

KLIMAUTFORDRINGER OG TILPASNINGSTILTAK ANALYSE AV AVLØPSNETTET I CHARLOTTENLUND OG RANHEIM, TRONDHEIM KOMMUNE.

CHALLENGES OF CLIMATE CHANGE AND ADAPTATION MEASURES
ANALYSIS OF THE URBAN DRAINAGE SYSTEM IN CHARLOTTENLUND AND
RANHEIM, TRONDHEIM MUNICIPALITY.

RENATE SARA

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP
INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2012



Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet som siste del av mitt masterstudium i Vann- og miljøteknikk ved Institutt for Matematiske Realfag og Teknologi, Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB). Masteroppgaven er en del av forskningsprosjektet ExFlood, og er en videreføring av tidligere mastergradsstudenters arbeid med fokus på klimaendringer.

Arbeidet med oppgaven har vært interessant og lærerikt. Jeg har fått benyttet meg av temaer som er en del av studiet, samtidig som ny fagkunnskap er tilegnet.

Først vil jeg rette en stor takk til min hovedveileder Oddvar Lindholm og biveileder Jarle T. Bjerkholt, for gode råd og innspill til det faglige innholdet og metoder som er benyttet i oppgaven. Jeg vil takke Exflood-gruppen og mine medstudenter for utveksling av erfaringer.

Takk til DHI ved daglig leder Tomas Eidsmo for tilgang til programvaren Mike Urban. Takk til Geir Lindholm i Rosim AS som stilte programvaren Rosie til disposisjon, og for hjelp til innstallering av programvaren og opplæring i nyttige funksjoner benyttet i modellsimuleringen. Takk til Magnus Olsen for en innføring i avløpsmodellens oppbygning.

Jeg vil også rette en takk til Birgitte Gisvold Johannessen og Olav Nilssen i Trondheim kommune som har stilt avløpsmodellen til rådighet. De har også vært behjelpelig med en felles befaring i analyseområdet, og gitt meg nyttig informasjon om avløpsnett og kostnadstall.

Til slutt vil jeg si mange takk til mamma og pappa for korrekturlesning og oppmuntrende ord underveis.

Ås, 13. august 2012

Renate Sara

Sammendrag

Klimaforskningen viser trender for økning av overflate- og havtemperaturen på jorda. Menneskelig aktivitet påvirker jordas energibalanse gjennom utslipp av drivhusgasser til atmosfæren. Det sees et klima i endring, og ved hjelp av klimamodeller finnes det prognoser om fremtidens forventede klimaendringer.

Framskrivninger for Norges klima gir prognoser om blant annet flere og større regnhendelser i fremtiden som vil gi samfunnet en ny utfordring. Konsekvensene kan være dårlig kapasitet i avløpsnettene, flommer kan skade bygninger, veger, utstyr og resipienter som kan føre til store miljømessige- og økonomiske ulemper. Det sees at kommuner i Norge bør ta klimaendringene på alvor og implementere en helhetlig og klimatilpasset overvannshåndtering i et tidlig stadium i prosjekter.

Analyseområdet i denne oppgaven er i Charlottenlund og Ranheim i Trondheim kommune, og ved benyttelse av en urbanhydrologisk avløpsmodell i Mike Urban, Rosie og den hydrauliske motoren MOUSE er klimaendringenes effekt på avløpssystemet simulert. Det er valgt å benytte konstruerte symmetriske regnhyetogram for ulike gjentaksintervall. Regnintensiteten er oppskalert med en klimafaktor på 1,5 for å simulere endringer som oppstår om 100 år som følge av klimaendringer. Det er videre simulert tre ulike tilpasningstiltak mot den økte regnintensiteten, for å se om det fås tilfredsstillende effekt på reduksjon av antall kjelleroversvømmelser. En grov økonomisk analyse er utført for å se på skadeomfanget av kjelleroversvømmelser over 100 år, og vurdere lønnsomheten av å anlegge tiltakene i dag. Tiltakene som er simulert er frakopling av takflater, fordrøyning og økning av ledningsdimensjoner. Resultatene som er fremkommet er preget av usikkerheter, blant annet på grunn av at modellen ikke er kalibrert og usikre/utelatte kostnader.

Resultatene fra modellsimuleringen viser at regnhendelser med klimafaktor gir en stor økning av kritisk oppstuvning i ledningsnettet og antall kjelleroversvømmelser, spesielt for de laveste gjentaksintervallene. Regnhendelser med klimafaktor gir 42-168 % økning av antall meter ledning med kritisk oppstuvning, og 47-210 % økning av antall kjelleroversvømmelser. De ulike tiltakene som er simulert vil ha tilnærmet lik effekt på reduksjon av antall kjelleroversvømmelser ned til dagens skadenivå.

Resultatene av den økonomiske analysen viser at regnhendelsene med de laveste gjentaksintervallene bidrar til de største årlige skadekostnadene for kjelleroversvømmelser i løpet av 100 år. Etter forutsetningene som er satt, og ved benyttelse av nåverdimetoden, er det funnet at LOD-tiltakene fordrøyning og frakopling av takflater har den høyeste lønnsomheten. Anleggelse av ledninger med større dimensjoner har den høyeste investeringskostnaden og den laveste netto nåverdien.

Følsomhetsanalysen som er utført viser at avløpsnettet er sårbart for økt overflateavrenning på grunn av økt andel tette flater. Dette belyser at en fortetting av områder kan gi store virkninger på avløpsnettet i tillegg til større regnhendelser

Abstract

Climate research shows trends for increasing surface and ocean temperatures on Earth. Human activity affects the Earth's energy balance through the emissions of greenhouse gases into the atmosphere. It is seen a changing climate, and by using climate models predictions are made about expected climate changes for the future.

Projections of Norway's climate indicate larger rainfall events happening more often, giving the community a new challenge. Urban drainage systems may already have insufficient capacity, and floods can damage buildings, roads, equipment and recipients that may lead to major environmental and economic disadvantages. Municipalities in Norway should take the climate changes seriously, and implement holistic and climate change adapted storm water management in the early stages of projects.

The case study in this thesis is the urban drainage system in Charlottenlund and Ranheim in the municipality of Trondheim. By using an urban hydrological model in Mike Urban, Rosie and the hydraulic motor MOUSE, the impacts of climate changes in the system are simulated. Constructed symmetrical hyetograms for different return periods are given a 1,5 climate factor to simulate the effects occurring 100 years from today. Three different adaptation measures are simulated to see if they can reduce the numbers of damaged basements caused by the increased rainfall intensity. A rough economic analysis is made to look at the costs of flood damaged basements in a hundred year period, and assess the profitability of establishing the measures today. The measures simulated are; disconnection of roof surfaces, storage of surface water and increased pipe dimensions. The results obtained are characterized by uncertainties, partly because the model is not calibrated and uncertain/excluded costs.

The results of the model simulations show that rainfall events with climate factor provides a large increase of critical flooding in the urban drainage system and number of flood damaged basements, especially for the lowest return periods. Rainfall events with climate factor gives 42-168 % increase in pipe lengths with critical flooding, and 47-210 % increase of flood damaged basements. The measures that are simulated return results showing approximately equal effects on the reduction of flood damaged basements to the current situation. The results of the economic analysis shows that the rainfall events with the lowest return periods contribute to the largest annual costs of flood damaged basements over a hundred years. By using the net present value method with the assumptions made, it is found that disconnection of roof surfaces and storage of surface water are the measures with highest profitability. Increasing pipe dimensions has the highest investment costs and the lowest net present value.

The sensitivity analysis conducted shows that the urban drainage system is vulnerable to increased surface runoff due to increased impermeable surfaces. This illustrates the major impact urbanization and land use can have on urban drainage systems besides large rainfall events.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Figurliste	viii
Tabelliste	xi
Formelliste.....	xiii
Liste over forkortelser	xiv
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling.....	1
2 ExFlood	2
3 Klima.....	4
3.1 Klimasystemet	4
3.2 Det globale klimaet.....	5
3.2.1 Klimaendringer	5
3.2.2 IPCC.....	6
3.2.3 Utslippsscenarioer	6
3.2.4 Observerte globale klimaendringer	8
3.2.5 Framskrivninger av globalt klima	10
3.3 Klimamodeller.....	11
3.3.1 Globale klimamodeller	11
3.3.2 Nedskalering av klimamodeller.....	13
3.3.3 Delta Change Metode	14
3.4 Klimaet i Norge	15
3.4.1 Observerte klimaendringer	15
3.4.2 Framskrivninger av klimaet i Norge	16
3.5 Usikkerheter ved klimaframskrivninger	20
4 Det urbane avløpssystemet	21
4.1 Overvannsberegninger	23
4.1.1 Manuell beregning	23

4.1.2	Regndata	24
4.1.3	Dimensjonerende gjentakintervall	25
4.1.4	Sesongvariasjoner	27
4.2	Konsekvenser av klimaendringer.....	27
4.3	Urbanisering	30
5	Matematiske modeller	32
5.1	Modeller som beregningsverktøy.....	32
5.2	Modellmiljø.....	33
5.2.1	Mike Urban.....	33
5.2.2	MOUSE	33
5.2.3	Rosie	39
6	Klimatilpasset overvannshåndtering.....	40
6.1	Helhetlig overvannsplanlegging	40
6.2	Klimafaktor for nedbørsendringer.....	42
6.3	Tiltak i ledningsnettet	43
6.4	LOD-tiltak	44
6.4.1	Infiltrasjon	46
6.4.2	Fordrøyning og forsinking	47
6.4.3	Sikring av flomveier	49
6.4.4	Overvannsrensing.....	49
7	Analyseområdet	51
7.1	Landskap og bebyggelse	52
7.2	Grunnforhold	52
7.3	Avløpssystemet.....	54
7.3.1	Generell beskrivelse	54
7.3.2	Problemområder	55
7.3.3	Analyse av klimaeffekter på avløpssystemet utført av DHI	56
7.4	Avløpsmodellen	56
8	Simuleringer i avløpsmodellen.....	58
8.1	Forutsetninger og valg.....	58
8.1.1	Analysens tidsperspektiv.....	58
8.1.2	Regndata	58

8.1.3	Klimafaktor	61
8.2	Følsomhetsanalyse	62
8.3	Flomanalyse – konsekvenser av klimaendringer	64
8.3.1	Oppstuvning i avløpsnettet	64
8.3.2	Kjelleroversvømmelser	68
8.4	Analyse av tilpasningstiltak mot klimaendringene	71
8.4.1	Frakopling av takflater	71
8.4.2	Fordrøyning	73
8.4.3	Økning av ledningsdimensjoner	75
8.4.4	Sammenligning av tiltak	76
9	Økonomisk analyse	78
9.1	Nåverdimetoden	78
9.2	Opptredende regnhendelser i løpet av analyseperioden	79
9.3	Kostnader ved kjelleroversvømmelser	80
9.4	Investeringskostnader for tilpasningstiltak	81
9.5	Resultater	82
9.5.1	Situasjonen uten tilpasningstiltak	82
9.5.2	Frakopling av takflater	84
9.5.3	Fordrøyning	85
9.5.4	Økning av ledningsdimensjoner	86
9.5.5	Sammenligning av tiltak	87
9.6	Alternativ metode for å bestemme skadekostnader	88
10	Diskusjon	90
10.1	Usikkerheter i avløpsmodellen	90
10.2	Metoder og resultater	91
11	Konklusjon	94
12	Videre arbeid	95
13	Litteraturliste	96
14	Vedlegg	101
	Vedlegg 1 – Symmetrisk regnhyetogram med og uten klimafaktor for ulike gjentaksintervall.	102

Vedlegg 2 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket frakopling av takflater.	104
Vedlegg 3 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket fordrøyning.....	105
Vedlegg 4 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket økning av ledningsdimensjoner.	106
Vedlegg 5 – Delfelt med frakoplede takflater	107
Vedlegg 6 – Avrenning ved 100-års gjentaksintervall med klimafaktor, med og uten fordrøyningstiltak.....	108
Vedlegg 7 – Ledninger med økt dimensjon.....	109

Figurliste

Figur 1: Illustrasjon av et nedbørsfelt med avrenning til urbane områder. (ExFlood 2009)	2
Figur 2: Arbeidspakkene i ExFlood-prosjektet. (ExFlood 2009)	3
Figur 3: Oversikt som viser sammenhengen mellom solenergi, atmosfære, og jordens overflate. Oppgitte verdier er prosent av gjennomsnittlig solinnstråling. (Bjerknessenteret 2009b)	4
Figur 4: Illustrasjon av oppbygningen av SRES-scenarier. (IPCC 2000)	7
Figur 5: Årlig globalt CO ₂ -utslipp fra alle kilder (energi, industri og forandringer i arealbruk) fra 1990 til 2100 for de ulike scenariogrupper. (IPCC 2000).....	8
Figur 6: Observerte endringer for global temperatur, havnivå og snødekke på den nordlige halvkule. Endringene er vist i forhold til gjennomsnittsverdier i perioden 1961-1990. (IPCC 2007)	9
Figur 7: Framskrivninger av temperaturendringer for 2020-2029 og 2090-2099 i forhold til 1980-1999 for ulike utslippsscenarioer. Grafene til venstre presenterer usikkerhet, og differansen i antall kurver skyldes forskjell i antall foreliggende resultater. (IPCC 2007)	11
Figur 8: Klimamodellens utvikling fra enkle atmosfæremodeller til en implementering av flere modeller som tar hensyn til ulike prosesser i klimasystemet. (Bjerknessenteret 2009e)	12
Figur 9: Veien fra ulike utslippsscenarioer til beregninger av fremtidige klimaendringer i Norge (Hanssen-Bauer et al. 2009)	14
Figur 10: Inndeling av de seks temperaturregionene til venstre, og 13 nedbørsregionene til høyre.(Hanssen-Bauer et al. 2009)	16
Figur 11: Årsnedbør i Norge: observerte verdier fra år 1900 og beregnet høy, lav og middels framskrivning mot år 2100. Punktene er eksempelframskrivninger benyttet i hydrologisk modellering,(Hanssen-Bauer et al. 2009).....	17
Figur 12: En beregnet økning i havnivået (cm) i år 2100 fra referanseåret 2000 for A2 scenarioet. (Drange et al. 2007).....	19
Figur 13: Illustrasjon av fellessystemet til venstre og separatsystemet til høyre. (Svensk vatten 2007)	21
Figur 14: Prinsippskisse av oppstuvning i ledningsnettet. (Nie 2004)	22
Figur 15: Illustrasjon av kjelleroversvømmelser for a: fellessystem og b: separatsystem.(Fredrikstad kommune 2007).....	22
Figur 16: Illustrasjon som viser andelen av kilder til prosessforårsakede byggskader registrert i SINTEF Byggforsks byggskadearkiv for perioden 1993-2005. Skadekildene i figuren er ikke ensbetydende med skadeårsak, og skadene kan representere deler av hele byggets konstruksjon. (SINTEF Byggforsk, b.)	28
Figur 17: Skisse av endringer i avrenningsforløpet som følge av endret arealbruk og urbanisering. (Bergen kommune 2005)	31
Figur 18: De tre definerte tid-areal kurvene i MOUSE runoff. Tid-areal kurvens form avhenger av feltets utseende. (DHI 2009d)	35
Figur 19: Illustrasjon av effekten et regnskylt (Rain-1) har på avrenningen til et etterfølgende regnskylt av lik størrelse (Rain-2) Den raske avrenningen (FRC) er omtrent lik for de to forskjellige regnskyltene, mens den trege avrenningen (SRC) vil være forskjellige på grunn av at det hydrologiske systemet har blitt endret. (DHI 2009b).....	38

Figur 20: RDI-modulens struktur som viser sammenhengen mellom de fire hydrologiske lagringsenhetene. (DHI 2009b)	38
Figur 21: ROS-analysens rolle i kommunens overordnede planlegging. Bearbeidet etter KS (2012)	42
Figur 22: Lineær økning i regnintensiteter frem mot år 2100 basert på data fra DANVA. (Olsen 2011)	43
Figur 23: Skissen viser konvensjonelt overvannssystem øverst, og åpen og lokal håndtering overvannshåndtering nederst. (Lindholm et al. 2008)	45
Figur 24: Treleddstrategi for overvannshåndtering. Tallene må tilpasses lokale forhold.(Lindholm et al. 2008)	45
Figur 25: Mulige LOD-tiltak. Illustrasjonen viser forslag til hvordan avrenning fra tette flater i et boligfelt i Olderdalen i Ranheim avløpssone kan behandles lokalt, og føres til lokal bekk i stedet for til avløpssystemet. (Hovdenak 2011)	47
Figur 26: Utsnittet viser analyseområdet i Trondheim kommune. (Trondheim kommune 2012b)	51
Figur 27: Et typisk boligområde i analyseområdet, med hus på grønne tomter. Utsnittet er fra Nyheimsveien i Charlottenlund avløpssone. (Opplysningen 1881).....	52
Figur 28: Løsmassekart for analyseområdet. (NGU)	53
Figur 29: Infiltrasjonsevnen i analyseområdet.(NGU).....	53
Figur 30: Skredrisiko - faregrad (NVE)	54
Figur 31: Oversiktsbilde av avløpsmodellen i Charlottenlund og Ranheim.	57
Figur 32: IVF-kurve for målestasjon Voll-Moholt-Tyholt i Trondheim for perioden 1967-2009. Regnintensiteten oppgis i l/s*ha og regnets varighet i minutter. Kurvene viser forskjellige gjentaksintervall. (Trondheim kommune 2011b)	59
Figur 33: Symmetrisk regnhyetogram for et 60 minutters regn med 20-års gjentaksintervall.	61
Figur 34: Gjennomsnittlig DCF for Værnes avhengig av sesong. (Olsen 2011).....	62
Figur 35: Resultater fra følsomhetsanalysen.	64
Figur 36: Oversiktsbilde av modellen, og utsnitt av området hvor kritisk oppstuvning opptrer. Modellen er vist med nedbørsfelt, pumpestasjoner, ledninger og kummer.	65
Figur 37: Oppstuvning i ledninger for gjentaksintervall 2, 5 og 10 år, med og uten klimafaktor. Røde ledninger viser oppstuvning over 90cm.....	67
Figur 38: Oppstuvning i ledninger for gjentaksintervall 20, 50 og 100 år, med og uten klimafaktor. Røde ledninger viser oppstuvning over 90cm.....	68
Figur 39: Bildet til venstre viser hvilke ledninger som er overvannsledninger, og som ikke bidrar til kjelleroversvømmelser. Bildet til høyre viser lengdeprofilen til et av ledningsstrekene, hvor det sees at oppstuvningen er over 90 cm, men ikke over terreng.....	69
Figur 40: Antall kjelleroversvømmelser for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.70	
Figur 41: Sammenstilling av prosentvis økning av oppstuvning og kjelleroversvømmelser, som følge av klimafaktoren for de ulike gjentaksintervallene.	71
Figur 42: Delfeltene som er endret i tiltaket med frakoblede takflater.	71
Figur 43: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten frakopling av takflater som tiltak.....	73
Figur 44: Metode for beregning av nødvendig fordrøyningsvolum.....	73
Figur 45: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten fordrøyning som tiltak.	74

Figur 46: De merkede ledningene har fått større dimensjon i tiltaket.	75
Figur 47: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten økning av ledningsdimensjoner som tiltak.	76
Figur 48: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser ved ulike tiltak.	77
Figur 49: Erstatningsutbetaling avhengig av flomtype. (NORVAR 2004).....	81
Figur 50: Totale skadekostnader for ulike gjentakintervall med og uten klimafaktor over en periode på 100 år.	83
Figur 51: Årlige skadekostnader for kjelleroversvømmelser med antagelsen om at skadekostnadene stiger lineært fra år 0 til år 100.	84
Figur 52: Økonomisk sammenligning av tiltakene.	87
Figur 53: Et eksempel på observeringer av skadekostnader for to byer. (COWI & NIRAS 2007)	88
Figur 54: Utsnittet viser oppstuvning over 90 cm i et ledningsstrek i Olderdalen ved et regn med 2-års gjentakintervall uten klimafaktor.	90
Figur 55: Lengdeprofil av ledningsstrekket i Olderdalen ved et regn med 2-års gjentakintervall uten klimafaktor.	90

Tabelliste

Tabell 1: Relativ forandring (%) i års- og årstidsnedbør fra perioden 1961–90 til perioden 2021-50 og 2071–2100 ifølge middels, høy og lav framskrivning. Tabellen viser verdier for Norge og region Trøndelag/Helgeland. (Hanssen-Bauer et al. 2009)	18
Tabell 2: Relativ endring (%) av dager med mye nedbør og endring av nedbørsmengde på dager med mye nedbør fra perioden 1961–90 til perioden 2071–2100 for middels, høy og lav framskrivning. Tabellen viser resultater for Norge og to utvalgte regioner. (Hanssen-Bauer et al. 2009).....	19
Tabell 3: Forskjellige høydekrav opp gjennom årene.(Lindholm et al. 2008).....	23
Tabell 4: Verdier for avrenningskoeffisienten for ulike områder. (Trondheim kommune 2011b)	24
Tabell 5: Dimensjonerende gjentaksintervall etter NS-EN 752. (Lindholm et al. 2008).....	26
Tabell 6: Norsk vanns veiledende valg av minimums gjentaksintervall. (Lindholm et al. 2008)	26
Tabell 7: En vurdering av klimasårbarhet for ulike kategorier av kommunal og fylkeskommunal infrastruktur. (Aall et al. 2011)	29
Tabell 8: Virkning av klimaendringer for bygningsmasse og infrastruktur. (Rasmussen & Vennemo 2010).....	30
Tabell 9: Benyttede enhetskostnader for skader i Roskilde. (COWI & NIRAS 2007)	30
Tabell 10: Hierarkisk oversikt over plannivåene i kommunen. Eksempler på krav og retningslinjer viser hvordan overvannet kan tas hånd om i de enkelte nivåene for en helhetlig overvannshåndtering. Bearbeidet etter Lindholm et. al (2008).....	41
Tabell 11: Anbefalt klimafaktor i Danmark for ulike gjentaksintervall. (DANVA 2007).....	43
Tabell 12: Oversikt over løsmassenes egenskaper.(Mæhlum et al. 2009)	46
Tabell 13: Ulike tiltak som kan fordrøye og forsinke overvannet. Bearbeidet fra Lindholm et. al (2008)	48
Tabell 14: Renseeffekter for forskjellige LOD-anlegg. (Lindholm et al. 2008) Rekkefølgen av LOD-anlegg er justert etter total virkningsgrad.	50
Tabell 15: Sammenstilling av antall noder med maks vannspeil over bakkenivå og antatt kjellernivå. Analysen er utført av DHI. (König 2011).....	56
Tabell 16: Regnintensitet for IVF-kurven Voll-Moholt-Tyholt for 20-års gjentaksintervall fra IVF-kurvens tabelldata. (Johannessen 2011b) Intensiteten for 40- og 50 minutters varighet er interpolert.....	60
Tabell 17: Resultater for et 60-minutters symmetrisk regnhyetogram med 20-års gjentaksintervall.....	61
Tabell 18: Oversikt over antall kummer med oppstuvning mer enn 90 cm over topp rør for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.	65
Tabell 19: Oversikt over antall meter ledninger med kritisk oppstuvning for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.....	66
Tabell 20: Antall boliger i fare for kjelleroversvømmelse for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.....	70
Tabell 21: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (frakopling av takflater) for ulike gjentaksintervall.....	72
Tabell 22: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (fordrøyning) for ulike gjentaksintervall.....	74

Tabell 23: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (økning av ledningsdimensjoner) for ulike gjentaksintervall.....	76
Tabell 24: Antall opptredende regnhendelser for ulike gjentaksintervall i løpet av en periode på 100 år.	79
Tabell 25: Resultater fra VASK; erstatningsbeløp og antall skader. (FNO 2012)	80
Tabell 26: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall uten tiltak.....	83
Tabell 27: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med tiltak frakopling av takflater.	84
Tabell 28: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for tiltaket frakopling av takflater.....	85
Tabell 29: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med fordrøyingstiltak.	85
Tabell 30: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for fordrøyingstiltaket.	86
Tabell 31: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med tiltaket økning av ledningsdimensjoner.	86
Tabell 32: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for tiltaket økning av ledningsdimensjoner.....	87
Tabell 33: Sammenligning av skadekostnader for benyttet metode og den danske modellen.	89

Formelliste

Formel 1: Metode for å beregne DCF. (Holvik 2010)	15
Formel 2: Den rasjonelle formel (Oslo kommune 2011).....	23
Formel 3: Frekvens som funksjon av gjentakintervall. (Winther et al. 2006)	24
Formel 4: Antall celler ved tid-arealmetoden (DHI 2009d).....	35
Formel 5: Kontinuitetsligning (DHI 2009d).....	36
Formel 6: Momentligning (DHI 2009d)	36
Formel 7: Netto nåverdi (Finansdepartementet 1997).....	78

Liste over forkortelser

AOGCM Atmosphere Ocean General Circulation Model

DANVA Dansk Vand- og Spildevandsforening

DCF Delta Change Factor

DCM Delta Change Method

DHI Danish Hydraulic Institute

EMIC Earth System Model of Intermediate Complexity

ExFlood Extreme weather in small catchments: new method for flood protection

FN De Forente Nasjoner

FNO Finansnæringens fellesorganisasjon

GCM General Circulation Model/Global Climate Model

GIS Geographic Information System

IVF Intensitet-Varighet-Frekvens

IPPC The Intergovernmental Panel on Climate Change

LOD Lokal overvannsdiskonering

MET Meteorologiske institutt

NORKLMA Klimaendringer og konsekvenser for Norge

NORVAR Norsk VA-verkforening

NoSerC - Norwegian Service Centre for Climate Modelling.

NOU Norges offentlige utredninger

NVE Norges vassdrags- og energidirektorat

RCM Regional Circulation Model

RDI Rainfall Dependent Infiltration

SRES Special Report on Emissions Scenarios

UMB Universitetet for miljø- og biovitenskap

UNEP United Nations Environment Programme

VA Vann og avløp

VASK Vannskadestatistikk fra FNO

VAV Vann- og avløpsetaten i Oslo kommune

WMO World Meteorological Organization

WP Work package

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Klimaet har den siste tiden fått økt oppmerksomhet, mye grunnet uønskede flommer som har oppstått på grunn av store overvannsmengder. Menneskelig aktivitet påvirker klimaets energibalanse gjennom utslipp av drivhusgasser til atmosfæren. Det pågår stadig forskning verden over for å finne svar på hvordan klimaet vil utvikle seg i fremtiden, men det finnes spørsmål som fortsatt er ubesvart. I Norge er det forventet kraftigere og hyppigere ekstreme regnhendelser. Spesielt i urbane områder kan dette føre til et overbelastet avløpssystem og store flomskader.

Gjennom forskningsprosjektet Exflood har flere mastergradsstudenter ved UMB skrevet oppgaver som omhandler overvannshåndtering og klimaendringer. Hovdenak (2011) og Berling (2011) så på blant overvannshåndtering gjennom skisserte løsninger for åpne LOD-anlegg ved Ranheim i Trondheim kommune. Denne oppgaven er delvis en videreføring av en masteroppgave utarbeidet av Olsen (2011). Olsen benyttet en avløpsmodell for Charlottenlund og Ranheim i Trondheim kommune for å kjøre simuleringer av ulike regnhendelser. Olsen benyttet historiske regnhendelser og utvelgelseskriterier for å finne de verste regnhendelsene. I en sårbarhetsanalyse ble fire regnhendelser skalert med 10, 20, 30, 40 og 50 % for å se på effektene i systemet. Olsen fant at avløpssystemet var sårbart for korte intense regn, og at en økning i regnintensiteten medførte at progressivt flere kummer fikk kritisk oppstuvning. Det ble også sett på tiltak for å hindre overløpsutslipp til Sjøskogbekken som i dag har dårlig resipientkvalitet. (Olsen 2011)

I denne oppgaven står økonomiske konsekvenser og tilpasningstiltak mot klimaendringene sentralt. Det er valgt å se på hvilke konsekvenser økt regnintensitet har på avløpsnett og bygninger i Charlottenlund og Ranheim avløpssone i Trondheim kommune. Arbeidet vil i stor grad bestå av modellsimuleringer i den samme avløpsmodellen som Olsen benyttet i sin oppgave. Videre vil effekten av ulike klimatilpasningstiltak i overvannshåndteringen simuleres, og i en økonomisk analyse vil tiltakenes lønnsomhet vurderes.

1.2 Problemstilling

Problemstillingene som er formulert for denne oppgaven er:

- Hvilke effekter har klimaendringer på avløpssystemet i Charlottenlund og Ranheim i Trondheim kommune, og hvilke økonomiske konsekvenser kan dette gi?
- Vil klimatilpasningstiltak i avløpsnett redusere skadeomfanget i tilfredsstillende grad, og vil anleggelse av tiltak være økonomisk lønnsomt?

2 ExFlood

ExFlood er et forskningsprosjekt som gjennomføres i perioden 2010-2013. Prosjektets koordinator er Bioforsk, og samarbeidspartnerne er NVE, UMB og Statens Vegvesen. (ExFlood 2009) ExFlood finansieres av NORKLIMA, som er et av Forskningsrådets programmer med programperiode 2004-2013. NORKLIMA skal bidra med ny kunnskap om klimaet og klimaendringenes effekter, samt samfunnsmessige tilpasningstiltak. (Forskningsrådet 2011)

Med ExFlood-prosjektet ønsker man å definere og analysere tiltak mot negative hendelser som oppstår på infrastrukturen på grunn av ekstreme nedbørshendelser i små nedbørsfelt. Urbane områder, infrastruktur, landbruksområder og skogsområder har arealflater med forskjellige egenskaper. Et nedbørsfelt kan bestå av flere forskjellige areal typer som gir en sammensatt effekt av ekstremvær. Gjennom prosjektet vil det studeres hvilke effekter opp- og -nedstrøms tiltak har for en avrenning som kan gjøre skade på infrastrukturen. Det ønskes å se på sammensatte områder som inneholder både natur- og urbane områder. Avslutningsvis ønskes det å produsere et arealplanleggingsverktøy som kan benyttes for sammensatte nedbørsfelter. Et slikt verktøy vil kunne gi økt kunnskap og bedre planlegging av tiltak som hindrer ødeleggelser på infrastrukturen for kommuner og andre myndigheter (ExFlood 2009)



Figur 1: Illustrasjon av et nedbørsfelt med avrenning til urbane områder. (ExFlood 2009)

Det er tre deltagende kommuner i ExFlood-prosjektet. Trondheim kommune, Fredrikstad kommune og Sandnes kommune bidrar med hvert sitt studiefelt, som er valgt på grunnlag av tilgjengelig informasjon, eksisterende studiemateriale og rapporterte flomhendelser. I tillegg er et fjerde felt i Skuterud i Ås kommune valgt som pilotprosjekt for å studere prosesser i detalj. Arealbruken i dette feltet er passende for ExFlood-prosjektet, samt at pågående

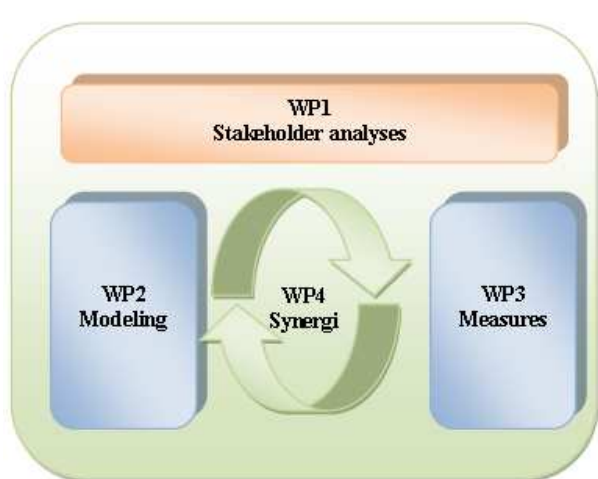
forskning og langsiktige utslippsdata er tilgjengelig. ExFlood er delt inn i fire arbeidspakker som er beskrevet under, og illustrert i figur 2.

Arbeidspakke 1 (WP1) skal identifisere og kartlegge interessenter som opplever ekstreme værhendelse i små nedbørsfelt. Informasjon om eksisterende tiltak, og den kvantitative effekten som følge av ekstrem nedbør vil undersøkes ved hjelp av spørreskjemaer og lagres i en database. Områder hvor flomproblemer er registrert, og områdets egenskaper ønskes avdekket ved hjelp av lokale interessegrupper. Informasjonen blir lagret i et topografisk kartverk.

I arbeidspakke 2 (WP2) ønsker man ved hjelp av modelleringsverktøy å få oversikt over hendelser i sammensatte nedbørsområder som følge av dagens- og fremtidens ekstreme regnhendelser, samt mulige endringer av arealutnyttelsen. Det tilstrebes å benytte egnede modeller avhengig av hvilke arealer (for eksempel urbane-, skogs- og landbruksområder) nedbørsfeltene består av, og ved å sette de eksisterende modellene sammen ønskes det å få ut resultater for hele feltanalysen. Det vil utføres følsomhetsanalyser for å bestemme hvilke parametere i modellen som er sensitive for variasjoner i modellresultatene.

Arbeidspakke 3 (WP3) konsentrerer seg om analyser av effekten til eksisterende tiltak, og oversikt over nye tiltak som vil gi positiv effekt på uønskede hendelser som følge av regnhendelser. Resultater fra arbeidspakke 2 benyttes også til å finne utforminger og plassering av tiltak, kostnader, og i hvilken grad tiltakene egner seg for forskjellige områder og regnhendelser.

I arbeidspakke 4 (WP4) er målet å benytte resultatene fra de tre første trinnene til å utvikle et planleggingsverktøy som kan simulere regnhendelser tilnærmet virkeligheten i et område, og være et hjelpemiddel ved valg av tiltak. (ExFlood 2009)



Figur 2: Arbeidspakkene i ExFlood-prosjektet. (ExFlood 2009)

Denne oppgaven inngår i arbeidspakke 2 og 3, med fokus på simulering av klimaendringenes konsekvenser i urbane områder, og plassering av mottiltak og kostnadsvurderinger.

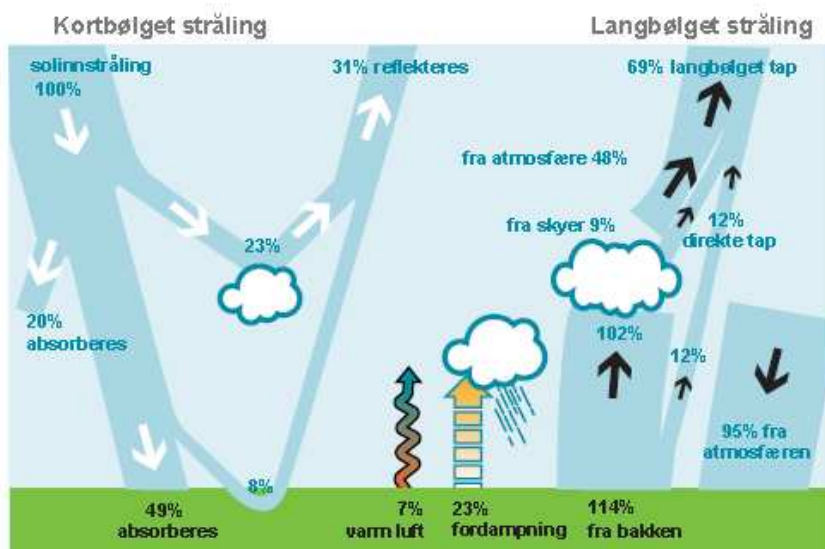
3 Klima

3.1 Klimasystemet

Når man hører ordet *klima*, vil mange tenke på lokale regnbyger og sol- og varmekorhold. MET (Meteorologisk institutt) har følgende beskrivelse av klimaet:

«Klima er en beskrivelse av gjennomsnittsværet på ett sted eller område, slik det framkommer når enkeltobservasjoner bearbeides statistisk etter internasjonale retningslinjer.»

Klimasystemet består av jordklodens fysiske komponenter; havet, jordoverflaten, biosfæren og atmosfæren, og kan variere naturlig og uforutsigbart. (RegClim) Klimaet styres av balansen mellom innstrålingen fra solen, refleksjon fra jordoverflaten og atmosfære og atmosfærens sammensetning. Jordas energibalanse er vist i figur 3. En balanse mellom strålingsenergien fra sola og reflektert energi gir et stabilt klima. (Bjerknessenteret 2009b)



Figur 3: Oversikt som viser sammenhengen mellom solenergi, atmosfære, og jordens overflate. Oppgitte verdier er prosent av gjennomsnittlig solinnstråling. (Bjerknessenteret 2009b)

Omtrent 31 % av solenergien reflekteres, mens resten absorberes i klimasystemet. Atmosfæren får tilført energi fra solstråling, varmestråling fra jorda, samt varmeledning og fordampning. Da energibudsjettet ikke er likt over alt, vil det fraktes varme via luftstrømmer og havstrømmer som skaper bevegelse i klimasystemet. Varmestrålingen fra jorda har en strålingstemperatur på ca. $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, mens jordoverflatens gjennomsnittlige temperatur er ca. $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Denne forskjellen skapes av den naturlige drivhuseffekten (RegClim), som oppstår ved at drivhusgasser, skyer og partikler i atmosfæren tar opp infrarød stråling og sender den ut igjen. Drivhusgassene slipper med andre ord solstråling gjennom atmosfæren, mens varmestråling fra jorda adsorberes. (Bjerknessenteret 2009b)

3.2 Det globale klimaet

3.2.1 Klimaendringer

Endringer i klimasystemet kan forekomme på grunn av jordens interne dynamikk og ytre påvirkning. Ytre påvirkning kan være naturlige, som for eksempel endret solinnstråling og vulkanutbrudd. Ytre påvirkninger kan også være menneskeskapte, ved å endre atmosfærens innhold av drivhusgasser. (RegClim). Naturlige klimavariasjoner kan være regionale, da særlig for svingninger som har mindre enn 100 års varighet. (Bjerknessenteret 2009d) Endringer i energibalansen i klimasystemet gir et strålingspådriv¹ som benyttes til å sammenligne ulike klimafaktorer og variasjoner i klimasystemet. (IPCC 2007)

Fortidens klima (paleoklima) forskes på ved å rekonstruere klimaet med minst mulig usikkerhet og tidsoppløsning bakover i tid. Til dette benyttes kilder som; historiske data, geologiske data, landdata, data om isbreer og biologisk data. Paleoklimatiske studier er viktige for å forstå dagens klima og projisere fremtidens klima (Bjerknessenteret 2009d).

Temperaturendringer over tusenvis av år henger sammen med blant annet jordens bane rundt sola og jordaksens vinkel mot sola. Det har opp gjennom tidene vært naturlige klimaendringer på jorda, som for eksempel veksling mellom varme perioder og istid. For omtrent 125 000 år siden var det 3-5 °C varmere enn i forrige århundre fordi jorden stod nært solen om sommeren. Havet stod 4-6 meter høyere, og en tredjedel av Grønlandsisen hadde smeltet. (Bjerknessenteret 2009d) Under siste istid for omtrent 20 000 år siden sto havnivået ca. 120 meter lavere enn i dag, og over 1 meters lag med is dekket Norge. (Bjerknessenteret 2009d; Hanssen-Bauer et al. 2009) Temperaturen var 0,5-1 °C høyere i middelalderen enn i perioden 1961-1990, og det milde klimaet førte til at nordboere kunne skape en bosetting på Grønland. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

De naturlige pådrivene i den siste halvdel av det forrige århundret skulle tilsi en svak nedkjøling av jorden, mens det tvert imot er sett en oppvarming, og mange forskere har gjennom vitenskapelige metoder fastslått at oppvarmingen er menneskeskapt. (Bjerknessenteret 2009d) Siden den industrielle revolusjonen med økt grad av menneskelig aktivitet har konsentrasjonen av CO₂, metan og lystgass økt betydelig i atmosfæren. CO₂ er den viktigste drivhusgassen, og skyldes først og fremst bruk av fossilt brensel og endret arealbruk. (IPCC 2007) Konsentrasjonen av CO₂ har økt med nærmere 40 % og konsentrasjonen av metan har økt med 17 % siden den førindustrielle tiden, indikert i iskjernedata fra Grønland og Antarktis. Disse verdiene er høyere enn den naturlige variasjonen gjennom den siste million år. (Bjerknessenteret 2009d) Da partikler i atmosfæren reflekterer innkommende solinnstråling og øker skydannelsen, vil en forventet økning av

¹ Strålingspådriv benyttes som et mål på viktigheten av en faktors evne til å skape endring i energibalansen. Positivt strålingspådriv tilsier oppvarming av jordoverflaten, mens ved negativt strålingspådriv forventes en nedkjøling av jordoverflaten. (IPCC 2007)

partikkelkonsentrasjonen bidra med en redusering av den totale oppvarmingen.
(Bjerknessenteret 2009d)

3.2.2 IPCC

IPCC ble etablert av verdens meteorologiorganisasjon (WMO) og FNs miljøprogram (UNEP) for å vurdere vitenskapelig, teknisk og økonomisk informasjon for å øke forståelsen av menneskeskapte klimaendringer. IPCC har produsert en rekke rapporter om forståelsen til årsakene av klimaendringer og mulige konsekvenser. Publikasjonene fra IPCC har blitt mye benyttet som referanseverk av forskningsinstitusjoner og beslutningstakere.(IPCC 2000)

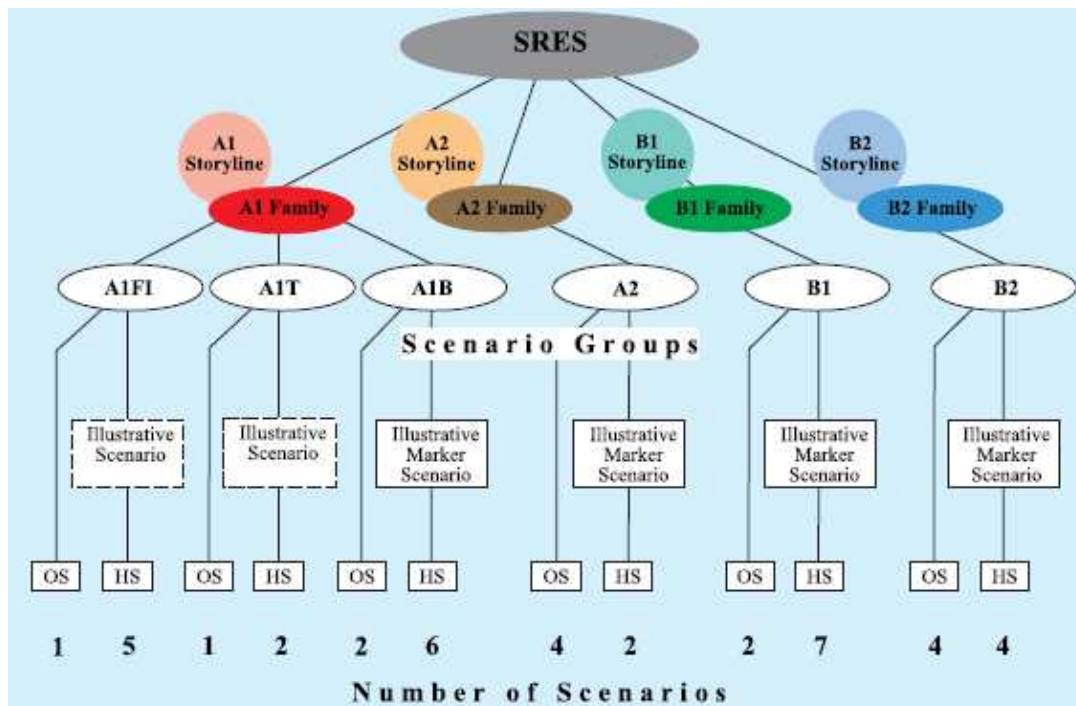
I henhold til IPCC fjerde hovedrapport kan ikke de naturlige klimavariasjonene forklare temperaturendringen som er sett de siste 50 år. Ved klimamodellering vil observeringer av klimaet stemme først når drivhusgassene blir lagt til. Fremtidige endringer av klimaet forventes å oppstå på grunn både av naturlig og menneskeskapt påvirkning.(Hanssen-Bauer et al. 2009) IPCC anser det som *meget sannsynlig*² at det meste av den globale gjennomsnittstemperaturen som har økt siden midten av det 20. århundret er begrunnet i den økte mengden menneskeskapte drivhusgasser.(IPCC 2007)

3.2.3 Utslippsscenarioer

IPCC har utviklet ulike fremtidige langtidsscenarioer for utslipp av drivhusgasser for fremtiden. Utslippsscenarioene (SRES) er beskrevet fra blant annet teknologisk, demografisk, og samfunnsøkonomisk utvikling, som det er knyttet store usikkerheter til.

Utslippsscenarioene gir et bilde på hvordan fremtiden kan utarte seg, og benyttes som et verktøy i klimaforskningen ved blant annet klimamodellering og analyser av konsekvenser. Scenarioene er ikke tillagt sannsynlighet, slik at det ikke er mer sannsynlig at et scenario vil inntreffe enn et annet. De ulike scenarioene gir en nyttig kontekst ved å kunne se ulikhetene i forhold til hverandre. Figur 4 illustrerer oppbygningen av SRES-scenarioene, hvor fire fremtidshistorier gir et sett med fire scenariefamilier og seks scenariogrupper. Ut fra Scenariogruppene er det utviklet til sammen 40 scenarioer.(IPCC 2000)

² IPCCs sannsynlighetsterminologi (grad av sannsynlighet for et resultat i parentes): nærmest sikkert (> 99 %), svært sannsynlig (> 95 %), meget sannsynlig (> 90 %), sannsynlig (> 66 %), mer enn 50 % sannsynlig, (> 50 %), like usannsynlig som sannsynlig(33-66 %), usannsynlig (< 33 %), meget usannsynlig (< 10 %), svært usannsynlig (<5 %) eksepsjonelt usannsynlig (<1 %)(Solomon et al. 2007)



Figur 4: Illustrasjon av oppbygningen av SRES-scenariene. (IPCC 2000)

De fire scenariefamiliene er beskrevet under (IPCC 2000):

A1: Rask økonomisk utvikling, hvor forskjellen mellom fattige og rike land vil jevnes ut. Det benyttes raskt voksende teknologi, inntekten øker, forbruket av varer er høyt, og det investeres for å opprettholde den høye økonomiske veksten. Befolkningsantallet i verden øker mot ni milliarder mennesker i 2050, og avtar deretter til syv milliarder mennesker i 2100. A1 er delt inn i tre undergrupper med ulik teknologiutvikling og energikilder, hvor de ulike underscenariene bygger på: ikke-fossile energikilder (scenario A1T), fossilintensive energikilder (scenario A1F1) og en balanse på tvers av energikilder. (scenario A1B)

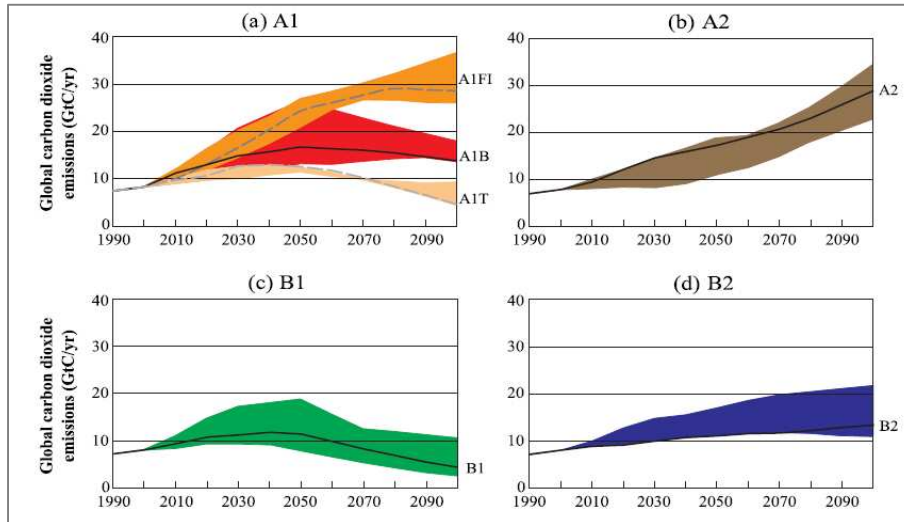
A2: Den teknologiske utviklingen er langsommere enn i A1, og økonomien utvikler seg ujevnt mellom regioner. Befolkningsveksten er størst i dette scenarioet, med fremtidig befolkningsantall på 15 milliarder mennesker i 2100. Miljøhensynet er ikke sammenfallende mellom regionene, men forurensninger reduseres lokalt i områder. Bruk av energikilder er forskjellig avhengig av tilgang og økonomisk status i regionene.

B1: Befolkningsantallet stiger og synker på lik linje med scenario A1, slik at det i 2100 er syv milliarder mennesker på jorda. Den økonomiske aktiviteten er høy, og det pågår en bevisst utvikling mot en rettferdig utjevning av økonomien mellom regioner. Miljø og bærekraftig bruk av og naturressurser er generelt i fokus. Investeringer benyttes blant annet på renere teknologi og redusert forurensning.

B2: Utviklingen går generelt langsomt, men det finnes ujevnheter mellom forskjellige regioner. I 2100 vil befolkningstallet nå 10 milliarder mennesker. Likheter for mennesker og miljøvern er høyt prioritert, og det finnes en økt bekymring for miljøet og sosial bærekraft i

forhold til scenario A2. Energibruken varierer avhengig av ressursene i forskjellige regioner, og en ser mer vellykkede lokale og regionale strategier for å løse miljøproblemer fremfor globale.

Figur 5 viser forventet utvikling av CO₂-utslipp fra 1990 til 2100 for de ulike scenariogrubbene.



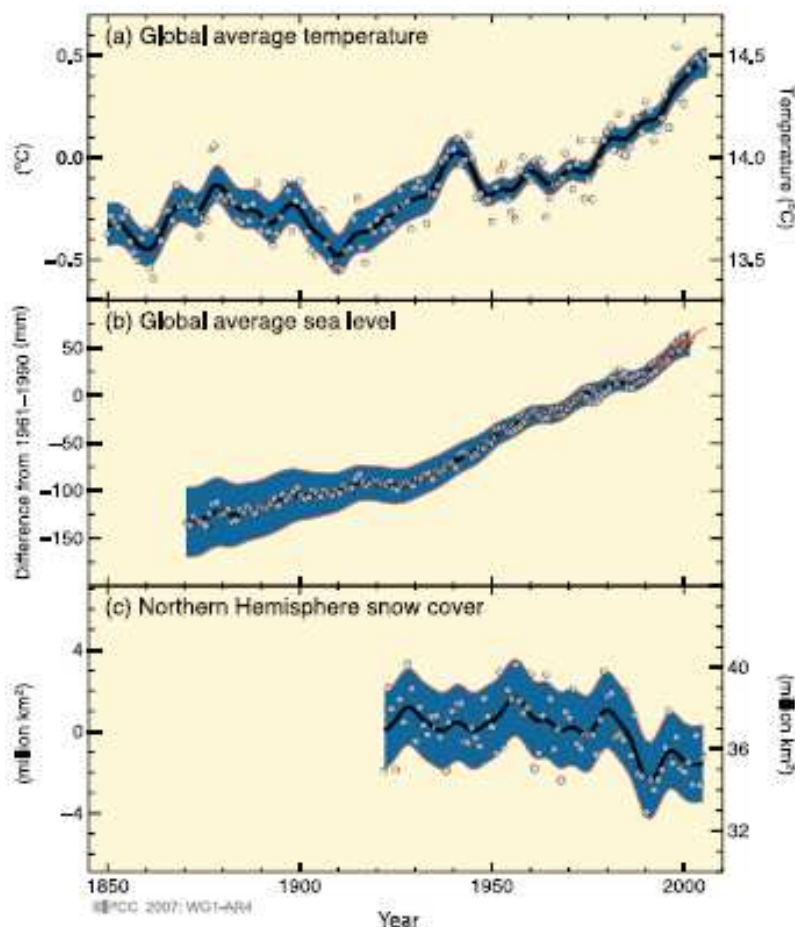
Figur 5: Årlig globalt CO₂-utslipp fra alle kilder (energi, industri og forandringer i arealbruk) fra 1990 til 2100 for de ulike scenariogrubbene. (IPCC 2000)

3.2.4 Observerte globale klimaendringer

I henhold til IPCCs fjerde hovedrapport er oppvarmingen av klimasystemet er utvetydig, etter observeringer av globale endringer for gjennomsnittstemperaturer, snø, is og hav. Hovedpunktene fra globale observasjoner fra nylig tid er beskrevet under (IPCC 2007):

- Trenden for temperaturforandring for perioden 1906-2005 viser en temperaturøkning på 0,74 °C. Den lineære trenden for oppvarming over de siste 50 år er nesten dobbelt så høy som over de siste 100 år. De siste 50 årene har det blitt observert forandringer i ekstreme temperaturer. Varme dager og netter, samt varmebølger er mer vanlig.
- Etter 1970-årene er det observert lengre og mer intense tørkeperioder, dette gjelder spesielt i subtropene og tropene.
- De siste 100 årene har gjennomsnittstemperaturen i Arktis steget nesten dobbelt så fort som den globale gjennomsnittstemperaturen. Siden 1980-årene har temperaturen i det øverste permafrostlaget i Arktis generelt økt, og den gjennomsnittlige sjøisutbredelsen har siden 1978 blitt redusert med 2,7 % per tiår.
- Globalt sett har gjennomsnittstemperaturen i havet ned til 3000 meters dybde økt, ut fra observasjoner siden 1961. 80 % av varmen som er tilført energisystemet er absorbert av havet, som fører til utvidelse og havstigning.

- Fra 1961 til 2003 steg havnivået med gjennomsnittlig 1,8 mm per år. Det er *meget sannsynlig* at isdekkene på Grønland og i Antarktis har bidratt til stigningen av havnivået mellom 1993 og 2003. Hastigheten i observert havstigning økte med *høy grad av sikkerhet* fra det 19. til det 20. århundret.
- Gjennomsnittlig har isbreer minket på begge halvkuler. Reduksjon av breer og iskapper har gitt en stigning av havnivået.
- Mengde vanddamp i atmosfæren har i gjennomsnittet økt. Dette gjelder i hvert fall siden 1980-årene over land og hav, samt i den øvre troposfære.
- Det er observert langtidstrender for nedbørsmengde i perioden 1900-2005, med en betydelig økning av nedbør i noen regioner, og tørke i andre.
- Antall intense nedbørshendelser har økt over de fleste landområder.
- Siden 1960-årene har vestlige vinder på midlere breddegrader på begge halvkuler økt i styrke.
- Endringer i fordamping og nedbør over verdenshavene kan være årsaken til lavere saltholdighet i vann på midlere og høyere breddegrader og høyere saltholdighet i vann på lavere breddegrader

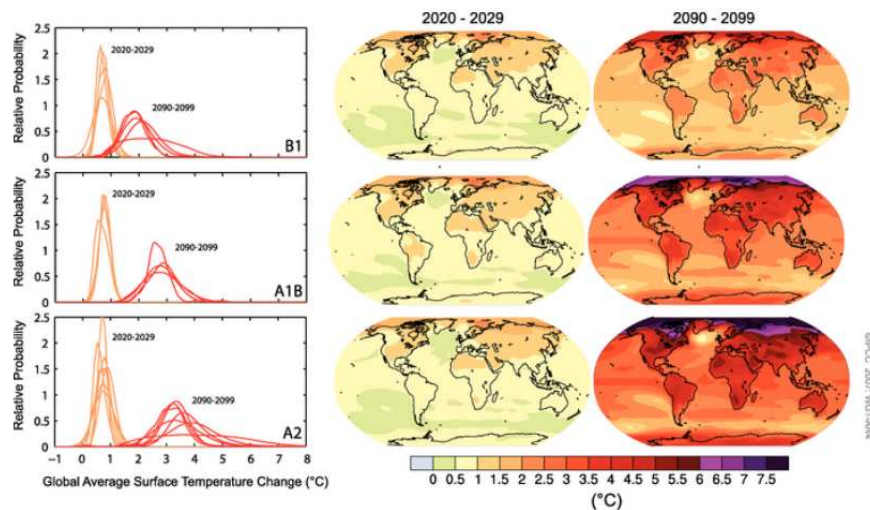


Figur 6: Observerte endringer for global temperatur, havnivå og snødekke på den nordlige halvkule. Endringene er vist i forhold til gjennomsnittsverdier i perioden 1961-1990. (IPCC 2007)

3.2.5 Framskrivninger av globalt klima

Ved hjelp av resultater fra et spekter av modellsimuleringer med ulike utslippsscenarioer og observerte verdier er det dannet et kvantitativt grunnlag for framskrivninger av det globale klimaet. Noen av de viktigste globale framskrivningene fra IPCCs (2007) fjerde hovedrapport er oppsummert under:

- Temperaturen forventes å øke. *Beste anslag* av temperaturøkningen i 2090-2099 i forhold til fra 1980-1999 viser på det minste 1,8 °C (B1 scenarioet) og 4,0 °C på det høyeste (A1F1 scenarioet). De fleste landområder på høye nordlige breddegrader forventes å få den største oppvarmingen, mens den minste forventes over Sørishavet og deler av Nord-Atlanteren. Figur 7 viser framskrevet temperaturendring for noen ulike scenarioer.
- Det er *meget sannsynlig* at nedbørsmengden øker på høye breddegrader, og det er *sannsynlig* at nedbørsmengden reduseres i de fleste subtropiske landområdene.
- Varmebølger, ekstremvarme og kraftig nedbør vil *meget sannsynlig* opptre oftere.
- Det er *sannsynlig* at fremtidige tropiske sykloner vil ha større maksimale vindhastigheter og kraftigere nedbør.
- Havstigningen forventes å bli 0,18-0,38 meter for B1 scenarioet, og 0,26-0,59 meter for A1F1 scenarioet i 2090-2099 i forhold til fra 1980-1999.
- Det forventes at snødekket minker, og de fleste permafrostområdenes tiningsdybder øker.
- Sjøisen i Antarktis og Arktis minker for alle utslippsscenarioene.
- Havet blir surere som følge av økt CO₂-utslipp, med en PH-reduksjon på 0,14- 0,35 gjennom det 21. århundret.
- Det sees en tendens til redusert opptak av atmosfærisk CO₂ i havet og på land ved en global oppvarming, og dette vil øke mengden menneskeskapte utslipp som blir værende i atmosfæren.
- Da CO₂ fjernes langsomt fra atmosfæren forventes det at tidligere og fremtidige utslipp fører til fortsatt havstigning og oppvarming i over tusen år frem i tid.

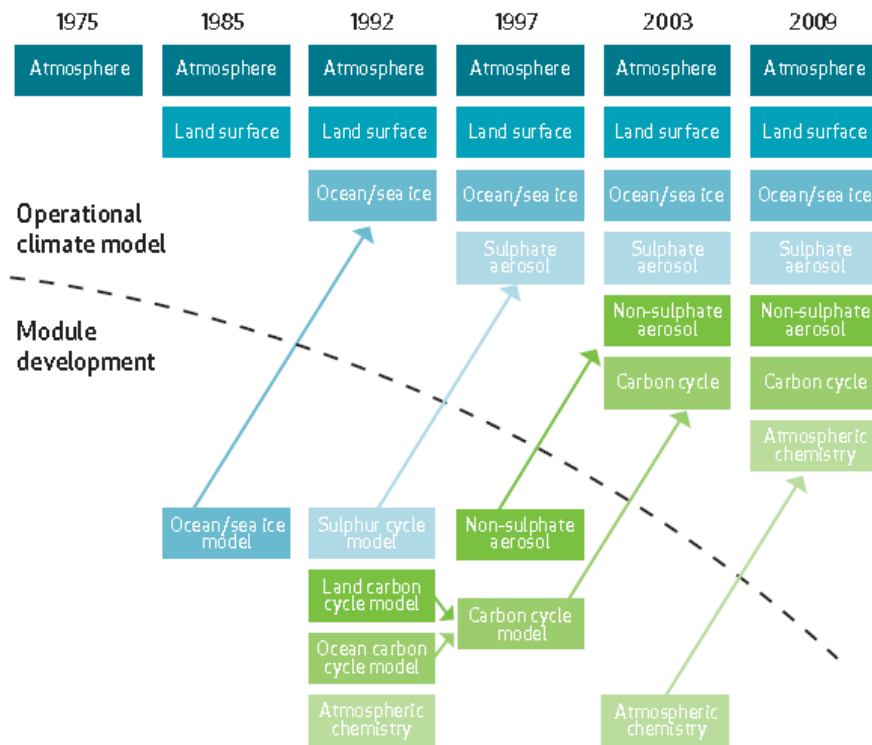


Figur 7: Framskrivninger av temperaturendringer for 2020-2029 og 2090-2099 i forhold til 1980-1999 for ulike utslippsscenarioer. Grafene til venstre presenterer usikkerhet, og differansen i antall kurver skyldes forskjell i antall foreliggende resultater. (IPCC 2007)

3.3 Klimamodeller

3.3.1 Globale klimamodeller

Klimamodeller bygger på fysiske prinsipper, og benyttes til å simulere både fortidens, nåtidens og fremtidens klima. (Randall et al. 2007) Naturlover uttrykkes som matematiske ligninger som løses av datamaskiner, og ligningene beskriver for eksempel vind, havstrømmer, nedbør, temperatur, solens oppvarming av jorda og drivhusgasser i atmosfæren. Klimamodellen må videre ta hensyn til blant annet topografi, vegetasjon, reflektering av sollys og utvikling av drivhusgasser. Ved å endre ulike inputdata kan ulike scenarioer undersøkes. Klimamodellene er under stadig utvikling, og er forbedret spesielt de siste tiårene. Figur 8 viser klimamodellenes utvikling fra 1975 til 2009, fra de enkleste atmosfæremodellene til kompliserte modeller som beskriver flere sider av klimasystemet. Siste generasjons modeller er en såkalt jordsystemmodell som tar hensyn til en interaktiv karbonsyklus som kan forbedre vurderingen av utslipp og klimaets utvikling. (Bjerknessenteret 2009e)



Figur 8: Klimamodellenes utvikling fra enkle atmosfæremodeller til en implementering av flere modeller som tar hensyn til ulike prosesser i klimasystemet. (Bjerknessenteret 2009e)

Ulike klimamodeller er forskjellige avhengig av blant annet tidsmessig og romlig løsning. De ulike klimamodellene som er benyttet gjennom klimaforskningen kan deles inn i tre hovedkategorier; enkle klimamodeller, *Earth System Models of Intermediate Complexity* (EMIC) og *General Circulation Models* (GCM). (Davies & Simonovic 2005) En modell eller et modellensemble kan ikke uten videre defineres som bedre enn en annen, da dette kommer an på formål og kompleksitet av den enkelte analyse. (Randall et al. 2007)

De enkleste klimamodellene har lav tidsmessige og romlig oppløsning. Enkle klimamodeller er raske i beregninger og enkle å forstå, men utelater hydrologiske variabler som for eksempel nedbør. (Davies & Simonovic 2005) Enkle modeller kan beregne blant annet atmosfæriske drivhusgasser, strålingspådriv, og påvirkningen på den globale middeltemperaturen. De enkle modellene er ofte effektive ved undersøkelse av klimaets respons av ulike utslipp av drivhusgasser for forskjellige scenarier. (Randall et al. 2007)

General Circulation Models eller *Global Climate Models* (GCM) er en komplisert modell av tredimensjonal karakter som beskriver bevegelse av energi, moment og diverse sporstoffer, og omfatter den globale atmosfæren og verdenshavene. I løpet av klimaforskningen har prosesser i atmosfæren og havet blitt beskrevet hver for seg ved benyttelse av *Atmospheric GCM* og *Ocean GCM*. Gjennom de siste tiårene har en kobling mellom *Global Climate Models* vært i fokus. En slik sammenkobling som inkluderer blant annet prosesser for masse, varme, og strømninger gir en bedre beskrivelse av atmosfærens og havets sammensatte

påvirkninger på klimaet. (Davies & Simonovic 2005) Den mest omfattende modellen er *Atmosphere Ocean General Circulation Models (AOGCM)* som inkluderer flere og flere prosesser, og gir den mest realistiske tolkningen av klimasystemet. Denne modellens største ulempe er store beregninger, og bare et begrenset antall analyser utføres med AOGCM. (Randall et al. 2007)

Et stort spekter av *Earth System Models of Intermediate Complexity (EMIC)* er utviklet for å håndtere gapet mellom de mest avanserte klimamodellene og de enkleste klimamodellene. Noen EMIC benyttes til å simulere så mange komponenter i klimasystemet som mulig, mens andre har færre samhandlende komponenter som benyttes til langsiktige simuleringer for å undersøke bestemte sider ved klimaet. De mest kompliserte versjonene av EMIC trenger ikke være så ulike AOGCM, da begge modellene kan beskrive store geografiske områder av jorda, som for eksempel kontinenter og havområder, som ikke beskrives av de enkleste modellene. EMIC er et nyttig verktøy for å forstå de store prosessene i klimasystemet, og kan benyttes som grunnlag for mer detaljerte analyser med AOGCM. (Randall et al. 2007)

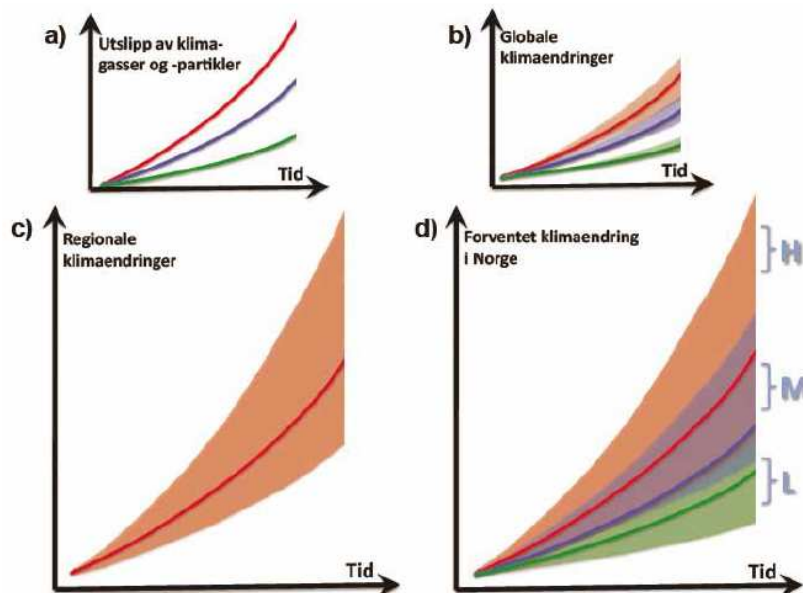
3.3.2 Nedskalering av klimamodeller

Verdier for klimaendringene regionalt og lokalt kan være forskjellig fra oppgitte gjennomsnittsverdier for de globale klimaendringene. De koblede globale klimamodellene har som oftest en grov oppløsning, som gjør det nødvendig å nedskalere resultatene. Nedskaleringen gir en bedre romlig oppløsning og et mer detaljert nivå for regionale og lokale forhold. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

For regionale framskrivninger benyttes såkalte dynamiske- og statistiske metoder for nedskalering av resultater fra de globale klimamodellene. I den dynamiske nedskaleringen benyttes de samme ligningene som blir brukt i de globale klimamodellene, men det regionale områdets ytre grenser setter grensebetingelsene fra de globale modellene. (Hanssen-Bauer et al. 2009) *Regional Circulation Model (RCM)* er en regional modell som er dynamisk nedskalert fra globale klimamodeller. (Davies & Simonovic 2005) Den statistiske metoden går ut på å lage statistiske sammenhenger mellom registrerte klimaparametere i det globale klimaet og lokale forhold, og resultater fra de globale klimamodellene kan da benyttes til å beregne regionalt og lokalt klima. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Ved framskrivninger for Norges klima er begge nedskaleringsmetodene benyttet. Resultater fra hver metode er satt sammen i hver sin gruppe. Sammenstilling av modeller i ensembler gir en bedre mulighet til å vurdere usikkerheten ved å se på spredningen i resultatene, og beregnede middelveier for dagens klima i ensemblene har vist seg å ligge nærmere observert klima enn resultater fra en enkelt modell. For nedskaleringer av Norges havområder har det blitt benyttet kun dynamisk nedskalering. Atmosfæren har blitt nedskalert med både den dynamiske og statistiske metoden, hvor det også er tatt utgangspunkt i ulike globale modeller og utslippsscenarioer. Figur 9 viser prosessen for å

simulere Norges forventede klimaendringer, med utgangspunkt i utslippsscenarioer og globale klimamodeller. Skraveringen rundt linjen for middelværdi i grafene illustrerer en viss spredning i modellresultatene for de ulike utslippsscenarioene, og som oftest øker usikkerhetsintervallet når et mindre geografisk område betraktes, som sees tydelig for den regionale- (c) og lokale modellen (d). Dette kommer av at naturlige variasjoner gir større utslag i mindre geografiske områder, og at spredningen mellom resultatene blir større. (Hanssen-Bauer et al. 2009)



Figur 9: Veien fra ulike utslippsscenarioer til beregninger av fremtidige klimaendringer i Norge (Hanssen-Bauer et al. 2009)

3.3.3 Delta Change Metode

I urbanhydrologiske problemstillinger er det ønskelig med en lavere romlig og tidsmessig oppløsning enn nedskaleringen som er utført på klimamodeller kan gi. (Holvik 2010) Nedskaleringer er ofte beregnet for månedlige- eller sesongvise variasjoner, og i urbanhydrologien kan det, avhengig av formål, være nødvendig med en oppløsning på under en time. (König 2011) Slike faktormetoder som er blitt benyttet til å tilpasse og justere resultater fra klimamodeller er kalt Delta Change Metode. (DCM). Ved denne metoden tas det utgangspunkt i forskjellen som er beregnet for dagens og fremtidig klima med klimamodeller. Forskjellen mellom disse er Delta Change Faktor (DCF) som tillegges observerte regndata. For nedbør vil dette uttrykkes i en prosentvis økning eller reduksjon i gjennomsnittlig nedbør, som kan skaleres opp eller ned for de historiske regnhendelsene man benytter til urbanhydrologisk modellering. (Holvik 2010)

Holvik (2010) beregnet DCF for Sandnes i sin masteroppgave. Metoden som ble benyttet for å bestemme DCF for en gitt sesong og scenario er vist under:

$$DCF = \frac{\textit{Scenarioe volume}}{\textit{Control volume}}$$

Formel 1: Metode for å beregne DCF. (Holvik 2010)

Det ble tatt utgangspunkt i nedbørsframskrivninger i perioden 2071-2100 for scenarioene A2 og B2, og kontrollperioden 1961-1990. Holvik beregnet årlig og sesongvis DCF som ble benyttet for en konstruert tidsserie med 30 års varighet og høy tidsoppløsning, og fant av dette en gjennomsnittlig prosentvis årlig og sesongvis endring i framtidig nedbør. (Holvik 2010)

3.4 Klimaet i Norge

Norges klima er preget av store variasjoner geografisk, da landet strekker seg over mer enn 13 breddegrader. Mens områder langs kysten kan ha noen dager i året med snødekke, finner man snødekke på høyfjellet 300 dager i året. Årsmiddeltemperaturen er 6 °C på Vestlandskysten og mindre enn – 4 °C i høyfjellet. Klimaet er varmere i Norge enn flere andre områder beliggende på samme breddegrad. Dette er på grunn av det atmosfæriske sirkulasjonsmønsteret og havstrømninger i Golfstrømmen, og uten dette ville temperaturen i Norge ha vært 10-15 °C lavere. (Bjerknessenteret 2009c; Hanssen-Bauer et al. 2009) Den gjennomsnittlige årsnedbøren i Norge er 1485 mm, som varierer fra under 300 mm til over 5000 mm over landet. Av den gjennomsnittlige årsnedbøren i Norge er anslagsvis 1140 mm avrenning, mens 346 mm fordamper. De mest nedbørrike områdene finnes på Vestlandet, mens Sørlandet, Fosenhalvøya og Oslofjorden har høyest årlig fordampning. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

3.4.1 Observerte klimaendringer

Temperatur, nedbør og sjøis i Norge har variert i mindre perioder og fra år til år, og slike ujevnheter kommer for det meste av naturlig variasjoner. Basert på måleserier fra de siste 100–150 år kan en likevel se trendene for langtidsutviklingen av klimaet, og under følger en oppsummering av noen hovedpunkter for observerte endringer (Hanssen-Bauer et al. 2009):

- Periodevis er det observert både stigende og fallende temperaturer, men etter 1965 har temperaturen steget med omtrent 0,4 °C per tiår. De siste 100 årene har årsmiddeltemperaturen økt med omtrent 0,8 °C, hvorav den største økningen sees om våren.
- Vannføringen om vinteren har økt, og vårens snøsmelting begynner tidligere.
- Vekstsesongen har blitt lengre, og snøsesongen kortere i de fleste områder.
- De siste 30 årene har årsminimum av sjøisens utbredelse i Arktis avtatt, med 30 % for september måned, og 10-12 % om vinteren.
- Siden år 1900 er det sett at årsnedbøren har økt med opp mot 20 %, hvor høyest økning sees på Vestlandet. Nedbørsøkningen er minst i sommersesongen og størst i vintersesongen.

- Hundreårs tidsserier av temperaturen fra vannet fra Atlanterhavet som strømmer langs norskekysten og inn i Barentshavet, viser en tendens til oppvarming, men det er store variasjoner for ulike tidsskalaer.
- De siste 100 år har vannstanden i havet utenfor den norske kysten økt med omtrent 14 cm. Men på grunn av landhevingen over store deler kysten har havnivået sunket forhold til landjorda.

3.4.2 Framskrivninger av klimaet i Norge

Framskrivninger for Norges klima som er presentert i «Klima i Norge 2100» av Hanssen-Bauer et. al (2009) er resultater fra 22 klimaframskrivninger med dynamiske metoder og 55 framskrivninger med statistiske metoder. Det er benyttet en regional klimamodell kalt HIRHAM og en global atmosfæremodell med variabel oppløsning og med høyest oppløsning i det samme området som i HIRHAM-modellen. Regionale beregninger fra europeiske institutter har også blitt benyttet i denne sammenstillingen av resultater. Årlige og sesongvise framskrivninger fra modellensemblene er beregnet for regionene vist i figur 10. Disse regionene har hatt måtelig lik langtidsutvikling av temperatur- og nedbørsforhold. (Hanssen-Bauer et al. 2009)



Figur 10: Inndeling av de seks temperaturregionene til venstre, og 13 nedbørsregionene til høyre.(Hanssen-Bauer et al. 2009)

Hovedpunktene i framskrivningene i Norge fra Hanssen-Bauer et. al (2009) er oppsummert under:

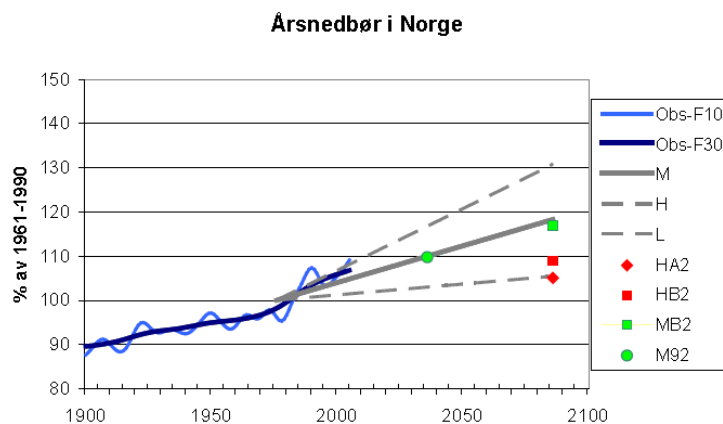
- Temperaturen øker for alle årstider i alle landsdeler. Innen år 2100 beregnes Norges årsmiddeltemperatur å øke med 2,3 til 4,6 °C. Den største oppvarmingen sees i

nordlige regioner, spesielt for vintersesongen. Den minste oppvarmingen sees om sommeren for alle regionene.

- Havets overflatetemperatur vil øke. I Nordsjøen kan temperaturen kunne øke med 1,4 °C over de neste 100 år, og i løpet av 65 år kan økningen bli 0,5 og 1,0–1,5 °C for henholdsvis Vestkysten og Barentshavet.
- Langs Norges kystlinje forventes havnivået å stige med 40-70 cm for ulike geografiske områder.
- Havet blir surere, og det forventes en nedgang i PH-verdi på 0,5 mot år 2100.
- Norges snøsesong blir kortere, og vekstsesongen blir lengre. Mot år 2100 kan reduksjonen av snøsesongen og økning av vekstsesongen bli 2-3 måneder i noen områder.
- Alle regioner og alle årstider vil ha en økning av nedbør, men lokale områder kan tidvis oppleve redusert nedbør. Årsnedbøren i Norge er anslått til å øke med 5-30 % mot år 2100.
- Antall dager med mye nedbør øker, og det sees at alle årstider og regioner opplever en økning av den gjennomsnittlige nedbørsmengden for disse dagene.
- Avrenningen forventes å øke om høsten og vinteren, og reduseres om sommeren. Sett under ett anslås det en økning i årsavrenningen.
- Regnflommer forventes å øke, med forskyvning av flomtidspunkter grunnet temperaturendringer.

Middelnedbør

Framskrivninger viser trender for gjennomsnittlig mer nedbør i hele Norge i fremtiden, høyst sannsynlig for vår, høst og vinter. Resultater for sommerperioden viser en trend for redusert nedbør på Sør- og Østlandet, samt noen resultater viser en redusering for Vest- og Sør-Vestlandet. For Nord-Norge vil derimot nedbøren øke også i sommersesongen. Lokale variasjoner kan være en konsekvens av tilfeldige endringene i den atmosfæriske sirkulasjonen.



Figur 11: Årsnedbør i Norge: observerte verdier fra år 1900 og beregnet høy, lav og middels framskrivning mot år 2100. Punktene er eksempelframskrivninger benyttet i hydrologisk modellering, (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Figur 11 viser observerte verdier for årsnedbøren fra år 1900 (blå linjer) og trender for *middels*³, *høy* og *lav* framskrivning (grå linjer) frem mot år 2100 for middelnedbøren i Norge. Grafenes verdier er oppgitt som prosent av den observerte middelnedbøren i perioden 1961-1990. Tabell 1 viser framskrivninger av endring i årsnedbør og årstidsnedbør for Norge og regionen NR-10 Helgeland/Trøndelag som Trondheim ligger innenfor. (Hanssen-Bauer et al. 2009) Nedbørssummen stiger for begge periodene på landsbasis dersom en ser på middelverdiene. Ved lav framskrivning vil derimot nedbørssummen reduseres i sommersesongen. I henhold til tabellen er middelverdiene fra framskrivningene for Trondheim større enn gjennomsnittet over landet, foruten i vintersesongen. Økningen i sommersesongen er større enn gjennomsnittet for hele Norge, med en endring i nedbørssum på 21,1 % for perioden 2071-2100.

Tabell 1: Relativ forandring (%) i års- og årstidsnedbør fra perioden 1961–90 til perioden 2021–50 og 2071–2100 ifølge middels, høy og lav framskrivning. Tabellen viser verdier for Norge og region Trøndelag/Helgeland. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Region	Sesong	1961–90 til 2021–50:			1961–90 til 2071–00:		
		Endring (%) i nedbørsum			Endring (%) i nedbørsum		
		M	L	H	M	L	H
Norge	År	9,6	2,4	14,0	18,3	5,4	30,9
	Vinter DJF	11,1	3,8	18,4	21,4	8,5	39,9
	Vår MAM	10,0	3,7	20,0	19,4	7,2	41,5
	Sommer JJA	5,0	-1,6	9,7	9,2	-3,2	17,4
	Høst SON	12,2	2,1	16,1	23,3	4,6	33,4
NR-10 Trøndelag/ Helgeland	År	12,3	0,6	28,3	22,5	1,1	51,8
	Vinter DJF	10,1	-6,3	19,9	18,6	-11,6	36,5
	Vår MAM	12,3	3,1	31,3	22,6	5,7	57,4
	Sommer JJA	11,5	4,4	19,7	21,1	8,0	36,1
	Høst SON	15,4	0,5	33,2	28,3	0,9	60,8

Dager med mye nedbør

Tabell 2 viser framskrivninger for prosentvise endringer i antall *dager med mye nedbør*⁴, og endringen av *nedbørsmengde på dager med mye nedbør* for Norge og noen utvalgte nedbørsregioner fra perioden 1961–90 til perioden 2071–2100. Både antall dager med mye nedbør og nedbørsmengden på disse dagene stiger for gjennomsnittet for Norge i alle sesonger og for alle framskrivningene. For region Helgeland/Trøndelag er det en årlig middelframskrivning på 68,6 % i antall dager med mye nedbør, og 13,9 % endring av nedbøren på disse dagene. Den største endringen sees for sommer og høst, og minst på

³ *Middels* defineres som middelverdien av alle benyttede klimaframskrivninger, *lav* er verdier som underskrives av 10 % av framskrivningene (10-prosentil), og *høy* er verdiene som overskrives av 10 % av framskrivningene (90-prosentil). (Hanssen-Bauer et al. 2009)

⁴ *Dager med mye nedbør* er definert som dager i normalperioden (1961–90) hvor nedbørsmengder ble overskredet i 0,5 % av dagene. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

våren. Middelerverdiene er mindre enn for verdiene for hele landet, foruten i sommersesongen.

Tabell 2: Relativ endring (%) av dager med mye nedbør og endring av nedbørmengde på dager med mye nedbør fra perioden 1961–90 til perioden 2071–2100 for middels, høy og lav framskrivning. Tabellen viser resultater for Norge og to utvalgte regioner. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Region	Sesong	1961–90 til 2071–2100: Endring (%) i antall dager med mye nedbør			1961–90 til 2071–2100: Endring (%) i nedbørmengde på dager med mye nedbør		
		M	L	H	M	L	H
Norge	År	75,7	40,6	139,9	15,6	7,2	23,1
	Vinter DJF	126,5	80,0	250,9	16,5	1,9	32,3
	Vår MAM	88,3	41,6	193,1	15,5	5,9	29,1
	Sommer JJA	71,4	30,0	86,9	16,5	6,4	21,5
	Høst SON	110,3	55,9	192,5	17,5	9,7	26,4
NR-2 Østlandet	År	65,4	34,8	94,8	14,4	8,0	19,0
	Vinter DJF	188,0	118,3	335,5	22,8	17,5	34,6
	Vår MAM	91,6	26,3	199,9	17,4	6,0	32,4
	Sommer JJA	44,9	6,1	81,0	10,8	0,2	20,4
NR-10 Trøndelag/ Helgeland	År	68,6	9,1	183,7	13,9	1,0	32,8
	Vinter DJF	86,5	-43,2	172,9	13,2	-13,6	33,5
	Vår MAM	65,1	7,5	184,6	11,1	1,3	33,0
	Sommer JJA	90,1	17,0	158,1	19,4	3,6	36,6
	Høst SON	92,7	5,7	310,1	13,9	1,1	38,8

Havstigning

Oppvarming av havet er ikke jevnt fordelt og strømminger i havet kan endres på grunn av temperaturøkninger, og derfor kan havnivået for Norges kyst stige mer enn det forventede globale gjennomsnittet. Samtidig vil landjorda heve seg flere steder, og det forventes en heving på 5-50 cm langs Norskekysten mot år 2100. (Bjerknessenteret 2009a) Stormflo er en økning i havets vannstand som kan komme i tillegg til vannstanden ved flo på grunn av oppstuvning av vind og lavt lufttrykk. (RegClim 2005) Figur 12 viser midlere forventet havstigning frem mot århundreskiftet for noen byer i Norge ved beregninger utført med A2 scenarioet, hvor resultatene er korrigert for landhevingen. Gitt usikkerhetene for resultatene vil vannstanden kunne øke ytterligere 30 cm i tillegg til verdiene vist i figuren. (Bjerknessenteret 2009a)



Figur 12: En beregnet økning i havnivået (cm) i år 2100 fra referanseåret 2000 for A2 scenarioet. (Drange et al. 2007)

3.5 Usikkerheter ved klimaframskrivninger

Usikkerhetene som er tilknyttet klimaframskrivningene kan deles inn i fire hovedkategorier (Hanssen-Bauer et al. 2009):

- *Naturlig klimavariasjon*
- *Naturlig klimapådriv*
- *Menneskeskapt klimapådriv*
- *Ufullstendig kunnskap*

Selv om kunnskapen om mye av grunnlaget til klimasystemet foreligger, er det vanskelig å beskrive kommende klimaendringer på grunn av klimasystemets kompleksitet, og naturlige variasjoner i klimasystemet vil alltid være tilstede. Den naturlige klimavariasjonen kan vare i hundre år og mer i noen tilfeller. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Naturlige klimapådriv kan komme av for eksempel endring i solinnstråling og vulkanutbrudd som ikke kan kontrolleres. De faktiske menneskelige utslippene for fremtiden kan man heller ikke være sikker på, og det er heller ikke gjort sannsynlighetvurdering av de forskjellige utslippsscenarioene. Det kan være vanskelig å knytte enkelte hendelser i klimaet til menneskeskapt aktivitet. Forskjeller i resultater får man likevel belyst ved å benytte flere av utslippsscenarioene i framskrivninger. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Det finnes usikkerheter rundt de fysiske komponentene i klimasystemet, og forståelsen for hvilken effekt de gir på hverandre. Ikke alle prosesser er medtatt i klimamodelleringen, noe på grunn av ufullstendig kunnskap. (Hanssen-Bauer et al. 2009)

Modellusikkerheten kan være en begrensning, da en modell aldri kan beskrive det virkelige klimaet perfekt. Det er for eksempel knyttet stor usikkerhet til resultater fra de lokale klimamodeller som er benyttet med grunnlag i de globale klimamodellene.

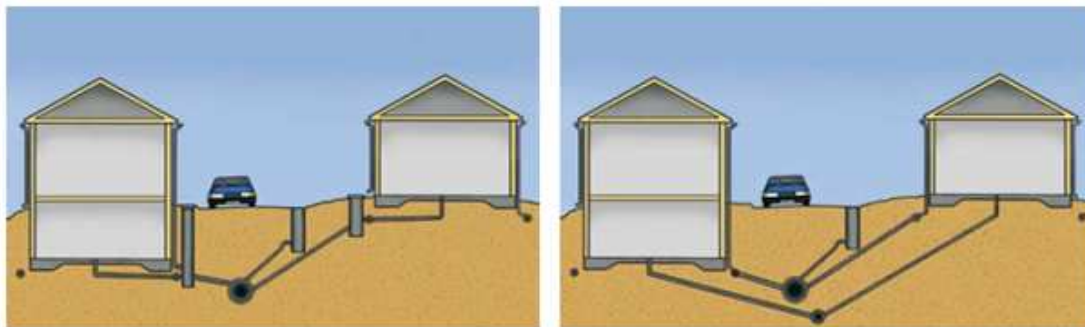
Maskinregnekapasiteten kan gi for grove beregninger fra globale til for lokale forhold. (Hanssen-Bauer et al. 2009) Benyttelse av flere modellensembler kan belyse forskjeller i resultater, men kan på den andre siden overdrive de tilfeldige variasjonene. (RegClim 2005)

4 Det urbane avløpssystemet

Avløpssystemet er nødvendig for å samle, transportere og behandle spillvann og overvann i urbane områder. Avløpssystemet består av mange fysiske komponenter som rør, sluk, kummer, magasiner og naturlige vannveier. Spillvannet består hovedsakelig av avfallsstoffer fra mennesker og industri, mens overvannet kommer fra nedbør, avrenning fra markoverflaten og infiltrasjonsvann. (Bøyum & Thorolfsson 2001) Overvannssystemet er viktig i urbane områder, da tette overflater kan bidra til større avrenning og endre naturlige avrenningsmønstre. Ledningsnett utføres som selvfallsledninger, dykkerledninger, eller med pumpestasjoner og pumpeledninger dersom topografien ikke tillater selvfall. Pumpestasjoner anrettes med nødoverløp som kan føre avløpsvannet videre dersom det opptrer pumpestopp. Avløpsvannet føres til renseanlegg som renser avløpsvannet avhengig av avløpsvannets sammensetning og renskrav før utslipp i resipienten. (Bøyum & Thorolfsson 2001)

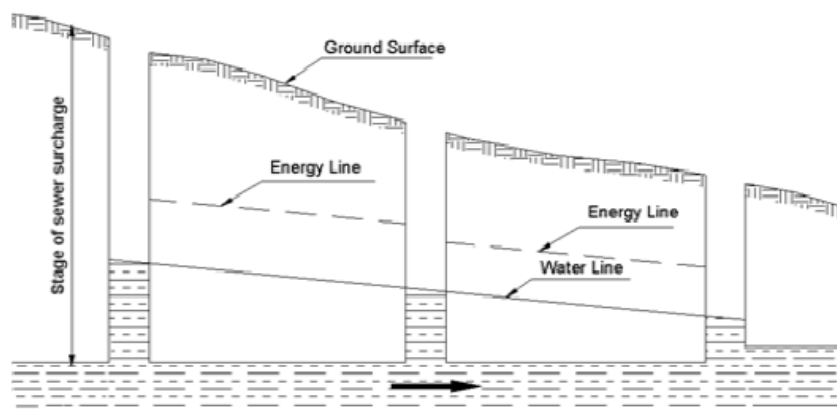
Det finnes to hovedsystemer for transport av avløpsvannet. Det ene systemet er fellessystemet, hvor overvann og spillvann ledes i en felles ledning. Det andre systemet er separatsystemet, hvor spillvannet og overvannet ikke ledes sammen i samme ledning. Innen separatsystemet finnes to systemer hvor overvannet enten føres i et lukket system (2-rørs system) eller ledes bort på markoverflaten til resipient eller infiltrasjonsanlegg (1-rørs system). Fellessystemet anrettes ofte med overløp, som avlaster systemet ved store regnhendelser. Overløpet trer i kraft etter en fastsatt grense, og går i overløpsledning til nærmeste resipient. (Bøyum & Thorolfsson 2001)

Figur 13 viser prinsippet for separatsystemet og fellessystemet.



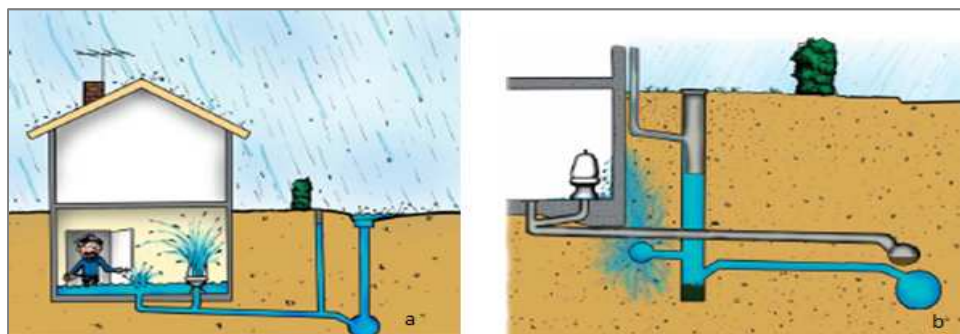
Figur 13: Illustrasjon av fellessystemet til venstre og separatsystemet til høyre. (Svensk vatten 2007)

Ved underkapasitet i ledningsnett oppstår såkalt oppstuvning. Dette er en tilstand hvor avløpsvannet er under trykk i selvfallsystemet. Figur 14 viser prinsippet av oppstuvning med vannivået i ledningsnett og energilinjen. Avløpsvannet kan forårsake oversvømmelse i kjellere, eller på markoverflaten dersom oppstuvningen blir stor nok.



Figur 14: Prinsippskisse av oppstuvning i ledningsnett. (Nie 2004)

Kjelleroversvømmelse i en bygning oppstår ved oppstuvning i ledningsnett når vannet trenger inn gjennom sluker eller andre installasjoner i kjelleren, eller ved inntrenging gjennom vegger og gulv via dreneringsledninger. (Fredrikstad kommune 2007) Skadeomfanget for en oppstuvning i et separatsystem kan gi skader grunnet utette støpeskjøter i kjelleren. I områder hvor separatsystemet er tilknyttet fellessystemet, kan dette føre til et ikke-virkende separatsystem som har innvirkning på skadetyper. (Lindholm et al. 2008) Figur 15 viser hvordan oversvømmelser kan oppstå i fellessystemet og separatsystemet.



Figur 15: Illustrasjon av kjelleroversvømmelser for a: fellessystem og b: separatsystem. (Fredrikstad kommune 2007)

Det stilles i dag standard høydekrav fra sluk i bygning til tilknytning i kommunens ledning, som en beskyttelse mot inntrengning av avløpsvann i bygningen. Sanitærreglementet i Trondheim kommune (Trondheim kommune 2002) har følgende definisjon av høydekravet:

«Det kreves høydeforskjell på minimum 900 mm mellom vannstand i laveste monterte vannlås i bygning og innvendig topp kommunalt rør målt i privat lednings tilkoplingspunkt på hovedledning.»

Opp gjennom tidene har det blitt benyttet andre retningslinjer med andre høydekrav. Lavere høydekrav ble tidligere benyttet med grunnlag i lærebøker og utgitte veiledninger, men

dagens høydekrav gjelder med tilbakevirkende kraft. (Lindholm et al. 2008) Tabell 3 viser ulike høydekrav som har blitt benyttet som normer for ulike årstall. Ut fra dette er det rimelig å tro at tidspunktet for boligbyggingen vil ha innvirkning på hvor lett en kjelleroversvømmelse vil opptre.

Tabell 3: Forskjellige høydekrav opp gjennom årene.(Lindholm et al. 2008)

Årstall	Høydekrav [cm]
1909 - 1946	30
1946 - 1972	120*
1972 - 1980	50
1980 -	90

*50 dersom sluket kunne stenges med ventil.

4.1 Overvannsberegninger

4.1.1 Manuell beregning

De mest benyttede manuelle beregningsmetodene for overflateavrenning er tid-arealmetoden, summasjonskurvemetoden og enhetshydrogrammetoden. Metodene benyttes med utgangspunkt i den rasjonelle formel. (Bøyum & Thorolfsson 2001) Den rasjonelle formel er vanlig å benytte til beregninger av avrenning. (Oslo kommune 2011) Formelen er vist under:

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

Formel 2: Den rasjonelle formel (Oslo kommune 2011)

Hvor:

Q = avrenning

φ = avrenningskoeffisient

A = nedbørsfeltets areal

I = regnintensitet

Ved benyttelse av den rasjonelle formel velges regnskyllens varighet lik nedbørsfeltets konsentrasjonstid. Denne metoden gir den største vannføringen og kalles Imhoffs sats. Konsentrasjonstiden består av den største tilrenningstiden på overflaten i feltet og strømningstiden i ledningene. Resultatenes nøyaktighet er imidlertid avhengig av nedbørsfeltets form, hvor for eksempel felter som ikke er rektangulære kan gi større flommer i øvre eller nedre deler av feltet ved valgt regnvarighet. (Bøyum & Thorolfsson 2001) Ved beregninger med den rasjonelle formel er fastsettelse av avrenningskoeffisient viktig. Avrenningskoeffisienten er avhengig av blant annet permeabiliteten og fall i overflatedekket og nedbørens intensitet og varighet. (Lindholm et al. 2008) Det sees mindre

variasjoner i anbefalinger av maksimal avrenningskoeffisient for ulike overflater avhengig av benyttet litteratur.

Tabell 4 viser Trondheim kommunes inndeling av avrenningskoeffisienter for overflater som ikke er frosset. De laveste verdiene i tabellen benyttes ved flate og permeable flater og lavt grunnvannsspeil, mens de høyeste benyttes for brattere og tettere flater, eller hvor grunnvannsspeilet står opp mot overflaten. (Trondheim kommune 2011b) Tabellen må dermed benyttes etter en vurdering av området, og behov for å beregne for eksempel en vintersituasjon.

Tabell 4: Verdier for avrenningskoeffisienten for ulike områder. (Trondheim kommune 2011b)

Overflatetype	Avrenningskoeffisient
Tette flater (tak, asfalterte plasser/veger og lignende)	0,85-0,95
Bykjerne	0,70-0,90
Rekkehus-/leilighetsområder	0,60-0,80
Eneboligområder	0,50-0,70
Grusveier-/plasser	0,60-0,80
Industriområder	0,50-0,90
Plen, park, eng, skog, dyrket mark	0,30-0,50

Norsk Vann (Lindholm et al. 2008) anbefaler å benytte modellverktøy for beregninger for delfelt med større areal enn 20-50 ha. Matematiske modeller er nærmere beskrevet i kapittel 5.

4.1.2 Regndata

IVF-kurve

Målinger av nedbør er utført over en årrekke, og sammenhengen mellom størrelser på regnintensiteten, regnets varighet og gjentaksintervall presenteres i form av historiske data og IVF-kurver. (Bøyum & Thorolfsson 2001) Gjentaksintervallet i IVF-kurven representerer en graf i et logaritmisk koordinatsystem, og viser antall år mellom en regnhendelse med lik eller større intensitet opptrer ut fra historiske målinger. IVF-kurven finnes ved en statistisk behandling av maksimale regnintensiteter for ulike regnvarigheter i nedbørsserier. En regnhendelses gjentakperiode kan i stedet for gjentaksintervall (T) oppgis i frekvens (n) ved formelen: (Winther et al. 2006)

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

Formel 3: Frekvens som funksjon av gjentaksintervall. (Winther et al. 2006)

Kasseregner

Ved benyttelse av et kasseregner til dimensjonering i tid-arealmetoden/den rasjonelle formel velges regnskylllets varighet lik nedbørsfeltets konsentrasjonstid. (Bøyum & Thorolfsson 2001) Kasseregnerets regnintensitet velges fra IVF-kurven for valgt dimensjonerende gjentakintervall og regnvarighet. Ved å benytte kasseregnerets ene regnintensitet mister man et naturlig regns forløp. Regner har vanligvis en høy maksintensitet med for- og etterregner, ikke en konstant regnintensitet gjennom hele varigheten. Det er mulig å benyttes mange kasseregner langs hele IVF-kurven for å finne dimensjonerende regner (Lindholm et al. 2008; Lindholm 2011b), som naturlig nok blir en mer krevende metode.

Modellregner

Ved beregninger i matematiske modeller kan man omdanne IVF-kurven til et modellregner kalt SAFILDA eller symmetrisk regnhyetogram, for å unngå ulempen ved å benytte en eneste regnintensitet. Det symmetriske regnhyetogrammet er mer likt en virkelig regnhendelse enn kasseregneret, og kan brukes til et avløpsnett med flere ulike konsentrasjonstider. Modellregneret vil på denne måten gi avløpsnettet dimensjonerende regner i flere deler av avløpsnettet i en enkelt beregning. Den totale nedbørsmengden i et symmetrisk regnhyetogram er den samme som for en valgt regnvarighet. (Lindholm et al. 2008; Lindholm 2011b) Metoden for konstruksjon av et symmetrisk kasseregner er vist i kapittel 8.1.2.

Tidsserier

Ved avansert modellsimulering kan man også benytte tidsserier av målte nedbørsdata for en lengre periode. Det kan for eksempel benyttes flere års nedbørsdata, og på denne måten kan en se langtidsvirkninger over en lengre simuleringsperiode.

Ved å lage sannsynlighetskurver for oppstuvningsresultatene kan man konstruere frekvensfordelingskurver som gir nyttig informasjon over hvor mange kritisk situasjoner som oppstår gjennom ulike perioder.

Det er også en mulighet å utarbeide lokale modellregner som er basert på tidsseriekjøringer. Bakgrunnen for denne metoden er at man benytter et modellregner som resulterer i at kravene til oversvømmelsesfrekvens blir tilfredsstillt. Modellregneret utarbeides for et delfelt av avløpsnettet, og konstrueres av tidsserier til regnintensiteten ikke gir oppstuvninger innenfor fastsatte akseptable krav. Hele avløpsnettet kan så beregnes med det utarbeidede regneret, og en kan spare tid ved å slippe å kjøre lengre tidsserier for hele det gitte området. (Lindholm et al. 2008)

4.1.3 Dimensjonerende gjentakintervall

Ved valg av optimalt gjentakintervall for dimensjonering av avløpssystemet burde bærekraftige og samfunnsøkonomiske betraktninger være gjeldene gjennom ledningenes levetid. Dette kan imidlertid være komplisert å beregne for hvert enkelt prosjektområde, og i praksis velges oftest verdier fra gjeldende normer. Tabell 5 viser dimensjonerende

gjentaksintervall fra gjeldende Norsk Standard NS-EN 752. Standarden beskriver ikke hvilke ledningssystem tabellen gjelder for, slik at det antas at den gjelder for både separat- og fellessystem. (Lindholm et al. 2008)

Tabell 5: Dimensjonerende gjentaksintervall etter NS-EN 752. (Lindholm et al. 2008)

Dimensjonerende regnskyllhyppighet* (1 i løpet av "n" år)	Plassering	Dimensjonerende oversvømmelseshyppighet** (1 i løpet av "n" år)
1 i løpet av 1	Landbruksområder	1 i løpet av 10
1 i løpet av 2	Boligområder	1 i løpet av 20
1 i løpet av 2 1 i løpet av 5	Bysenter/industriområder/forretningsstrøk -med oversvømmelseskontroll -uten oversvømmelseskontroll	1 i løpet av 30
1 i løpet av 10	Undergrunnsbaner/underganger	1 i løpet av 50

* Ledningsnettets skal bare fylles opp til topp rør ved dimensjonerende regn.

**Oversvømmelsesnivået skal normalt regnes til marknivå eller kjellernivå.

Norsk Vann anbefaler dimensjonerende gjentaksintervall som skiller mellom separat og fellessystem som vist i tabell 6. Retningslinjene regnes som minimumskrav, og anbefalingene er strengere enn dimensjoneringskriteriene fra Norsk standard NS-EN 752. Valg av gjentaksintervall for viktig infrastruktur og sårbare områder må gjøres etter en risiko- og samfunnsøkonomisk vurdering. (Lindholm et al. 2008)I Trondheim kommune benyttes det i henhold til VA-normen (Trondheim kommune 2011b) tilnærmet samme kriterier som Norsk Vanns retningslinjer, men områdetypene er definert noe annerledes hvor det skiller mellom åpne og lukkede områder.

Tabell 6: Norsk vanns veiledende valg av minimums gjentaksintervall. (Lindholm et al. 2008)

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

* Ledningsnettets skal bare fylles opp til topp rør ved dimensjonerende regnskyll.

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

4.1.4 Sesongvariasjoner

Avrenningssituasjonen er forskjellig avhengig av årstidene, som må vurderes for beregning for urbane områder. Norsk vann (Lindholm et al. 2008) angir følgende karakteristikkk for de forskjellige sesongene:

- **Sommer:** Intense regnbyger og avrenning fra de tette flatene. Liten avrenning fra semipermeable og permeable flater.
- **Høst:** Langvarig regn på våt og/eller frossen mark. Avrenning fra alle flater med betydelig avrenning fra permeable flater.
- **Vinter:** Regn på snødekket og frossen mark. Avrenning fra alle flater med betydelig avrenning fra permeable flater.
- **Vår:** Snøsmelting, våt og mett mark. Avrenning fra alle typer flater.

Den dimensjonerende avrenningen finnes ved å velge den mest ugunstige situasjonen. Situasjonen med nedbør fra sommersesongen beregnes for alle beregningssituasjoner. Dersom nedbørsfeltet er større enn 20-50 ha, bør det i tillegg beregnes avrenning fra andre årstider. Ved beregning av vinteravrenning bør regn fra sommerperioden sorteres ut fra IVF-kurven. (Lindholm et al. 2008)

4.2 Konsekvenser av klimaendringer

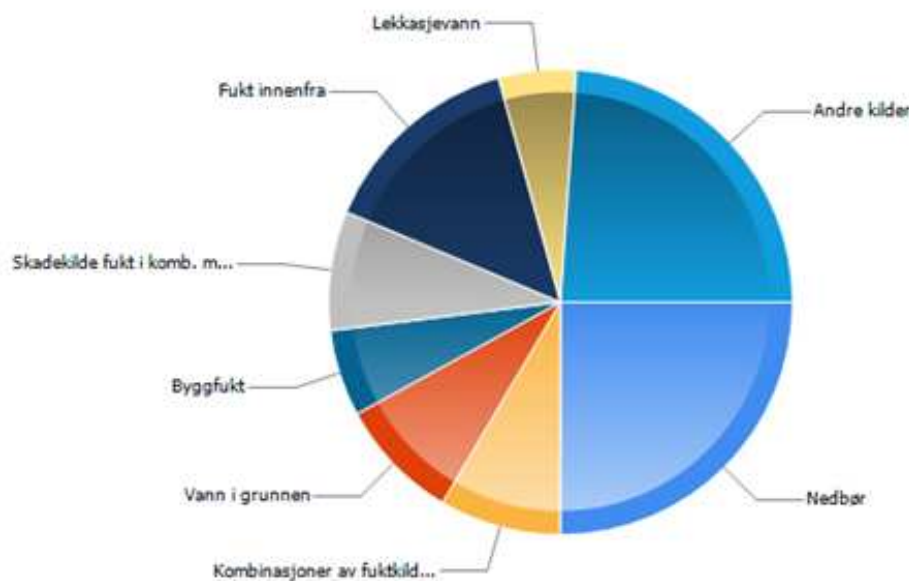
Klimaendringer kan medføre en rekke konsekvenser for det urbane avløpssystemet. Kummer og ledninger kan få problemer med oppfylling av slam og andre uheldige materialer, og erosjon i grunnen kan gi fysiske skader på avløpselementene. Redusert kapasitet i avløpsnett kan også føre til at utslipp fra overløp opptrer oftere, slik at forurensningsgraden i resipienter øker. Større overflateavrenning kan også føre til forhøyede konsentrasjoner av for eksempel næringsstoffer fra jordbruksområder og miljøgifter fra vegarealer og byområder. Større nedbørshendelser kan også føre til at renseanlegg får tekniske problemer, vannskader som setter systemer ut av drift, og økte utgifter i forbindelse med pumping og kjemikaliedosering. Store regnvannsmengder fører også som oftest til at fremmedvannsmengden som ankommer renseanlegget øker på grunn av feilkoblinger og lekkasjer i ledningsnett. (Lindholm et al. 2007; Lindholm et al. 2008) Flomsituasjoner kan også føre til forringet drikkevannskvalitet dersom avløpsvann lekker inn i utette ledninger. (Aaheim et al. 2009)

Økt havnivå og stormflo langs kystområder kan føre til større oppstuvninger i ledningsnett da den hydrauliske gradienten reduseres på grunn av større mottrykk ved stigende havnivå. (Lindholm et al. 2008) Dersom stormflo sammenfaller med springflo er det også større muligheter for at det oppstår skader i lavtliggende bebygde områder langs kysten. (RegClim 2005)

Flomhendelser som oppstår dersom avløpsnettene ikke klarer å ta unna avrenningen, kan i tillegg til kjelleroversvømmelser føre til store flommer på markoverflaten, ødeleggelse av bygninger og annen infrastruktur, samt erosjonsskader. (Lindholm et al. 2008)

Kostnadene som følger av de materielle skadene som overbelastede avløpsnett og oversvømmelsene medfører, følges ofte av indirekte skadestrukturer, som for eksempel ved trafikkforstyrrelser, bemanning på arbeidsplasser, administrative omkostninger og beredskapsplanlegging. Det kan også sees sosiale kostnader som for eksempel at eiendommer i risikoområder for flom blir mindre attraktive og at markedsverdien synker. (DANVA 2011)

SINTEF Byggforsk har siden 1964 utført over 5000 utredninger av prosessforårsakende⁵ byggskader, og kartlagt skadene etter blant annet kilder og bygningsdeler. Sammen med Byggforskserien representerer arkivet en av landets viktigste kilder til kunnskap om skadetyper og årsaker. (SINTEF Byggforsk, a.) De prosessforårsakende skadene oppgitt i skadearkivet representerer kun en liten del av alle skader i Norge. (SINTEF Byggforsk, b.) Figur 16 viser kilder til skadene fra SINTEF Byggforsks skadearkiv, hvor det sees at ulike typer fukt er en stor kilde til skadene. Det urbane avløpssystemet kan ha innvirkning på noen av disse kildene, spesielt med tanke på økt nedbør som følge av klimaendringer.



Figur 16: Illustrasjon som viser andelen av kilder til prosessforårsakede byggskader registrert i SINTEF Byggforsks byggskadearkiv for perioden 1993-2005. Skadekildene i figuren er ikke ensbetydende med skadeårsak, og skadene kan representere deler av hele byggets konstruksjon. (SINTEF Byggforsk, b.)

Vestlandsforskning (Aall et al. 2011) har utarbeidet en rapport om klimaendringenes konsekvenser for kommunal- og fylkeskommunal infrastruktur. I rapporten påpekes VA-systemenes lave fornyelsestakt. Uten nyanlegging vil det ta mer enn 200 år å fornye hele

⁵ Prosessforårsakede byggskader er skader som oppstår under bygging. (Rasmussen & Vennemo 2010)

spillvannsnettet. Dersom fornyelsestakten ikke øker, vil dette føre til et aldrende ledningsnett og økt sårbarhet for klimaendringene. Den naturlige-, samfunnsøkonomiske- og institusjonelle klimasårbarheten⁶ som er funnet for infrastrukturen er vist i tabell 7, hvor vann og avløp er en av de mest sårbare kategoriene innenfor kommunal- og fylkeskommunal infrastruktur. (Aall et al. 2011)

Tabell 7: En vurdering av klimasårbarhet for ulike kategorier av kommunal og fylkeskommunal infrastruktur. (Aall et al. 2011)

Type infrastruktur	Naturlig sårbarhet	Samfunnsøkonomisk sårbarhet	Institusjonell sårbarhet
Jordbruksproduksjon	Usikker nasjonalt, stor globalt	Stor og økende	Liten og økende
Lokalisering av infrastruktur	Stor	Middels og økende	Middels og stabil
Bygg	Middels	Middels og økende	Stor og økende
Vann og avløp	Middels	Stor og økende	Middels og økende
Veger	Middels	Middels og økende	Middels og stabil
Havner	Lav	Lav og svakt økende	Middels og stabil
Offentlig transportarbeid	Middels	Middels og økende	Middels og stabil
IT og strømforsyning	Middels	Middels og økende	Middels og stabil

Direkte tilpasningstiltak for VA-nettet og flomsikring vil gi store kostnader, som vil falle på både private og offentlige aktører. Det etterslepet som sees av vedlikeholdet av VA-nettet knyttes det store kostnader til, men tilfredsstillende vedlikehold vil redusere sårbarheten for klimaendringene. Indirekte skadekostnader, som for eksempel trafikkproblemer og drikkevannskvalitet, er vanskelig å kvantifisere. (NOU 2010)

Vista Analyse (2010) har på oppdrag fra Klimatilpasningsutvalget utført en analyse for samfunnsøkonomiske virkninger av klimaendringene i Norge i dette århundret, med utgangspunkt i framskrivingene fra Hanssen-Bauer (2009) Det er her stipulert med en årlig klimarelatert kostnad for vann- og avløpssystemet på 0,2-0,6 mrd. kr. per år, som gjelder for de kvantifiserbare kostnadene for byggskader. Tabell 8 viser en sammenstilling av virkninger av klimaendringer for bygningsmassen og infrastrukturen. (Rasmussen & Vennemo 2010)

⁶ Vestlandsforskning (2011) skiller benytter tre typer sårbarhet som tar hensyn til ulike faktorer:
Naturlig: klimaparameter (nedbør, temperatur, vind) og effektparameter (avrenning, havnivå og stormflo)
Samfunnsøkonomisk: Omfang og tap av dyrka og dyrkbarmark. Kvalitet på og nivå på drift/vedlikehold av fysisk infrastruktur. Lokalisering av fysisk infrastruktur.
Institusjonell: Tilgang på kompetanse, administrativ kapasitet, økonomiske ressurser, kunnskap, verktøy og virkemidler til å gjennomføre klimatilpasning

Tabell 8: Virkning av klimaendringer for bygningsmasse og infrastruktur. (Rasmussen & Vennemo 2010)

Virkningskategori	Kostnader i milliarder kroner
Økt vedlikehold bygg	4,5 – 10
Lavere oppvarming bygg	-5 – -6
Økt avkjølingsbehov bygg	0,5 – 0,6
Økte drifts- og vedlikehold transportinfrastruktur	0,17 – 0,5
Økt skredkostnader transportinfrastruktur	0,05 – 0,1
Skader på transportinfrastruktur ved ekstremvær	0,005 – 0,01
Økte skader og vedlikeholdsbehov kraftinfrastruktur	0,01 – 0,5
Økte vannskader bygg (vann og avløp)	0,2 – 0,6

Med Miljøstyrelsen i Danmark sitt ønske om å øke fokus på klimatilpasning i urbane områder er det utført en analyse omhandlende økonomiske virkninger av klimaendringer og tilpasningstiltak i avløpsnett. Det er benyttet ulike enhetskostnader for ulike skadekategorier. Tabell 9 viser noen av kostnadene som er benyttet i den økonomiske analysen for Roskilde by. (COWI & NIRAS 2007)

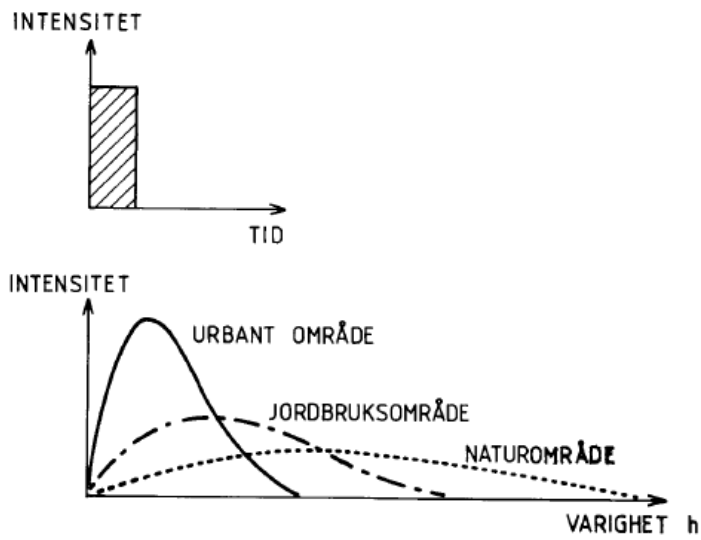
Tabell 9: Benyttede enhetskostnader for skader i Roskilde. (COWI & NIRAS 2007)

Skadekategori	Enhetspris
Forsinkelse, transport arbeid-hjem på grunn av trafikkforstyrrelser	127 kr/time
Veibrudd	1 mill. kr/veibrudd
Oversvømmelse stuegulv	500.000 kr/ bolig
Kjelleroversvømmelse	25.000 kr/ bolig
Matvarebutikkers lagertap	ca. 190.000 kr/ butikk
Andre butikkers lagertap	ca. 395.000 kr/ forretning
Helsekostnader virus	7.200 kr/syk person

4.3 Urbanisering

Urbanisering og fortetting i områder øker andelen tette flater, og reduserer andelen naturlig permeabel markoverflate, trær og vegetasjon. Dette fører til inngrep i den naturlige vannbalansen. Naturlig absorpsjon, fordampning, fordrøyning og infiltrasjon reduseres ved at de tette flatene dominerer i områder, og overflateavrenningen øker. Figur 17 viser at overflateavrenningen øker i både volum og intensitet ved ulik benyttelse av arealer. (Bergen kommune 2005) De naturlige vannveiene på overflaten erstattes ofte med at den raske avrenningen føres til ledningsnett. Urbanisering av områder kan dermed gi kapasitetsproblemer i avløpsnett, med de uheldige virkningene dette kan føre til. Et eksisterende avløpsnett som tilføres overvann kan dermed bli overbelastet dersom det ikke er dimensjonert for forventet fortetting i et område, spesielt dersom avløpsnett har dårlig

kapasitet fra før. Det er derfor viktig å tenke på konsekvensene av en urbanisering, spesielt sett sammen med framskrivningene for klimaendringene. (Lindholm et al. 2008)



Figur 17: Skisse av endringer i avrenningsforløpet som følge av endret arealbruk og urbanisering. (Bergen kommune 2005)

5 Matematiske modeller

5.1 Modeller som beregningsverktøy

Matematiske modeller er et nyttig verktøy i mange analyser av eksisterende og fremtidige avløpsnett. Modellene utfører beregninger kanskje tusen ganger raskere enn ved manuelle beregninger, og en får innsikt og oversikt over systemet og variabler som benyttes. (Lindholm 2011a)

Hydrologiske modeller er en forenklet beskrivelse av system og sammenhenger, hvor en benytter basiskunnskap om hydrologiske prosesser til en matematisk beskrivelse av systemet. Det finnes to ytterpunkter for de hydrologiske modellene; fysikalsk- og systemanalytisk modell. Den fysikalske modellen baseres hva som inngår i systemet vi beskriver, altså prosessene og studien av disse. Den systemanalytiske modellen baseres først og fremst på sammenhenger mellom inn- og utdata i systemet, uten å beskrive sammenhengene i selve systemet. Denne modellen omtales også som «svart-boks» system. I nedbør- og avløpsmodeller benytter vi oftest begrepsmessige modeller, som er ligger et sted mellom ytterpunktene av hydrologiske modeller. Denne modellen beskriver hovedprosessene i nedbørsfeltet og avløpsfeltets parametere bestemmes ut kunnskap om feltet. (Sælthun 2001)

En modell beskriver alltid en forenkling av virkeligheten, og usikkerheter vil alltid forekomme. De matematiske tilnærmingene for en rekke enkeltprosesser, og løsningsmetodene kan begge gi en grad av usikkerhet. I tillegg kan feil i inngangsdata, og vår egen grad av kunnskap og forståelse av de fysiske prosessene være kilder til usikkerhet. (Bjerkholt 2011)

Ved å utføre en følsomhetsanalyse av viktige parametere, kan en bestemme hvilke parameterendringer som betyr mest i forhold til resultatene. (Lindholm 2011a)

Kalibrering er nødvendig for at modellen skal ligne mest mulig på virkeligheten slik at resultatene kan sees på som troverdige. (Lindholm et al. 2008) Kalibrering er prosessen med å justere karakteristikkene i modellen slik at det representerer målte verdier i det fysiske nettet. (Engan 2011) Nedbør kan måles i en eller flere målestasjoner for korttidsnedbør dersom det ikke allerede finnes området. Avrenningen kan registreres for eksempel nederst i feltet for alle årstidene. (Lindholm et al. 2008) Målingene bør utføres over lengre tid, helst et helt år, og man bør ha registrert en eller flere store nedbørshendelser i løpet av perioden. Et område som er karakterisert av treg avrenning med lite tette flater vil gjerne ha behov for lengre måleserier enn urbane områder. (Lindholm 2007) Som et eksempel på kalibrering ble avløpsmodellen benyttet i saneringsplanen for Ranheim og Charlottenlund avløpssoner (Trondheim kommune 2005) utført i to deler. Innlekking til avløpssystemet ble kalibrert mot flere års pumpedata fra kommunens overvåkingssystem som hadde en oppløsning på en time. De tette flatene og andre hydrologiske parametere ble så kalibrert mot direkte målinger ute i feltet med en høyere oppløsning på fem minutter.

5.2 Modellmiljø

I denne oppgaven det det benyttet dataverktøyene Mike Urban med MOUSE simuleringsmotor, og Rosie for modellering av avløpsnett i Charlottenlund og Ranheim. Disse modellene beskrives derfor nærmere under dette kapitlet.

5.2.1 Mike Urban

Mike Urban er utviklet av DHI, og er et GIS-basert simuleringsverktøy for avløpssystemet og avrenning fra overflater, som kan benyttes til hydrauliske og hydrologiske analyser. Mike Urban er modulbasert og kommer i forskjellige størrelser. (DHI) Med Mike Urban kan modellresultater visualiseres og presenteres i form av blant annet kartdata, statistikker, profiler og tidsserier. Mike Urban benytter funksjonaliteter fra ESRI's GIS-program ArcObject, og MOUSE simuleringsmotor som også er en programvarepakke fra DHI. (DHI 2011)

5.2.2 MOUSE

MOUSE er delt inn i følgende moduler:

- MOUSE RUNOFF: Modell for overflateavrenning i urbane nedbørsfelt.
 - MOUSE PIPEFLOW (HD): Hydrodynamisk modell for rørstrømning.
 - MOUSE RDI: Avansert hydrologisk modell for simulering over lengre tidsintervaller.
 - MOUSE RTC: Kontrollfunksjoner og kontrollregler for MOUSE ledningsnettmodeller.
 - MOUSE LTS: Hydraulisk langtidssimulering og statistikk.
 - MOUSE TRAP: er delt inn i fire undermoduler:
 - MOUSE SRQ: Oppbygning og transport av forurensning på overflaten i nedbørsfeltet.
 - MOUSE AD: Transport og spredning av forurensning i væske i ledningsnett.
 - MOUSE WQ: Prosesser som virker inn på vannkvalitet i ledningsnett.
 - MOUSE ST: Transport av sedimenter i ledningsnett.
- (DHI 2009c)

Nedenfor følger en beskrivelse av de modulene i MOUSE som er vurdert som de viktigste for denne oppgaven.

MOUSE runoff

Det finnes fire ulike metoder for beregning av overflateavrenning ved bruk av MOUSE runoff:

- Modell A: Tid-arealmetoden.
- Modell B: Kinematisk bølge. Ikke-lineært reservoar
- Modell C: Lineært reservoar. Herunder to ulike metoder (C1 og C2)
- UHM: Unit Hydrograph Model.

Valg av metode kan avhenge av tilgjengelig nødvendig data om nedbørsfeltene, og det er ikke mulig å kombinere flere beregningsmetoder for ulike delfelter i en og samme

modellkjøring. MOUSE runoff beregner avrenningen på overflaten, men modell A, B og C kan kombineres sakte avrenning i RDI-modulen. Metodene kan gi store ulikheter i resultatet for overflateavrenningen på grunn av forskjellige inputdata for nedbørsfeltene, og parametere og beregningsmetoder i modellen. (DHI 2009d)

Tid-areal metoden (modell A) beregner avrenning fra nedbørsfelt avhengig av feltes areal, regn og hydrologiske tap.

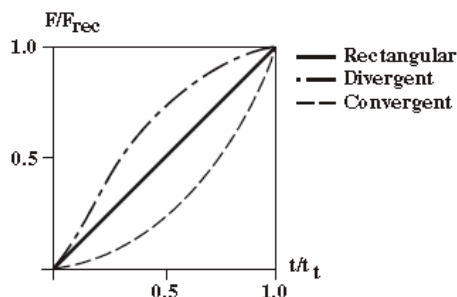
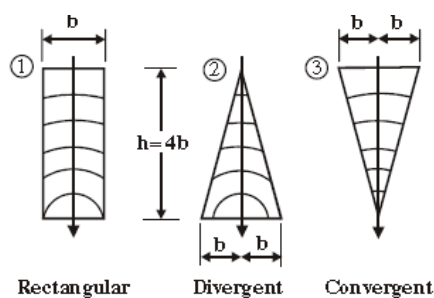
Før en beregning kan utføres må hvert nedbørsfelt i modellen beskrives ved hjelp av følgende feltparametere:

- Størrelse: det horisontale overflatearealet til feltet.
- Beliggenhet: identifiserer hvor feltet kobles til avløpsnett.
- Andel tette flater: prosentandelen av overflaten som bidrar til avrenningen.
- Innbyggere: antall innbyggere i nedbørsfeltet. Benyttes kun til tørrværsavrenning.
- Annen avrenning: en konstant avrenning som legges til avrenningshydrografen. Dette kan for eksempel være en forenklet beskrivelse av bidrag fra infiltrasjon for en enkelt hendelse.

I tillegg angis modellspesifikke data som er andel tette flater, det bidragende arealet til overflateavrenningen. De hydrologiske parameterne for modellen som må bestemmes er:

- Konsentrasjonstid: tiden det tar før punktet i feltet med størst avstand til feltets utløpspunkt bidrar til avrenningen.
- Hydrologisk tap: reduksjonsfaktor som tar hensyn til for eksempel evapotranspirasjon og tette flater som ikke bidrar til avrenning til ledningsnett.
- Initialtap: en gitt høyde for magasinering av nedbørsmengden. Dette tar høyde for porerom og ujevnheter, og overflateavrenningen starter når magasinet er fylt opp.
- Tid-arealkurve: Det benyttes en kurve avhengig av formen på nedbørsfeltet. Det finnes tre forhåndsdefinerte kurver å velge mellom.

MOUSE deler ved tid-areal metoden nedbørsfeltet i mindre buformede celler med senter i feltet utløp, som vist i figur 18.



Figur 18: De tre definerte tid-areal kurvene i MOUSE runoff. Tid-areal kurvens form avhenger av feltets utseende. (DHI 2009d)

Arealet av hver celle beregnes etter tid-areal kurven. Summen av cellene er lik arealet av de angitte tette flatene i feltet. Avrenningen i nedbørsfeltet starter idet regnvolumet overskrider gitt initialtap, og stanser når det akkumulerte regndybden er mindre enn magasineringskapasiteten i feltet. Etter avrenningen har startet vil det akkumulerte regnvolumet fra en celle bevege seg nedstrøms mot neste celle. Avrenningen i ethvert tids steg i en celle er et resultat av innløpet, utløpet og regnfallet i selve cellen. Avrenningen for hele nedbørsfeltet er derav utløpet i den nederst beliggende cellen, og er feltets hydrogram for overflateavrenningen. Antall celler (n) er avhengig av konsentrasjonstiden (tc) og tidssteget (Δt) i simuleringen, og er gitt ved formelen: (DHI 2009d)

$$n = \frac{t_c}{\Delta t}$$

Formel 4: Antall celler ved tid-arealmetoden (DHI 2009d)

MOUSE Pipe Flow

Med modulen MOUSE Pipe Flow beregnes turbulent vannføring i avløpsnett ved hjelp av kompliserte formelverk, og er et nyttig verktøy for beregninger i både nye og eksisterende avløpssystemer. Det kan beregnes rørstrømninger med og uten trykk, eller for fri overflate.

MOUSE løser Saint Venants ligninger for bevaring av masse og moment numerisk for dynamisk strømning:

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

Formel 5: Kontinuitetsligning (DHI 2009d)

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

Formel 6: Momentligning (DHI 2009d)

Hvor:

Q = Vannføring

A = Strømningsareal

y = Strømningsdybde

g = tyngdeakselerasjon

x = avstand i strømningsretning

t = tid

α = hastighets distribusjonskoeffisient

I_0 = bunnhelning

I_f = friksjonshelning

Gransebetingelsene for ligningene er gitt av hydrografene fra MOUSE Runoff, hvor det beskrives hvordan overvannet når ledningsnettets til enhver tid. (Olsen 2011) MOUSE Pipe Flow modulen har muligheter til å definere og beregne vannstrømmen i blant annet følgende komponenter i avløpssystemet:

- Ledninger
- Åpne kanaler
- Runde kummer
- Fordrøyningsbasseng. Herunder tanker, ikke-sirkulære kummer og dammer.
- Utløp med konstant eller tidsavhengig vannnivå.
- Regnvannsoverløp og nødoverløp for pumpestasjoner
- Strømningsregulering og tilbakeslagsventiler
- Pumper med ulike styringsbestemmelser
- Konstante eller variable innløpsmengder (DHI 2009a)

Det finnes fem standard rørtverrsnitt og velge mellom, og rørmaterialet som velges definerer friksjonen ved Mannings tall. (DHI 2009a)

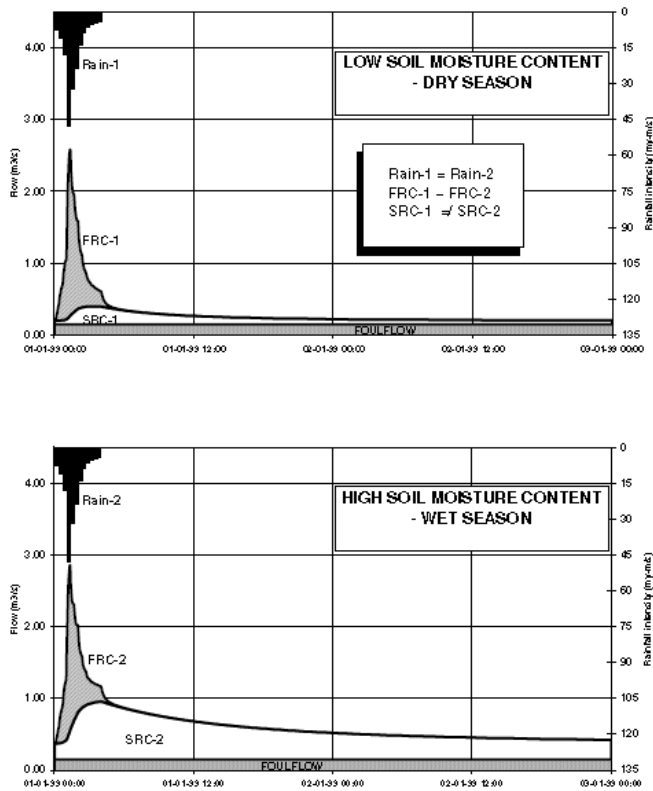
MOUSE RDI

I den virkelige verden kan overvannets bidrag til avløpsnettets avhenge av flere faktorer enn overflateavrenningen på tette flater i nedbørsfeltet. Grunnen i permeable flater kan mettes av et regnskyll, slik at et like stort etterfølgende regn vil gi mindre infiltrasjon og større regntopper. I tillegg vil snø, fordampning og grunnvann i den hydrologiske syklusen kunne påvirke infiltrasjonen og regnvannets veg. Vannbalansen i systemet kan påvirkes av den såkalte trege avrenningen som kan opptre i flere dager etter et regnskyll, i tillegg til den raske overflateavrenningen. RDI-modulen tar hensyn til flere hydrologiske faktorer, som blant annet gjør det mulig å simulere virkningen av en tidligere hendelse som illustreres i figur 19. Det er også mulig å simulere lengre tidsintervaller og regnhendelser i tillegg til enkelte korte regnskyll.

RDI-modulen er basert delvis på fysisk og delvis empirisk ligninger for å beskrive de hydrologiske prosessene, og er i stor grad styrt av metrologiske input-data. RDI-modulen deler inn magasinering av vannet i følgende fire lagre:

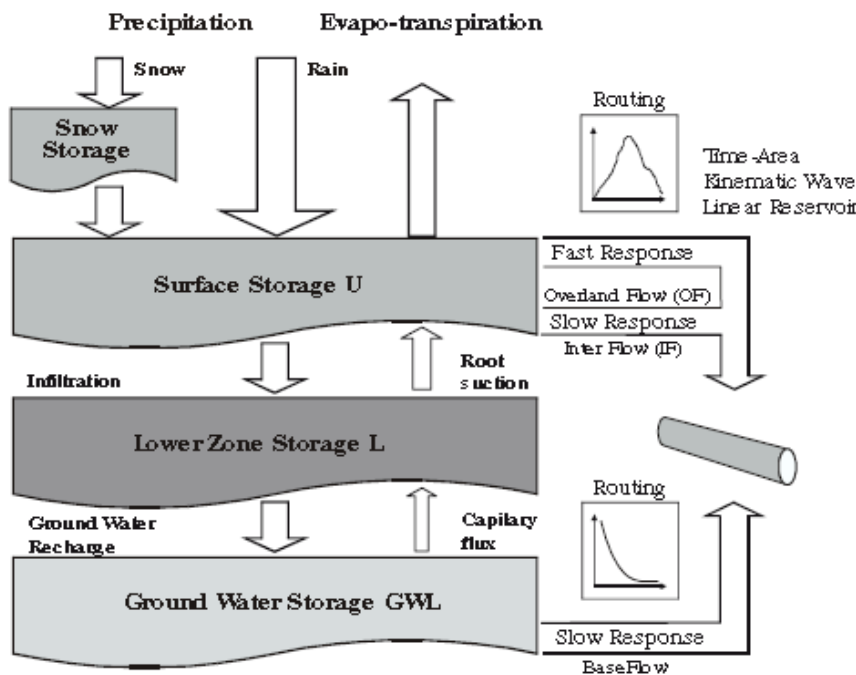
- Overflatelager
- Snølager
- Rotsonelager
- Grunnvannslager

(DHI 2009b)



Figur 19: Illustrasjon av effekten et regnskyll (Rain-1) har på avrenningen til et etterfølgende regnskyll av lik størrelse (Rain-2). Den raske avrenningen (FRC) er omtrent lik for de to forskjellige regnskyllene, mens den trege avrenningen (SRC) vil være forskjellige på grunn av at det hydrologiske systemet har blitt endret. (DHI 2009b)

Oppbygningen og sammenhenger mellom lagringsenhetene i det hydrologiske systemet for RDI-modulen er vist i figur 20. (DHI 2009b)



Figur 20: RDI-modulens struktur som viser sammenhengen mellom de fire hydrologiske lagringsenhetene. (DHI 2009b)

5.2.3 Rosie

Rosie er en GIS-applikasjon innen vann og miljø som er utviklet av Rosim AS, og er en tilleggsapplikasjon til standard produkter utviklet av ESRI. Rosie er en ArcGIS Extension, som vil si at det kan arbeides i et ArcGIS brukergrensesnitt og ha alle ArcGIS funksjonaliteter tilgjengelig. Rosie gir tilgang til modelloppbygging, beregninger og presentasjon av resultater for vann- og avløpsnett modeller. Med Rosies verktøy kan man blant annet importere og oppdatere modell-data for ledninger og kummer fra Gemini VA, og verktøyet for modelloppbyggingen og modell-forvaltningen er tilpasset norske forhold. Rosie består av Rosie Mouse og Rosie Epanet for henholdsvis modellering av avløp og vannforsyning. Rosie Mouse benytter MOUSE som hydraulisk motor. (Rosim)

6 Klimatilpasset overvannshåndtering

6.1 Helhetlig overvannsplanlegging

Ved dimensjonering av tiltak for en bedre overvannshåndtering bør det tilstrebes samfunnsøkonomiske- og bærekraftige anlegg, og overvannsplanleggingen bør komme inn i et tidlig stadium i planleggingsfasen. (Lindholm et al. 2008) Oversvømmelser og skader på grunn av ekstremregn kan aldri elimineres, men formålet med å sette i verk tiltak mot store overvannsmengder vil begrense hyppigheten og skadeomfanget av uønskede hendelser. (DANVA 2007)

En helhetlig planlegging er satt fokus på også utenfor Norges landegrenser. EUs rammedirektiv for vann har som hovedmål å sikre en bærekraftig bruk av- og beskytte vannmiljøet. En forutsetning er at vann og vassdrag forvaltes systematisk og helhetlig innenfor et nedbørsfelt, og samordnet på tvers av kunnskap, bransjer og myndigheter. (Vannportalen.no 2012a) EUs flomdirektiv har som mål å redusere flomskader og beskytte mennesker, kultur, miljø, og økonomi ved å analysere og kartlegge flomrisikoen i hvert nedbørsfelt. Deretter ønskes det at tiltak mot flom utredes og settes inn, avhengig av akseptabel risiko og ressurser. I Norge har NVE fått oppgaven med å utarbeide en norsk forskrift, i tillegg til å utrede flomrisiko og varsle flommer. For en mer helhetlig håndtering av flom har NVE foreslått at det for Norges 9 vannregioner utarbeides flomforvaltningsplaner som vedtas som fylkesplaner, og samordnes av vannregionutvalgene. (NVE 2011b)

For å møte klimaendringenes virkninger på overvannsproblematikken bør overvannshåndteringen sees i sammenheng med langsiktig arealplanlegging. Med hjemmel i Plan- og bygningsloven, Vannressursloven og Forurensningsloven kan det gis en rekke bestemmelser og retningslinjer for forvaltningen av overvannet i kommunen. I kommuneplanens arealdel og kommunedelplaner bør det fastsettes retningslinjer og bestemmelser for helhetlig håndtering av overvannet, og flomsoner og områder som er spesielt utsatt for fare må kartlegges. For regulerings- og bebyggelsesplaner bør det stilles nærmere krav for de forskjellige områdene, og for eksempel plassering og utforming av bygninger, og utforming av terrenget. Tiltak for overvannshåndtering på private tomter kan pålegges av kommunen i den enkelte byggesak før byggetillatelse gis. (Lindholm et al. 2008) Eksempler på krav og retningslinjer for innarbeidelse i de ulike plantypene er vist i tabell 10.

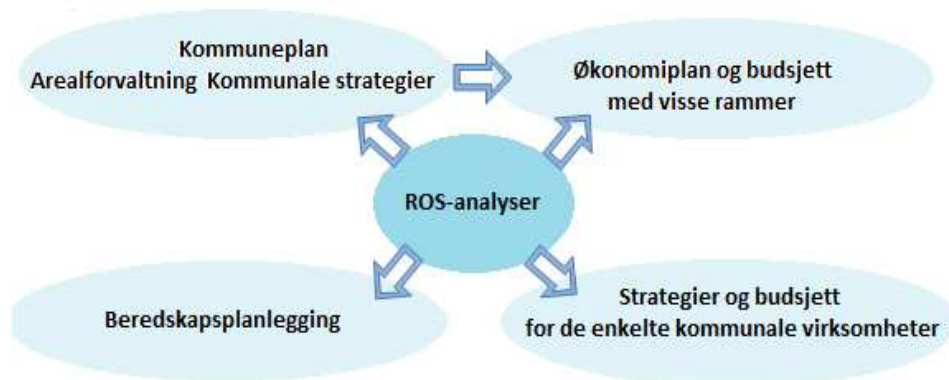
Tabell 10: Hierarkisk oversikt over plannivåene i kommunen. Eksempler på krav og retningslinjer viser hvordan overvannet kan tas hånd om i de enkelte nivåene for en helhetlig overvannshåndtering. Bearbeidet etter Lindholm et. al (2008)

Planområde	Plannivå	Tiltak	Eksempler på krav og retningslinjer
Hele kommunen	Kommuneplanens arealdel	Fastsette generelle krav i form av retningslinjer for en helhetlig overvannshåndtering.	<ul style="list-style-type: none"> • Overvannet skal søkes å være en ressurs og bidra positivt til innbyggerne • Åpne løsninger bør hvis mulig benyttes • Flomveier må sikres, og fareutsatte områder skilles fra andre områder. • Bestemmelser for kotehøyder og bygningsutforming
Vassdrag/ område	Kommunedelplan		
Lokalt	Reguleringsplan/ bebyggelsesplan	Fastsette krav for de enkelte områder.	<ul style="list-style-type: none"> • Regulere spesialområder til bruk av dammer, fordrøynings- og infiltrasjonsområder • Bestemmelser for utforming av terreng og permeable flater • Bestemmelser for plassering og utforming av bygninger • Forby kjellere
Tomt	En enkelt tomt	Tiltak for overvannshåndtering på tomt kan pålegges i byggesak før byggetillatelse gis.	<ul style="list-style-type: none"> • Anlegge eller bevare gressflater og vegetasjon • Påby frakopling av takflater • Angi maksimal tillatt overvannsmengde til påslipp til kommunal ledning • Påby LOD-tiltak på egen tomt • Anlegge smalere vegger og permeable dekker

For å lykkes med mottiltak mot klimaendringene og en helhetlig overvannshåndtering er det viktig å ha god dokumentasjon om den nåværende situasjonen. Det bør utføres en analyse av problemområder og flaskehals i avløpsnett for å avdekke eventuelle uheldige overløpsutslipp, og mulige områder som vil kunne gi oversvømmelser i bygninger og på infrastruktur. Utarbeidelse av risikokart med inndeling i soner etter ulike hendelsers risiko kan illustrere problemområdene og gjøre tiltaksvurderingen enklere. (Lindholm 2007)

Risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS-analyse) er et nyttig verktøy for å iverksette tiltaksplaner. I en ROS-analyse vurderes ulike hendelsers sannsynlighet og konsekvenser. Resultatet av ROS-

analysen gir et samlet bilde av virkningene av klimaendringene, og kan benyttes i hele kommunens planleggingsprosess som vist i figur 21. (KS 2012)



Figur 21: ROS-analysens rolle i kommunens overordnede planlegging. Bearbeidet etter KS (2012)

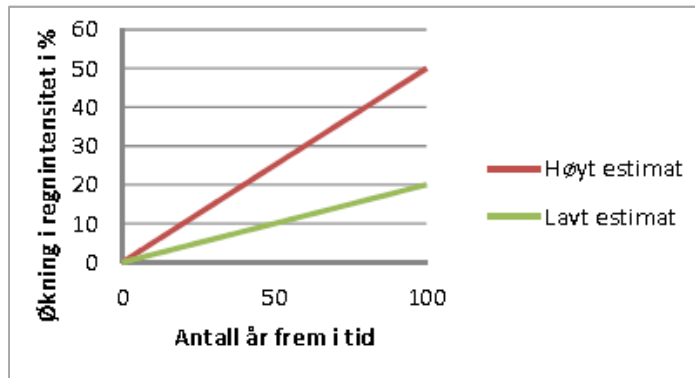
Beredskapsplanene i kommunen må inkludere varslings- og beredskapsplaner ved flommer, oversvømmelser og skadelige overløpsutslipp som følge av store nedbørsmengder. VA-normer og retningslinjer i kommunen må holdes ajourført og tilpasses klimapåvirkninger, og informasjon om forebyggende tiltak til befolkningen bør være en del av kommunens strategi. Kommunen bør informere innbyggere som holder til i utsatte områder, og retningslinjer om hva som kan gjøres selv for å redusere risikoen. Den private husholdningen bør sørge for å ha dekkende forsikringer, og sørge for at bygningens drenerings- og avløpssystemer er riktig anlagt, og at overflatevann føres bort fra bygningen. Risikoen for ødeleggelser kan også reduseres ved å installere tilbakeslagsventiler for stikkledninger, samt lagre gjenstander i kjellere i forsvarlig høyde. Kommunen kan også innføre et belønningssystem for beboere ved avgiftslettelse ved god overvannshåndtering. (Lindholm 2007)

6.2 Klimafaktor for nedbørsendringer

Flere kommuner i Norge tar i dag hensyn til forventede klimaendringer ved å implementere en klimafaktor i dimensjoneringsnormene. I Trondheim kommune skal det i henhold til VA-normen tillegges en sikkerhetsfaktor på 1,2 på historiske regndata ved dimensjonering av overvannsledninger. (Trondheim kommune 2011b)

Ved benyttelse av fremtidige langtidsserier anbefales det at disse blir utarbeidet av bransjer med god fagkunnskap i feltet, som for eksempel MET. (Lindholm et al. 2008) Den sesongvarierte nedbørsøkningen på grunn av klimaendringene kan differensieres ved å benytte ulike faktorer for dette, for eksempel fra framskrivninger. (Lindholm 2007) Faktormetoden Delta Change Metode er tidligere omtalt i kapittel 3.3.3.

I Danmark er det funnet at den maksimale timenedbøren kan forventes å øke med 20-50 % fra perioden 1960-1990 til 2070-2100. Uten tilstrekkelig kunnskap om hvordan klimaet vil endre seg med tiden antas klimaendringen å stige lineært igjennom de neste 100 år. (DANVA 2011) Figur 22 viser antagelsen om en lineær økning av regnintensiteten på 20 % og 50 % frem mot år 2100 vist som et høyt og lavt estimat.(Olsen 2011)



Figur 22: Lineær økning i regnintensiteter frem mot år 2100 basert på data fra DANVA. (Olsen 2011)

En analyse i Danmark ga resultater som viste en trend av økende klimafaktor ved økende gjentaksintervall. Disse klimafaktorene er vist i tabell 11, og DANVA anbefaler at disse brukes til dimensjonering av danske avløpssystem. Faktoren på 1,2-1,4 er ment som en faktor for ekstremregn, og ikke for tidsserier. Med antagelsen om en lineær stigning av regnintensiteten får et 10-års gjentaksintervall klimafaktor 1,0 for dagens situasjon og 1,3 for situasjonen om 100 år, med en lineær stigning av klimafaktoren for årene i mellom denne perioden.(DANVA 2007)

Tabell 11: Anbefalt klimafaktor i Danmark for ulike gjentaksintervall. (DANVA 2007)

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

Norsk Vann vil utgi en ny veiledning for dimensjonering og utforming av VA-anlegg. I denne veiledningen kommer det til å anbefales en klimafaktor på 1,3-1,5 for enkeltregn for alle gjentaksintervall fra IVF-kurver som er utarbeidet før 2011. (Lindholm 2012b)

6.3 Tiltak i ledningsnett

Dersom overbelastning er et problem kan man ved konvensjonelle tiltak øke kapasiteten ved å skifte ut eldre ledninger, da disse ofte ikke er dimensjonert for dagens- og fremtidens klima. Ved dimensjonering av nye nett kan det også være hensiktsmessig å runde opp til en større dimensjon enn dimensjonert overvannsmengde tilsier. Dette vil normalt ikke være av større kostandsbetydning. (Lindholm et al. 2008) Grøftegraving og legging av nye større

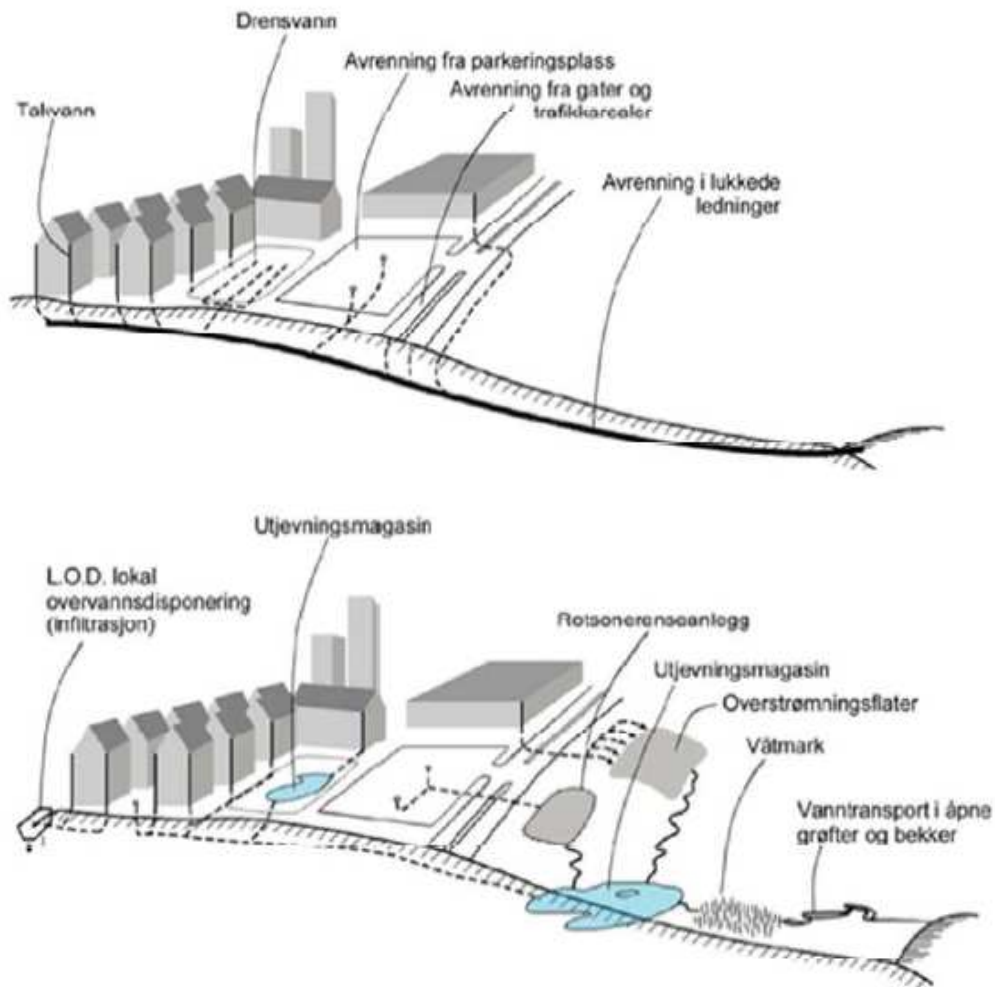
ledninger er ofte kostbart, spesielt dersom dette ikke samtidig er en nødvendig rehabilitering eller planlagt separering av gamle fellesledninger. Ved anleggelse av store rørdimensjoner oppstrøms, kan dette gi uheldige belastninger nedstrøms, og føre til økte utslipp og erosjon i resipienten. (Lindholm 2007)

NoDig er en nyere metode for rørfornyelse med ingen eller minimal grøftegraving. Metoden er under stadig utvikling, og har nå blitt benyttet i Norge i over 30 år. Ved tiltak for å rehabilitere gamle ledninger i dårlig stand bør metoden vurderes benyttet fremfor konvensjonell grøftegraving, med tanke på blant annet kostnader. Metoden egner seg ikke ved separering av fellessystem, men ved materielle skader på overvannsledningen, og ved for dårlig kapasitet kan metoden være å foretrekke ved rørfornyelse. (Asplan Viak 2010)

Mange kommuner vil ved utskiftning av eldre ledninger samtidig separere overvann- og spillvannsledninger dersom hele eller deler av det eksisterende nettet er fellessystem. (Lindholm et al. 2008) Dette vil avlaste et avløpssystem med dårlig kapasitet, og rent overvann trenger ikke føres til renseanlegg.

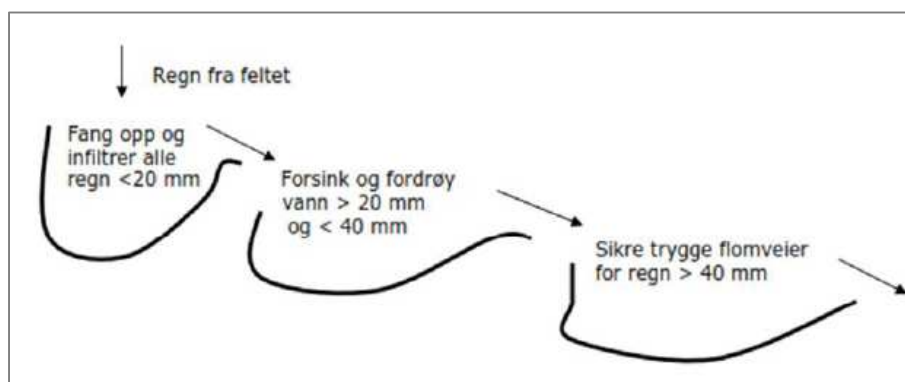
6.4 LOD-tiltak

I motsetning til det konvensjonelle avløpssystemet som transporterer overvannet fra rør til rør, vil man med LOD (Lokal overvannsdisponering) behandle og utnytte overvannet nærmest mulig kilden, og ikke overbelaste avløpsnett. På denne måten vil vannet bedre følge det naturlige kretsløpet, og være et positivt element for mennesker, dyr og miljø. Åpne overvannsløsninger kan styrke det biologiske mangfoldet, og urbane områder med åpne vannspeil kan være gunstig for innbyggerne i form av synsinntrykk og opplevelser, rekreasjon og lek. (Statsbygg 2004) I figur 23 sees forskjellene ved det konvensjonelle avløpssystemet og benyttelse av LOD i urbane områder.



Figur 23: Skissen viser konvensjonelt overvannssystem øverst, og åpen og lokal håndtering overvannshåndtering nederst. (Lindholm et al. 2008)

Figur 24 viser treleddsstrategien for overvannshåndtering. Strategien går ut på at man først søker infiltrasjon for en mengde nedbør, før man forsinker og fordrøyer resterende avrenning, og sikrer trygge flomveier for de største regnhendelsene. (Lindholm et al. 2008)



Figur 24: Treleddsstrategi for overvannshåndtering. Tallene må tilpasses lokale forhold.(Lindholm et al. 2008)

6.4.1 Infiltrasjon

Infiltrasjon skjer når overflatevannet trenger gjennom markoverflaten, og infiltrerbarheten er avhengig av løsmassenes egenskaper. Tabell 12 viser generelle egenskaper for noen løsmasser.

Tabell 12: Oversikt over løsmassenes egenskaper. (Mæhlum et al. 2009)

Løsavsetning	Renseevne	Infiltrerbarhet	Hydraulisk kapasitet
Morene	+++	+ (-)	+ (-)
Breelavsetninger	+	+++	+++
Elveavsetninger	- / +	++	+
Strandavsetninger	+	++	++
Marin avsetninger	+++	-	
Forvittringsjord	+++	++	+
Torv og myr	- (+)	++	+

(+++ svært bra, - mindre bra, -/+ lokale variasjoner)

Vinterstid kan frost skape problemer for infiltrasjonen, spesielt på terrengoverflaten. Situasjoner med smeltevann og dannelse av is må derfor vurderes i planleggingen. (Lindholm et al. 2008)

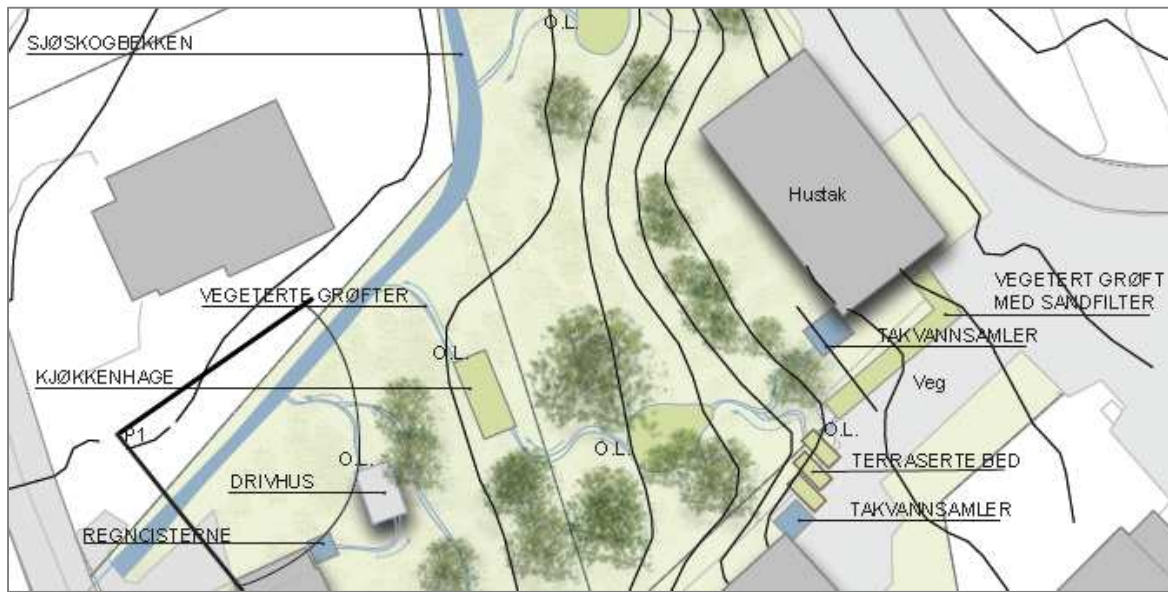
Infiltrasjonsanlegg kan være en åpen grøft med avrenning direkte fra terrenget, eller lukket med tilførsel via ledninger. (Lindholm et al. 2008) Infiltrasjonsanlegg kan også anlegges som dammer, men disse vil være sårbare for partikulært materiale og kan kreve forbehandling. Dammen vil fylles opp ved regnskyll, overskytende vann som ikke infiltreres føres bort i overløp. (Lindholm et al. 2008)

Gressklede terrengoverflater og annen vegetasjon kan benyttes til direkte infiltrasjon fra tette flater i bebygde områder. Åpne infiltrasjonsgrøfter kan anlegges i gressklede forsenkninger, som også kalles swales. Infiltrasjon fra terreng benyttes vanligvis for mindre områder enn 2-5 ha, og er mye brukt i boligområder. (Lindholm et al. 2008)

Porøs overflatebelegning kan anlegges i stedet for å asfaltere parkeringsplasser og veier etc. Da vil en del av vannet finne veien gjennom dekket, og ned til underliggende masser forutsatt at disse har gode nok infiltrasjonsevner. Grus, porøs asfalt- og betongstein, og gatesteiner med hullåpninger er typiske dekker til dette formålet. Som med infiltrasjonsmasser, kan dekkene tettes, og de må vedlikeholdes tilstrekkelig med høytrykksspyling og vakuumpfeing. (Lindholm et al. 2008)

Hustak gir et betydelig bidrag til avrenningen i avløpssystemet. Ved liten kapasitet i det kommunale systemet bør det vurderes å ikke koble til nye- eller frakoble eksisterende taknedløp til ledningsnett. (Lindholm et al. 2007) Takvannet kan føres til terreng for infiltrasjon på gressklede flater. Dersom infiltrasjon på tomten ikke er mulig, kan avrenningen ledes til renner og kanaler som føres til andre infiltrasjonsflater eller

fordrøyning. Takvannet kan føres til vegarealer og følge samme behandling som avrenningen fra gatene, men dette kan føre til økt grad av rensetiltak. (Statsbygg 2004) Takvannet kan også føres til regnvannstønner, og benyttes til vanning av grøntarealer. Redusering av antall sluk og fjerning av kantstein kan redusere bidragende avrenning fra veiarealer. (Lindholm et al. 2008) Figur 25 viser mulige LOD-anlegg i boligområde, hvor vann fra tette flater behandles lokalt i stedet for å føres til avløpssystemet.



Figur 25: Mulige LOD-tiltak. Illustrasjonen viser forslag til hvordan avrenning fra tette flater i et boligfelt i Olderdalen i Ranheim avløpssone kan behandles lokalt, og føres til lokal bekk i stedet for til avløpssystemet. (Hovdenak 2011)

6.4.2 Fordrøyning og forsinking

Ved fordrøyning, eller magasinering, holdes vannet tilbake og reduserer flomtoppene nedstrøms fordrøyningsanlegget. (Statsbygg 2004) I Trondheim kommune er hovedregelen at det ved nye utbygginger skal benyttes fordrøyning av overvann fra tette flater før det kan tilknyttes det kommunale nettet. Det stilles krav om dobbelt så stort fordrøyningsvolum dersom det tilknyttes et fellessystem, i forhold til en tilknytning til separate overvannsledninger med utslipp til resipient. (Trondheim kommune 2011b) Fordrøyningsanlegg utføres med utløpskontroll for kontrollert videreføring, og evt overløp. (Lindholm et al. 2008) Tabell 13 viser en oversikt over ulike LOD-tiltak for forsinking og fordrøyning. Ulike LOD-tiltak kan kombineres for en best mulig overvannshåndtering avhengig av arealer, overvannsmengder og formål i forskjellige områder.

Tabell 13: Ulike tiltak som kan fordrøye og forsinke overvannet. Bearbeidet fra Lindholm et. al (2008)

Lokal overvannshåndtering	Beskrivelse
Lukkede fordrøyningsanlegg	Fordrøyning. Anlegges under bakkenivå, og beslaglegger ikke overflatearealer. Kan benyttes under f.eks. parkeringsplasser/veger. Overvannet fordrøyes i porevolumet i steinmagasiner/steinkassetter, eller i volumet i rør/kummer/prefabrikkerte tanker. Kan kombineres med infiltrasjon.
Våte dammer med fordrøyningsvolum	Fordrøyning og rensing. Anlegges i leirholdig grunn eller med tett bunn. Det permanente vannspeilet gir et positivt element i nærmiljøet.
Tørre dammer	Fordrøyning og rensing. Grunnforhold med en viss infiltrasjon vanligvis uten betydning. Benyttes vanligvis for større og mer sjeldne regnhendelser.
Våtmark	Fordrøyning og rensing. Anlegges som grunn våtmark, eller med større fordrøyningsvolum. Vannvegetasjon vil være et positivt element for befolkningen og for biologisk mangfold. Anlegges normalt på leirholdig grunn, og er plasskrevende.
Grønne tak	Reduserer og fordrøyer. Nedbør kan opptas i vegetasjon, og sige til drenerende sjikt. Mest effektiv ved lite nedbør
Regnbed	Fordrøyning og infiltrasjon. Egnert til avrenning fra tak og gårdsplasser, og anlegges med vakre vannkjære vekster. Når den flomdempende effekten overskrides ledes vannet kontrollert videre.
Grøfter/kanaler	Fordrøyning og forsinking. Transportsystem som kan utføres som forsenkninger i grøntarealer eller steinsatte/støpte kanaler og renner. Overvannet kan utnyttes som estetisk element i urbane områder i stedet for å føres i lukkede rørsystemer.
Oppdemming på overflatearealer	Fordrøyning og forsinking. Struping eller tetting av sluk i rennesteiner kan utføres på lokale gater. Overvannet får lengre vei til "neste" sluk slik at tilrenningstiden blir lengre.
Benyttelse av naturlige vassdrag	Eksisterende lokale bekker og andre vassdrag kan utnyttes ved kontrollerte tilkoblinger av overvann. Gamle bekkelukkinger kan åpnes for en åpen avledning av overvannet.

6.4.3 Sikring av flomveier

Ved nedbørshendelser som overskrider det overvannsanleggene er dimensjonert for, er det viktig med gode flomveier på overflaten. Ved å sikre trygge flomveier og regulere hvilke områder som kan oversvømmes, vil man kunne begrense et skadeomfang betraktelig. (DANVA 2007)

Flomveier bør planlegges for en kapasitet til minimum en 100-års flom, og primært følge offentlig grunn. En mulighet er å la flomveier inngå i vegarealer eller oppholdsplasser som for eksempel ballplasser, bruksplasser og parker, men dette krever godkjenning av myndigheter/eiere. Ved å tilrettelegge for bruk av oversvømmelsesarealer, kan kortvarige oversvømmelser kontrolleres. (Lindholm et al. 2008)

6.4.4 Overvannsrensing

Overvann med utslipp i naturlige resipienter må ha tilfredsstillende kvalitet avhengig av formål og sårbarhet. Badeplasser krever for eksempel høy kvalitet i vannforekomsten. Et kjent fenomen for resipienter som får for stor tilførsel av næringsstoffene nitrogen og fosfor er at det oppstår problematisk algevekst. (Statsbygg 2004) Overvann fra takflater har oftest god vannkvalitet, mens trafikkerte områder bidrar med varierende grad av miljøgifter. Overvann fra trafikkerte vegger kan gi forurensing i form av tungmetaller og organiske miljøgifter, og salt fra vinterdrift av veier og olje kan også være aktuelle forurensningsstoffer. (Lindholm et al. 2008; Statsbygg 2004)

Stoffer fra konstruksjoner og materialer, forøpling og industri er andre eksempler på forurensningskilder. Dersom overvannet ikke tilfredsstiller krav til kvalitet, må renseseffekten til LOD-tiltak vurderes spesielt. (Statsbygg 2004)

I tabell 14 er det vist ulike renseseffekter for forskjellige parametere, ut fra erfaringer med LOD-anlegg i miljøer med nokså likt klima som i Norge. Det sees at enkelte infiltrasjonsanlegg og våte dammer har en høy rensesgrad, mens lukkede magasiner ligger helt på bunn uten noen form for renseseffekt. Variasjoner i resultater er imidlertid store, og en benyttelse av tallmaterialet i tabellen må gjøres med forsiktighet. (Lindholm et al. 2008)

Tabell 14: Renseeffekter for forskjellige LOD-anlegg. (Lindholm et al. 2008) Rekkefølgen av LOD-anlegg er justert etter total virkningsgrad.

LOD- anlegg	Parameter						Total virkningsgrad
	Partikulært materiale	P	N	BOF	Metaller	Bakterier	
Infiltrasjonsdammer	80-100	60-80	60-80	80-100	80-100	80-100	Høy
Infiltrasjon fra porøs overflatebelegning	80-100	60-80	60-80	80-100	80-100	80-100	Høy
Lukkede infiltrasjonsgrøfter	80-100	60-80	60-80	80-100	80-100	80-100	Høy
Stor "våt" dam uten fordrøyning	80-100	60-80	40-60	40-60	60-80	Ukjent	Høy
"Våt" dam med oppholdstid 24 timer etterfulgt av våtmark	80-100	60-80	40-60	40-60	60-80	Ukjent	Høy
"Våt" dam med oppholdstid 24 timer	80-100	40-60	20-40	40-60	60-80	Ukjent	God
Infiltrasjon fra terreng, skogsvegetasjon med bredde 30m	80-100	40-60	40-60	0-20	80-100	Ukjent	God
Liten "våt" dam uten fordrøyning	60 -80	40-60	20-40	20-40	20-40	Ukjent	God
"Våt" dam med oppholdstid 9 timer	60-80	20-40	20-40	20-40	40-60	Ukjent	God
"Tørr" dam	30-75	10 60	10 60	24-60	30-90	50-90	God
Infiltrasjon fra åpne gresskledde grønner	20-40	20-40	20-40	20-40	0-20	Ukjent	Lav
Infiltrasjon fra terreng, gresskledt stripe med bredde 6 m	20-40	0-20	0-20	0-20	20-40	Ukjent	Lav
Lukkede magasiner	0	0	0	0	0	0	

7 Analyseområdet

Analyseområdet i denne oppgaven er i Charlottenlund- og Ranheim avløpssone i Trondheim kommune, som ligger øst for Trondheim sentrum. Trondheim kommune er Norges tredje største by. Dagens innbyggertall er ca. 176 000, og byen er i kraftig vekst. (Trondheim kommune 2011a)



Figur 26: Utsnittet viser analyseområdet i Trondheim kommune. (Trondheim kommune 2012b)

7.1 Landskap og bebyggelse

Analyseområdet grenser mot Malvik kommune i øst, og mot sør ligger Jonsvatnet som er hoveddrikkevannskilden i Trondheim kommune og Malvik kommune. (Trondheim kommune 2012a)

Ranheim og Charlottenlund består av tettbebyggelse, boligområder, industriområder, større infrastruktur bestående av jernbane og hovedveger, skog og dyrket mark. De bebygde områdene og større infrastruktur er i hovedsak konsentrert nord i nedbørsfeltet mot fjorden.



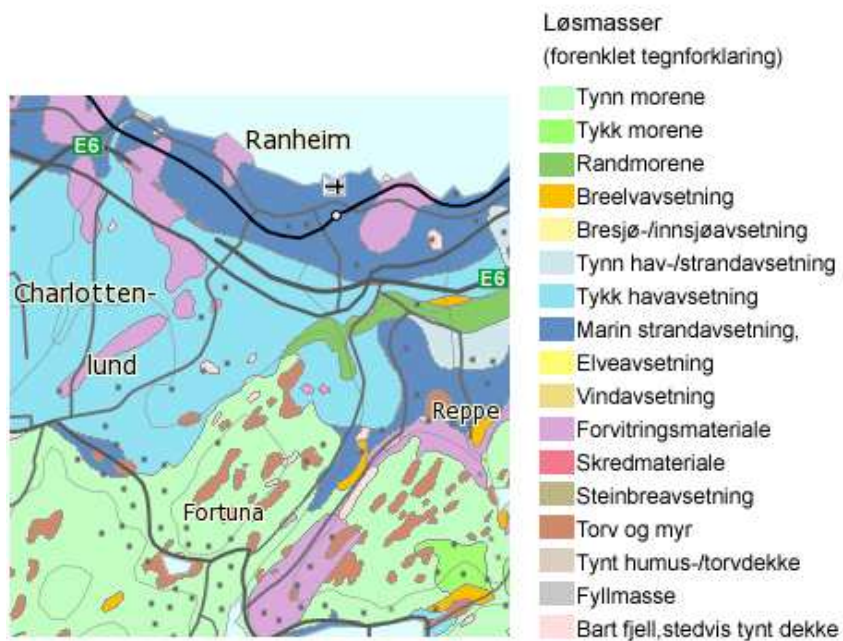
Figur 27: Et typisk boligområde i analyseområdet, med hus på grønne tomter. Utsnittet er fra Nyheimsveien i Charlottenlund avløpssone. (Opplysningen 1881)

Sjøskogbekken og Stokkanbekken/Grilstadbekken renner gjennom analyseområdet med utløp i Trondheimsfjorden. Fjorden har en generelt god vannkvalitet som er næringsfattig. Området består av badeplasser som benyttes spesielt i sommerhalvåret. (Trondheim kommune 2005)

Kommuneplanens arealdel 2007-2018 (Trondheim kommune 2009) viser at det er avsatt arealer til fremtidige byggeområder, blant annet til gravlund, bybebyggelse og tettbebyggelse.

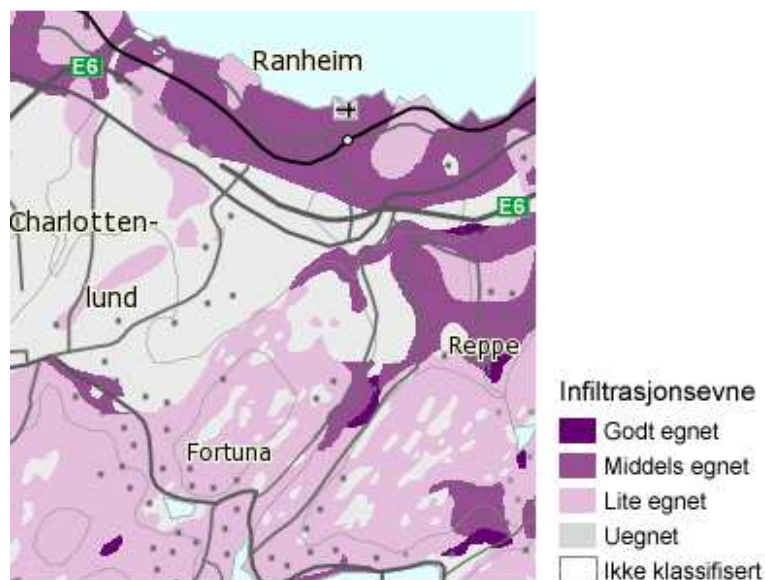
7.2 Grunnforhold

Berggrunnen består hovedsakelig av Grønnstein, samt områder med fyllitt og leirskifer. (Trondheim kommune 2005) Løsmassene i analyseområdet består hovedsakelig av tykk marin avsetning og forvittringsmateriale. På Ranheim finnes store områder med tykk strandavsetning og stedvis forvittringsmateriale. Lengst sør i analyseområdet domineres løsmassene av tynn morene. Stedvis i feltet finnes også områder med torv og myr, bart fjell, randmorene og breelvavsetning. Løsmassekart for området er vist i figur 28.



Figur 28: Løsmassekart for analyseområdet. (NGU)

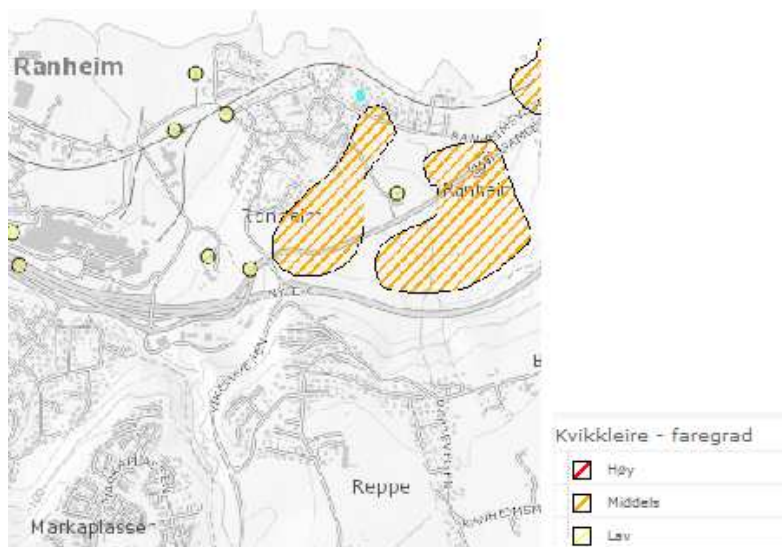
Fjord og- havavsetninger består av silt og leire. Den tykke marine avsetningen er vanligvis uegnet til infiltrasjon. Strandavsetninger er løsmasser vasket av bølger i strandsonen under marin grense, og består vanligvis av sand, grus og stein. (NGU 2007) I figur 29 er infiltrasjonsevnen for analyseområdet vist.



Figur 29: Infiltrasjonsevnen i analyseområdet. (NGU)

På grunn av leire i grunnen, er det i Trondheim kommune ofte vanskelig å tilrettelegge for infiltrasjonsanlegg. Infiltrasjonsegenskapene i aktuelle områder må derfor vurderes av personer med geoteknisk kompetanse. (Trondheim kommune 2011b)

Lengst øst i analyseområdet på Ranheim finnes soner med kvikkleire som er karakterisert til middels faregrad. (NVE) Faregraden er vist i figur 30, og er et uttrykk for sannsynligheten for at et skred skal inntreffe, ut fra geotekniske, hydrologiske og topografiske forhold. Oversikten over kvikkleiresoner er i hovedsak et grunnlag for å vurdere skredfare på kommuneplannivå, ved beredskapsplanlegging, og for sikringstiltak. Ved planlagte utbyggingsprosjekter må det undersøkes mer detaljert i området. (NVE 2011a)



Figur 30: Skredrisiko - faregrad (NVE)

7.3 Avløpssystemet

7.3.1 Generell beskrivelse

Beskrivelsen av avløpssystemet i dette kapitlet er hentet fra saneringsplanen for Charlottenlund og Ranheim fra 2005 (Trondheim kommune 2005), og kan ha endret noe karakter siden den tid.

Ranheim- og Charlottenlund avløpssone er to av 22 avløpssoner i Trondheim kommune, og tilhører Ladehammeren rensedistrikt. Avløpssonene består av et totalt areal på 42,6 km², med 16162 bosatte personer. Dette utgjør totalt 18635 pe, hvorav 18301 av disse er tilknyttet det kommunale avløpsnett.

Avløpsnettets består av felles- og separatsystem, samt ikke virksomt separatsystem. Avløpssonene drenerer til et avskjærende ledningssystem langs sjøen. Nærmere halvparten av selvfallsledningene er tykkveggede betong mufferør som er lagt etter 1964, mens en mindre del består av tynnveggede betong mufferør lagt i perioden 1949–1965 og PVC

ledninger. Avløpssystemet består av åtte pumpestasjoner, hvorav fire ligger ved Jonsvatnet, og resten har beliggenhet langs fjorden. Det finnes til sammen 14 regnvannsoverløp og nødoverløp.

7.3.2 Problemområder

I saneringsplanen for Charlottenlund og Ranheim (Trondheim kommune 2005) er det beskrevet flere problemområder. Noen av disse har vært kjente problemer, mens andre er avdekket ved nærmere undersøkelser og befaringer ved utarbeidelse av saneringsplanen. Et utdrag av problemene er listet opp under:

- **Overbelastning**
Langs sjøen ligger et avskjærende avløpssystem som er overbelastet.
- **Forurensning**
Stokkanbekken/Grilstadbekken og Sjøskogbekken er meget forurenset. Grunnene til dette er blant annet feilkoblinger i overvannsledninger med utslipp til bekk, overløpsutslipp og avrenning fra jordbruksarealer. Feilkoblinger er undersøkt ved å måle innhold av tarmbakterier, eventuelt med etterfølgende ammoniumsmålinger, fargetesting, eller benyttelse av hønsenetting for registrering av toalettpapir. Badevannskvaliteten langs fjorden er periodevis redusert. Kraftig nedbør gir et høyt bakterieinnhold i badevannet i fjorden, og overløpsutslipp gir kloakksjøppel i fjordens strandsone.
- **Innlekking av fremmedvann**
I de fleste felleskummene for overvann og spillvann som er undersøkt ligger spillvannsledningen dypest. Dette kan føre til tilfeller av at overvann flommer over i spillvannsledningen på grunn av for stort hull i overvannsledningen. Kummene kan også gi uheldige virkninger ved uoppdagede tilstopninger i spillvannsledningen, dersom spillvannet renner over og blander seg med overvannet. Også langs Sjøskogbekken er det registrert betydelig inn- og utlekking, da avløpsledningen her ligger svært nær bekken.
- **Tilbakeslag av sjøvann**
Det er registrert innlekking av sjøvann i utette kummer i tilknytning til pumpestasjoner langs fjorden, og innlekking av grunnvann/bekkevann som er påvirket av tidevannet.
- **Driftsforstyrrelser**
Enkelte ledningsstrekk er registrert med gjentatte driftsforstyrrelser og tilstopninger. I noen av disse ledningsstrekene utføres det fast spyling.
(Trondheim kommune 2005)

Innlekking av fremmedvann, driftsforstyrrelser, tilbakeslag og overbelastning i avløpssystemet kan være direkte eller indirekte kilder til uheldige hendelser for tilknyttede bygninger, spesielt med tanke på de forventede fremtidige klimaendringene.

Kommunen har ikke registrert noen kjelleroversvømmelser for området, men dette betyr ikke at det ikke er registrert noen hos forsikringsselskapene. (Johannessen 2011a)

7.3.3 Analyse av klimaeffekter på avløpssystemet utført av DHI

DHI har analysert effektene på avløpssystemet i Trondheim med avløpsmodeller i MIKE URBAN etter ønske fra kommunen. Avløpsnettets på Ranheim og Charlottenlund er i denne sammenheng analysert med tanke på havstigning og økning i regnintensitet. For modellkjøringene for flomanalyser er det benyttet en korttidshendelse med en times varighet med 20-års gjentaksintervall. Videre er det valgt to ulike scenarioer for år 2100 etter middels (12,9 %) og høy (38,8 %) framskrivning av *nedbørsmengde på dager med mye nedbør* for region Trøndelag/Helgeland. Tre ulike havnivåer valgt for å simulere havstigning kombinert med de to ulike scenarioene. Resultatene som er presentert i sluttrapporten viser antall kummer med maks vannstand over bakkenivå og kjellernivå (90 cm over bunn kum).

Tabell 15 viser deler av resultatene for kummene (nodene) i modellen for scenarioet med høy framskrivning ved 100-års stormflo (havnivå + 3,81) i år 2100. Stormflonivået er funnet til kun å påvirke selve utløpsledningen, og ikke avløpsnettets oppstrøms. (König 2011)

Tabell 15: Sammenstilling av antall noder med maks vannspeil over bakkenivå og antatt kjellernivå. Analysen er utført av DHI. (König 2011)

	Antall / prosentandel noder med maks vannstand over bakkenivå	Antall / prosentandel noder med maks vannstand over kjellernivå
År 2000	18 / 1,2 %	78 / 5 %
År 2100, middels framskrivning	28 / 1,8 %	100 / 6,4 %
År 2100, høy framskrivning	34 / 2,2 %	121 / 7,7 %
År 2100, høy framskrivning og 100 års	46 / 2,9 %	151 / 9,6 %

7.4 Avløpsmodellen

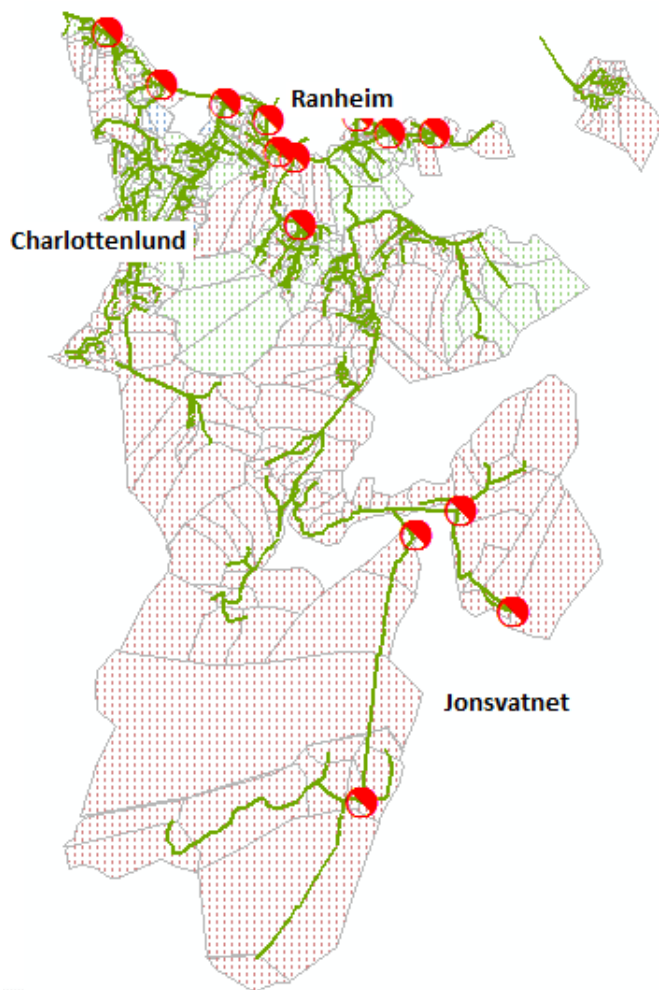
Det er i denne oppgaven benyttet en ferdig bygd urban avløpsmodell som er stilt til rådighet av Trondheim kommune. Det er en enkel hydrologisk modell, hvor designet kan ha endret seg over årene som har gått. (Olsen 2011)

Avløpsmodellen inneholder 1570 ledninger, 1576 kummer, 8 pumper, 14 overløp og 8 utløp. Ledningene har en total lengde på omtrent 83 km.

Det totale nedbørsfeltet er omtrent 2600 ha, og er delt inn i 510 delfelt. Delfeltene er klassifisert etter hvilke avløpssystem som er ligger i de ulike områdene. 328 delfelter er for separatsystem, 161 er for fellessystem, og 21 er for overvann. De separate delfeltene drenerer kun spillvann, mens delfeltene for overvann og fellessystem drenerer overvann fra

tette flater i tillegg til eventuelt spillvann. Delfeltene for fellessystem og overvann har totalt 5,25 % andel tette flater av hele feltet.

Figur 31 viser et oversiktsbilde av modellen med delfelt, ledninger og overløp. De røde delfeltene viser separatsystem, de grønne viser fellessystem, og de grå viser overvannssystem.



Figur 31: Oversiktsbilde av avløpsmodellen i Charlottenlund og Ranheim.

De hydrologiske parameterne i modellen er satt til standard verdier:

- Tid-arealkurve: TACurve1
- Konsentrasjonstid: 7 minutter
- Overflatemagasinering: 0,6 mm
- Reduksjonsfaktor: 0,9

Modellen er ikke kalibrert. (Olsen 2012) En usikkerhet i forhold til de virkelige forhold må derfor tas i betraktning ved benyttelse av modellresultatene.

8 Simuleringer i avløpsmodellen

8.1 Forutsetninger og valg

Modellen benyttes «som den er mottatt», uten en vurdering av om ledningsnettets tilfredsstillende dagens faktiske forhold, og ikke minst i tiden fremover.

8.1.1 Analysens tidsperspektiv

Det er valgt å se på effekter i avløpssystemet som kan skje i løpet av en 100-årsperiode, da fornyelsesplaner forutsetter en gjennomsnittlig levetid på ca. 100 år. (Trondheim kommune) I tillegg sammenfaller framskrivninger for klimaendringer bra med denne perioden, og 100-års gjentaksintervall er det største som foreligger i IVF-kurven som benyttes.

Det ikke tatt høyde for fremtidig utbygging i området i løpet av perioden. Det forutsettes at nye utbyggingsområder må behandle overvannet lokalt. Det er heller ikke tatt hensyn til en gradvis fornyelse av ledningsnettets i løpet av perioden.

8.1.2 Regndata

På grunn av tidsbegrensninger er langtidssimuleringer med RDI-modulen utelatt i oppgaven. Det benyttes tid-arealmetoden i MOUSE, hvor de tette flater bidrar til avrenning. Olsen (2011) benyttet i sin masteroppgave et utvalg av historiske regn for analysen av avløpsnettets. Utvelgelsen av regn ble utført i et MATLAB-script, for å finne maksimale nedbørshendelser innenfor et intervall per år, og de fem regnene med størst nedbørsum ble benyttet til modellanalysen. I denne oppgaven velges det å benytte enkeltregn i form av symmetriske regnhyetogram. Dette er valgt fordi gir bedre resultater enn kasseregnet som omtalt i kapittel 4.1.2, og de er enkle å konstruere for ulike gjentaksintervaller fra IVF-kurven. I tillegg vil simuleringsanalysen gi nyttige resultater for de ulike gjentaksintervallene som er forventet gjennom en periode på 100 år.

Trondheim kommune har IVF-kurver for to målestasjoner; Risvollan og Voll-Moholt-Tyholt. Risvollan målestasjon gir høyere regnintensiteter enn Voll-Moholt-Tyholt selv om stasjonene ligger nær hverandre, men grunnen til dette er ikke kjent. Stasjonen Voll-Moholt-Tyholt har målinger med lengst registreringstid. Risvollan ble startet opp senere, og det er benyttet data fra Voll-Moholt-Tyholt for å få nok data til å lage gode nok IVF-kurver. Trondheim kommune benytter selv IVF-kurven fra Voll-Moholt-Tyholt til dimensjonering. (Johannessen 2011a) Denne IVF-kurven er vist i figur 32, og benyttes som utgangspunkt til å konstruere symmetriske regnhyetogram.



Figur 32: IVF-kurve for målestasjon Voll-Moholt-Tyholt i Trondheim for perioden 1967-2009 Regnintensiteten oppgis i l/s*ha og regnets varighet i minutter. Kurvene viser forskjellige gjentaksintervall. (Trondheim kommune 2011b)

Fem minutters beregningssteg er valgt, da det i henhold til Norsk Vann (Lindholm et al. 2008) i de fleste tilfeller vil være hensiktsmessig å bruke ved konstruksjon av symmetriske regnhyetogram. Det konstrueres regnhyetogram for gjentaksintervall på 2, 5, 10, 20, 50 og 100 år da disse er oppgitt i IVF-kurven. Regnhendelsen for regnhyetogrammet settes til 60 minutters varighet. 60 minutter er vanlig varighet å benytte i slike beregninger (Køste & Hval 2011) Nedbørsfeltet i denne oppgaven er langstrakt, og det kan tenkes at 60 minutter ikke er lang nok regnvarighet. Men siden de øverste delfeltene er separatsystem som ikke bidrar til overflateavrenning, kan en kortere regnvarighet forsvares. Olsen (2011) gjorde også en grov beregning av konsentrasjonstiden til de områdene oppstrøms kritiske kummer som viser seg å være langt mindre enn 60 minutter.

Metoden for omdanning av IVF-kurven til symmetrisk regnhyetogram er beskrevet av Norsk Vann (Lindholm et al. 2008), og er vist under for et 20-års gjentaksintervall.

Tabell 16 viser regnintensitetene som benyttes i beregningene. Verdiene for 40- og 50 minutters varighet er ikke oppgitt i IVF-kurvens tabelldata og er derfor interpolert.

Tabell 16: Regnintensitet for IVF-kurven Voll-Moholt-Tyholt for 20-års gjentakintervall fra IVF-kurvens tabelldata. (Johannessen 2011b) Intensiteten for 40- og 50 minutters varighet er interpolert.

Varighet [min]	Intensitet [l/s*ha]
10	124,0
20	76,3
30	56,7
40	49,2
50	43,4
60	39,2

Det beregnes en ny regnintensitet som skal fordeles i regnhyetogrammet:

$$I_{10} = 124 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

$$I_{20} - I_{10} = \frac{(76,3 * 20) - (124 * 10)}{10} = 28,6 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

$$I_{30} - I_{20} = \frac{(56,7 * 30) - (76,3 * 20)}{10} = 17,5 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

$$I_{40} - I_{30} = \frac{(49,2 * 40) - (56,7 * 30)}{10} = 26,8 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

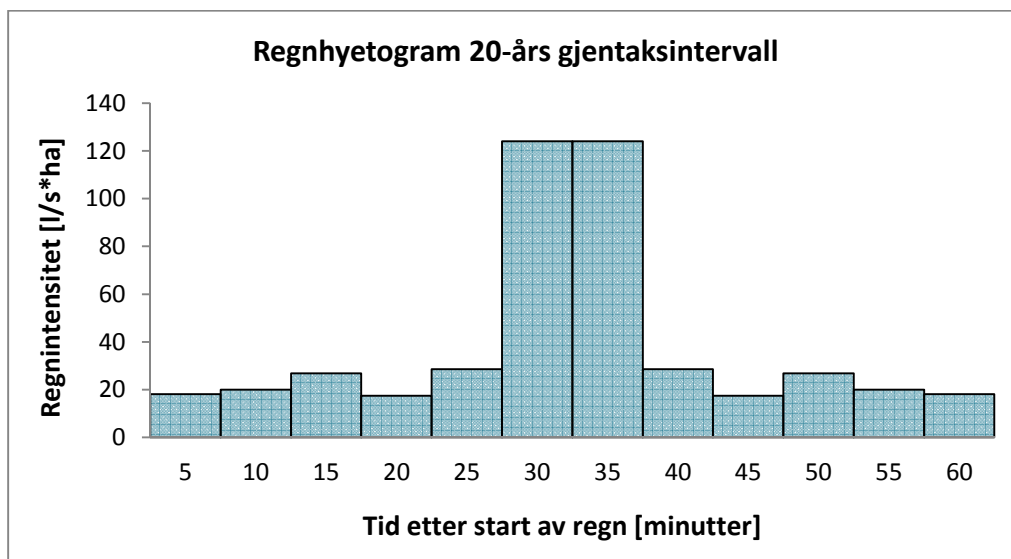
$$I_{50} - I_{40} = \frac{(43,4 * 50) - (49,2 * 40)}{10} = 20,2 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

$$I_{60} - I_{50} = \frac{(39,2 * 60) - (43,4 * 50)}{10} = 18,2 \text{ l/s} \cdot \text{ha}$$

Resultatet fra beregningene fordeles deretter symmetrisk om midten av regnets varighet med 5 minutters beregningssteg, hvor toppintensiteten plasseres på midten. Resultatene er vist i tabell 17. Det symmetriske regnhyetogramets form er vist i figur 33, og inneholder like mye nedbør som et «kasseregn» på 60 minutter.

Tabell 17: Resultater for et 60-minutters symmetrisk regnhyetogram med 20-års gjentaksintervall.

	Intensitet [l/s*ha]	Tid [min]
I ₅₀ - I ₆₀	18.2	5
I ₅₀ - I ₄₀	20.1	10
I ₄₀ - I ₃₀	26.8	15
I ₃₀ - I ₂₀	17.5	20
I ₂₀ - I ₁₀	28.6	25
I ₁₀	124	30
I ₁₀	124	35
I ₂₀ - I ₁₀	28.6	40
I ₃₀ - I ₂₀	17.5	45
I ₄₀ - I ₃₀	26.8	50
I ₅₀ - I ₄₀	20.1	55
I ₅₀ - I ₆₀	18.2	60



Figur 33: Symmetrisk regnhyetogram for et 60 minutters regn med 20-års gjentaksintervall.

8.1.3 Klimafaktor

Inspirert av Holvik (2010) utførte Olsen (2011) en enkel DCF-analyse med utgangspunkt i å sammenligne endringer i nedbør fra kontrollperioden (1961- 1990) og et scenario i fremtiden (2071-2100) i Trondheim. Det ble estimert gjennomsnittlige DCF for vår, sommer, vinter og høst. Det ble valgt empirisk og dynamisk nedskalering for Værnes, da dette

området har tilgjengelig data fra NoSerC⁷-prosjektet, og ligger nærmest analyseområdet Charlottenlund og Ranheim. Resultatene av estimeringen av DCF er vist i Figur 34, og viser en økning fra 18 % til 36 % avhengig av sesong og klimascenario. (Olsen 2011)

DCF - A2/CONTROL	vinter	vår	sommer	høst
AVERAGE	1.18	1.23	1.33	1.25
DCF - B2/CONTROL	vinter	vår	sommer	høst
AVERAGE	1.29	1.14	1.31	1.36

Figur 34: Gjennomsnittlig DCF for Værnes avhengig av sesong. (Olsen 2011)

Resultatene for beregnet DCF er tillagt usikkerhet, spesielt dersom de gjennomsnittlige sesongendringene benyttes til å beskrive endringer i korte intense regn. (Olsen 2011) Delta Change metoden gir også grunnlag til usikkerhet da variasjoner i tørrvær og spissavrenning ikke blir tatt nok hensyn til. (König 2011)

I DHIs flomanalyse av avløpsnettets i Charlottenlund og Ranheim er det som nevnt i kapittel 7.3.3 valgt å øke regnintensiteten med 13,9 % og 38,8 % etter framskrivninger for *dager med mye nedbør*. (König 2011)

Med bakgrunn i litteraturen, beregningene og analysene som allerede er gjort, og usikkerheten omkring estimatene for klimaendringene, velges det en klimafaktor på 1,5. Dette samsvarer det høye estimatet i figur 22, og kan sees på som et «worst scenario».

Regnintensiteten fra IVF-kurven skaleres dermed med en faktor på 1,5 for å simulere klimaendringer, som vil si at regnintensiteten økes med 50 %. De konstruerte symmetriske regnhyetogrammene for de ulike gjentakintervallene med og uten klimafaktor som benyttes i modellsimuleringen er vist i vedlegg 1.

Det er i denne oppgaven valgt kun å se på endringer i nedbøren, og ikke kombinere dette med endringer i havnivået og stormflo. DHIs analyse (König 2011) viste dessuten at endringer av havnivået ikke ville ha noen oppstuvningseffekt på avløpsnettets foruten i utslippsledningen.

8.2 Følsomhetsanalyse

Godt datagrunnlag er nødvendig for et mest mulig nøyaktig resultat i modelleringen. En studie av inputdataene bør utføres ved hjelp av en analyse av følsomheten på resultatet. (Lindholm et al. 2008)

⁷ NoSerC (Norwegian Service Centre for Climate Modelling) ble etablert i 2000, med overordnet mål om å legge til rette effektiv klimaforskning i Norge, ved å gi teknisk assistanse innen områdene datahåndtering, analyse og beregningsorientert effektivitet av klimamodeller. (NoSerC)

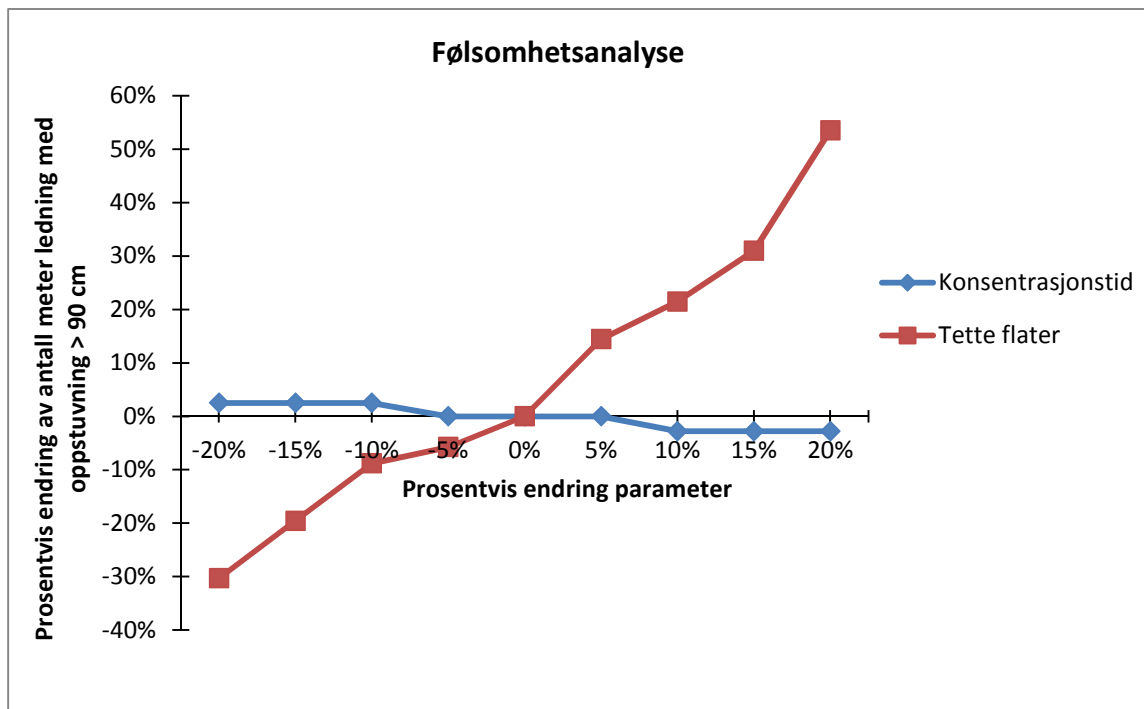
I kapittel 7.4 er det vist hvilke verdier for ulike hydrologiske parametere som er benyttet i modellen. Overflatemagasineringsen som samler små vannmengder på overflaten antas å ha liten innvirkning på modellresultatet. Det hydrologiske tapet som korrigerer for det vannet som ikke når ledningsnettets er vanskelig å anslå, og evapotranspirasjonen antas å være av liten betydning ved korte regn. Den valgte tid-arealkurven beskriver delfeltene med en rektangulær form, og det antas at valg av kurve ikke vil gi store utslag på modellresultatene. (Olsen 2011)

Konsentrasjonstiden er satt til 7 minutter for alle delfeltene i modellen, men er i realiteten avhengig av terrenghelning, utforming, og overflatens dekke, som kan være vanskelig å bestemme. (Olsen 2011) Konsentrasjonstiden antas å være av betydning for resultatene.

Arealet av de tette flatene bidrar til overflateavrenningen i modellen, og denne parameteren vil i noen tilfeller bestemmes ved hjelp av kartstudier og overslagsberegninger. Det kan være utfordrende å bestemme hvor stor andel av de tette flatene som i realiteten bidrar til avrenning i avløpsnettets.

Følsomhetsanalysen utføres på parameterne tette flater og konsentrasjonstid, som er de to parameterne som antas å ha størst påvirkning på modellresultatet. I modellsimuleringen benyttes et regn med 20-års gjentaksintervall uten klimafaktor, og det er valgt å se på resultatene av antall meter ledning med kritisk oppstuvning.

Figur 35 viser resultatene av følsomhetsanalysen. Kurvene viser prosentvis endring i antall meter ledning med kritisk oppstuvning ved endringer av parameterne. Det sees at ved økning av andel tette flater øker antall ledninger med kritisk oppstuvning, og en reduksjon av andel tette flater reduserer antall meter ledning med kritisk oppstuvning. Det sees en trend av en lineær sammenheng mellom modellresultatet og endring av andel tette flater, men en økning av andel tette flater gir større utslag på resultatet enn en reduksjon av andel tette flater. Endring av konsentrasjonstiden gir også økning og reduksjon av antall meter ledning med kritisk oppstuvning, men det sees at konsentrasjonstiden har langt mindre påvirkning av modellresultatet enn andel tette flater.

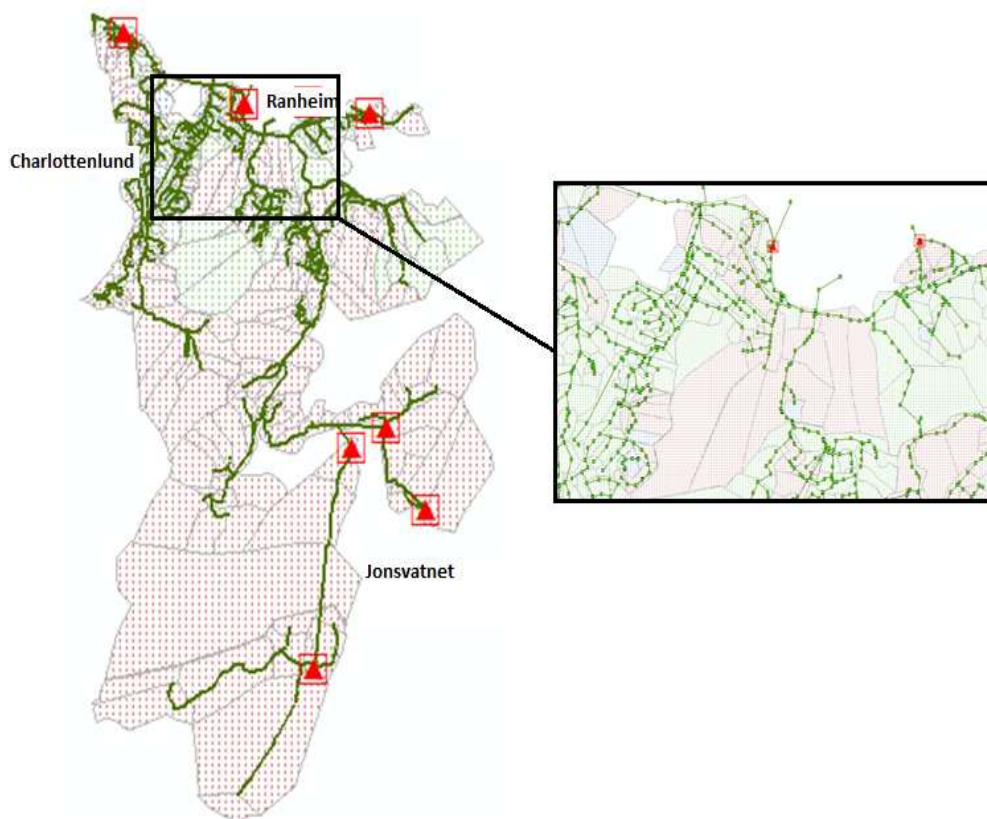


Figur 35: Resultater fra følsomhetsanalysen.

8.3 Flomanalyse – konsekvenser av klimaendringer

8.3.1 Oppstuvning i avløpsnettet

Hver av de valgte regnhendelsene blir simulert i avløpsmodellen med og uten klimafaktor for å undersøke hvilke konsekvenser klimaendringene kan gi. Figur 36 viser et utsnitt av analyseområdet hvor det oppstår oppstuvninger over 90 cm i ledningene for alle benyttede regnhendelser. Dette utsnittet er derfor benyttet i resten av oppgaven ved grafiske fremstillinger av resultatene.



Figur 36: Oversiktsbilde av modellen, og utsnitt av området hvor kritisk oppstuvning opptrer. Modellen er vist med nedbørsfelt, pumpestasjoner, ledninger og kummer.

Av tabell 18 ser man antall kummer som får kritisk oppstuvning med og uten klimafaktor. Den prosentvise økningen på grunn av klimafaktoren er fra 63 % til 145 % for de ulike gjentaksintervallene.

Tabell 18: Oversikt over antall kummer med oppstuvning mer enn 90 cm over topp rør for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.

Gjentaksintervall	Antall kummer med oppstuvning > 90cm		Økning antall kummer	Prosentvis økning
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor		
2 år	16	26	10	63 %
5 år	26	56	30	115 %
10 år	29	71	42	145 %
20 år	36	81	45	125 %
50 år	59	102	43	73 %
100 år	66	111	45	68 %

Til sammenligning viser resultatene fra DHIs analyse (König 2011) en økning på 94 % for et 20-års gjentaksintervall fra år 2000 til år 2100 for scenarioet med høy framskrivning og 100 års stormflo. Olsen (2011) fant i sin masteroppgave en økning på mellom 70- og 110 % fra de

opprinnelige historiske regnene til oppskalerte regn med 50 % økning av regnintensiteten. Forskjeller i resultatene kan komme av ulike forutsetninger i avløpsmodellene i tillegg til ulike regnhendelser, men det sees en klar likhet mellom analysene i form av den høye økningen som følge av økt regnintensitet.

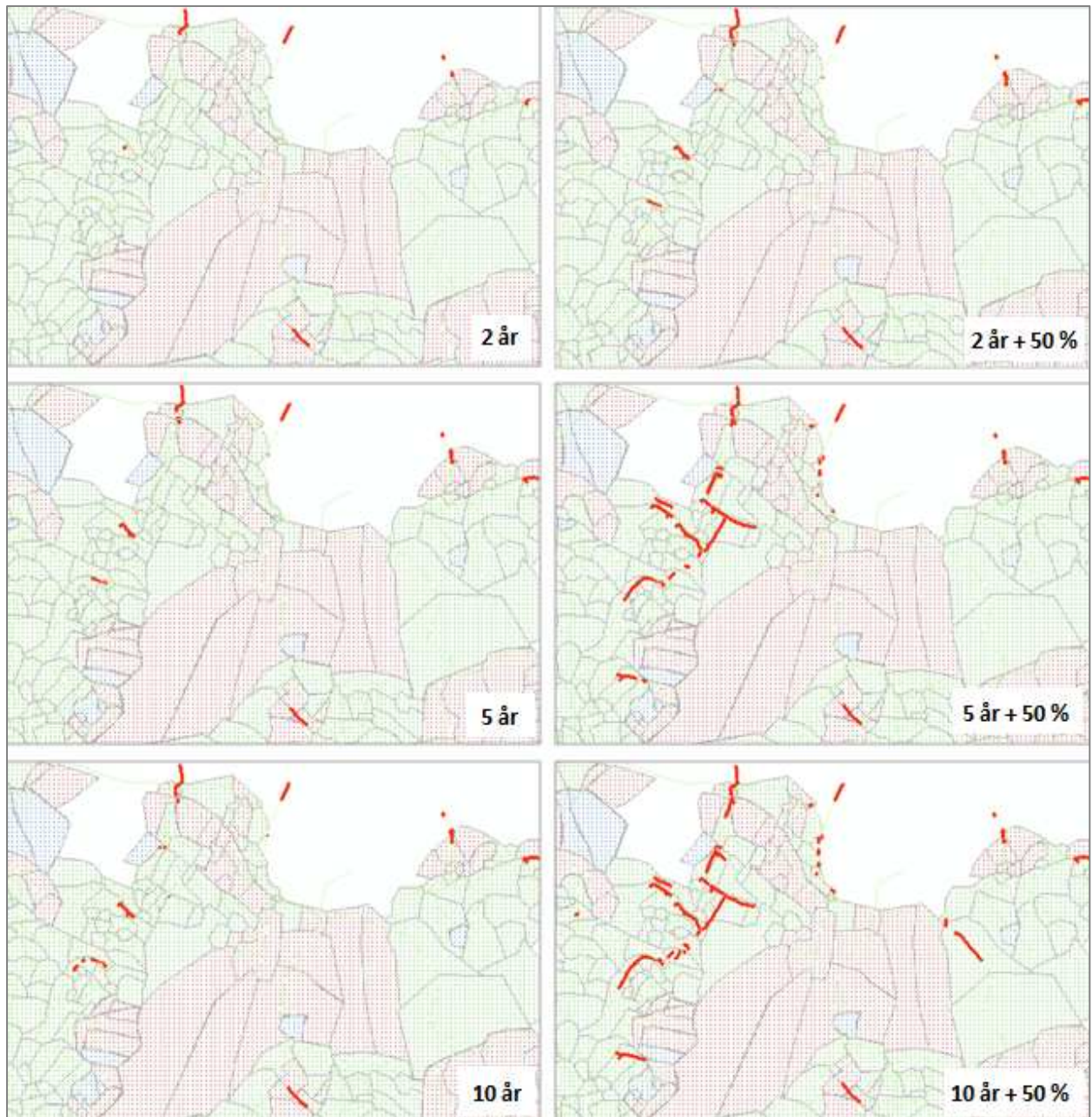
Med tanke på høydekravet fra laveste sluk i kjeller til tilknytningspunktet i hovedledningen, vil oppstuvning i ledningene være et mer interessant mål for kjelleroversvømmelser. Av tabell 19 ser man endringer i antall meter ledning som får kritisk oppstuvning ved regn med og uten klimafaktor. Den prosentvise økningen på grunn av klimafaktoren er fra 42 % på det laveste, til 168 % på det høyeste.

Tabell 19: Oversikt over antall meter ledninger med kritisk oppstuvning for ulike gjentakintervall med og uten klimafaktor.

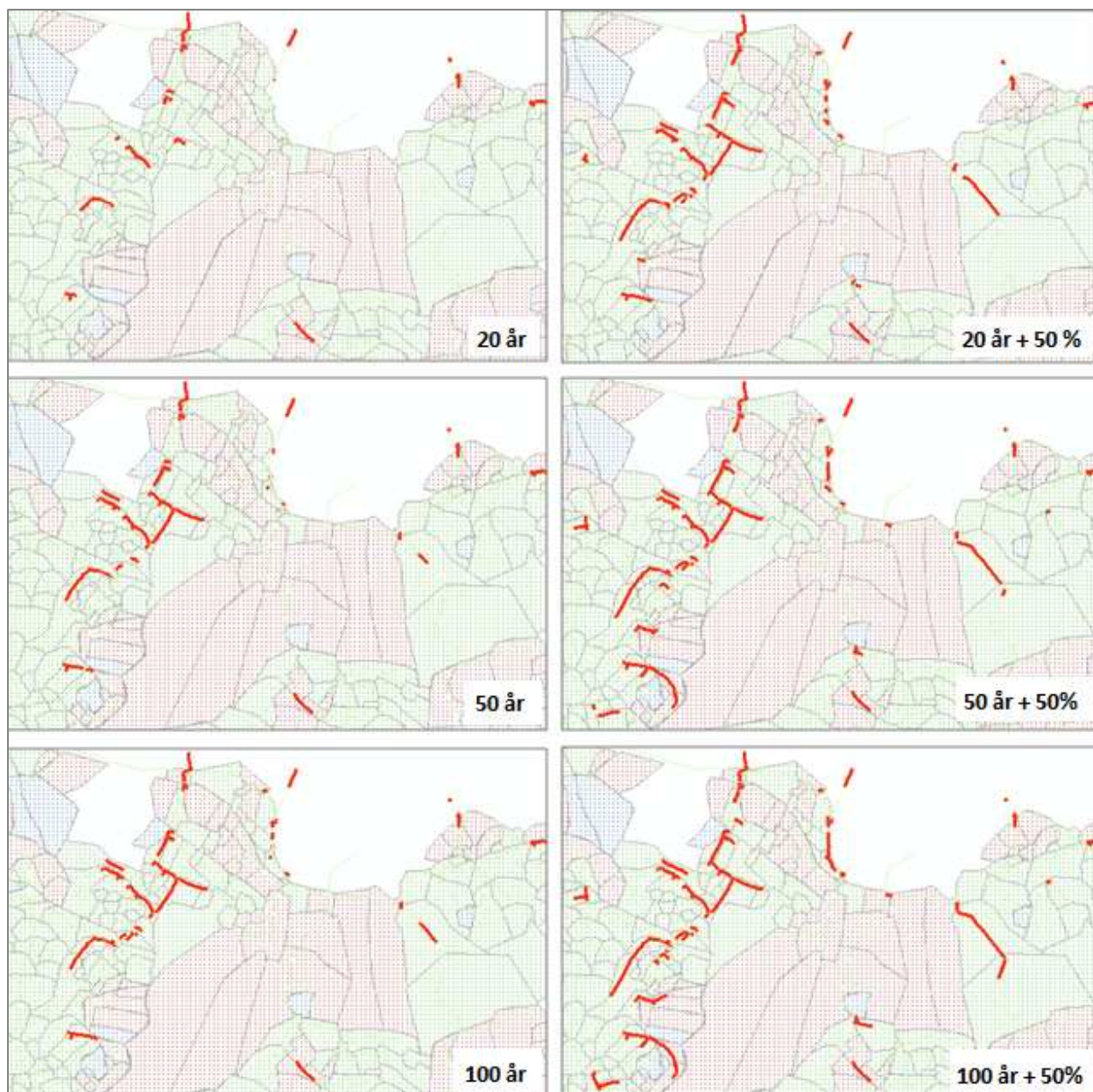
Gjentakstintervall	Antall meter ledning med oppstuvning > 90 cm		Økning antall meter	Prosentvis økning
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor		
2 år	860	1220	360	42 %
5 år	1305	2957	1652	127 %
10 år	1389	3721	2332	168 %
20 år	1799	4158	2359	131 %
50 år	3043	5204	2161	71 %
100 år	3440	5810	2370	69 %

Spranget mellom laveste og høyeste prosentvise økning er større for antall meter ledning enn for antall kummer med kritisk oppstuvning. Størst prosentvis økning sees ved et regn med 10 års gjentakintervall for både kummer og ledninger. Maks prosentvis økning er høyere for antall meter ledning enn antall kummer med kritisk oppstuvning.

Figur 37 og figur 38 viser utsnitt av modellen hvor det inntreffer oppstuvning over 90 cm i ledningene for de ulike gjentakintervallene med og uten oppskalering av regnintensiteten.



Figur 37: Oppstuvning i ledninger for gjentakintervall 2, 5 og 10 år, med og uten klimafaktor. Røde ledninger viser oppstuvning over 90cm.



Figur 38: Oppstuvning i ledninger for gjentaksintervall 20, 50 og 100 år, med og uten klimafaktor. Røde ledninger viser oppstuvning over 90cm.

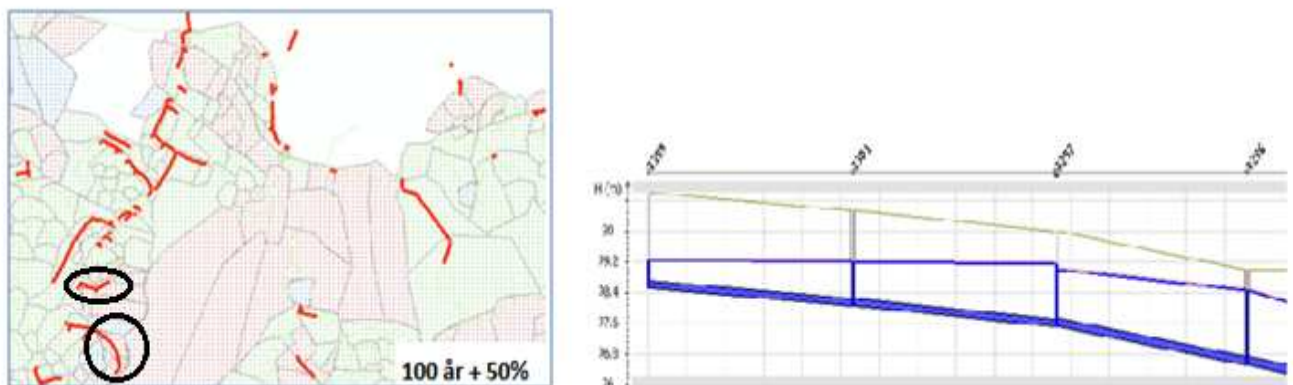
8.3.2 Kjelleroversvømmelser

Resultatene for oppstuvning i ledningene og kummene i modellen sier ikke noe om hvilke områder ledningene ligger i, og hvor mange hus som er tilknyttet ledningene. For å få en oversikt over hvor mange hus som er i fare for kjelleroversvømmelse, er antall hus telt manuelt. Kartgrunnet i modellen mangler data for bygninger og veger enkelte steder, og det er derfor benyttet supplerende informasjon fra karttjenesten på Trondheim kommunes hjemmeside. (Trondheim kommune 2012b) Det finnes ingen informasjon om hvor stikkledningene ligger i modellen eller i kartene. Hvilke bygninger som er tilknyttet ledninger med oppstuvning er antatt etter bygningenes lokalisasjon, og vurdert etter skjønn. Ved

oppstuvning langs større bygninger som antas å være rekkehus etc., er antall kjelleroversvømmelser justert etter antatt antall boenheter. Det er videre antatt at alle bygningene har kjellere. 90 cm er valgt som dimensjonerende høyde for oppstuvning som kan føre til kjelleroversvømmelser.

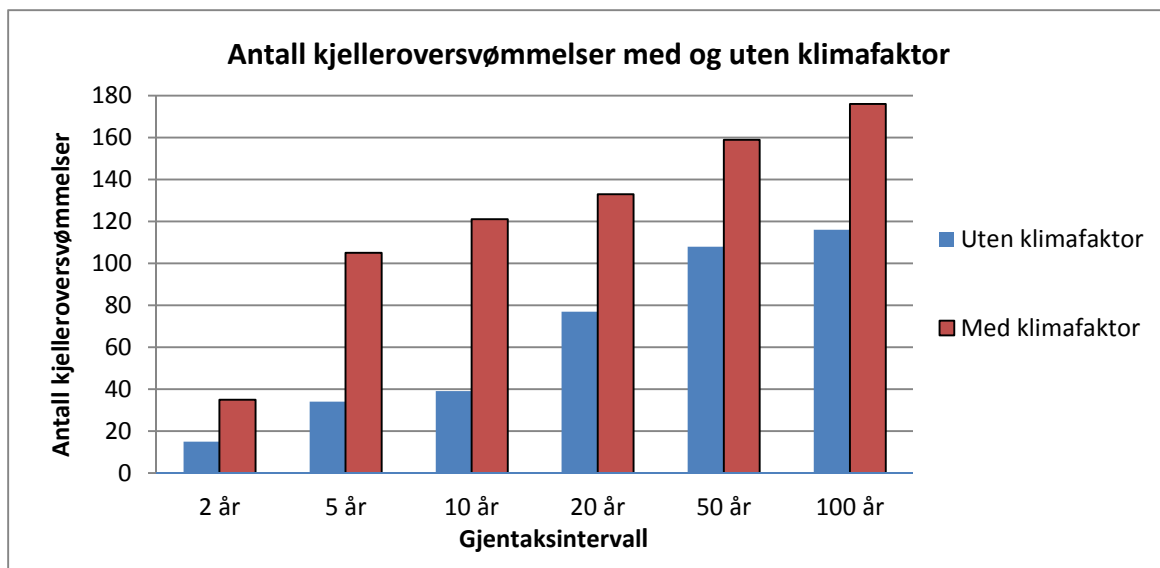
På grunn av retningslinjene som ble benyttet før 1980, vil det imidlertid være knyttet større usikkerheter for resultatene da flere ledningsstrekker er anlagt tidligere enn 1980.

Etter en nærmere gjennomgang av ledningene med oppstuvning over 90 cm, ble det funnet at to av ledningsstrekke med oppstuvning i modellen er overvannsledninger i et separatsystem, vist i figur 39. Overvannsledningene har ikke direkte tilknytning til sluk i kjellere, men dersom oppstuvningen går over terrengoverflaten, kan vann fra kummer og sandfang forårsake oversvømmelser og skader på bygninger avhengig av terrengutformingen. Drensledninger rundt bygninger vurderes til ikke å bidra til kjelleroversvømmelser i denne betraktningen, da det sees på korte regnhendelser. De aktuelle overvannsledningene har ikke oppstuvning over terrengoverflaten ved et 100-års regn med klimafaktor, og er derfor ikke tatt med som grunnlag for potensielle oversvømmelser i bygningene.



Figur 39: Bildet til venstre viser hvilke ledninger som er overvannsledninger, og som ikke bidrar til kjelleroversvømmelser. Bildet til høyre viser lengdeprofilen til et av ledningsstrekke, hvor det sees at oppstuvningen er over 90 cm, men ikke over terreng.

Av figur 40 og tabell 20 ser man antall kjelleroversvømmelser ved regnhendelser med og uten klimafaktor. Antall kjelleroversvømmelser øker ved økende gjentaksintervall både med og uten klimafaktor.

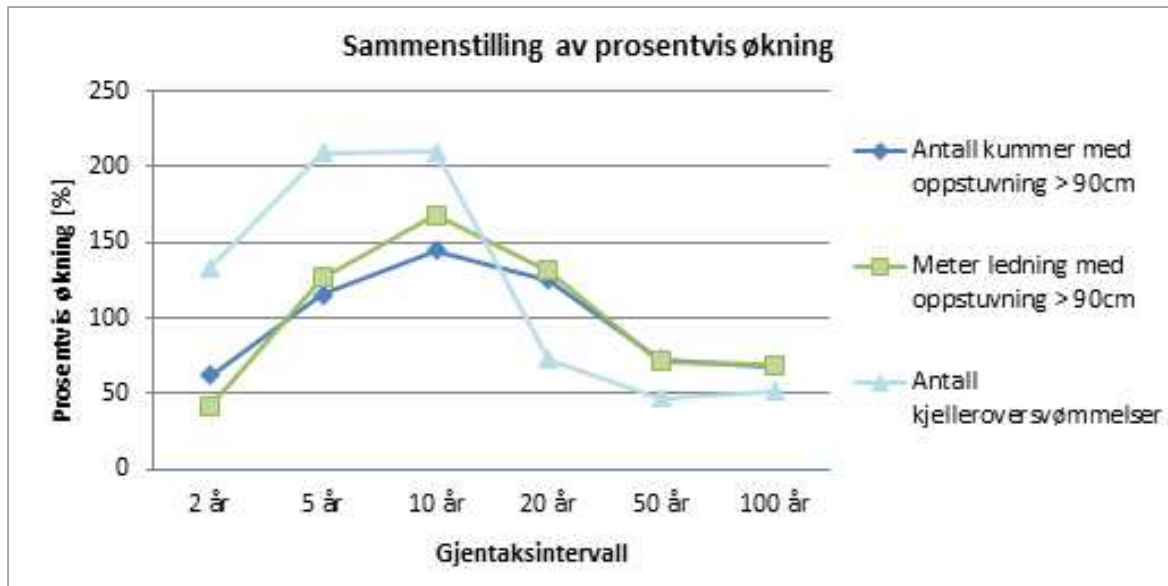


Figur 40: Antall kjelleroversvømmelser for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.

Tabell 20: Antall boliger i fare for kjelleroversvømmelse for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor.

Gjentaksintervall	Antall boliger i fare for kjelleroversvømmelse		Økning antall kjelleroversvømmelser	Prosentvis økning
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor		
2 år	15	35	20	133 %
5 år	34	105	71	209 %
10 år	39	121	82	210 %
20 år	77	133	56	73 %
50 år	108	159	51	47 %
100 år	116	176	60	52 %

Sammenlignet med oppstuvningen i kummer og ledninger er den prosentvise økningen høyere ved gjentaksintervall lavere enn 10 år, og lavere ved høye gjentagsintervall, som vist i figur 41. Økningen avtar etter 10-års gjentaksintervall, og flater ut ved et 50-års gjentaksintervall. Dette kan tyde på at det er nådd en slags metning i avløpssystemet i de områdene som er utsatt for kjelleroversvømmelser allerede ved 10-års gjentasintervall. Kurvene viser at antall kjelleroversvømmelser avtar mer enn de andre to kurvene etter 10-års gjentaksintervall. En grunn til at den prosentvise økningen er lavere for kjelleroversvømmelser ved høye gjentaksintervall er at noen av ledningsstrekene med kritisk oppstuvning er overvannsledninger som er antatt til ikke å være bidragende til kjelleroversvømmelser.



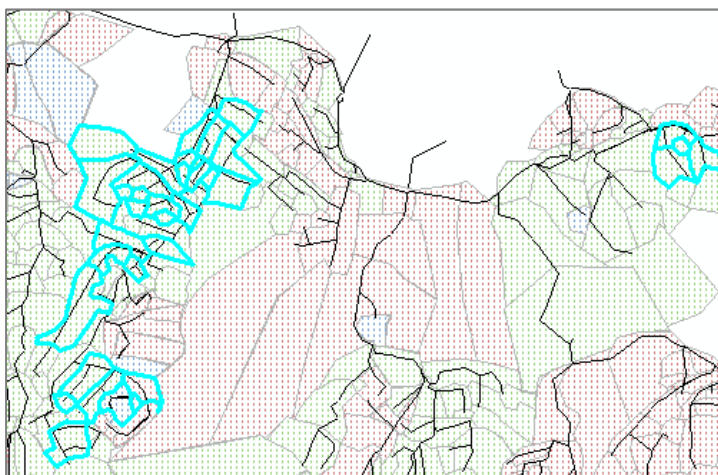
Figur 41: Sammenstilling av prosentvis økning av oppstuvning og kjelleroversvømmelser, som følge av klimafaktoren for de ulike gjentaksintervallene.

8.4 Analyse av tilpasningstiltak mot klimaendringene

Målet med klimatilpasningstiltakene er å undersøke om antall kjelleroversvømmelser ved regnhendelser med klimafaktor kan reduseres til samme, eller lavere antall kjelleroversvømmelser som opptrer uten klimafaktor. Tiltakene vil da redusere de kjellerskadene som forventes 100 år frem i tid, ned til de skader som sees for dagens situasjon.

8.4.1 Frakopling av takflater

Takflater er koblet fra ulike delfelt som er tilknyttet, eller ligger oppstrøms ledninger med oppstuvning over 90 cm. Delfeltene er vist i figur 42.



Figur 42: Delfeltene som er endret i tiltaket med frakoplede takflater.

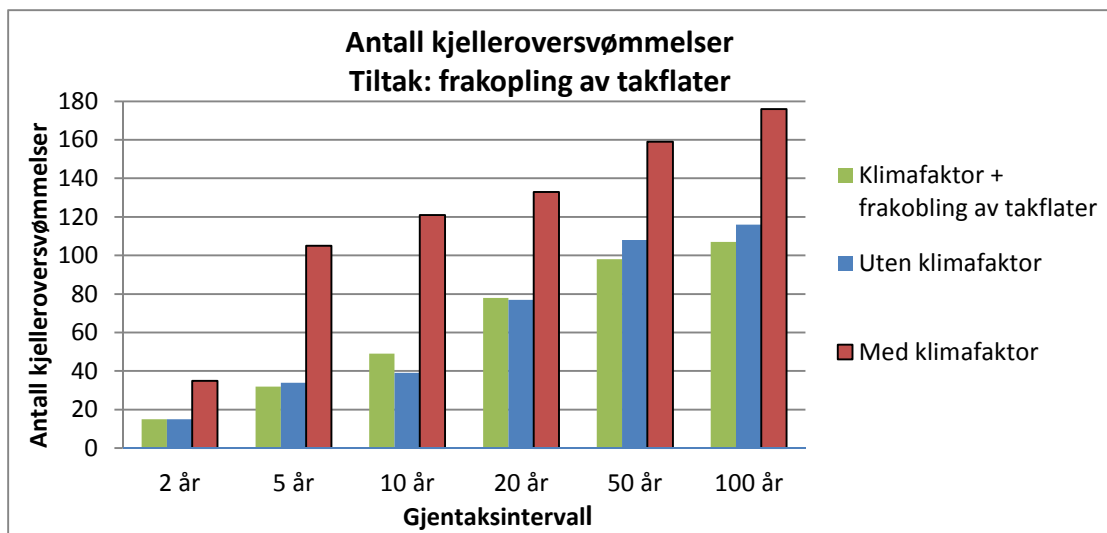
Da de aller fleste kjelleroversvømmelsene ved et 100-årsregn med klimafaktor finner sted i Charlottenlund avløpssone er tiltaket prioritert her, med unntak av tre delfelt øst i Ranheim avløpssone. Det er forsøkt å endre færrest mulig delfelt i området for å få en tilfredsstillende reduksjon av antall kjelleroversvømmelser. I modellen som er benyttet skilles ikke veg- og takarealer i innstillingene for hvor stor prosentandel av arealet i delfeltene som er tette flater. Takarealene er derfor beregnet manuelt etter bygningslaget i modellen hvor disse er tilgjengelig, mens for delfelt som mangler bygningsmasse i modellen er dette arealet anslått etter kartstudier. Det er antatt at alle bygninger innenfor et delfelt er tilkoblet ledningsnett i nåværende situasjon. Totalt er 45 201 m² takflater er koblet fra avløpsnett. Andel tette flater som er endret for hvert delfelt er vist i vedlegg 5.

I tabell 21 vises antall kjelleroversvømmelser for dagens situasjon, og en fremtidig situasjon med klimafaktor, med og uten frakopling av takflater som tiltak. Det sees at tiltakets effekt for det meste tilfredsstillende målet om å få ned antall kjelleroversvømmelser til dagens nivå. Ved 10-års gjentaksintervall gjenstår det 10 kjelleroversvømmelser for å komme ned på dagens nivå.

Tabell 21: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (frakopling av takflater) for ulike gjentaksintervall.

Gjentaksintervall	Uten tiltak		Med tiltak: frakopling av takflater
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor	Med klimafaktor
2 år	15	35	15
5 år	34	105	32
10 år	39	121	49
20 år	77	133	78
50 år	108	159	98
100 år	116	176	107

En sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak er vist i figur 43. Resultatene for oppstuvning over 90 cm i ledningene i modellen er vist i vedlegg 2.

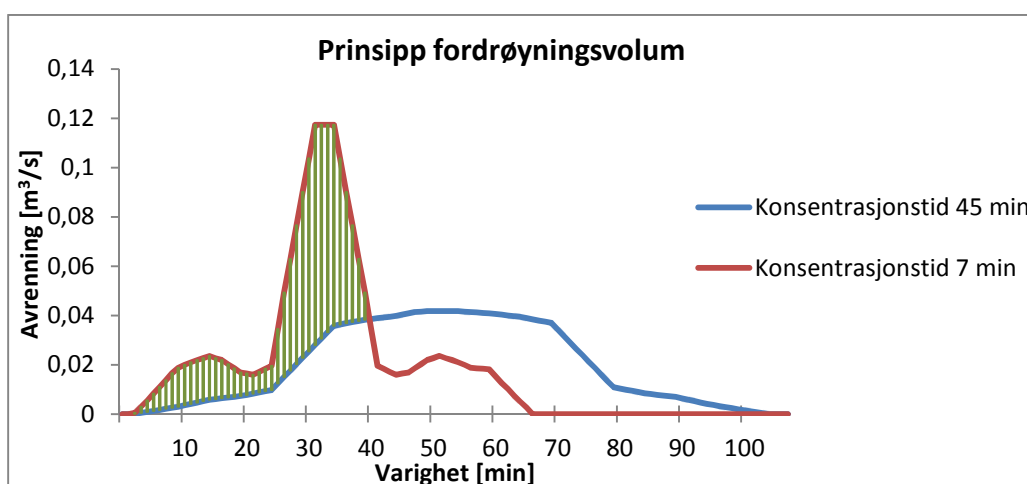


Figur 43: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten frakobling av takflater som tiltak.

8.4.2 Fordrøyning

For å simulere en fordrøyning av overflatevannet, er konsentrasjonstiden endret i de samme delfeltene som ble endret ved frakobling av takflater, vist i figur 42. Konsentrasjonstiden er endret fra 7 til 45 minutter, da dette gir tilfredsstillende reduksjon av antall kjelleroversvømmelser.

Ved en endring i konsentrasjonstiden vil overflatevannet bruke lengre tid på å nå avløpssystemet, og således vil tilløpskurven til systemet endre seg. Ved en sammenligning av avrenningskurvene for delfeltene før og etter endring av konsentrasjonstiden, kan det forutsettes at disse kan representere tilløps- og utløpskurven som benyttes ved hydraulisk dimensjonering av fordrøyningsanlegg. Figur 44 viser avrenningskurvene med og uten endret konsentrasjonstid, og det skraverte arealet mellom kurvene som tilsvarer nødvendig fordrøyningsvolum.



Figur 44: Metode for beregning av nødvendig fordrøyningsvolum.

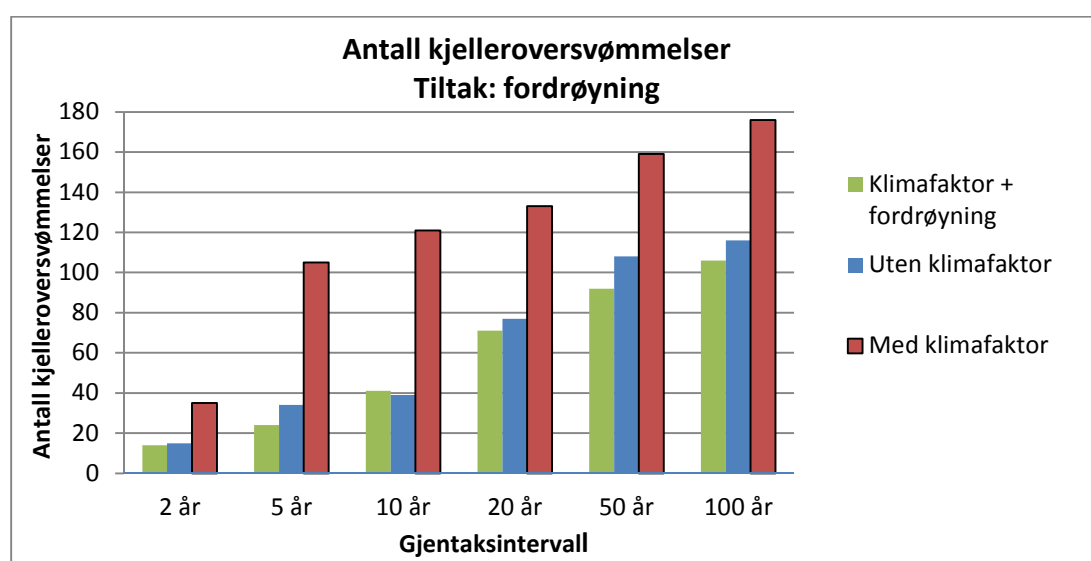
Ut fra rapportene i Rosie har tiltaket endret maksimal avrenningsintensitet i delfeltene med 60-67 % og forskjøvet maksimal avrenningsintensitet fra 34 minutter til 53 minutter etter regnets start. Beregning av avrenningen viser at de aktuelle delfeltenes fordrøyningsvolum er 52-54 %. De endrede delfeltenes grunnlagsdata før og etter tiltaket er vist i vedlegg 6.

I tabell 22 vises resultatene i form av antall kjelleroversvømmelser for dagens nivå uten klimafaktor, og med klimafaktor for situasjonen med og uten fordrøynings tiltaket. Det sees at tiltakets effekt tilfredsstiller målet om å få ned antall kjelleroversvømmelser til dagens nivå. Som ved tiltaket med frakopling av takflater, er antall kjelleroversvømmelser ikke kommet under dagens nivå ved 10-års gjentaksintervall, men for dette tiltaket er differansen kun to.

Tabell 22: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (fordrøyning) for ulike gjentaksintervall.

Gjentaksintervall	Uten tiltak		Med tiltak: fordrøyning
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor	Med klimafaktor
2 år	15	35	14
5 år	34	105	24
10 år	39	121	41
20 år	77	133	71
50 år	108	159	92
100 år	116	176	106

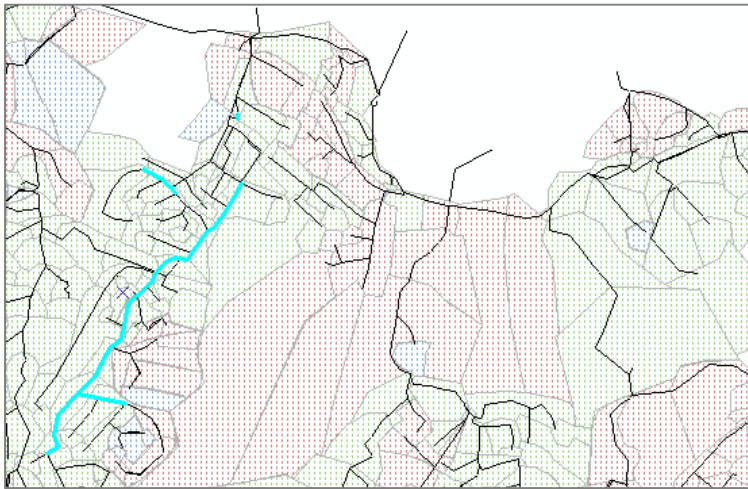
En sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak er vist i figur 45. Resultatene for oppstuvning over 90 cm i ledningene i modellen kan sees i vedlegg 3.



Figur 45: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten fordrøyning som tiltak.

8.4.3 Økning av ledningsdimensjoner

Ledningsdimensjonene er økt i Charlottenlund avløpssone, i boligområdene med de fleste flaskehalsene. Det er tilstrebet å endre færrest mulig ledningsstrek, og dimensjonene er endret minst mulig til en større standard ledningsdimensjon for å oppnå ønsket effekt på reduksjon av antall kjelleroversvømmelser. Dimensjonsendringen er utført på 35 ledninger, som gir en total ledningslengde på 1507 meter. Dette er omtrent 26 % av antall meter ledning med oppstuvning over 90 cm ved et 100-års gjentaksintervall med klimafaktor, og 1,8 % av antall meter ledning i hele avløpsmodellen. De endrede ledningenes plassering er vist i figur 46, og dimensjonene før og etter tiltaket kan sees i vedlegg 7.



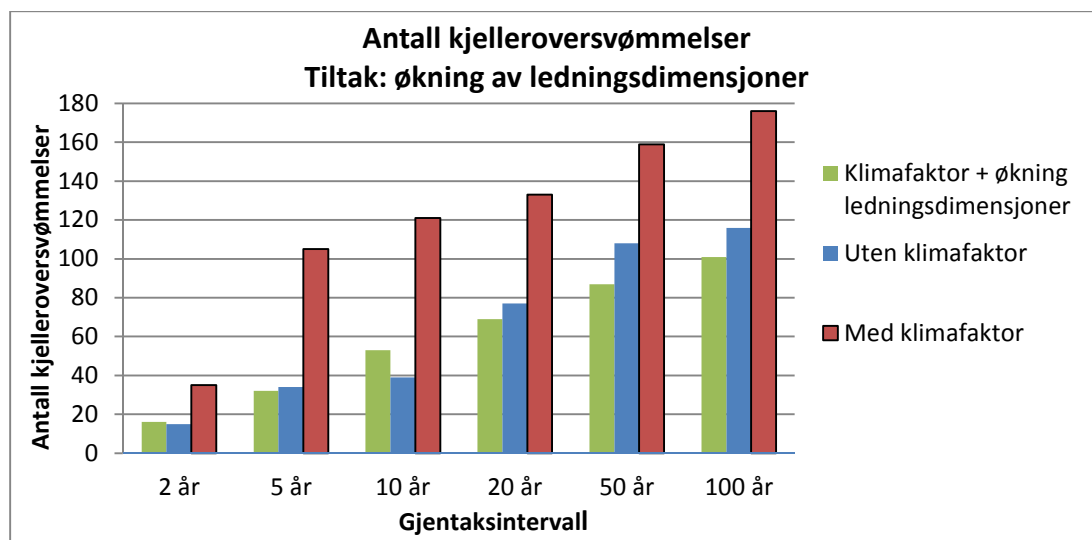
Figur 46: De merkede ledningene har fått større dimensjon i tiltaket.

I tabell 23 vises resultatene i form av antall kjelleroversvømmelser for dagens situasjon uten klimafaktor, og med klimafaktor for situasjonen med og uten tiltaket. Det sees at tiltakets effekt for det meste tilfredsstillende målet om å få ned antall kjelleroversvømmelser til dagens nivå. Med tiltaket fulgte en reduksjon av antall meter ledning med oppstuvning over 90 cm øverst i feltet, mens nedstrøms fikk enkelte ledninger oppstuvning hvor de ikke hadde hatt oppstuvning uten tiltak. Dette ga likevel ikke et stort utslag på resultatet av antall kjelleroversvømmelser, da bygningsmassen ikke er så konsentrert i det aktuelle området nedstrøms. Tiltaket er minst effektivt ved 10-års gjentaksintervall i henhold til målet om å komme under antall kjelleroversvømmelser som ved dagens situasjon uten klimafaktor.

Tabell 23: Antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak (økning av ledningsdimensjoner) for ulike gjentaksintervall.

Gjentaksintervall	Uten tiltak		Med tiltak: økning av ledningsdimensjon
	Uten klimafaktor	Med klimafaktor	Med klimafaktor
2 år	15	35	16
5 år	34	105	32
10 år	39	121	53
20 år	77	133	69
50 år	108	159	87
100 år	116	176	101

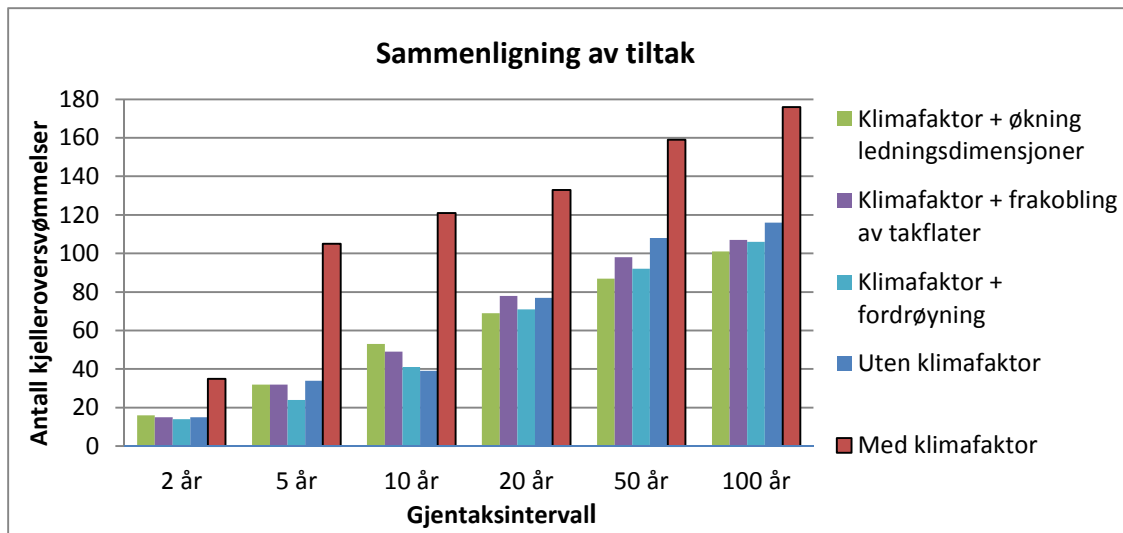
En sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten tiltak er vist i figur 47. Resultatene for oppstuvning over 90 cm i ledningene i modellen kan sees i vedlegg 4.



Figur 47: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser med og uten økning av ledningsdimensjoner som tiltak.

8.4.4 Sammenligning av tiltak

Figur 48 viser resultatene av antall kjelleroversvømmelser for situasjonene med og uten de ulike tiltakene. Økning av ledningsdimensjoner har størst effekt på de høye gjentaksintervall, og fordrøyning er mest effektiv ved lave gjentaksintervall. Som tidligere nevnt er alle tiltakene minst effektive ved et 10-års gjentaksintervall, hvor ingen av tiltakene klarer å redusere skadeomfanget helt ned til dagens nivå uten klimafaktor.



Figur 48: Sammenligning av antall kjelleroversvømmelser ved ulike tiltak.

9 Økonomisk analyse

I den økonomiske analysen er det valgt å se på de økonomiske konsekvensene som følge av økt regnintensitet de neste 100 år, målt i kostnader på grunn av oversvømmelse i kjellere. Ved utførelse av klimatiltakene i dag vil de, som vist i modellsimuleringene, redusere antall kjelleroversvømmelser, og derav også skadekostnadene. Den økonomiske nytteverdien dette gir vil sammenlignes med tiltakenes investeringskostnad for å finne lønnsomheten av en gjennomføring av prosjektene. Tiltakenes investeringskostnader vurderes dermed opp mot gevinsten som fås ved å redusere kjelleroversvømmelser. Det er valgt å utelate drifts- og vedlikeholdskostnader på grunn av manglende datagrunnlag for LOD-tiltak. For å kunne sammenligne kostnadene som løper i løpet av 100 år er det valgt å benytte nåverdimetoden.

9.1 Nåverdimetoden

Det er ikke mulig å forutsi når regn med ulike gjentakintervall vil oppstå fra i dag, og 100 år frem i tid. Derfor benyttes gjennomsnittskostnaden per år for alle kjelleroversvømmelser som oppstår i løpet av 100-årsperioden i den økonomiske analysen. For å sammenligne kostnadene som forventes i perioden, benyttes nåverdimetoden. Dette innebærer at den fremtidige kostnadsbesparelsen som fås på grunn av tilpasningstiltakene hvert år, neddiskonteres til investeringstidspunktet i år 0, og summeres til netto nåverdi (NNV). På denne måten fås nettoverdien i år 0, for de kontantstrømmene som løper i prosjektperioden. (Finansdepartementet 1997) Den generelle formelen for netto nåverdi er:

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

Formel 7: Netto nåverdi (Finansdepartementet 1997)

Hvor:

I_0 = investeringsutgift i år 0

U_t = nytteoverskudd i år t

k = diskonteringsrenten, forutsettes konstant

For at investeringsprosjektet skal være lønnsomt, må netto nåverdi være positiv. (Finansdepartementet 2005)

Nåverdibeløpet blir høyere jo større det fremtidige beløpet er. Jo lengre frem i tid et gitt beløp ligger, jo mindre verdt er det i dag, som vil si at nåverdien synker når antall år betraktet i prosjektet stiger. Nåverdien blir også mindre jo høyere diskonteringsrenten er. (Bøhren & Gjærum 1999)

Diskonteringsrenten skal ivareta kapitalkostnaden, som er den ulempen en får ved å binde penger opp i prosjektet fremfor å investere kapitalen. Kapitalkostnaden består av inflasjonskostnaden og en utålmodighetskostnad. Disse elementene belaster diskonteringen med prisstigningen, og ulempen ved å måtte utsette en investering til et senere tidspunkt. Diskonteringsrenten kan også ta høyde for usikkerheten om hva fremtidige innbetalinger vil bli. (Bøhren & Gjærum 1999)

I denne oppgaven er det valgt en diskonteringsrente på 4 %, med utgangspunkt i regjeringens inflasjonsmål på 2,5 % årlig vekst over tid (Norges Bank 2006), og et tillegg for usikkerhet. 4 % er en normal diskonteringsrente som benyttes for normale offentlige tiltak med moderat systematisk risiko. (Finansdepartementet 2005)

9.2 Opptredende regnhendelser i løpet av analyseperioden

I den økonomiske analysen som spenner seg over en periode på 100 år, er et viktig moment å vite hvor mange ganger regnhendelser med ulike gjentaksintervall vil opptre for å beregne de totale kostnadene i perioden. Man kan ikke vite på hvilket tidspunkt i løpet av disse årene de ulike regnhendelsene opptrer, men ved benyttelse av IVF-kurvens oppbygning kan det settes opp en enkel oversikt over hvor mange ganger de ulike regnhendelser kan opptrer. Det antas fra historiske data at en 100-års regnhendelse opptrer en gang i løpet av 100 år. Videre vil et 50-årsregn opptre to ganger i løpet av 100 år, et 20-årsregn opptrer fem ganger i løpet av 100 år, osv. Det sees på flere gjentaksintervall over 100 år i denne oppgaven, og IVF-kurvens oppbygning tilsier at det for et gitt gjentaksintervall er regnhendelser *lik eller større* enn det aktuelle gjentaksintervall som opptrer. Opptredende antall regnhendelser for et 20-årsregn i løpet av 100 år blir da tre i stedet for fem, da et av de fem regnintensitetene er 50-årsregnet, og et er 100-årsregnet. På bakgrunn av denne tankegangen er det i den økonomiske analysen benyttet verdier for antall opptredende regnhendelser for de ulike gjentaksintervallene som vist i Tabell 24.

Tabell 24: Antall opptredende regnhendelser for ulike gjentaksintervall i løpet av en periode på 100 år.

Gjentaksintervall	Akkumulert antall regnhendelser som er større eller lik gjeldende gjentaksintervall	Antall opptredende regnhendelser med gjeldende gjentaksintervall
100 år	1	1
50 år	2	1
20 år	5	3
10 år	10	5
5 år	20	10
2 år	50	30
Sum	50	50

9.3 Kostnader ved kjelleroversvømmelser

Kommunen har som tidligere nevnt ikke fått rapportert at det har oppstått kjelleroversvømmelser i analyseområdet. For å bestemme kostnad for en kjelleroversvømmelse sees det på tilgjengelig statistikker.

VASK vannskadestatistikk inneholder data som er meldt fra skadeforsikringsselskaper siden 2007. Dataene dekker omtrent 80 % av det norske markedet, og inkluderer skader som har resultert i erstatning og som er tilstrekkelig kodet. Erstatningssummene som benyttes i vannskadestatistikken er anslått erstatning, som vil si utbetalte erstatninger, og i tillegg avsetninger for skader som har skjedd i den aktuelle perioden statistikken omfatter. (FNO 2012) Ved utvelgelse av koder i vannskadestatistikken fås resultater i form av antall skader og erstatningsbeløp. For skader på bygning med vanninntrenging utenfra er det funnet to årsaker av interesse som kan være forårsaket av avløpssystemet; *drenering* og *stopp i avløp, tilbakeslag*. VASK (FNO 2012) angir følgende beskrivelse av valgte årsaker:

Stopp i avløp. Tilbakeslag: Oversvømmelse i bygningen fordi vann trenger inn gjennom avløpsnettets eller pga. tett sluk, vannlås eller sanitærutstyr.

Drenering: Tett drenering, ekstraordinær nedbør eller snøsmelting eller større mengder overflatevann enn det dreneringen er dimensjonert for.

Da det i denne oppgaven sees på kjelleroversvømmelser ved oppstuvning i ledningsnett antas det at kategorien *stopp i avløp, tilbakeslag* sammenfaller best med skadeomfanget, enten som eneste årsak eller i kombinasjon med *drenering*. Tabell 25 viser resultatene fra VASK i antall skader og erstatningsbeløp. Statistikken inneholder data fra 2008 til og med 31.3.2012. (FNO 2012)

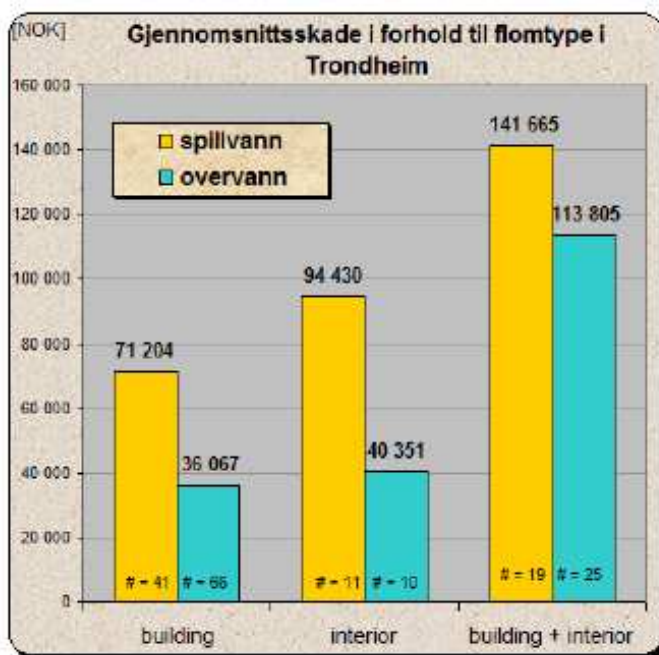
Tabell 25: Resultater fra VASK; erstatningsbeløp og antall skader. (FNO 2012)

År	Drenering		Stopp i avløp. Tilbakeslag	
	Antall skader	Erstatningsbeløp	Antall skader	Erstatningsbeløp
2008	993	kr 45 765 000	372	kr 32 260 000
2009	643	kr 29 544 000	205	kr 16 225 000
2010	1413	kr 79 349 000	252	kr 20 072 000
2011	2235	kr 118 935 000	320	kr 35 369 000
2012	155	kr 7 792 000	14	kr 445 000
Sum	5439	kr 281 385 000	1163	kr 104 371 000

Tabell 25 viser at *drenering* som årsak opptrer omtrent fem ganger oftere enn *stopp i avløp*. Det gjennomsnittlige erstatningsbeløpet per skadetilfelle er henholdsvis kr 51 734 og kr 89 742 for *drenering* og *stopp i avløp* som årsak. *Stopp i avløp* gir dermed et høyere skadeomfang enn *drenering* dersom hendelsen opptrer. Dersom begge hendelsene opptrer

samtidig antas det at summen av hvert tilfelle representerer skadeomfanget, som tilsvarer et gjennomsnittlig erstatningsbeløp på kr 141 478.

NORVAR har med en analyse av 378 forsikringskader i perioden 1995-1000 i Bærum og Trondheim funnet skadekostnader for kjelleroversvømmelser. Figur 49 viser en statistikk over registrerte skadedata for bygning og interiør i Trondheim kommune, fordelt etter flomtype. Det sees at erstatningsutbetalingen er vesentlig større dersom skaden er forårsaket av spillvann sammenlignet med skader forårsaket av overvann. Skadekostnadene avhenger av blant annet i hvilken grad kjelleren utnyttes, og om kjelleren møbleres. (NORVAR 2004)



Figur 49: Erstatningsutbetaling avhengig av flomtype. (NORVAR 2004)

Dersom en ser på skadekostnadene fra NORVAR for bygning og interiør forårsaket av spillvann (kr 141 665), samsvarer disse bra med erstatningsbeløpene fra VASK for summen av *drenering og stopp i avløp*. En kjelleroversvømmelse i fellessystemet fastsettes på grunnlag av overstående statistikker til 142 000 kr til beregninger i den økonomiske analysen.

9.4 Investeringskostnader for tilpasningstiltak

Investeringskostnadene til tiltakene er vurdert etter enhetspriser benyttet i VAV (Lindholm 2012a), og forslag fra Nilssen (2012) i Trondheim kommune.

Det benyttes følgende kostnadstall i den økonomiske vurderingen av de ulike tiltakene:

- **Frakopling av takflater: 40 kr/m²**
Frakopling av tette gateflater er oppgitt til å kunne koste 50 kr/m² i år 2002 i områder med enkle gjennomføringsforhold i VAV, mens det i Fredrikstad har vært nede i 15 kr/m². (Lindholm 2012a) Kostnaden på 40 kr/m² er satt etter antagelser om at prisen ligger i samme kostnadsklasse som frakopling av tette gateflater ved enkle forhold.
- **Fordrøyning: 5000 kr/m³**
Kostnaden er valgt etter forslag fra Nilssen (2012) i Trondheim kommune. Denne enhetsprisen gjelder for overslagsberegninger, og kan reduseres ved anleggelse av store basseng. Fordrøyningsanleggene i denne oppgaven forutsettes å bestå av flere mindre anlegg.
- **Økning av ledningsdimensjoner: 8000 kr/m**
Nilssen (2012) oppgir at prisområdet er fra 5000 kr til 15 000 kr avhengig av hvor mange ledninger som skal anlegges i grøfta. For utskiftning av spillvannsledning eller fellesledning foreslår Nilssen (2012) at prisen kan ligge på omtrent 8000 kr/m for ledninger som ligger i vei/gate. Da de fleste ledningene ligger i vei/gate settes derfor enhetsprisen til 8000 kr/m for økning av ledningsdimensjonen av spillvanns- og fellesledninger.

9.5 Resultater

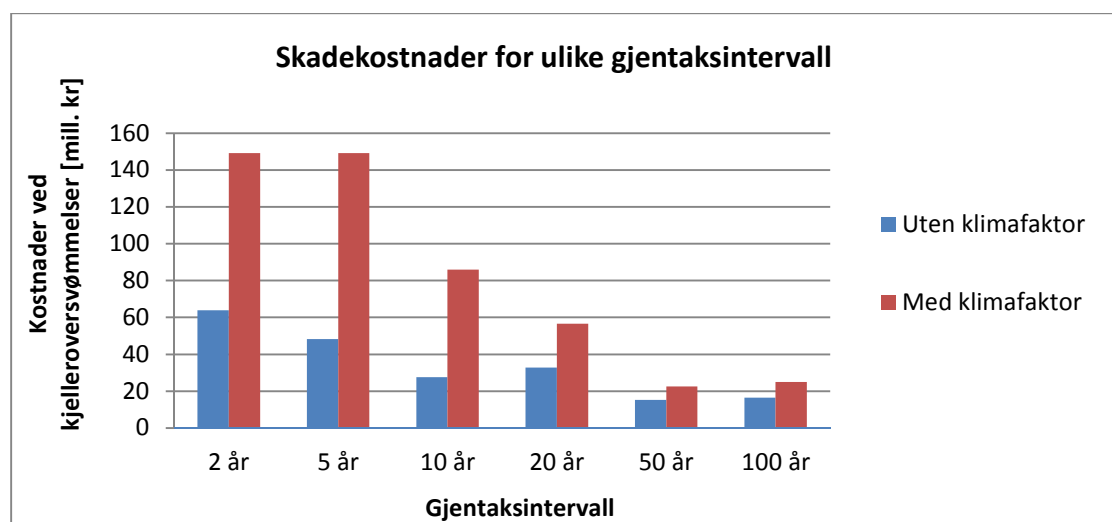
9.5.1 Situasjonen uten tilpasningstiltak

Tabell 26 viser skadekostnadene for de ulike gjentaksintervallene vist for situasjonen med og uten klimafaktor. De totale kostnadene i løpet av 100 år for hvert gjentaksintervall er beregnet med utgangspunkt i hvor mange ganger et regn med ulike gjentaksintervall forventes å opptre i løpet av perioden. Nåverdien av de totale kostnadene over 100 år er henholdsvis 50,1 mill. kr og 119,7 mill. kr for situasjonen uten klimaendringer, og situasjonen dersom regnintensiteten er 50 % høyere enn i dag.

Tabell 26: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall uten tiltak.

Gjentaksintervall	Uten klimafaktor		Med klimafaktor	
	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år
2 år	kr 2 130 000	kr 63 900 000	kr 4 970 000	kr 149 100 000
5 år	kr 4 828 000	kr 48 280 000	kr 14 910 000	kr 149 100 000
10 år	kr 5 538 000	kr 27 690 000	kr 17 182 000	kr 85 910 000
20 år	kr 10 934 000	kr 32 802 000	kr 18 886 000	kr 56 658 000
50 år	kr 15 336 000	kr 15 336 000	kr 22 578 000	kr 22 578 000
100 år	kr 16 472 000	kr 16 472 000	kr 24 992 000	kr 24 992 000
Sum		kr 204 480 000		kr 488 338 000
Nåverdi		kr 50 107 822		kr 119 667 222

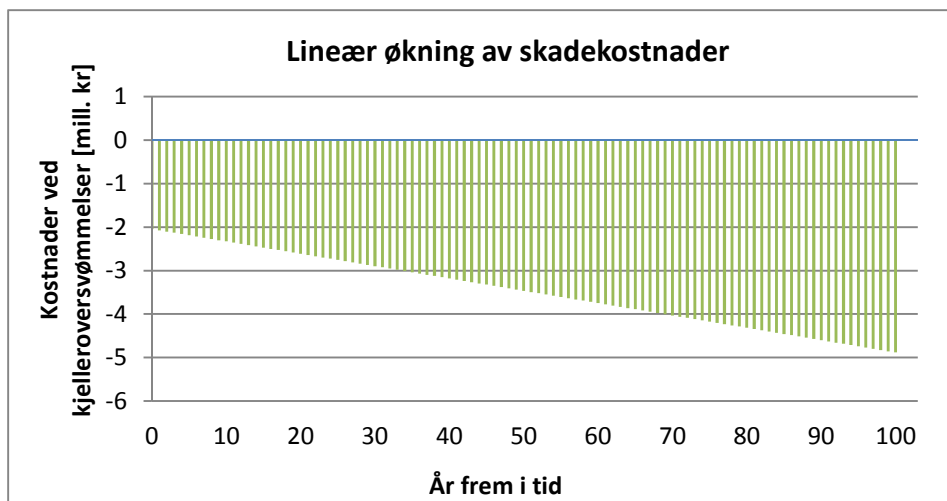
Figur 50 viser de totale skadekostnadene som opptrer for de ulike gjentaksintervallene. Selv om det er lavest antall kjelleroversvømmelser ved lave gjentaksintervall, vil disse opptre langt oftere enn de høyeste gjentaksintervallene i løpet av 100 år. Totalkostnaden er derfor høyest for de laveste gjentaksintervallene med og uten klimafaktor.



Figur 50: Totale skadekostnader for ulike gjentaksintervall med og uten klimafaktor over en periode på 100 år.

Inspirert av en dansk økonomisk analyse (COWI & NIRAS 2007) antas det at skadekostnadene stiger lineært fra i dag og 100 år frem i tid. Det antas at skadekostnadene følger den samme stigningen som DANVAs retningslinjer om lineært stigende klimafaktor i det neste århundret omtalt i kapittel 6.2.

Figur 51 viser de gjennomsnittlige årlige skadekostnadene for kjelleroversvømmelser med antagelsen om at skadekostnadene stiger lineært fra år 0 uten klimafaktor til år 100 med klimafaktor 1,5.



Figur 51: Årlige skadekostnader for kjelleroversvømmelser med antagelsen om at skadekostnadene stiger lineært fra år 0 til år 100.

Ved benyttelse av nåverdimetoden føres de nye årlige skadekostnadene i løpet av 100 år tilbake til år 0, og det fås **nåverdi: 66 788 166 kr** med antagelsen om en lineær økning av skadekostnadene. Denne nåverdien benyttes videre i den økonomiske analysen for økonomisk sammenligning av de ulike tiltakene.

9.5.2 Frakopling av takflater

Tabell 27 viser skadekostnader for ulike gjentaksintervall ved gjennomføring av tiltaket frakopling av takflater, og nåverdien etter prinsippet om en lineær økning av skadekostnadene over 100 år.

Tabell 27: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med tiltak frakopling av takflater.

Gjentaksintervall	Uten klimafaktor		Med klimafaktor	
	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år
2 år	kr 1 704 000	kr 51 120 000	kr 2 130 000	kr 63 900 000
5 år	kr 1 704 000	kr 17 040 000	kr 4 544 000	kr 45 440 000
10 år	kr 2 556 000	kr 12 780 000	kr 6 958 000	kr 34 790 000
20 år	kr 2 840 000	kr 8 520 000	kr 11 076 000	kr 33 228 000
50 år	kr 4 544 000	kr 4 544 000	kr 13 916 000	kr 13 916 000
100 år	kr 5 680 000	kr 5 680 000	kr 15 194 000	kr 15 194 000
Sum		kr 99 684 000		kr 206 468 000
Nåverdi skadekostnader				kr 30 702 510

Tabell 28 viser beregninger av investeringskostnad, og netto nåverdi ved gjennomføring av tiltaket. Investeringen forutsettes å gjennomføres i år 0. Resultatene viser at investeringskostnaden for tiltaket er 1,8 mill. kr, og ved gjennomføring av tiltaket fås en kostnadsbesparelse på omtrent 36 mill. kr. Netto nåverdi er positiv med en verdi på omtrent 34,3 mill. kr, som vil si at prosjektet anses som lønnsomt.

Tabell 28: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for tiltaket frakopling av takflater.

Enhetspris takflater	40	kr / m ²
Areal takflater	45 000	m ²
Investeringskostnad	1 800 000	kr
Nåverdi skadekostnader uten tiltak	66 788 166	kr
Nåverdi skadekostnader med tiltak	30 702 510	kr
Kostnadsbesparelse	36 085 656	kr
Investeringskostnad	1 800 000	kr
Netto nåverdi	34 285 656	kr

9.5.3 Fordrøyning

Tabell 29 viser skadekostnader for ulike gjentaksintervall ved gjennomføring av fordrøyningstiltaket, og beregnet nåverdi etter prinsippet om en lineær økning av skadekostnadene over 100 år.

Tabell 29: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med fordrøyningstiltak.

Gjentaksintervall	Uten klimafaktor		Med klimafaktor	
	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år	Kostnad per regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år
2 år	kr 1 704 000	kr 51 120 000	kr 1 988 000	kr 59 640 000
5 år	kr 1 704 000	kr 17 040 000	kr 3 408 000	kr 34 080 000
10 år	kr 1 988 000	kr 9 940 000	kr 5 822 000	kr 29 110 000
20 år	kr 2 556 000	kr 7 668 000	kr 10 082 000	kr 30 246 000
50 år	kr 3 834 000	kr 3 834 000	kr 13 064 000	kr 13 064 000
100 år	kr 5 112 000	kr 5 112 000	kr 15 052 000	kr 15 052 000
Sum		kr 94 714 000		kr 181 192 000
Nåverdi skadekostnader				kr 28 291 370

For å finne investeringskostnadene ved anleggelse av fordrøyningstiltak er fordrøyningvolumet beregnet etter er filene for avrenning i Rosie, og prinsippet forklart i kapittel 8.4.2. Det er tatt utgangspunkt i det største regnet som er benyttet, det vil si et 100-års regn med klimafaktor. I praksis ville et vanlig fordrøyningmagasin blitt anlagt med et lavere dimensjonerende gjentaksintervall i boligområder, men denne forenklingen er

benyttet for å beregne alle fordrøyningsvolumene i avløpsmodellen sett over en 100-årsperiode. Det totale fordrøyningsvolumet for tiltaket er beregnet til 866 m³.

Tabell 30 viser beregninger av investeringskostnad og netto nåverdi ved gjennomføring av tiltaket. Investeringen forutsettes å gjennomføres i år 0. Resultatene viser at investeringskostnaden for tiltaket er 4,33 mill. kr, og ved gjennomføring av tiltaket fås en kostnadsbesparelse på omtrent 38,5 mill. kr. Netto nåverdi er positiv med en verdi på omtrent 34,2 mill. kr, som vil si at prosjektet anses som lønnsomt.

Tabell 30: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for fordrøyningstiltaket.

Enhetspris fordrøyning	5 000	kr/ m ³
Fordrøyningsvolum	866	m ³
Investeringskostnad	4 330 000	kr/ m ³
Nåverdi skadekostnader uten tiltak	66 788 166	kr
Nåverdi skadekostnader med tiltak	28 291 370	kr
Kostnadsbesparelse	38 496 796	kr
Investeringskostnad	4 330 000	kr
Netto nåverdi	34 166 796	kr

9.5.4 Økning av ledningsdimensjoner

Tabell 31 viser skadekostnader for ulike gjentaksintervall ved gjennomføring av en utskiftning av ledningene, og nåverdien etter prinsippet om en lineær økning av skadekostnadene over 100 år.

Tabell 31: Skadekostnader for ulike gjentaksintervall, og nåverdi av skadekostnader over 100 år med tiltaket økning av ledningsdimensjoner.

Gjentaksintervall	Uten klimafaktor		Med klimafaktor	
	Kostnad pr regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år	Kostnad pr regnhendelse	Totale kostnader ila. 100 år
2 år	kr 2 130 000	kr 63 900 000	kr 2 272 000	kr 68 160 000
5 år	kr 2 556 000	kr 25 560 000	kr 4 544 000	kr 45 440 000
10 år	kr 2 556 000	kr 12 780 000	kr 7 526 000	kr 37 630 000
20 år	kr 2 840 000	kr 8 520 000	kr 9 798 000	kr 29 394 000
50 år	kr 5 396 000	kr 5 396 000	kr 12 354 000	kr 12 354 000
100 år	kr 6 958 000	kr 6 958 000	kr 14 342 000	kr 14 342 000
Sum		kr 123 114 000		kr 207 320 000
Nåverdi skadekostnader				kr 35 117 281

Tabell 32 viser beregninger av investeringskostnad og netto nåverdi ved gjennomføring av tiltaket. Investeringen forutsettes å gjennomføres i år 0. Resultatene viser at

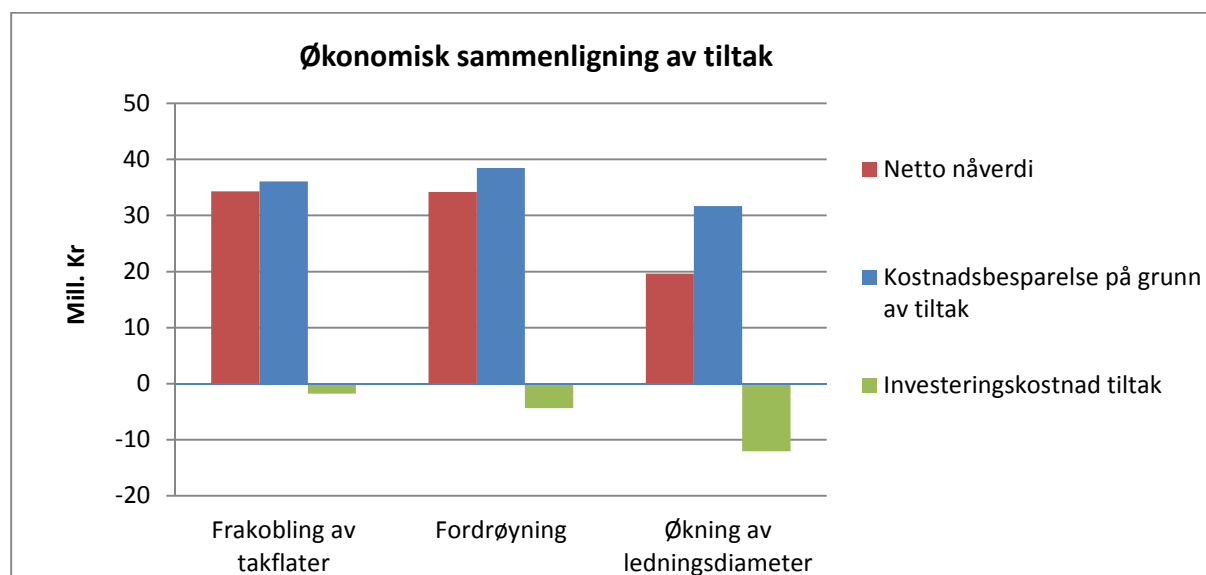
investeringskostnaden for tiltaket er 12 mill. kr, og ved gjennomføring av tiltaket fås en kostnadsbesparelse på omtrent 31,7 mill. kr. Netto nåverdi er positiv med en verdi på omtrent 19,6 mill. kr, som vil si at prosjektet anses som lønnsomt.

Tabell 32: Beregning av investeringskostnad og netto nåverdi for tiltaket økning av ledningsdimensjoner.

Enhetspris ledning	8000	kr /m
Antall meter ledning	1506	m
Investeringskostnad	12048000	kr /m
Nåverdi skadekostnader uten tiltak	66 788 166	kr
Nåverdi skadekostnader med tiltak	35 117 281	kr
Nåverdi kostnadsbesparelse	31 670 885	
Investeringskostnad	12 048 000	kr
Netto nåverdi	19 622 885	kr

9.5.5 Sammenligning av tiltak

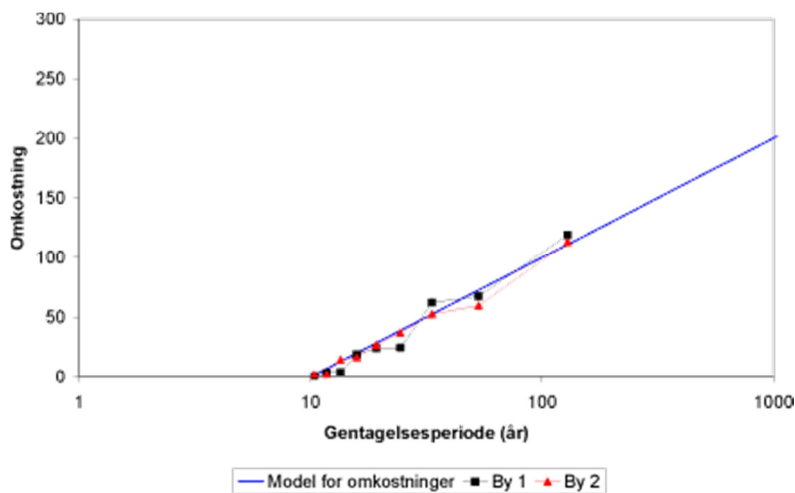
Figur 52 viser en sammenligning av tiltakenes investeringskostnad, nyttekostnad og netto nåverdi. Figuren viser at kostnadsbesparelsen ved gjennomføring av tiltak er høyest ved fordrøyning, og lavest ved økning av ledningsdiameter. Dimensjonsøkningen har også høyest investeringskostnad, som gir dette tiltaket lavest netto nåverdi. Alle tiltakene har en positiv netto nåverdi som tilsier at en gjennomføring av prosjektene vil være lønnsomme. Høyest lønnsomhet fås ved fordrøyning og frakopling av takflater som har omtrent lik netto nåverdi.



Figur 52: Økonomisk sammenligning av tiltakene.

9.6 Alternativ metode for å bestemme skadekostnader

COWI og NIRAS (2007) har utarbeidet en rapport med økonomisk analyse av kostnader og klimatilpasningstiltak for Roskilde og Aalborg i Danmark. Det ble i analysen beregnet gjennomsnittlig skadekostnader per år basert på en enkel modell for å se på skadebildet i løpet av 90 år. I modellen er det antatt at gjentaksintervall over 10 år vil gi skadekostnader, slik at skadeforholdet er satt til 0 for et 10-års gjentaksintervall og 100 for et 100-års gjentaksintervall. Prinsippet er vist i figur 53.



Figur 53: Et eksempel på observeringer av skadekostnader for to byer. (COWI & NIRAS 2007)

Dersom modellen brukes direkte kan forventet skadeomfang over en periode på 90 år finnes ved å skalere skadene som oppstår ved en 100-års regnhendelse med faktoren 3,45. Denne faktoren er funnet ved å se på forventet skadeomfang av ni ulike gjentaksintervall i løpet av perioden på 90 år. Det ligger en skjevhet i modellen grunnet at de største regnhendelsene forårsaker høyere skadekostnader, som er større enn de besparelsene som fås grunnet at de største regnhendelsene er forventet å opptre sjeldnere. Skaleringsfaktoren på 3,45 er derfor justert opp til 5. (COWI & NIRAS 2007)

For en enkel sammenligning med den danske modellen og metoden benyttet i denne oppgaven er skadekostnadene ved 100-års gjentaksintervall uten klimafaktor skalert opp. Faktor for skadekostnad per år i en periode på 90 år blir $5/90 = 0,055$, og skadekostnadene for en periode på 100 år skaleres derfor opp med faktoren 5,55. Resultatene av total skadekostnad og nåverdi er vist i tabell 33.

Tabell 33: Sammenligning av skadekostnader for benyttet metode og den danske modellen.

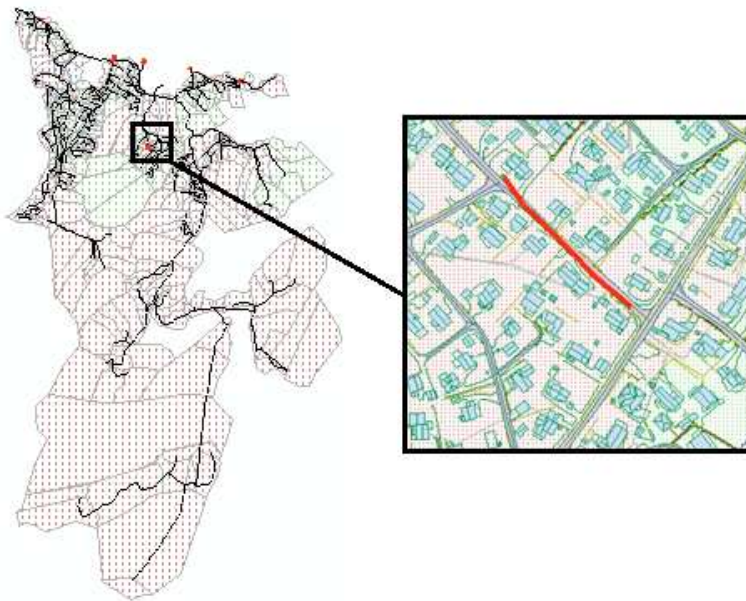
	Beregnet [mill. kr.]	Dansk modell [mill. kr.]
Total kostnad ila. 100 år	204.5	90.6
Nåverdi	50.1	22.2

Ut fra den store forskjellen i resultatene ser det ikke ut til at den danske modellen er direkte overførbart til avløpsmodellen og metoden som er benyttet i denne oppgaven. En grunn til dette kan være at de skadevoldende hendelsene som er funnet i den danske metoden er gitt ved andre gjentakintervall enn de som er benyttet i denne oppgaven. Andre grunner kan være at skadehendelser er definert forskjellig, og forskjeller i feltene. Den mest synlige forskjellen uten videre undersøkelse er at det i den danske metoden antas at skadene oppstår for gjentakintervall større enn 10 år. For avløpsnett i Charlottenlund og Ranheim er det derimot funnet skader også ved 2- og 5-års gjentakelsesintervall, og disse gjentakintervallene gir etter den benyttede metoden de største bidragene til den totale skadekostnaden i løpet av 100 år.

10 Diskusjon

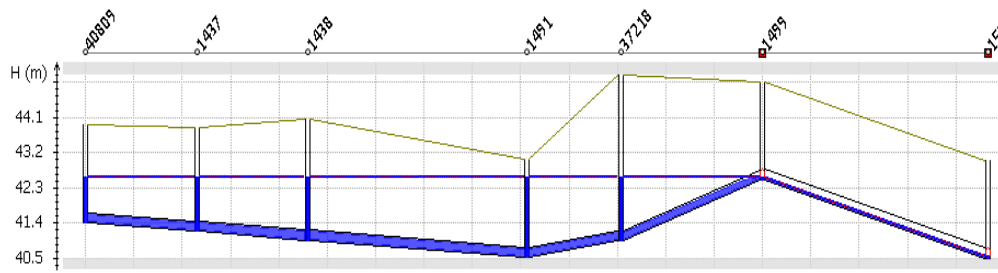
10.1 Usikkerheter i avløpsmodellen

Det har ikke vært hensiktsmessig å gjennomgå modellen med tanke på eventuelle feil og mangler innenfor tidsrammen av oppgavearbeidet. Enkelte ledningsstrek som fikk kritisk oppstuvning ved lave gjentaksintervall ble likevel gjennomgått for å undersøke om det fantes opplagte feil. I Olderdalen er et ledningsstrek som selv ved et 2-års gjentaksintervall uten klimafaktor får oppstuvning over 90 cm, som vist i figur 54.



Figur 54: Utsnittet viser oppstuvning over 90 cm i et ledningsstrek i Olderdalen ved et regn med 2-års gjentaksintervall uten klimafaktor.

I figur 55 er lengdeprofilet vist, og det finnes et tydelig motfall fra kum 1491 til 1499. Oppstuvningen er 176 cm over topp rør på det høyeste i kum 1491. Ved å undersøke høydene i bunn av kummene viser det seg at ledningen kunne ha ligget uten fall fra kum 1491 til den siste kummen i lengdeprofilet.



Figur 55: Lengdeprofil av ledningsstrekket i Olderdalen ved et regn med 2-års gjentaksintervall uten klimafaktor.

Det antas at oppbyggingen av ledningsstrekking kan være en feil i modellen, men dette burde undersøkes nærmere ved å gjennomgå data fra det virkelige anlegget. Ledningsstrekking er satt til å kunne gi 12 kjelleroversvømmelser, og er tatt med i resultatene da de likevel ikke vil gi store utslag på sluttresultatene.

Da modellen kun er en tilnærming til virkeligheten, er det flere forenklinger og antagelser i modellen som kan være feil eller manglende, og som bidrar til usikkerhet. Modellen er i denne oppgaven benyttet «som den er», og den er ikke endret foruten verdier i forbindelse med tilpasningstiltakene. Det er ikke utført kalibrering av modellen, og dette bidrar ytterligere til modellresultatenes usikkerhet.

10.2 Metoder og resultater

Resultatene fra modellsimuleringen viser at det vil opptre kjelleroversvømmelser for lave gjentaksintervall, også for regn uten klimafaktor. Dersom en ser bort fra de 12 kjelleroversvømmelsene omtalt i kapittel 10.1, viser oppstuvningsresultatene at det allerede ved 5-års gjentaksintervall er fare for et betydelig antall kjelleroversvømmelser i området. Da flere av de kritiske oppstuvningene finner sted i boligområder, kan det tenkes at det kommunens dimensjonerende gjentaksintervall for ledningsnettets overskrides. De lave gjentaksintervallene er mest sårbare for en klimaendring i form av økt regnintensitet, og vil forsterke effekten i problemområdene. 10-års gjentaksintervall og lavere gir en meget stor prosentvis økning i antall kjelleroversvømmelser ved økt regnintensitet, og bidrar også med den største årlige skadeposten. Tiltakenes plassering i forhold til hvilke områder som får oppstuvninger ved lave gjentaksintervall vil derfor ha betydning av den totale lønnsomheten.

Regn med høyere gjentaksintervall gir lavere årlige skadeposter over 100 år. Omfanget av de økonomiske resultatene belyser kun skader på bygninger. I realiteten antas det, spesielt for høye gjentaksintervall, at skadeposten blir høyere på grunn av skader på avløpsnett, omkringliggende områder og indirekte skader nevnt i kapittel 3.5. Selv om dette kan gi en undervurdering av skadeposten, gir resultatene likevel en forståelse av konsekvensene som forventede klimaendringene vil gi.

Det er ikke mulig å si når ulike regnhendelser vil opptre, og skadeposten er benyttet som gjennomsnittlige årlige skadeposter over 100 år, som er neddiskontert ved hjelp av nåverdimetoden. De økonomiske beregningene inngår derav i en grov analyse basert på en rekke antagelser og forutsetninger, og er ment for å kunne sammenligne den samfunnsøkonomiske nytten ved å gjennomføre de ulike tiltakene mot klimaendringer. Det er ikke utført analyse av følsomheten for de økonomiske forutsetningene, som kan belyse hvilke konsekvenser endringer av usikre faktorer får på lønnsomheten av de ulike tiltakene.

Det er knyttet usikkerhet til alle kostnadstall som er benyttet i den økonomiske analysen. Det antas å være variasjoner i kostnaden for kjelleroversvømmelser avhengig av blant annet regnstørrelse, bygningsutførelse og innbo. Enhetsprisene ved anleggelse av tiltakene er

basert på generelle kostnader som ikke nødvendigvis vil gjelde for avløpsnettets på Ranheim og Charlottenlund. Drifts- og vedlikeholdskostnader er ikke medregnet i analysen på grunn av manglende datagrunnlag for LOD-anlegg, og derfor kan tiltakskostnadene være undervurdert. Tiltakenes investeringsbeløp er satt til år 0. I virkeligheten antas det at tiltakene utføres delvis og over flere år avhengig av prioriteringer i hele avløpsnettets i kommunen etter for eksempel ROS-analyser omtalt i kapittel 6.1.

Valgt klimafaktor på 1,5 er den høyeste anbefalte faktoren fra litteraturen som er benyttet, og kan representere den verst tenkelige situasjonen om 100 år. De usikkerhetene som allerede ligger i projeksjonene for fremtidige klimaendringene, gjør likevel at usikkerheter omkring valg av klimafaktor er uunngåelig i denne analysen. Det kunne likevel ha vært interessant å se på forskjellene i de økonomiske resultatene ved å benytte andre verdier for klimafaktor.

Tilpasningstiltakene er simulert i områder med kjelleroversvømmelser, men det er ikke lagt stor vekt på å undersøke om en gjennomføring lar seg gjøre i de aktuelle områdene med tanke på grunnforhold og utforming. Boligområdene i Charlottenlund og Ranheim består av grønne tomter med gressplener og beplantning, hvor infiltrasjon kan utnyttes. Store deler av feltene i analyseområdet består av marine løsmasser som er uegnet til infiltrasjonsanlegg. Frakopling av takflater vil dermed ikke være den beste løsningen i alle tilfeller, og kan kreve etablering av andre lokale LOD-tiltak, som vil gi større kostnader. En annen mulighet er at frakopling av takflater kan benyttes til forsinke overflatevannet, ved at det vannet føres trygt på overflaten og kobles til avløpssystemet nedstrøms. De ulike tiltakene er simulert hver for seg, men en kombinasjon av disse vil nok være en mer optimal løsning.

I saneringsplanen for Charlottenlund og Ranheim (Trondheim kommune 2005) er det lagt frem ulike tiltak for å bedre avløpsnettets. Disse tiltakene kan allerede ha, -eller vil endre forutsetningene som ligger til grunn i den benyttede modellen. Dersom utbedringer av ledningsnettets utføres eller er planlagt fremover vil dette si at investeringskostnadene for tiltakene som er benyttet i oppgaven kan være overvurdert. Dette gjelder spesielt for økning av ledningsdimensjoner, ved at kommunen skifter ut eldre ledninger og separerer fellessystemet.

Antall kjelleroversvømmelser er telt opp manuelt, og er gjort etter skjønn ut fra bygningens størrelse og plassering i forhold til hovedledningene. Ved en mer omfattende og detaljert analyse kan man innhente informasjon om stikkledningenes beliggenhet, for å redusere denne usikkerheten.

De tette flatene gir også en usikkerhet ved simulering av tiltaket med frakoblede takflater. Det er forutsatt at alle bygningene er tilkoblet ledningsnettets, og arealet av takflatene er funnet ved overslagsberegninger da verdiene for veg- og takarealene var slått sammen til en «fellesparameter» i modellen. Betydningen av tette flater er belyst i følsomhetsanalysen i kapittel 8.2, hvor endringer av andel tette flater gir større utslag på oppstuvninger. Følsomhetsanalysen sier også noe om konsekvensen av utbygginger i området som medfører

en økning av andel tette flater. En urbanisering vil forsterke konsekvensene av klimaendringene dersom det ikke gjøres lokale tiltak.

Ved en simulering med RDI-modulen, som er utelatt i oppgaven, kunne lengre tidsserier blitt benyttet, i tillegg til at flere hydrologiske aspekter kunne ha blitt inkludert. De symmetriske regnhyetogrammene som er konstruert og brukt i simuleringen er valgt for å komme nærmere en virkelig regnhendelse enn ved benyttelse av kasseregn fra IVF-kurven. Regnhendelsene er likevel korte enkeltregn, og simuleringen baserer seg på regnhendelser i sommermånedene. En avrenning på høsten eller vinteren vil kunne være dimensjonerende for avløpsnettet.

11 Konklusjon

Avløpsnett i Charlottenlund og Ranheim er sårbart for økt regnintensitet, spesielt for regnhendelser med lave gjentaksintervall. Den prosentvise økningen av oppstuvninger i kummer og ledninger er høyest, for så å avta, allerede ved et 10-års gjentaksintervall. Antall kjelleroversvømmelser følger den samme utviklingen, som viser uheldige samfunnsøkonomiske konsekvenser som følge av klimaendringene.

Etter antagelser og forutsetningene satt i modellen og i den økonomiske analysen, vil regnhendelsene med lavest gjentaksintervall forårsake de høyeste årlige kostnadene i løpet av en 100-årsperiode. Iverksetting av tilpasningstiltak vil ha en stor positiv effekt på antall kjelleroversvømmelser som opptrer i løpet av de neste 100 år dersom tiltakene anlegges i dag. De ulike tiltakene som er simulert gir tilnærmet lik reduksjon av antall kjelleroversvømmelser. Den økonomiske analysen viser at alle de simulerte tiltakene vil være lønnsomme sett over en periode på 100 år. LOD-tiltakene fordrøyning og frakopling av takflater har omtrent lik netto nåverdi, og den største lønnsomheten. Investeringskostnaden for det konvensjonelle tiltaket med å øke ledningsdiametere er høyere enn de andre tiltakene, og kostnadsbesparelsen og lønnsomheten er lavere sammenlignet med LOD-tiltakene.

Klimaendringer vil gi kommuner større utfordringer med avløpsnett i urbane områder. Både eksisterende avløpsnett som allerede i dag har for liten kapasitet, og utbygging av nye anlegg bør vies oppmerksomhet. Fortetting av områder kan komme som et tillegg til klimaendringene, ved at tette flater bidrar til større overflateavrenning. Tilpasningstiltak i eksisterende avløpsnett vil kunne forhindre skader, men det bør også være fokus på en klimatilpasset overvannshåndtering for nye prosjekter i kommunen.

12 Videre arbeid

Analysene er utført over en 100-årsperiode, men det kan være aktuelt å se virkninger av klimaendringer og effekter av tiltak på kortere sikt. Ved å se på kortere perioder, og lage mer detaljert datagrunnlag for kostnader, kan noe av usikkerheten i en økonomisk vurdering reduseres. I stedet for den grove analysen som er utført, kan det utføres en mer detaljert analyse for utvalgte mindre områder i modellen. Det kan utføres en følsomhetsanalyse av de økonomiske resultatene ved å gjøre endringer i forutsetningene. En vurdering av skadekostnader fremover i tid ved benyttelse av en faktormetode som er vist i den danske metoden i kapittel 9.6 hadde vært interessant å undersøke nærmere. En enkel metode for vurdering av skadekostnader vil være tidsbesparende ved analyser av klimaendringenes virkninger, og kan senke terskelen for å igangsette slike analyser.

Ved å kalibrere modellen mot virkelige data, vil man få resultater med mindre grad av usikkerhet. Ved å kjøre langtidssimuleringer med historiske regn i RDI-modulen vil man kunne inkludere flere hydrologiske faktorer. For å få frem variasjoner i klimaendringer i de forskjellige sesongvariasjoner, kan simuleringer kjøres med andre regnhendelser.

For å få en mer realistisk økonomisk sammenligning mellom tilpasningstiltakene over en lengre periode kan en oppdatert modell i henhold til kommunens fremtidige planer i området benyttes. Det ville også være en mulighet å se på de miljømessige aspektene i en analyse, som for eksempel overløpsutslipp og resipienters kapasitet og kvalitet. En samkjøring av klimatiltakene og tiltak for Sjøskogbekken som i dag har dårlig kapasitet og er sterkt forurenset er en mulig videreføring. En nærmere undersøkelse av området, grunnforhold og stikkledning vil gi et bedre grunnlag for detaljplanlegging av hvor ulike tiltak best lar seg gjennomføre. Dette kan gi et bedre grunnlag for en mer optimal plassering av tiltak i ulike områder innenfor analyseområdet, og for å simulere effekten av ulike tilpasningstiltak samtidig i modellen.

13 Litteraturliste

- Aaheim, A., Dannevig, H., Ericsson, T., Oort, B. v., Innbjør, L., Rauken, T., Vennemo, H., Johansen, H., Tofteng, M., Aall, C., et al. (2009). Konsekvenser av klimaendringer, tilpasning og sårbarhet i Norge. *CIERO Report 2009:04*. 238 s.
- Aall, C., Groven, K., Heiberg, E., Øyen, C. F., Hafskjold, L. S., Miles, M., Husabø, I. & Gjerde, O. (2011). Klimaendringenes konsekvenser for kommunal og fylkeskommunal infrastruktur. Sluttrapport. *Vestlandsforskningsrapport nr. 4/2011*.
- Asplan Viak. (2010). NoDig versus åpen grøft. Miljømessige-, økonomiske- og juridiske betraktninger.
- Bergen kommune. (2005). Retningslinjer for overvannshåndtering i Bergen kommune.
- Berling, I. M. (2011). *Overvannshåndtering i bratt terreng. Utforming av boligområde på Tesliåsen*. Masteroppgave. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for landskapsplanlegging. 73 s.
- Bjerkholt, J. T. (2011). *Vassdragsplanlegging og VA-systemer. Modellering av vannforsyningsnett*. Forelesningsnotat THT 300. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Bjerknessenteret. (2009a). *Akselererende havstigning*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1363.pdf> (lest 23.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2009b). *Drivhuseffekt og jordas klima*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1671.pdf> (lest 23.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2009c). *Golfstrømmen og vårt milde klima*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1371.pdf> (lest 23.01.2012)
- Bjerknessenteret. (2009d). *Klimaendringer i fortiden*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1372.pdf> (lest 23.01.2012).
- Bjerknessenteret. (2009e). *Klimamodeller og fremtidens klima*. Tilgjengelig fra: <http://www.bjerknes.uib.no/filer/1365.pdf> (lest 23.01.2012).
- Bøhren, Ø. & Gjærum, P. I. (1999). *Prosjektanalyse*. 2 utg.: Skarvet Forlag AS.
- Bøyum, Å. & Thorolfsson, S. T. (2001). *VA-teknikk del 2 Avløp*. Trondheim: Tapir Akademisk Forlag, Kompendieforlaget.
- COWI & NIRAS. (2007). Klimatilpasning ad afløpsststemer og metodeavprøving. Økonomisk analyse. *Miljøprosjekt nr. 1187, 2007. Miljøstyrelsen*.
- DANVA. (2007). En kokebok for analyser af klimaændringers effekter på afløbssystemer - med fokus på oversvømmelser. *F&U rapport nr. 5*.
- DANVA. (2011). En kokebok for analyser af klimaændringers effekter på oversvømmelser i byer. *Forsknings- og udredningsprosjekt nr. 19*.
- 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. *MIKE URBAN - modelling water in the city*. Tilgjengelig fra:
<http://www.dhisoftware.com/Products/Cities/MIKEURBAN.aspx> (lest 18.07.2012).
- DHI. (2009a). *Mouse pipe flow. Reference manual*. Tilgjengelig fra:
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_ReferenceManual_Pipe_Flow.pdf (lest 20.04.2012).
- DHI. (2009b). *MOUSE RDII. Reference manual*. Tilgjengelig fra:
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_RDII_ReferenceManual.pdf (lest 20.04.2012).
- DHI. (2009c). *MOUSE Short introduction and tutorial*. Tilgjengelig fra:
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_Intro_Tutor.pdf (lest 20.04.2012).
- DHI. (2009d). *MOUSE Surface Runoff Models. Reference Manual*. Tilgjengelig fra:
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_ReferenceManual_Runoff.pdf (lest 20.04.2012).
- DHI. (2011). *Modelling the world of water. Software catalogue*. Tilgjengelig fra:
<http://www.mikebydhi.com/media/mikebydhi2011/index.html> (lest 20.04.2012).
- Drange, H., Marzeion, B., Nesje, A. & Sorteberg, A. (2007). *Opptil én meter havstigning langs Norskekysten innen år 2100*. CICERONE 2/07.
- Engan, J. A. (2011). *Modellbygging, kalibrering og praktisk bruk av modeller av vannforsyningsnett*. Forelesningsnotat THT 300. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- ExFlood. (2009). *Exstreme weather in small catchments: new method for flood protection*.
- Finansdepartementet. (1997). *Nåverdimetoden*. NOU 1997: 27. Nytt-kostnadsanalyser. Tilgjengelig fra: <http://www.regjeringen.no/nb/dep/fin/dok/nouer/1997/nou-1997-27/3/6/1.html?id=347211> (lest 02.05.2012).
- Finansdepartementet. (2005). *Veileder i samfunnsøkonomiske analyser*. Tilgjengelig fra: http://www.regjeringen.no/upload/FIN/Vedlegg/okstyring/Veileder_i_samfunnsokonomiske_analyser.pdf (lest 03.05.2012).
- FNO. (2012). *VASK - Vannskadestatistikk*. Tilgjengelig fra:
<http://fno.no/no/Hoved/Statistikk/skadeforsikring/VASK/> (lest 17.07.2012).
- Forskningsrådet. (2011). *Klimaendringer og konsekvenser for Norge (NORKLIMA). Om programmet*. Tilgjengelig fra: http://www.forskningsradet.no/prognett-norklima/Om_Programmet/1226993599882 (lest 12.02.2012).
- Fredrikstad kommune. (2007). *Viktig å vite om kjelleroversvømmelser*. Fredrikstad: Teknisk Drift – Vej, Vann og Avløp.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E. J., Roald, L. A., Børsheim, K. Y., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S., Sorteberg, A., et al. (2009). *Klima i Norge 2100*. Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpasning. Oslo: Norsk klimasenter.

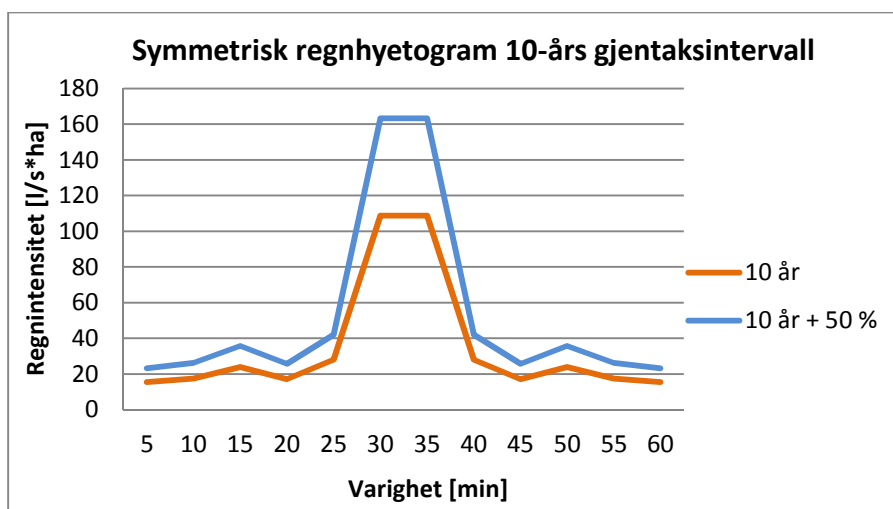
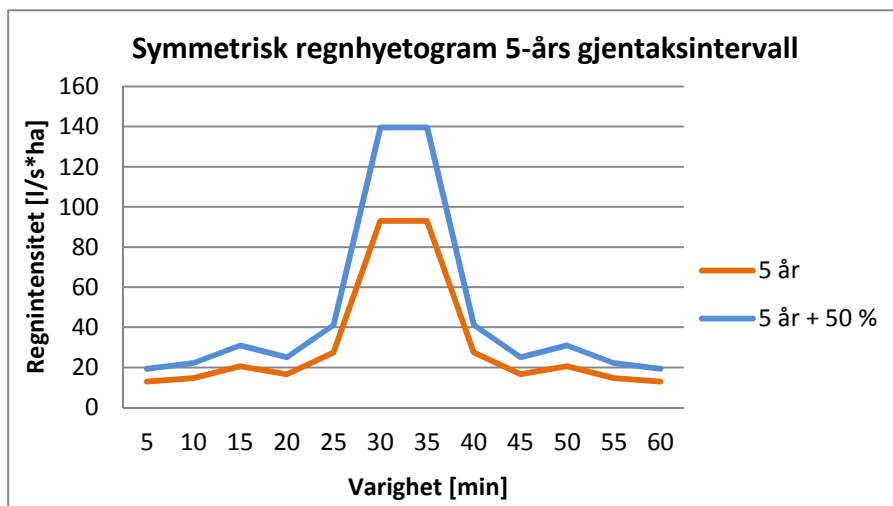
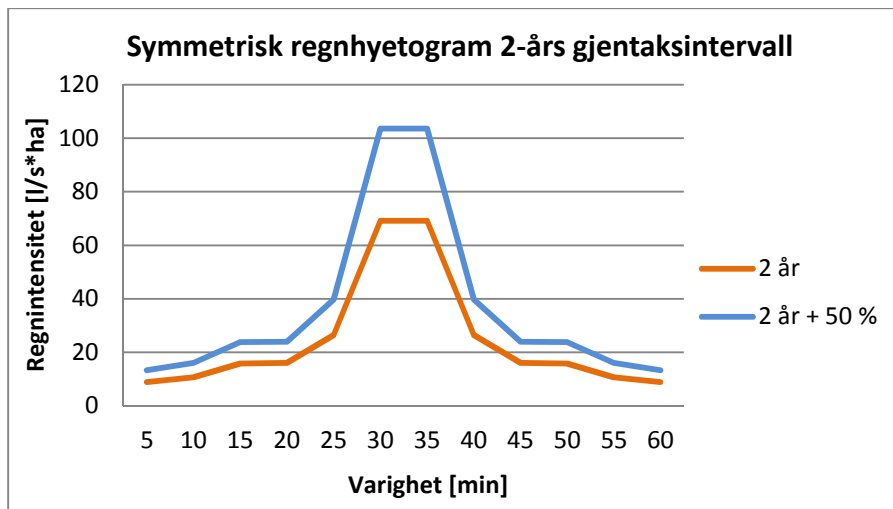
- Holvik, I. S. (2010). *Impact of storm water runoff from climate change. Example study in Sandnes, Norway*. Master thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology. Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering.
- Hovdenak, O. E. (2011). *Sjøskogbekken: fra problem til ressurs. En oppgave om håndtering av overflatevann*. Masteroppgave: Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for landskapsplanlegging.
- IPCC. (2000). IPCC Special Report. Emissions scenario. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III.
- IPCC. (2007). Summary for Policymakers. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Johannessen, B. G. (2011a). *ExFlood - Ranheim*. E-post (01.11.2011).
- Johannessen, B. G. (2011b). *Nedbørintensitet MET*. E-post (01.11.2011).
- KS. (2012). Lokal tilpasning til et klima i endring. Råd om tilpasning av fysisk planlegging og infrastruktur i kommuner og fylkeskommuner.
- König, A. (2011). Trondheim kommune. Klimaeffekter på avløpssystemet. MIKE URBAN.
- Køste, A. & Hval, J. P. (2011) *Modellering av avløpsnettverk med hensyn på klimaendringer i Fredrikstad kommune*. Masteroppgave. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for matematiske eealfag og teknologi.
- Lindholm, O. (2007) Veiledning om mulige tiltak i avløpsanlegg. Statens forurensningstilsyn. 48 s.
- Lindholm, O., Nie, L. & Bjerkholt, J. (2007). Klimaeffektens betydning for oppstuvninger og forurensningsutslipp fra avløpssystemer i byer. *IMT-rapport nr. 16/2007*. Ås: Institutt for matematiske realfag og teknologi, Universitetet for miljø- og biovitenskap. 79 s.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk vann rapport 162/2008*.
- Lindholm, O. (2011a). *Om matematiske modeller og beregning av urbane avløpssystemer*. Forelesningsnotat THT 300. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Lindholm, O. (2011b). *Videregående emner om nedbør til bruk i urbanhydrologien*. Forelesningsnotat THT 300. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap.
- Lindholm, O. (2012a). *Kostnadstall*. E-post (10.01.2012).
- Lindholm, O. (2012b). *Personlig meddelse*. E-post (09.08.2012).
- Meteorologisk institutt. *Klima*. Tilgjengelig fra: <http://met.no/Klima/> (lest 26.03.2012).
- Mæhlum, T., Køhler, J. C., Jenssen, P. D. & Hensel, G. R. (2009). Grunnundersøkelser for infiltrasjon - mindre avløpsanlegg. Forundersøkelse, befaring og detaljundersøkelse ved planlegging av mindre renseanlegg (Versjon 1). *Bioforsk rapport 155/2009*. 72 s.

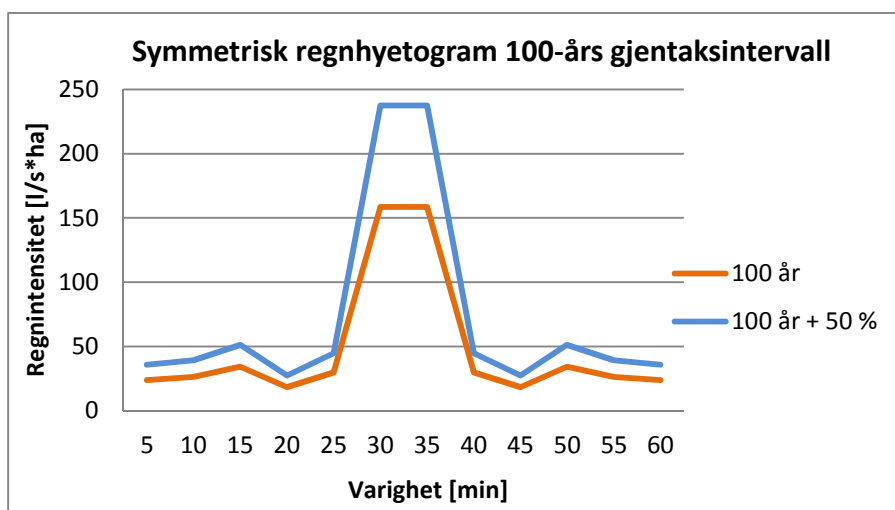
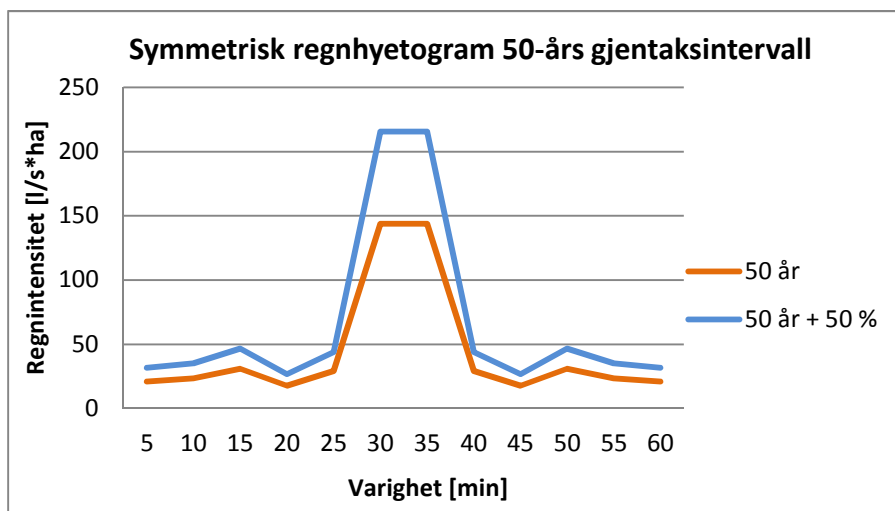
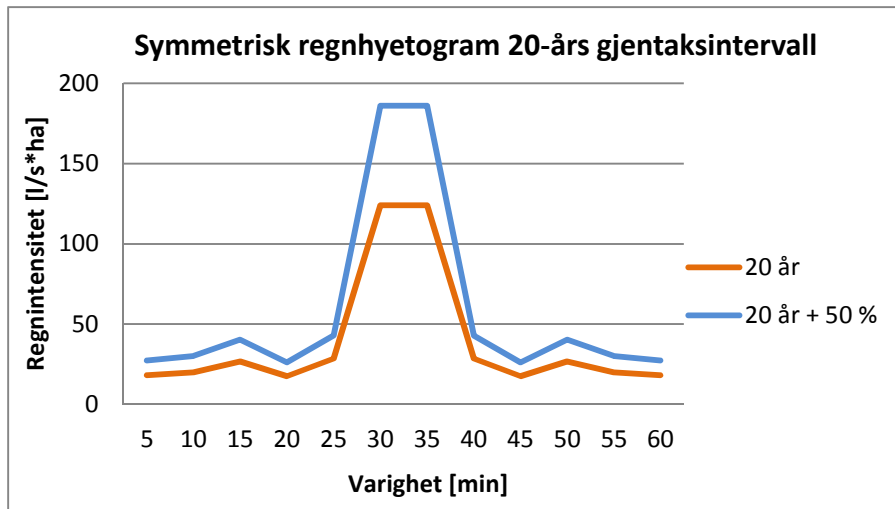
- NGU. *Løsmasser. Nasjonal løsmassedatabase* Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/?Box=270093:7033882:283282:7043162> (lest 15.05.2012).
- NGU. (2007). *Tolkning av løsmassekart*. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/no/tm/Vare-tjenester/Spor-en-geolog/Tidligere-stilte-sporsmal/Tolkning-av-losmassekart/> (lest 02.03.2012).
- Nie, L. (2004). *Flooding Analysis of Urban Drainage Systems*. Dr.ing.-thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Hydraulic and Environmental Engineering.
- Nilssen, O. (2012). *Exflood masteroppg - investeringskostnader*. E-post (27.07.2012).
- NORVAR. (2004). *Etterutdanningskurs " Reduksjon av oversvømmelser - Planlegging, dimensjonering, drift og vedlikehold av overvanns- og avløpsnett"*. Kurskompendium.
- NoSerC. *NoSerC. Norwegian Service Centre for Climate Modelling*. Project description 2003-2004. Tilgjengelig fra: <http://noserc.met.no/PD/index.html> (lest 12.06.2012).
- NOU. (2010). *Tilpassing til eit klima i endring. Samfunnet si sårbarheit og behov for tilpassing til konsekvensar av klimaendringane*.
- NVE. *Skredatlas*. Tilgjengelig fra: <http://skredatlas.nve.no/ge/Viewer.aspx?Site=Skredatlas#> (lest 14.05.2012).
- NVE. (2011a). *Aktsemdkart for kvikkleire*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Flom-og-skred/Farekartlegging/Kvikkleirekart/> (lest 13.04.2012).
- NVE. (2011b). *EUs flomdirektiv*. Tilgjengelig fra: <http://www.nve.no/no/Flom-og-skred/Flomdirektivet/> (lest 11.06.2012).
- Olsen, M. (2011). *Analyse av klimaendringers virkninger på avløpsnett i Charlottenlund og Ranheim, Trondheim kommune - Norge*. Masteroppgave. Ås: Universitetet for miljø- og biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi.
- Olsen, M. (2012). *Personlig meddelelse* (19.01.2012).
- Opplysningen 1881. *Kart*. Tilgjengelig fra: <http://www.1881.no/Kart/#> (lest 3.05.2012).
- Oslo kommune. (2011). *Overvannshåndtering. En veileder for utbygger*. Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten.
- Randall, D. A., Wood, R. A., Bony, S., Colman, R., Fichfet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., et al. (2007). *Climate Models and Their Evaluation*. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Rasmussen, I. & Vennemo, H. (2010). *Samfunnsøkonomiske virkninger av klimaendring i Norge. Rapport 2010/01*. Vista Analyse.
- RegClim. *Klimaet i Norge om 50 år*.
- RegClim. (2005). *Norges klima om 100 år. Usikkerheter og risiko*.

- Rosim. Tilgjengelig fra: <http://www.rosim.no/hXGYCSNdHS3G.22.idium> (lest 1.04.2012).
- SINTEF Byggforsk, a. *Nasjonal database for byggekvalitet*. Tilgjengelig fra: <http://www.byggkvalitet.no/> (lest 17.07.2012).
- SINTEF Byggforsk, b. *Nasjonal database for byggekvalitet. Byggskadearkiv*. Tilgjengelig fra: <http://www.byggkvalitet.no/Drilldown.aspx?nodeId=1&level=0&isLast=True§ionId=16> (lest 17.07.2012).
- Solomon, S., D. Qin, M. M., Alley, R. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L., Z. Chen, A. C., J.M. Gregory, G. C. H., M. Heimann, B. H., Hoskins, B. J., F. Joos, J. J., et al. (2007). Technical Summary. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Statsbygg. (2004). *Åpne overvannsløsninger. Erfaringer og løsninger. FoU prosjekt*.
- Svensk vatten. (2007). *Klimatförändringarnas inverkan på allmänna avloppssystem- Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen. Meddelande M134*.
- Sælthun, N. R. (2001). *THT300 - Hydroteknikk. Hydrologiske modeller. Kompendie: Universitetet for miljø- og biovitenskap. NIVA/Universitetet i Oslo*.
- Trondheim kommune. *Miljøstatus i Trondheim. Avløp og renseanlegg*. Tilgjengelig fra: <http://miljostatusitrondeheim.no/-avlop-reanseanlegg/> (lest 03.06.2012).
- Trondheim kommune. (2002). *Sanitærreglement for Trondheim kommune. Del 2: Administrative og tekniske normer*. Tilgjengelig fra: <http://www.trondheim.kommune.no/content/1103549868/T-07> (lest 01.04.2012).
- Trondheim kommune. (2005). *Saneringsplan avløp Charlottenlund og Ranheim avløpssoner. Hovedrapport*.
- Trondheim kommune. (2009). *Arealdel - Plankart og temakart*. Tilgjengelig fra: <http://www.trondheim.kommune.no/content.ap?contentId=1117624552&contextId=1117625786> (lest 07.02.2012).
- Trondheim kommune. (2011a). *Byutvikling*. Tilgjengelig fra: <http://www.trondheim.kommune.no/byutvikling/> (lest 07.02.2012).
- Trondheim kommune. (2011b). *VA-norm. Vedlegg 5. Beregning av overvannsmengde. Dimensjonering av ledning og fordrøyningsvolum*.
- Trondheim kommune. (2012a). *Jonsvatnet*. Tilgjengelig fra: <http://www.trondheim.kommune.no/jonsvatnet/> (lest 06.06.2012).
- Trondheim kommune. (2012b). *Kart*. Tilgjengelig fra: http://webhotel2.gisline.no/GISLINEWebInnsyn_Trondeheim/ (lest 12.02.2012).
- Vannportalen.no. (2012a). *Vanndirektivet. Om vanndirektivet - EUs rammedirektiv for vann*. Tilgjengelig fra: <http://www.vannportalen.no/enkel.aspx?m=31147> (lest 20.06.2012).
- Winther, L., Linde, J. J., Jensen, H. T., Mathiasen, L. L. & Johansen, N. B. (2006). *Afløbsteknik*. 5 utg. Danmark: Polyteknisk Forlag.

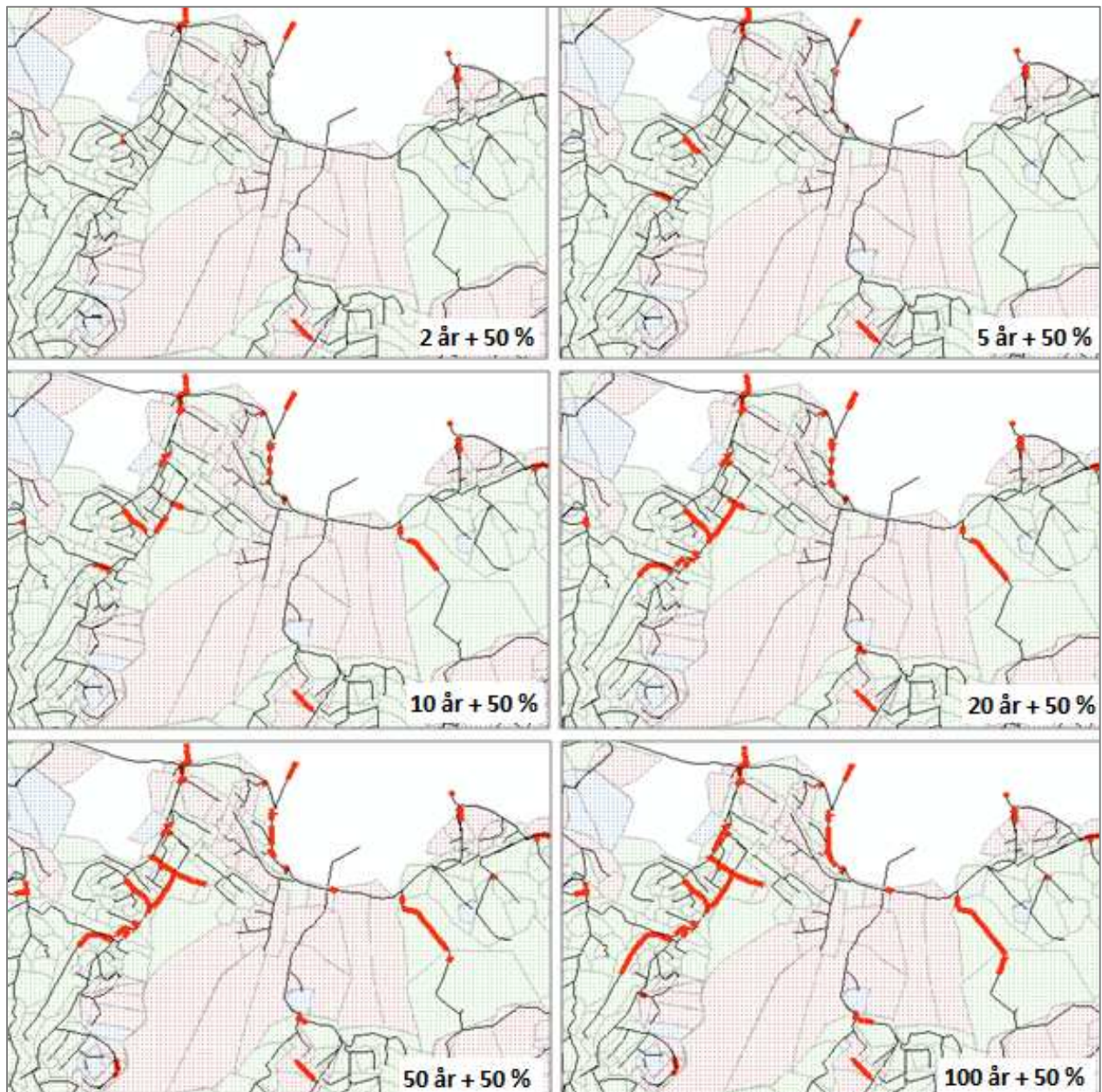
14 Vedlegg

Vedlegg 1 – Symmetrisk regnhyetogram med og uten klimafaktor for ulike gjentaksintervall.

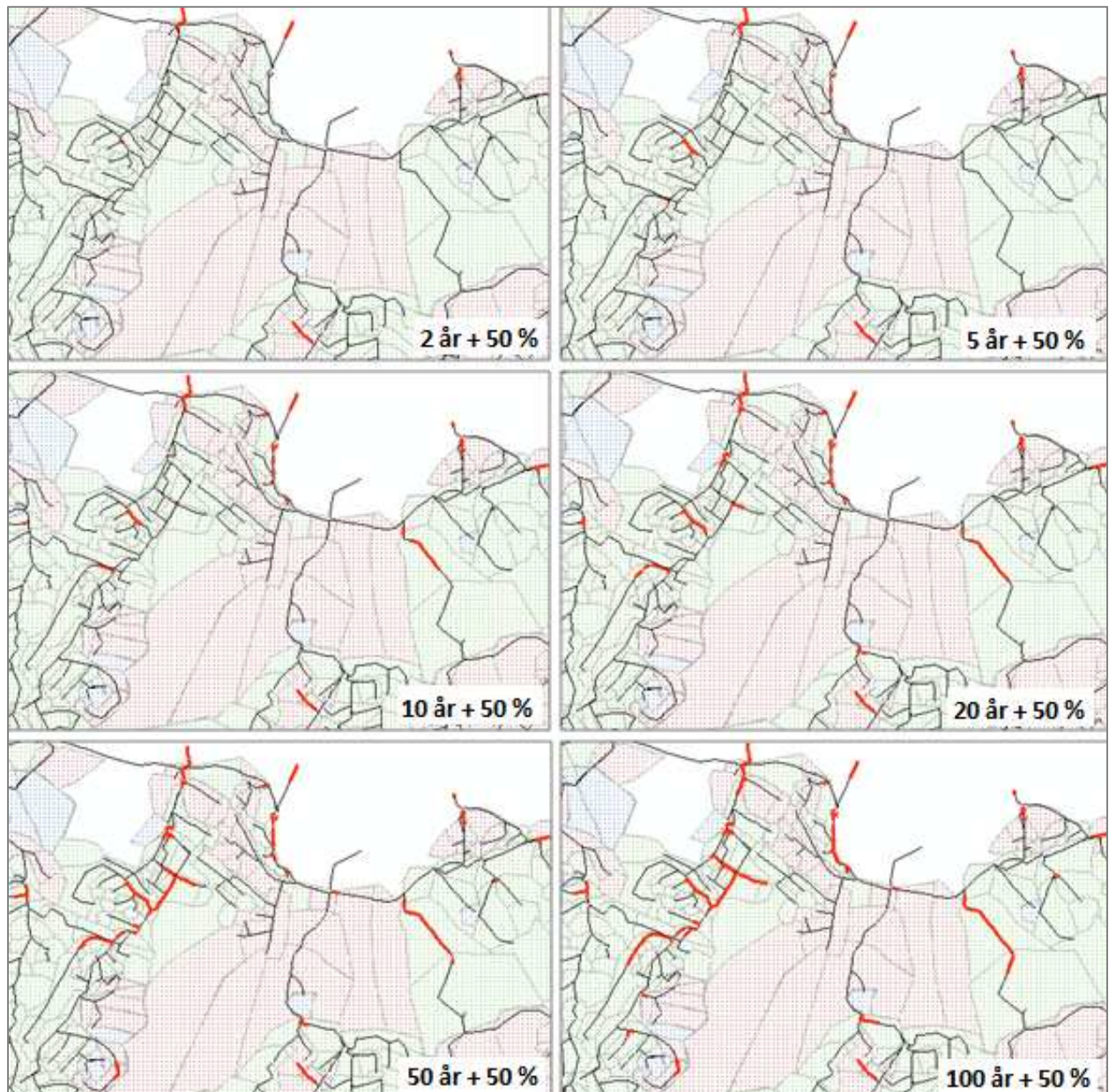




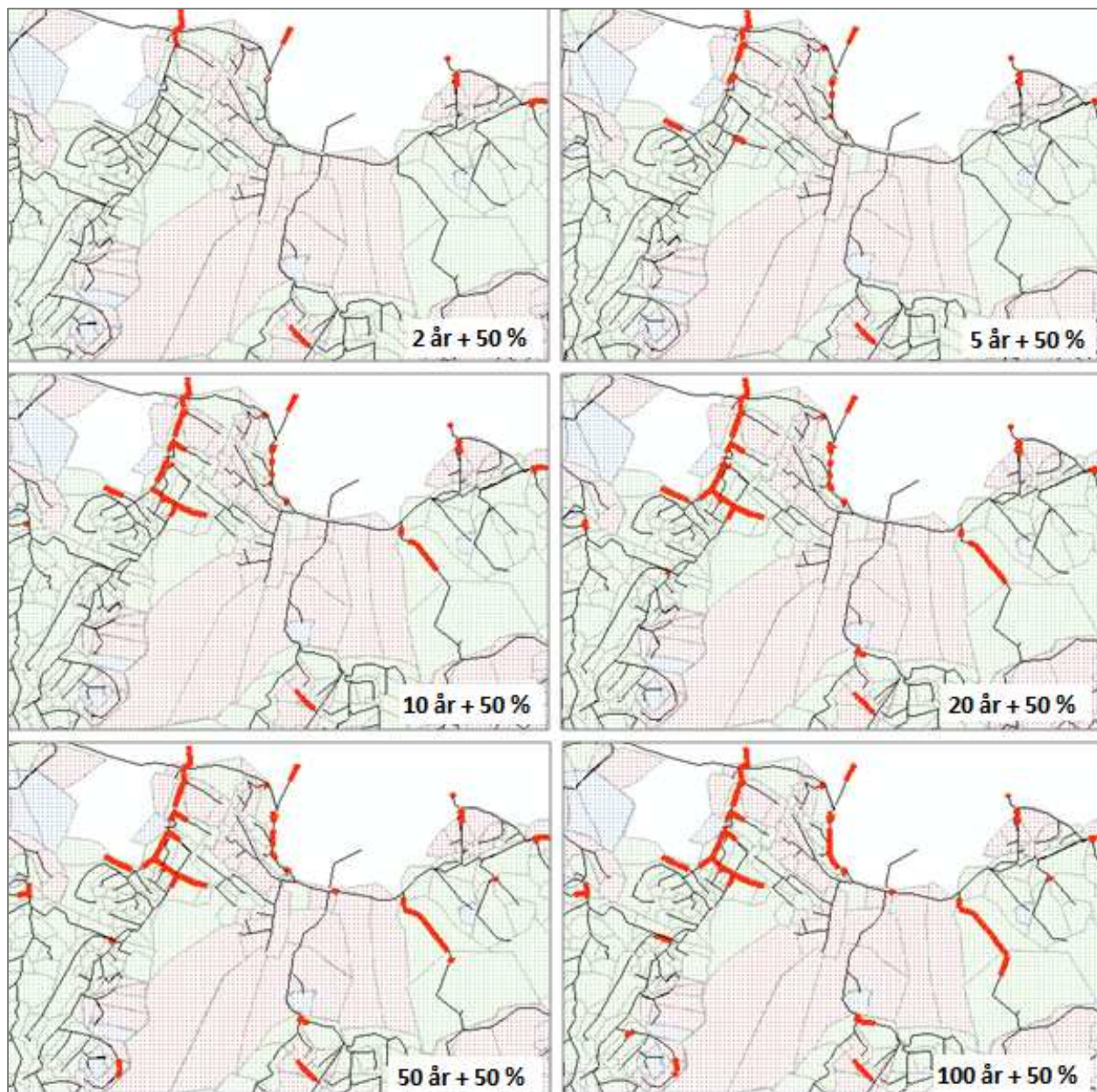
Vedlegg 2 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket frakopling av takflater.



Vedlegg 3 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket fordrøyning.



Vedlegg 4 – Oppstuvning i ledninger for ulike gjentaksintervall med klimafaktor og tiltaket økning av ledningsdimensjoner.



Vedlegg 5 – Delfelt med frakoplede takflater

Catchment ID	Totalt areal [ha]	Faktor tette flater	Areal takflater [m ²]	Ny faktor tette flater
1378_435	1.8043	0.30	3684	0.10
16119_318	2.42	0.11	1401	0.05
16122_222	3.2635	0.21	4000	0.09
16183_121	0.2766	0.17	276	0.07
18227_446	0.900	0.20	900	0.10
18231_405	1.2519	0.27	2087	0.10
18359_353	0.1362	0.26	132	0.17
18405_506	0.2766	0.15	257	0.06
18410_173	0.7578	0.13	537	0.06
18428_257	0.2633	0.21	325	0.09
18433_256	1.4643	0.20	1920	0.07
18438_497	1.1213	0.13	1120	0.03
18703_487	1.5388	0.23	2000	0.10
20703_452	0.3719	0.26	812	0.04
23340_221	0.3857	0.07	200	0.02
23354_120	0.6583	0.23	581	0.14
23355_172	1.6519	0.12	696	0.08
23356_220	0.5285	0.21	880	0.04
273898_209	1.102	0.19	1264	0.08
3232_501	0.9281	0.19	1028	0.07
3244_319	3.2804	0.23	5103	0.08
3248_500	0.4407	0.18	600	0.04
32697_320	1.677	0.25	2977	0.08
3363_363	1.2644	0.27	2640	0.06
3370_414	1.0395	0.24	1387	0.10
3390_412	0.9044	0.23	695	0.15
37293_498	0.3552	0.11	229	0.05
37301_494	1.6948	0.18	1807	0.07
37354_255	0.2447	0.20	289	0.08
47637_259	1.4173	0.22	1743	0.10
48143_307	0.9354	0.28	1643	0.10
Des_24_80	0.1844	0.33	480	0.07
Des_26_179	1.156	0.15	1394	0.03
Des 28_268	0.1449	0.16	114	0.08
Sum			45201	

Vedlegg 6 – Avrenning ved 100-års gjentaksintervall med klimafaktor, med og uten fordrøyningstiltak.

Catchment ID	Uten fordrøyningstiltak konsentrasjonstid 7 min.			Med fordrøyningstiltak konsentrasjonstid 45 min.		Beregnet fordrøynings- volum [m ³]	Andel fordrøyd [%]
	Maks avrenning [m ³ /s]	Total avrenning [m ³]	Antall minutter til maks	Maks avrenning [m ³ /s]	Antall minutter til maks		
1378_435	0.117	125.991	34	0.042	53	66	53
16119_318	0.056	59.966	34	0.020	53	31	53
16122_222	0.149	159.639	34	0.053	53	84	53
16183_121	0.010	10.782	34	0.004	53	6	52
18227_446	0.006	6.517	34	0.002	53	3	53
18231_405	0.072	76.93	34	0.025	53	40	53
18359_353	0.008	8.272	34	0.003	53	4	53
18405_506	0.009	9.708	34	0.003	53	5	53
18410_173	0.021	22.753	34	0.008	53	12	53
18428_257	0.012	13.046	34	0.004	53	7	53
18433_256	0.063	68.134	34	0.023	53	36	53
18438_497	0.032	34.363	34	0.011	53	18	53
18703_487	0.072	77.004	34	0.026	53	40	53
20703_452	0.021	22.282	34	0.007	53	12	53
23340_221	0.006	6.446	34	0.002	53	3	53
23354_120	0.032	34.334	34	0.011	53	18	53
23355_172	0.043	46.111	34	0.015	53	24	53
23356_220	0.024	25.646	34	0.008	53	13	53
273898_209	0.046	49.252	34	0.016	54	26	54
3232_501	0.037	39.413	34	0.013	53	21	53
3244_319	0.162	173.948	34	0.058	53	91	53
3248_500	0.017	18.3	34	0.006	53	10	53
32697_320	0.091	97.703	34	0.032	53	51	53
3363_363	0.073	78.454	34	0.026	53	41	53
3370_414	0.053	56.552	34	0.019	53	30	53
3390_412	0.044	46.878	34	0.016	53	25	53
37293_498	0.009	9.345	34	0.003	53	5	53
37301_494	0.064	68.706	34	0.023	53	36	53
37354_255	0.010	10.977	34	0.004	53	6	53
47637_259	0.066	71.053	34	0.024	53	37	53
48143_307	0.055	59.178	34	0.020	53	31	53
Des_24_80	0.013	13.867	34	0.005	53	7	53
Des_26_179	0.038	40.734	34	0.014	53	21	53
Des_28_268	0.005	5.201	34	0.002	53	3	53
Sum		1647.485				866	

Vedlegg 7 – Ledninger med økt dimensjon

Pipe ID	Fra kum	Til kum	Lengde [m]	Dimensjon [m]	Ny dimensjon [m]
16124	16122	37294	79.8	0.23	0.35
172444	3247	3248	25.8	0.45	0.60
172445	3281	3247	43.7	0.45	0.60
172447	3248	3391	29.1	0.5	0.60
172460	32696	3280	80.3	0.45	0.60
172462	3292	32696	50.1	0.45	0.60
172463	3280	3281	37.7	0.45	0.60
172469	3320	3289	55.9	0.45	0.60
172468	3289	3290	9.0	0.45	0.60
172470	3290	3292	27.3	0.45	0.60
172498	3319	3320	51.5	0.45	0.60
172499	3354	3319	84.5	0.45	0.60
172516	3352	3353	47.6	0.38	0.60
172517	3353	3354	53.2	0.38	0.60
172518	32697	3354	65.3	0.30	0.40
172521	3363	32697	93.0	0.30	0.40
172578	47637	3391	5.1	0.45	0.60
172579	3387	3401	15.3	0.45	0.60
172580	3401	3390	26.8	0.45	0.60
172584	3390	48126	30.0	0.45	0.60
172593	48126	3384	34.4	0.45	0.60
18225	18227	18224	16.9	0.45	0.60
182918	18385	23354	20.7	0.40	0.60
182920	23352	23355	39.8	0.50	0.60
182921	23353	23352	51.9	0.40	0.60
183020	23354	23353	86.7	0.40	0.60
18388	3384	18385	56.2	0.45	0.60
18435	18418	33705	17.2	0.23	0.45
18443	37294	33704	35.0	0.23	0.35
187992	33704	18433	5.6	0.23	0.35
193071	20694	20701	42.4	0.30	0.60
20699	3352	20698	64.6	0.38	0.60
20700	20698	20701	41.4	0.38	0.60
Des_10	47637	3385	53.9	0.45	0.60
Des_11	3385	3387	29.3	0.45	0.60
Sum			1506.8		