106	x	204							
416	x	1272		x	424				
419	x	15551	3	x	6322	2	x	5160	2
420	x	5184	1				x	730	
2328	x	1351							
2330	x	5969	2	x	730		x	660	
3189	x	6817	2	x	1202		x	1194	
4500	x	1217							
4503	x	3919							
5089	x	267							
5095	x	275							
5097	x	4555	1	x	385		x	338	
5321	x	2388							
5323	x	1123							
6585	x	1484		x	958				
8400	x	3629	1						
9202	x	2089		x	251				
9204	x	16							
9377	x	361							
9597	x	1123							
9599	x	2937	1						
13220	x	942							
13222	x	204							
13223	x	974							
15577	x	1594			353				
15579	x	7665		x	2152		x	2160	
15585	x	3094	1	x					
15587	x	1940							
15616	x	2333							
15620	x	16							
15621	x	872							
15622	x	102							
17113	x	14027		x	11616		x	3699	
18499	x	3636	1						
18588	x	620		x	39				
18590	x	550		x	8				
18803	x	448							
23203	x	1673		x	8				
23209	x	31							
23252	x	0							
27694	x	110							
1_23	x	408							
1_26	x	259							
1_41	x	4194	1						
Node_1	x	12833		x	10799		x	3966	

Vedlegg F: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer

Tabell F1: Endrede delfelt hvor bygningsarealet i delfeltet har fått bygningsfaktor 0 og ikke bidrar med avrenning til ledningsnettet

Delfelt ID	Totalt areal	Bygningsareal	Vegareal	Permeabelt areal	Bygningsfaktor
Catchment_24	0,21740034094	0,02031606110	0,00000000000	0,19708427984	0,00
Catchment_26	0,14658524353	0,04815253523	0,01549360198	0,08293910632	0,00
Catchment_27	0,30650585473	0,03560954688	0,03821588583	0,23268042202	0,00
Catchment_28	0,38376746665	0,08492805637	0,04603603424	0,25280337603	0,00
Catchment_29	0,27768253748	0,02044725263	0,04709710880	0,21013817605	0,00
Catchment_30	0,11110620081	0,00411001840	0,00000000000	0,10699618241	0,00
Catchment_31	0,48842612624	0,05347130799	0,04925270440	0,38570211385	0,00
Catchment_33	0,19898465922	0,06101251187	0,01746130500	0,12051084234	0,00
Catchment_34	0,23747807918	0,03604473914	0,01631201081	0,18512132923	0,00
Catchment_35	0,39835678398	0,06702614432	0,02074873387	0,31058190579	0,00
Catchment_36	0,17818104113	0,04627478367	0,02884707037	0,10305918708	0,00
Catchment_37	0,06948186834	0,00010838372	0,00093454947	0,06843893515	0,00
Catchment_42	0,11009991936	0,03189290340	0,01300024341	0,06520677256	0,00
Catchment_43	0,10968486931	0,04473519811	0,00789164059	0,05705803061	0,00
Catchment_44	0,08512539607	0,01396540653	0,00781929311	0,06334069644	0,00
Catchment_45	0,12677225219	0,01221420476	0,00915282159	0,10540522584	0,00
Catchment_49	0,18181374820	0,01328397878	0,01763433432	0,15089543509	0,00
Catchment_52	0,19257194331	0,00587660384	0,05069643402	0,13599890545	0,00
Catchment_74	0,19749391570	0,04989955081	0,04560164090	0,10199272399	0,00
Catchment_75	0,08649034069	0,01819709186	0,02362629111	0,04466695772	0,00
Catchment_76	0,10491097376	0,01130428057	0,04561450982	0,04799218336	0,00
Catchment_86	0,05478862515	0,00466112438	0,00989953831	0,04022796247	0,00
Catchment_89	0,19560664691	0,01776927730	0,04427290031	0,13356446930	0,00
Catchment_94	0,21534618858	0,05040243181	0,03418390593	0,13075985084	0,00
Catchment_95	0,22942335708	0,04654721556	0,03770935840	0,14516678312	0,00
Catchment_96	0,09623627985	0,02052385711	0,02736991191	0,04834251082	0,00
Catchment_105	0,07225571490	0,00000000000	0,01062471149	0,06163100341	0,00
Catchment_117	0,33972873698	0,01653427148	0,00000000000	0,32319446550	0,00
Catchment_119	0,05695734527	0,00000000000	0,00711801433	0,04983933095	0,00
Catchment_121	0,03470351581	0,00000000000	0,00519480053	0,02950871528	0,00
Catchment_252	0,11065913532	0,01208680880	0,00000000000	0,09857232652	0,00
Catchment_253	0,13924197327	0,01577292791	0,01711323141	0,10635581396	0,00
Catchment_259	0,37597283279	0,05480702997	0,02499233717	0,29617346565	0,00
Catchment_260	0,21538945939	0,00333410529	0,01093700273	0,20111835137	0,00
Catchment_261	0,41963984055	0,09761748048	0,03274609567	0,28927626440	0,00
Catchment_265	0,15772074857	0,05566972819	0,02183929500	0,08021172538	0,00
Catchment_266	0,17987870205	0,05074099696	0,02188668794	0,10725101715	0,00
Catchment_267	0,10462355671	0,01726654428	0,01702838584	0,07032862659	0,00
Catchment_269	0,09277355638	0,00090071911	0,02591445713	0,06595838014	0,00

Catchment_271	0,45352467394	0,09323596812	0,12886797886	0,23142072697	0,00
Catchment_273	0,32760904580	0,03123083545	0,01861453232	0,27776367804	0,00
Catchment_276	0,20467326447	0,03342143423	0,05554254610	0,11570928414	0,00
Catchment_277	0,22014559416	0,01416227277	0,01144206122	0,19454126017	0,00
Catchment_279	0,07891709770	0,00204771228	0,03379904653	0,04307033888	0,00
Catchment_280	0,10033205035	0,03010133422	0,01342167986	0,05680903627	0,00
Catchment_285	0,02636145541	0,00072954631	0,00785473432	0,01777717478	0,00
Catchment_286	0,04862503488	0,01134120620	0,00709083634	0,03019299233	0,00
Catchment_288	0,09517148913	0,01447658961	0,02630833669	0,05438656283	0,00
Catchment_289	0,06405511418	0,01144647116	0,01093430609	0,04167433693	0,00
Catchment_328	0,25497963489	0,06730189937	0,02036964216	0,16730809336	0,00
Catchment_331	0,18294283492	0,05119791602	0,02594374523	0,10580117367	0,00
Catchment_333	0,16817755199	0,06019939951	0,01502273817	0,09295541431	0,00
Catchment_334	0,26586950182	0,08456714705	0,02560264128	0,15569971350	0,00
Catchment_335	0,20984104502	0,05396584007	0,01983834607	0,13603685888	0,00
Catchment_339	0,22498607974	0,03324124277	0,01889004026	0,17285479670	0,00
Catchment_264	0,54734526204	0,06536034586	0,21669812596	0,26528679022	0,00

Tabell F2: Sammenligning av kummer/noder med oversvømmelse ved 100-års gjentaksintervall og 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, med klimatilpasningstiltak og 100-års gjentaksintervall med dagens intensiteter. Situasjon ved klimatilpasningstiltak markert i rødt.

Kum ID	100 + 50 %	Volum (l)	Hus skadet	100 + 50%	Volum (l)	Hus skadet	100	Volum (l)	Hus skadet
64	x	112		x	102				
100	x	12331	4	x	3102	1	x	4705	1
106	x	204							
416	x	1272		x	1280				
419	x	15551	3	x	9708	3	x	5160	2
420	x	5184	1	x	4359	1	x	730	
2328	x	1351		x	1327				
2330	x	5969	2	x	5836	2	x	660	
3189	x	6817	2				x	1194	
4500	x	1217							
4503	x	3919							
5089	x	267		x	204				
5095	x	275		x	236				
5097	x	4555	1	x	4445	1	x	338	
5321	x	2388							
5323	x	1123							
6585	x	1484		x	872				
8400	x	3629	1						
9202	x	2089		x	479				
9204	x	16							
9377	x	361							
9597	x	1123							
9599	x	2937	1						
13220	x	942							
13222	x	204							
13223	x	974							
15577	x	1594		x	1594				
15579	x	7665		x	7665		x	2160	
15585	x	3094	1	x	3094	1			
15587	x	1940		x	1940				
15616	x	2333		x	2333				
15620	x	16		x	16				
15621	x	872		x	872				
15622	x	102		x	102				
17113	x	14027		x	10948		x	3699	
18499	x	3636	1						
18588	x	620							
18590	x	550							
18803	x	448		x	94				
23203	x	1673							
23209	x	31							
23252	x	0							
27694	x	110							
1_23	x	408							
1_26	x	259							
1_41	x	4194	1						
Node_1	x	12833		x	10249		x	3966	

Vedlegg G: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og økning av ledningsdiametere

Tabell G1: Ledninger med endret diameter ved gjennomført tiltak. Delfelt med frakoplet overvann fra takarealer er de samme som i tabell D1.

Ledning ID	Fra node	Til node	Fra høyde	Til høyde	Lengde	Gammel diameter	Ny diameter
27	5090	5089	56,47	54,30	22,75	0,30	0,40
28	15571	5090	68,54	56,47	55,65	0,30	0,40
29	5088	5086	49,89	49,33	29,21	0,30	0,50
115	15585	15579	77,16	72,90	20,20	0,20	0,40
116	15579	15577	72,90	70,35	9,89	0,20	0,40
118	15577	15575	70,35	69,74	51,42	0,30	0,40
119	15575	15573	69,74	69,24	50,89	0,30	0,40
80	Node_1	Node_3	30,38	28,50	69,61	0,16	0,50
372	419	416	104,52	102,47	44,23	0,25	0,40
373	420	419	107,52	104,52	45,25	0,30	0,40
395	100	99	109,64	108,85	76,87	0,25	0,30
103	103	100	113,82	109,64	21,45	0,25	0,30
398	99	420	108,85	107,52	18,49	0,25	0,40
402	416	64	102,47	101,32	17,57	0,30	0,40
413	2328	5095	55,15	54,70	36,56	0,20	0,25
414	5095	5089	54,70	54,30	47,19	0,20	0,25
415	2330	5097	50,95	50,47	67,04	0,20	0,30
416	5089	5088	54,30	49,89	19,74	0,30	0,40
417	5097	5088	50,47	49,89	45,23	0,20	0,30
418	15573	15571	69,24	68,54	73,70	0,30	0,40

Tabell G2: Sammenligning av kummer/noder med oversvømmelse ved 100-års gjentaksintervall og 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, med klimatilpasningstiltak og 100-års gjentaksintervall med dagens intensiteter. Situasjon ved klimatilpasningstiltak markert

Kum ID	100 + 50 %	Volum (l)	Hus skadet	100 + 50%	Volum (l)	Hus skadet	100	Volum (l)	Hus skadet
64	x	112		x	3032	1			
100	x	12331	4				x	4705	1
106	x	204							
416	x	1272		x	5027	2			
419	x	15551	3				x	5160	2
420	x	5184	1				x	730	
2328	x	1351							
2330	x	5969	2	x	1249		x	660	
3189	x	6817	2				x	1194	
4500	x	1217							
4503	x	3919							
5089	x	267							
5095	x	275							
5097	x	4555	1	x	887		x	338	
5321	x	2388		x	63				
5323	x	1123							
6585	x	1484							
8400	x	3629	1						
9202	x	2089		x	503				
9204	x	16							
9377	x	361							
9597	x	1123							
9599	x	2937	1						
13220	x	942							
13222	x	204							
13223	x	974							
15128									
15577	x	1594							
15579	x	7665					x	2160	
15585	x	3094	1						
15587	x	1940		x	479				
15616	x	2333							
15620	x	16							
15621	x	872							
15622	x	102							
17113	x	14027		x	7336		x	3699	
18499	x	3636	1						
18588	x	620							
18590	x	550							
18803	x	448		x	102				
23203	x	1673							
23209	x	31							
23252	x	0							
27694	x	110							
1_23	x	408							
1_26	x	259							
1_41	x	4194	1						
Node_1	x	12833		x	3047		x	3966	

Vedlegg H: Klimatilpasningstiltak; frakopling av overvann fra takarealer og fordrøyning av overvann på overflaten

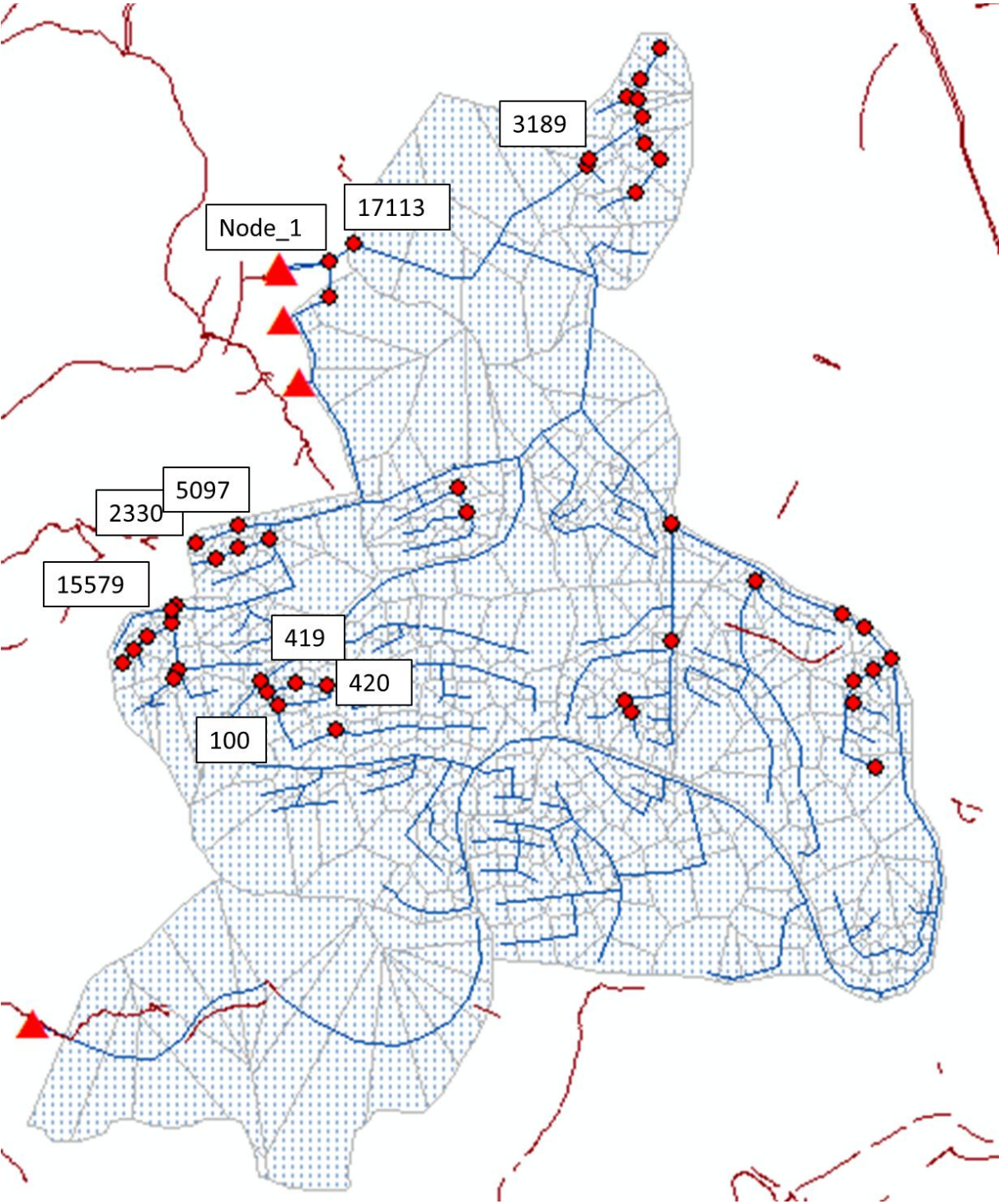
Tabell H1: Delfelt med endret konsentrasjonstid ved gjennomføring av tiltak. Delfelt med frakoplet av overvann fra takarealer er de samme som i tabell D1.

Delfelt ID	Totalt areal	Bygningsareal	Vegareal	Permeabelt areal	Konsentrasjonstid
Catchment_320	0,07800333442	0,00000000000	0,04955621985	0,02844711457	40,00
Catchment_340	0,25038776226	0,05029459561	0,01360124832	0,18649191834	40,00
Catchment_342	0,19894878121	0,02220885158	0,00000000000	0,17673992963	40,00
Catchment_357	0,18583404682	0,01647029277	0,01933621431	0,15002753973	40,00
Catchment_359	0,12415074045	0,00036659834	0,03569559815	0,08808854397	40,00
Catchment_360	0,18900681290	0,02628390736	0,05238164515	0,11034126039	40,00
Catchment_369	0,14040795514	0,00739523314	0,02653970612	0,10647301588	40,00
Catchment_384	0,16447748815	0,02616227942	0,02119932195	0,11711588678	40,00
Catchment_385	0,13373313194	0,04056637307	0,01689869466	0,07626806421	40,00
Catchment_386	0,22456414752	0,02646096225	0,00414410887	0,19395907640	40,00
Catchment_389	0,01994549461	0,00613183638	0,00478222601	0,00903143223	40,00
Catchment_390	0,10757618545	0,03151470474	0,01160161504	0,06445986567	40,00
Catchment_393	0,09811491480	0,02938072521	0,01213943758	0,05659475201	40,00
Catchment_394	0,14969185875	0,02692510477	0,00513971225	0,11762704173	40,00
Catchment_395	0,13024346180	0,01785661813	0,01521597284	0,09717087083	40,00
Catchment_396	0,22384471253	0,02115438173	0,04497887455	0,15771145625	40,00
Catchment_397	0,21709601737	0,01624501905	0,04504794617	0,15580305216	40,00
Catchment_400	0,07352644358	0,02366420402	0,01356844860	0,03629379095	40,00
Catchment_401	0,10000371680	0,02804849464	0,01078892700	0,06116629516	40,00
Catchment_406	0,09530405756	0,01224123071	0,03654179835	0,04652102850	40,00
Catchment_407	0,18635382871	0,06584031502	0,01976645620	0,10074705749	40,00
Catchment_408	0,15878394497	0,03981240805	0,01245408206	0,10651745485	40,00
Catchment_409	0,13602666662	0,02264796220	0,03068726706	0,08269143736	40,00
Catchment_411	0,11666715438	0,01042401450	0,02331846379	0,08292467609	40,00
Catchment_415	0,06555232584	0,02230540616	0,00612688953	0,03712003015	40,00
Catchment_416	0,07855648798	0,00000000000	0,00360871069	0,07494777730	40,00
Catchment_419	0,21688640665	0,02779050226	0,01019088378	0,17890502061	40,00
Catchment_420	0,06012531455	0,00000000000	0,00000000000	0,06012531455	40,00
Catchment_424	0,23715238817	0,02166196495	0,01596451951	0,19952590371	40,00
Catchment_425	0,22530506887	0,02540895278	0,00099868295	0,19889743314	40,00
Catchment_426	0,18636127777	0,05725257117	0,03196354941	0,09714515718	40,00
Catchment_427	0,19157557485	0,05191402612	0,02221845301	0,11744309572	40,00
Catchment_428	0,08435625387	0,00856213525	0,01941763279	0,05637648584	40,00
Catchment_431	0,09222656449	0,03696942511	0,00911758887	0,04613955050	40,00

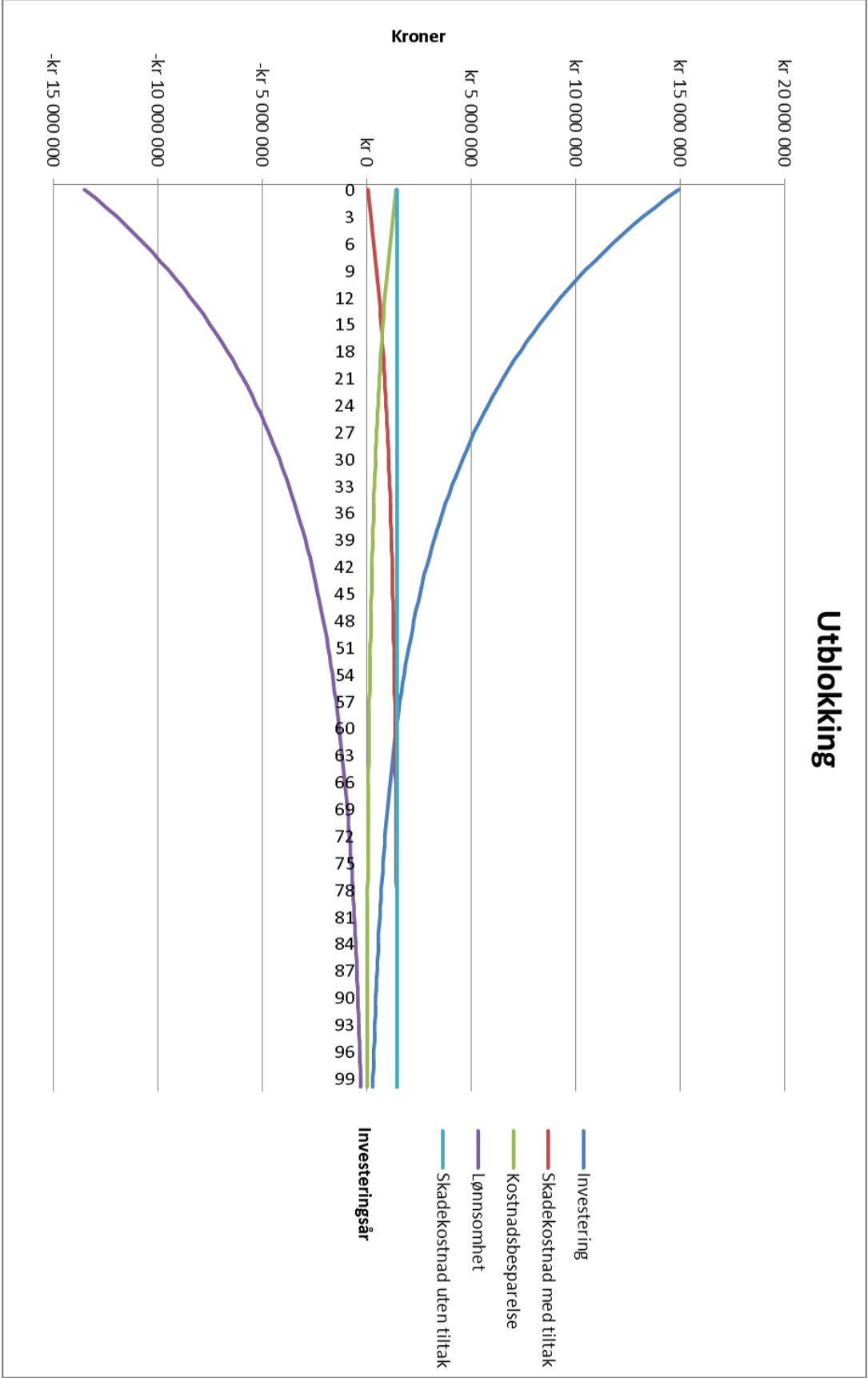
Tabell H2: Sammenligning av kummer/noder med oversvømmelse ved 100-års gjentaksintervall og 50 % klimatillegg uten klimatilpasningstiltak, med klimatilpasningstiltak og 100-års gjentaksintervall med dagens intensiteter. Situasjon ved klimatilpasningstiltak markert

Kum ID	100 + 50 %	Volum (l)	Hus skadet	100 + 50%	Volum (l)	Hus skadet	100	Volum (l)	Hus skadet
64	x	112							
100	x	12331	4	x	605		x	4705	1
106	x	204							
416	x	1272		x	683				
419	x	15551	3	x	6990	3	x	5160	2
420	x	5184	1	x	2176		x	730	
2328	x	1351							
2330	x	5969	2	x	715		x	660	
3189	x	6817	2				x	1194	
4500	x	1217							
4503	x	3919							
5089	x	267							
5095	x	275							
5097	x	4555	1	x	369		x	338	
5321	x	2388							
5323	x	1123							
6585	x	1484		x	872				
8400	x	3629	1						
9202	x	2089		x	471				
9204	x	16							
9377	x	361							
9597	x	1123							
9599	x	2937	1						
13220	x	942							
13222	x	204							
13223	x	974							
15577	x	1594		x	8				
15579	x	7665		x	1822		x	2160	
15585	x	3094	1						
15587	x	1940							
15616	x	2333							
15620	x	16							
15621	x	872							
15622	x	102							
17113	x	14027		x	10996		x	3699	
18499	x	3636	1						
18588	x	620							
18590	x	550							
18803	x	448		x	94				
23203	x	1673							
23209	x	31							
23252	x	0							
27694	x	110							
1_23	x	408							
1_26	x	259							
1_41	x	4194	1						
Node_1	x	12833		x	10249		x	3966	

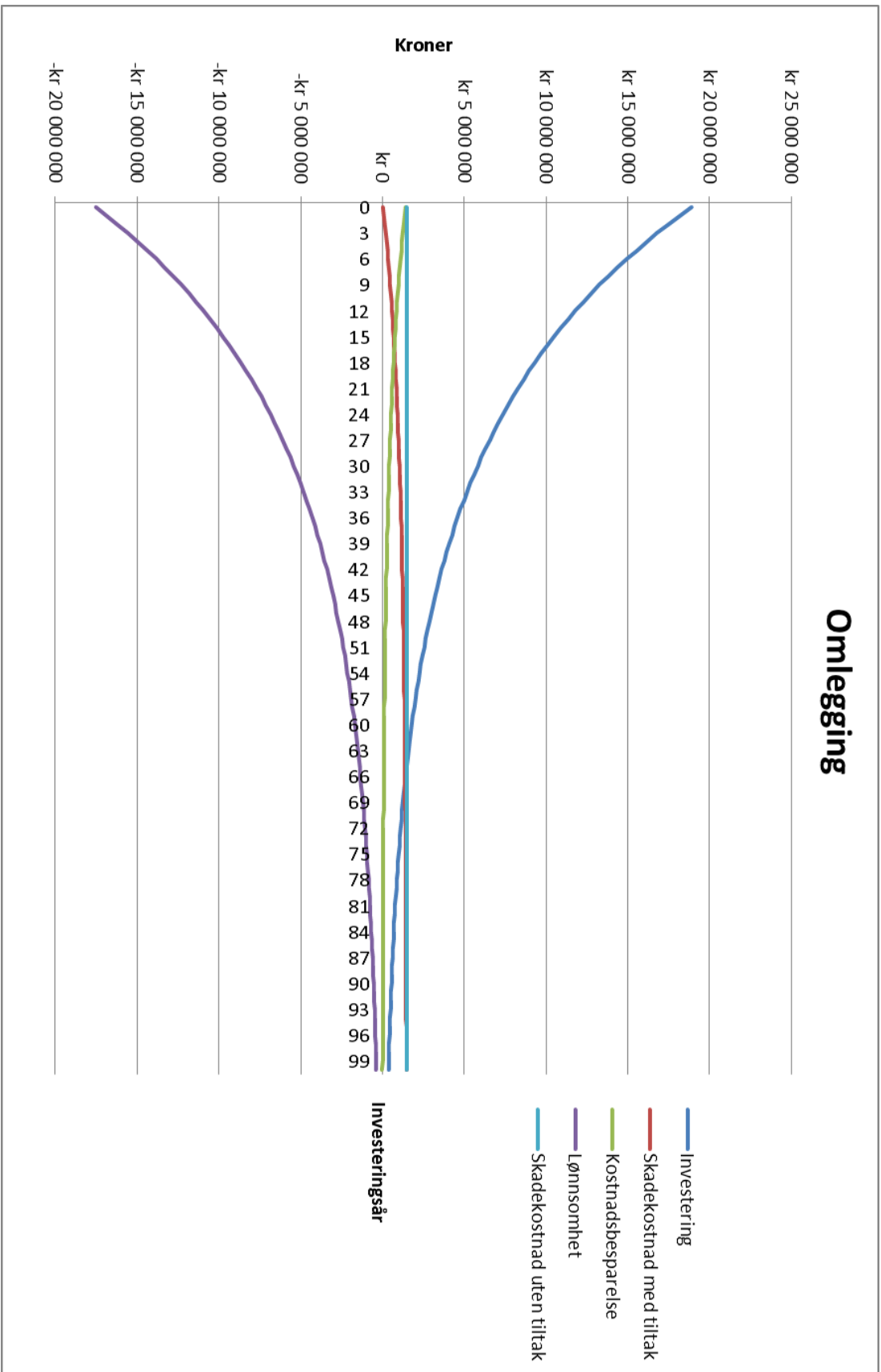
Vedlegg I: Kummer som oversvømmes ved lave gjentaksintervall



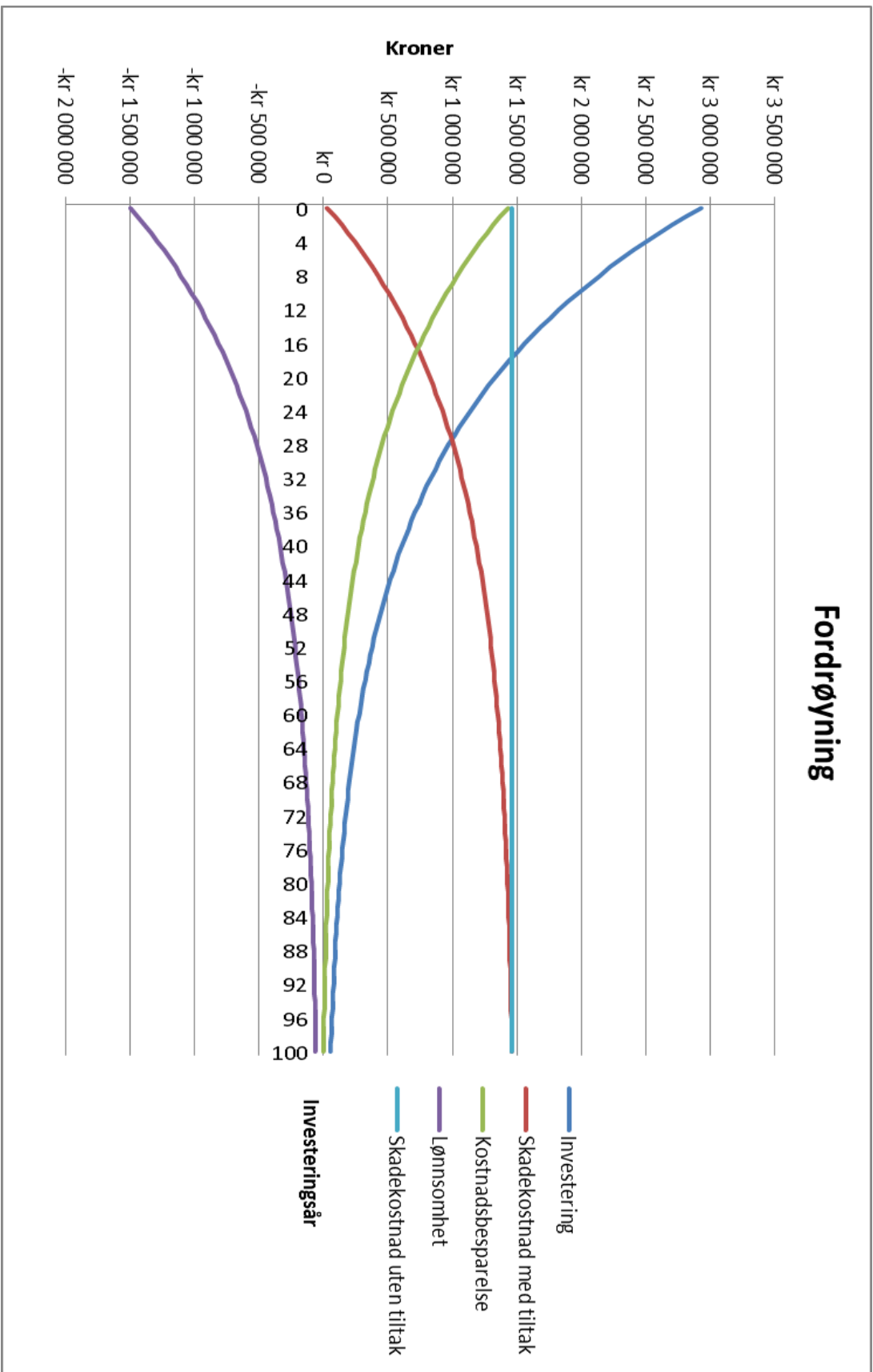
Vedlegg J: Lønnsomhetsanalyse av klimatilpasningstiltak relativt til investeringstidspunkt



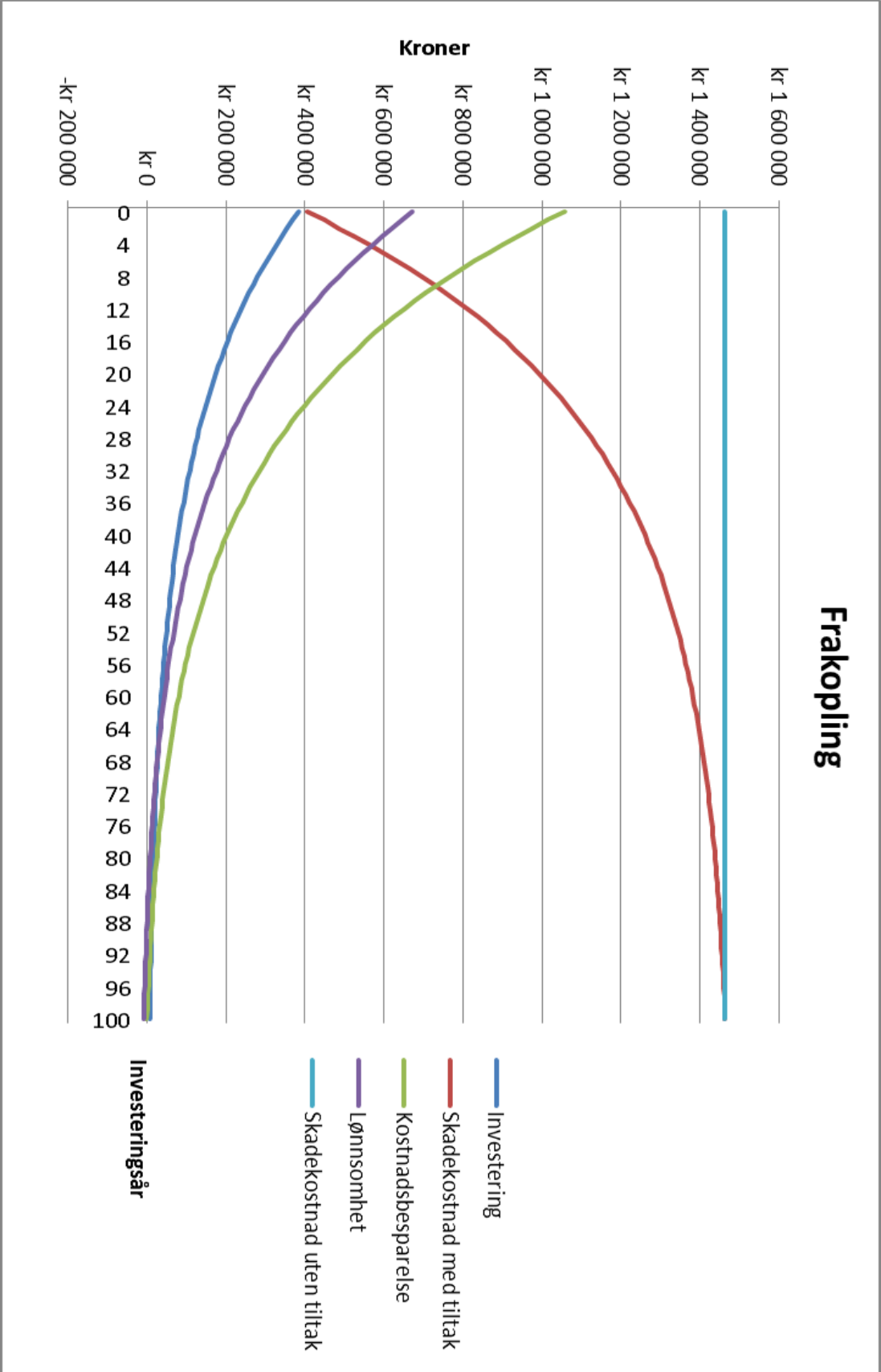
Omlegging



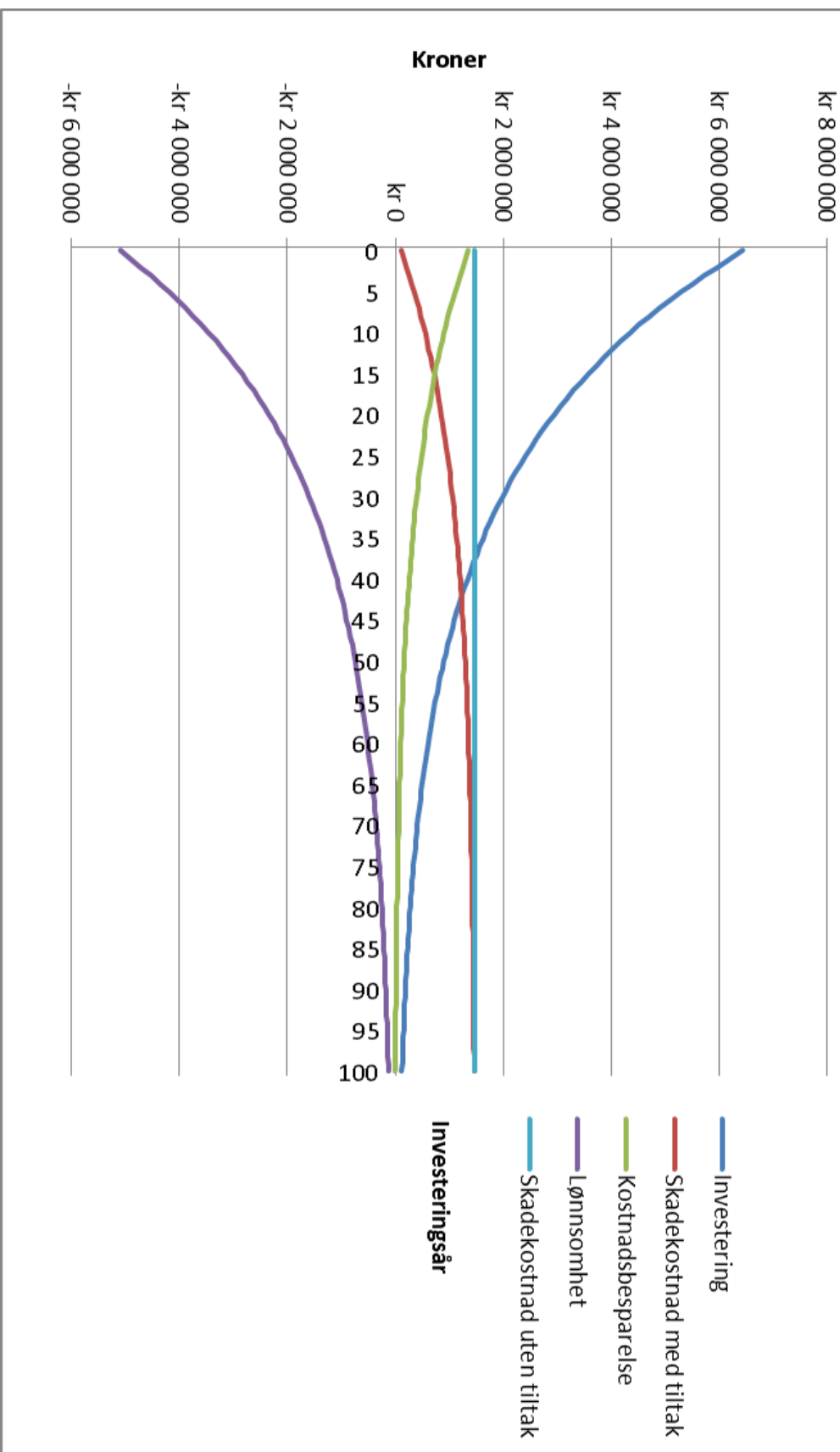
Fordrøynig



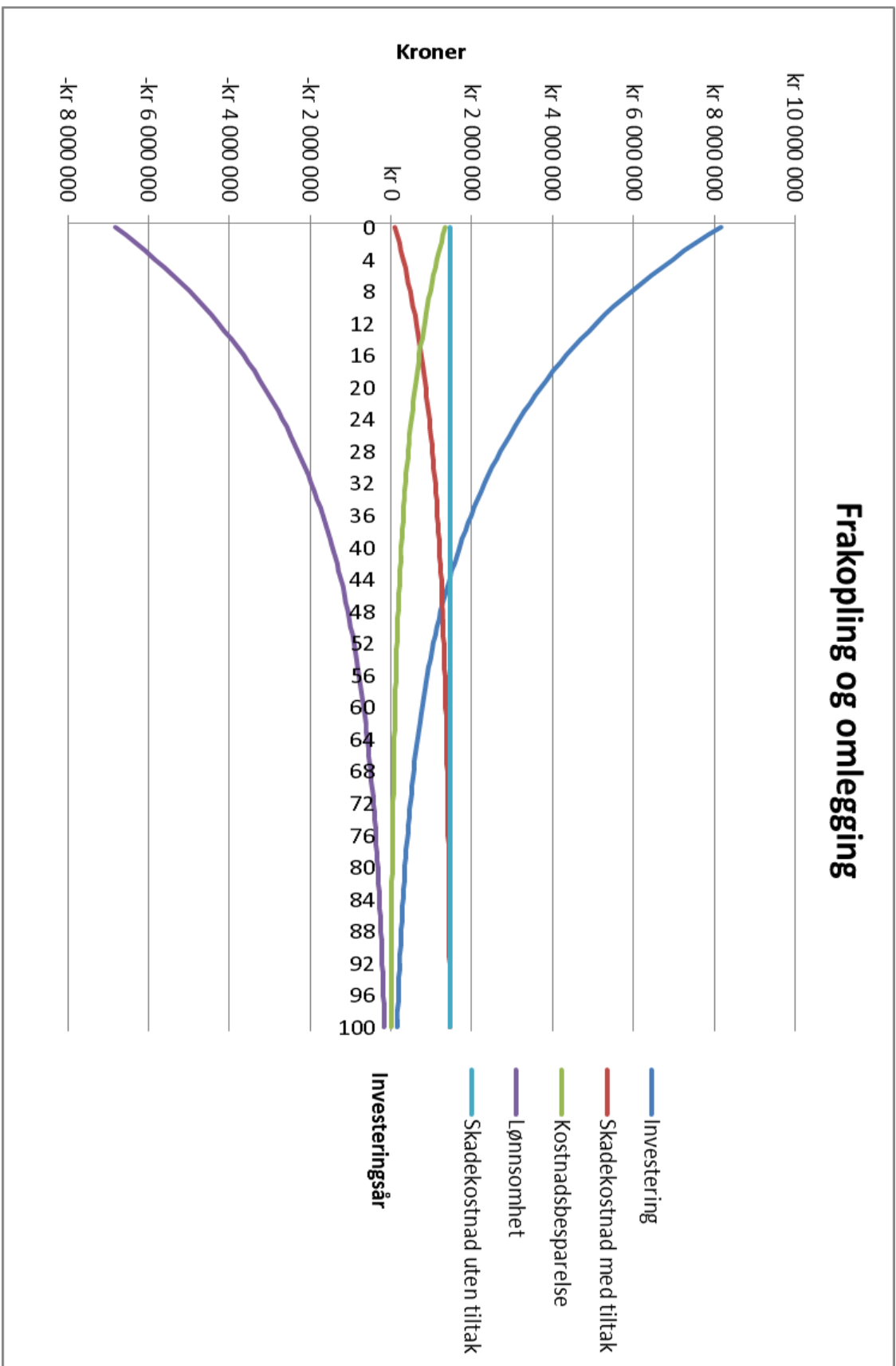
Frakopling



Frakopling og utblokking



Frakopling og omlegging



Frakobling og fordrøynning

