

Virkninger av arealbruk og klimaendringer på avrenning fra små nedbørsfelt

Bao-Thy Huynh

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Knut Alfredsen, IBM

Medveileder: Aynalem Tsegaw, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Masteroppgåve i vassdragsteknikk

Kandidat: **Bao-Thy Huynh**
Tema: **Virkninger av klimaendringer og arealbruk på avrenning fra små nedbørfelt.**

1. Bakgrunn

Endringer i arealbruk og klimapådriv er viktige faktorar som påverkar avrenning frå små nedbørfelt, og i den seinare tid har det vore eit spesielt fokus på ekstremverdiar i avrenninga frå små felt som er viktig for planlegging og dimensjonering i slike felt. I Klima 2050 er der ein aktivitet for å vurdere metodar for flomberekning og for å ta med arealbruksendringar og endra klima i risikovurderingar for infrastruktur i slike felt. Bruk av hydrologiske modellar for slike vurderingar har fleire fordelar. Først kan vi gjennom køyring av modellar vurdere korleis tilstanda i feltet påverkar avrenning, og vidare kan vi bruke modellane for å gjere vurderingar av korleis endringar i arealbruk og klima påverkar avrenninga og dermed grunnlaget for planlegging og dimensjonering. Eit stor utfordring i denne samanhengen er at det sjeldan finst kalibreringsdata for dei feltar vi er interesserte i, noko som gjer tilpassing av modellen vanskeleg. Det er i Klima 2050 utvikla metodar for å tilpasse den hydrologiske modellen DDD til umålte felt, og dette arbeidet vil danne eit grunnlag for denne oppgåva.

2. Arbeidsoppgåver

Oppgåva kan delast inn i tre hovuddelar:

1. Tilpassing av DDD modellen for eit utval studiefelt.
 - (a) Eit antal felt som skal brukast i arbeidet skal plukkast ut og data for desse skal hentast. I utgangspunktet vil vi bruke dei felte på strekninga Støren – Soknedal som har rapportert skader på kulvertar, men det kan ver aktuelt å legge til fleire etterkvart
 - (b) Tilpasse parametrar DDD modellen for desse felte basert på regional regresjon. Modellen skal så køyrast for historisk nedbør og avrenninga skal dokumenterast.
2. Med utgangspunkt i modellen sett opp i 1) skal det gjerast ei vurdering av korleis klima påverkar flommar i felte.
 - (a) Lage ei grunnleggande litteraturoversikt over metodar og moglege data for å finne korttidsnedbør i framtidens klima. Dette skal så brukast til å bestemme

dimensjonerande nedbør i framtidens klima, om ein baserer seg på data frå andre kjelder eller reknar ut eigne data skal vurderast utifrå litteraturgjennomgangen.

- (b) Klargjere nedbørdata for simulering av dimensjonerande flom i dei utvalde felta, dette inkluderer både situasjonen i dag og for situasjonen i framtida.
 - (c) Køyre klimasimuleringar på kvart felt og samanlikne resultatane med tanke på bruk i dimensjonering.
3. Velje ut eit av felta der det har skjedd eller er planlagd endringar i arealbruk, og gjere ei vurdering av korleis dette påverkar avrenninga. Val av modell for arealbruksendringar skal gjerast med utgangspunkt i prosjektoppgåva frå hausten 2017.
- (a) Tilpasse arealbruksmodellen til feltet med utgangspunkt i berekna avrenning frå DDD-modellen, og deretter kalibrere arealbruksmodellen med utgangspunkt data frå DDD.
 - (b) Deretter skal det køyrast scenariosimuleringar av endra arealbruk, og det skal gjerast ei vurdering av kor sensitiv modellen er for endringar.

3. Rettleiing, data og informasjon

Faglærer vert professor Knut Alfredsen ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. PhD student Aynalem Tsegaw vil kunne hjelpe til med regionalisering og oppsett av DDD, og arbeidet vil elles vere knytt til Klima 2050 arbeidspakke 2. Kandidaten er elles ansvarleg for innsamling, kontroll og bruk av data. Hjelp frå ovannemnde eller andre må refererast i rapporten.

4. Rapport

Struktur og oppsett av rapporten er viktig. Gå utifrå at det målgruppa er teknisk personell på seniornivå. Rapporten skal innehalde eit samandrag som gir lesaren informasjon om bakgrunn, framgangsmåte og hovudresultata. Rapporten skal ha innhaldsliste og referanseliste. Referanselista skal vere formatert etter ein eksisterande standard.

Denne oppgåveteksta skal vere inkludert i rapporten.

Data som er samla inn skal dokumenterast og leverast på digital form.

Formatet på rapporten skal følgje standarden ved NTNU. Alle figurar, kart og bilete som er inkludert i rapporten skal vere av god kvalitet med tydeleg tekst på akse og teiknforklaring.

Kandidaten skal inkludere ei signert fråsegn som seier at arbeidet som er presentert er eins eige, og at alle bidrag frå andre kjelder er identifiserte gjennom referanser eller på andre måtar.

Frist for innlevering er 11. juni 2018.

Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU

Knut Alfredsen
Professor

Sammendrag

Endringer i klima og arealbruk er temaer som har fått mye fokus innenfor hydrologien i de siste årene. Mange forskere har analysert effektene av menneskelig aktivitet på det hydrologiske systemet. Det er antatt at klimaendringene vil føre til en intensivering av dagens klimatiske forhold på jorda. For Norge vil dette bety økt og mer intensivt nedbørhendelser. I lag med arealbruksendringer som økt urbanisering og større områder med impermeable flater er det antatt mer avrenning, som igjen vil føre til flere, større og hyppigere flommer. Flom er definert som naturkatastrofen som forekommer mest og som forårsaker størst skader. Skader på infrastruktur og andre bebyggelser er både tidskrevende og dyrt å reparere. For å redusere skadeomfanget mest mulig er det viktig å være forberedt på fremtidige vannføringer.

Infrastrukturen vi har idag er ikke dimensjonert for den økende vannføringen som kommer. Det er i denne masteroppgaven fokusert på kulverter, da de valgte observasjonsområdene er 11 små nedbørfelt definert av kulvertfeil registrert langs en jernbanestrekning i Soknedal i Trøndelag fylke. En vanlig årsak til kulvertfeil er underdimensjonering. Det er derfor viktig at nye installasjoner tilpasses det endrede klimaet. Usikkerheten ligger i størrelsen og konsekvensen av endringene. I dette studiet er hovedoppgaven å analysere effektene av både klimaendringer og arealbruk på avrenning for små nedbørfelt. En ledende metode for å studere endringer i et hydrologisk system er hydrologisk modellering. Det er i denne oppgaven valgt to ulike hydrologiske modeller, Distance Distribution Dynamics (DDD) og Soil and Water Assessment Tool (SWAT) for å studere effektene av henholdsvis klimaendringer og arealbruk. Nødvendig data er hentet fra flere ulike kilder, blant annet Meteorologisk institutt (MET), Norsk klimaservicesenter, Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO) og Norges geologiske undersøkelse (NGU). En stor utfordring ved hydrologisk modellering av små nedbørfelt er at de som oftest er umålte. Det vil dermed være umulig å validere simuleringsresultatene med observerte vannføringsverdier fra feltet, fordi slike data ikke eksisterer. DDD-modellen er dannet for å minimere usikkerheten ved modellering av umålte nedbørfelt. Modellens inngangsparametere hentes hovedsakelig ut fra karttjenester, som et geografisk informasjonssystem (GIS). Parametere som krever kalibrering er estimert ved en regionaliseringsmetode basert på regresjon utviklet av Klima 2050 i sin Arbeidspakke 2. Fem år med vannføring fra feltene ble simulert for perioden mellom 1. september 2010 til 31. august 2015. Dimensjonerende 200-års nedbør for kulverter ble simulert for å teste både modellens beskrivelse av jordas metningsprosess og kulvertkapasitet. Vanlig klimafaktor på 1.2 (20 %) for kulverter er benyttet for å analysere klima-effekter på avrenning. Simuleringsresultatene viser svært lave flomverdier sammenlignet med kulvertkapasitet. Det konkluderes med at kulvertene ikke er underdimensjonerte og det antas at tilstopping kan ha redusert kulvertkapasitet og ført til overbelastning. DDD er funnet til å være svært pålitelig med realistiske beskrivelser av jordas metningsprosess, samtidig viser resultatene at modellen har en tendens til å underestimere flomtopper.

SWAT-modellen har tidligere blitt benyttet for å studere vannkvalitet, samt arealbrukseffekter. Modellen klargjøres for simulering med svært detaljerte beskrivelser av både arealbruk og jordforhold i det aktuelle feltet. Modellen simulerer også transportering av sedimenter og næringsstoffer. På grunnlag av dette ble SWAT valgt til å studere av arealbrukseffekter, samt undersøke mengden sedimenter som kan ha tettet kulvertrør og redusert kapasiteten. På grunn av tidsbegrensninger ble dessverre ikke SWAT-modellen kalibrert etter simulerte vannføringsdata som planlagt. Det er utført innledene undersøkelser av modellen og resultatene fra en ikke-kalibrert modell, viser stort potensial for realistiske simuleringer av arealbrukseffekter, både på avrenning og sedimenttransport. Det konkluderes at kvaliteten på resultatene ikke er bedre enn inngangsparameterene benyttet og det er forventet at modellen vil være et svært effektivt verktøy ved riktig og optimal kalibrering.

Summary

In recent years both climate changes and land use changes have been popular topics, which have received a lot of attention in the hydrological context. Many studies have focused on analyzing the effects of human activity on the hydrological system. It is assumed that these changes will lead to an intensification of the existing climatic conditions on Earth. Hence, Norway will experience increased precipitation with higher intensity. With land use changes, such as urbanization and more areas with impermeable surfaces the results will be more runoff and larger floods, which will also occur more frequently. Flood is defined as a natural disaster that occurs most often and causes the greatest damages to the surrounding infrastructure and other structures. These damages can be both time consuming and expensive in the case of repairs. In order to minimize the damages that can occur, it is important to be prepared for the water discharges in the future.

The infrastructure of today is not designed to withstand such high flows that may occur in the future. This master thesis is focused specifically on culverts, as the chosen study areas are eleven small catchments ($< 3 \text{ km}^2$) defined by culvert failures detected along a railway line in Soknedal, Norway. A common cause for culvert failures is undersizing. It is therefore important that new installations are adapted to the changing conditions. The uncertainty lies in the amount of effects as a consequence of these changes. In this study, the main task is to analyze the effects of both climate change and land use on runoff from small catchments. A leading method of studying changes in a hydrological system is hydrological modeling. Two different hydrological models, Distance Distribution Dynamics (DDD) and Soil and Water Assessment Tool (SWAT) have been selected to analyze the effects of both climate change and land use. Necessary data are obtained from several different sources, including the Norwegian Meteorological Institute (MET), the Norwegian Climate Service Center, the Norwegian Institute for Bioeconomy (NIBIO) and the Geological Survey of Norway (NGU). A major challenge of hydrological modeling of small catchments is the fact that these areas are commonly ungauged. Thus, it will be impossible to validate the results with observed discharge due to lack of such data. The DDD model is designed to minimize the uncertainty of modeling small catchments areas. The models' input parameters are mainly derived from maps, such as a Geographic Information System (GIS). The parameters requiring calibration are estimated by regionalization based on regression developed by Klima 2050 in Work package 2. Five years of runoff from the catchment was simulated between the period of September 1st 2010 and August 31st 2015. 200-year design precipitation was simulated to test the DDD description of the ground saturation process and culvert capacity. A typical 1.2 climate factor was applied to the design precipitation to study the effects of climate change. The results of the simulations show flood peaks significantly lower than the culvert capacities. It is concluded that the culvert failures did not occur due to exceeded capacity and undersizing, and it is believed that blocking of the culvert due to sediments and debris, could have reduced the

capacity, which could have led to an culvert overload. DDD has been found to be highly reliable with realistic descriptions of the ground saturation process, even though the results show a tendency of underestimated flood peaks.

The SWAT model has previously been used to analyze water quality, as well as land use effects. The model was prepared for simulation with detailed descriptions of both land use and soil conditions in the study area. The model also simulates transportation of sediments and nutrients. SWAT was chosen in this study to examine the effects of land use, and additionally to investigate the possibility to simulate sediment transportation with the availability to block the culverts. Due to time limitations, the SWAT model was not calibrated using simulated hydrological data as planned. The results of a non-calibrated model show great potential for realistic simulations of land use effects, on both runoff and sediment transportation. It is also concluded that during hydrological modeling time is one of the most important resources and that the quality of the results is not better than the input data used. It is expected that SWAT would be a very effective tool for studying land use effects if proper and optimal calibration is carried out.

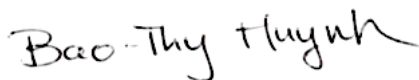
Forord

Denne masteroppgaven innenfor Vassdragsteknikk har fått tittelen ”Virkninger av arealbruk og klimaendringer på avrenning fra små nedbørfelt” og er skrevet av Bao-Thy Huynh, vårsemesteret 2018. Masteroppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven ”Effekter av arealbruksendringer på avrenning”. Masteroppgaven tilsvarer 30 studiepoeng og er avsluttende arbeid på masterprogrammet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU i Trondheim.

Oppgaven har vært et lærerikt og interessant arbeid. Jeg var heldig nok til å skrive om et tema som jeg fant svært interessant og som i tillegg er veldig relevant i dagens samfunn. Hovedutfordringen ved denne oppgaven har vært å bli kjent med de to hydrologiske modellene, DDD og SWAT. I tillegg har en stor del av oppgaven bestått av innhenting og preparering av data. Dette har vært både tidkrevende, knotete og til tider svært frustrerende arbeid. Til gjengjeld har jeg blitt en mer tålmodig person, med litt ekstra Excel-kunnskaper. Jeg tror erfaringen og kompetansen jeg har fått ved bruk av modellene, R og spesielt GIS, vil kunne komme godt med videre i arbeidslivet.

Jeg vil gjerne rette en stor takk til mine veiledere. Hovedveileder, Knut Alfredsen og spesielt medveileder, Aynalem Tsegaw for god hjelp og kunnskap. Jeg vil også takke Maren Benjaminsen for alle timene på datasalen og motivasjon gjennom hele denne prosessen. Til min beste venn og storesøster, Bao-Mai Huynh for all støtte og oppmuntring. Og til slutt, tusen takk til min kjære Eskil Kristiansen, et liv uten deg hadde vært så ufattelig kjedelig.

Juni 2018, Trondheim



Bao-Thy Huynh

Innhold

Sammendrag	i
Summary	iii
Forord	v
Tabelliste	x
Figurliste	xii
1 Innledning	1
1.1 Introduksjon	1
2 Teori og litteratur	3
2.1 Avrenning	3
2.1.1 Avrenning fra små nedbørfelt	3
2.2 Metoder for flomberegning i små nedbørfelt	4
2.2.1 Den rasjonale formel	4
2.2.2 Nasjonalt formelverk for små og uregulerte nedbørfelt	5
2.2.3 Regionalisering av parametere	6
2.2.4 Beregningsforutsetninger	7
2.2.5 Dimensjonering av kulverter	8
2.3 Effekter av menneskelig aktivitet	9
2.3.1 Klimaendringer	9
2.3.2 Arealbruksendringer	12
2.3.3 Effekter av klima- og arealbruksendringer på avrenning	12
2.3.4 Analyse av klima- og arealbrukseffekter	14
2.4 Fremtidige prognoser av klima- og arealbruksendringer	17
2.4.1 Klimaframskrivninger og nedskaleringmetoder	17
2.4.2 Arealbrukscenarier og arealbruksmodeller	21
2.4.3 Fremtidig tilpasning ved dimensjonering	21

3	Metode - Modeller og materiale	23
3.1	Observasjonsområde	23
3.2	Modeller og verktøy	25
3.2.1	DDD-modellen	26
3.2.2	SWAT-modellen	29
3.3	Tilleggsverktøy	32
3.3.1	R	32
3.3.2	GIS	32
3.4	Innhenting av data	32
3.4.1	Meteorologiske data	33
3.4.2	Hydrologiske data	33
3.4.3	Feltkarakteristikk	33
3.5	Simuleringer med DDD	34
3.5.1	Vannføring	34
3.5.2	Dimensjonerende nedbør	34
3.5.3	Klimafaktor	36
3.6	Simuleringer med SWAT	36
3.6.1	Arealbrukscenario	38
4	Resultater	41
4.1	Simuleringer med DDD	41
4.1.1	Effekten av miljøforhold	42
4.1.2	Effekten av jordas metningsnivå	44
4.1.3	Effekten av hyetografen	45
4.1.4	Klimafaktor	46
4.2	Simuleringer med SWAT	47
5	Diskusjon	49
5.1	Simuleringer med DDD	49
5.1.1	Miljøforhold og metningsnivå	50
5.1.2	Klimafaktor	51
5.1.3	Kulvertkapasitet	51
5.2	Simuleringer med SWAT	52
5.2.1	Arealbruksscenario	52
6	Konklusjon	55
6.1	Konklusjon og videre arbeid	55
	Referanseliste	59
	VEDLEGG	67

Tabelliste

2.1	Veiledende avrenningsfaktor, c for ufrosset dekke med returperiode 10 år (1).	5
2.2	Oversikt over effekter av arealbruksendringer på avrenning, basert på resultatene fra prosjektoppgaven ”Effekter av arealbruksendringer på avrenning” (2).	13
2.3	Oversikt over de tre utslippsscenarioene benyttet for Norge ved klimaframskrivninger, etter FNs klimapanel sin femte hovedrapport (3).	18
3.1	Kulvertfeil, definert som skadepunkter (SP) registrert langs jernbanestrekningen mellom Garli og Støren, i perioden 2000 og 2014. ”-” betegner en ukjent verdi (4).	25
3.2	Parametere i DDD som estimeres gjennom regionaliseringsmetoden basert på regresjon.	29
3.3	Beregnet konsentrasjonstid med Ligning 2.2 i minutter, for nedbørfeltene SP1-SP11. For videre analyse er konsentrasjonstidene rundet til nærmeste time.	35
3.4	Arealbrukstyper benyttet som inngangsparametere i SWAT, for SP10. Innebygde arealbrukstyper i SWAT er benyttet. Se Tabell 6.3 i Vedlegg 7 for mer detaljert beskrivelse av arealbrukstypene.	37
3.5	Jorddata benyttet som inngangsparametere i SWAT, for SP10. Innebygde jordtyper i SWAT er benyttet. Se Tabell 6.4 i Vedlegg 7 for mer detaljert beskrivelse av jordtypene.	37
3.6	Informasjon om feltkarakteristikk av de ni dominante HRU-ene, definert i SWAT.	38
3.7	Arealbrukstyper benyttet ved de to arealbruksscenarioene i SWAT.	38
4.1	Gjennomsnittlig simulert, $Q_{m_{sim}}$ og observert vannføring, $Q_{m_{obs}}$ for perioden 1961-1990, for nedbørfeltene SP1 til SP11. Alle verdier er gitt i l/s.	42

4.2	Maksimal vannføring, Q_p etter 200-års nedbør, beregnet med Den rasjonale formel (R) og Nasjonalt formelverk for små og uregulerte nedbørfelt (N). Alle verdier gitt i l/s.	42
4.3	Sammenligning av kulvertens kapasitet og maksimal avrenning etter 200-års nedbør ved tre ulike miljøforhold. Q_U står for maksimal vannføring ved umettet jord, Q_M er vannføring ved mettet jord og Q_{MS} er vannføring ved mettet jord med snøsmelting. Alle verdier er gitt i l/s.	44
4.4	Effekten av to ulike nedbørsfordelinger, symmetrisk (sym) og usymmetrisk (usym) på avrenning for nedbørfelt SP10 og SP11. To ulike nedbørsintensiteter er benyttet, hvor "tc" står for nedbørsvarighet på 2 timer og "24" for varighet på ett døgn. Alle verdier i l/s.	46
4.5	Maksimal vannføring ved ulike miljøforhold, etter dimensjonerende 200-års nedbør med klimafaktor på 20 %. Tabellen viser også forholdet mellom vannføring for 200-års nedbør med klimapåslag og vannføring uten klimapåslag, Q_{klima}/Q . U , M og MS står for de ulike metnings- og miljøforholdene som tidligere. Alle vannføringer er gitt i l/s.	47
4.6	Sedimentkonsentrasjonen i vannet [mg/L] for hvert simuleringsår 2010-2015 for nedbørfelt SP10, både før og etter arealbruksendringen. Scenario 0 definerer eksisterende arealbruksforhold i feltet og Scenario 1 er ved omgjøring av feltet til kun urbant område.	48
6.1	Feltkarakteristikk for de 11 nedbørfeltene, SP1 - SP11. I tabellen er arealbrukene definert som S = skog, J = jordbruk, M = myr og U = urbant område.	68
6.2	Inngangsparametere for modellen DDD.	69
6.3	Detaljert informasjon om de valgte arealbrukstypene i SWAT ved simulering av eksisterende arealbruksforhold (Scenario 0) i nedbørfelt SP10. For definisjoner, se tabellene "urban/urbandefault" "crop/cropdefault" i (5), på henholdsvis s. 438 og 422.	75
6.4	Detaljert informasjon om de valgte jordtypene i SWAT ved simulering av SP10. For definisjoner, se Tabell "Usersoil/usersoildefault" i (5) på s. 440.	77
6.5	Arealbrukstyper valgt for Scenario 1 (kun urbant) for analysering av arealbrukseffekter. For definisjoner se Tabell "urban/urbandefault" på s. 438 i (5).	81
6.6	Verdier benyttet for beregning av flomtopp med Den rasjonale formel og Nasjonalt formelverk for å og uregulerte felt.	83

Figurliste

2.1	”Hockeykølle-grafen” viser gjennomsnittlig temperatur på den nordlige halvkulen fra år 1000 og frem til idag. Temperaturen har vært jevn i nesten 900 år, frem til de siste tiårene hvor gjennomsnittlig temperatur har økt drastisk. Grafen får en form som ligner en hockeykølle, derav navnet (6).	10
2.2	Drivhuseffekten er den naturlige prosessen som er nødvendig for alt liv på jorda. Drivhusgasser absorberer en del av solstrålingen og varmer opp jorda (7).	11
2.3	Oversikt over arealbruksfordelingen i Norge per 2015 (8).	14
2.4	Tre typer klassifisering av hydrologiske modeller basert kompleksitet og beskrivelse av romlig og tidsmessig variasjon.	15
2.5	Inndelinger av hydrologiske modeller basert på modellens distribusjon av nedbørfeltet for hydrologisk simulering. Konsentrerte modeller (lumped) og distribuerte modeller (distributed) (9).	16
2.6	Oversikt over nedskaleringprosessen ved dynamisk nedskalering, også kalt regional klimamodellering (RCM) (10)	20
3.1	Observasjonsområde og de registrerte kulvertfeil med tilhørende nedbørfelt (SP1-SP11).	24
3.2	Modellstruktur av DDD-modellen. Figuren viser at modellen består av to moduler som beskriver prosessene som skjer over og under jordoverflaten (11).	27
3.3	Inn- og utgangsdata i SWAT (12).	30
3.4	SCS-kurve, som viser sammenhengen mellom nedbør og avrenning benyttet i modellen SWAT (13).	31
3.5	Hyetografer som viser fordelingen av 200-års nedbør med varighet på to timer for simulering av ekstremnedbør, for nedbørfelt SP10 og SP11.	35
3.6	To ulike hyetografer av 200-års dimensjonerende nedbør med varighet på to timer med klimapåslag på 20 %, brukt ved simuleringer av ekstremnedbør for nedbørfelt SP10 og SP11.	36

4.1	Simulert vannføring, Q [l/s] for nedbørfelt SP10 i perioden 1. september 2010 til 31. august 2015. Simulering er utført med modellen DDD.	41
4.2	Hydrografer for nedbørfelt SP10 og SP11 ved 200-års nedbør med to timers varighet og symmetrisk hyetograf, for tre ulike miljøforhold. Hvor grønn linje representerer umettet jord, blå linje er mettet jord og rosa linje er mettet jord med snøsmelting.	43
4.3	Hydrograf for nedbørfelt SP10 ved 200-års nedbør med varighet på 14 timer og symmetrisk nedbørfordeling, for tre ulike miljøforhold. Det er lagt inn det samme 24 timers nedbørsforløp før 200-års nedbøren for å danne konstante miljøforhold, for å kun studere effekten av jordas metningsnivå.	44
4.4	Hydrograf som viser effekten av 200-års nedbør ved to ulike hyetografer, symmetrisk og usymmetrisk med topp høyre for nedbørfelt SP11.	45
4.5	Hydrograf som viser effekten av dimensjonerende nedbør med klimapåslag på 20 %, for nedbørfelt SP11.	46
4.6	Simulering av vannføring fra nedbørfelt SP10 i perioden september 2010 til august 2015, med eksisterende arealbruk (blå graf) og kun urbant (rød graf). Gjennomsnittlig verdier av timelige vannføringer er også presentert som daglige verdier i grafen.	48
6.1	Eksempel av NEVINA-rapport for nedbørfelt SP10	72
6.2	IVF-kurver for Blakli og Risvollan stasjon (14).	73
6.3	Hyetografer som viser fordelingen av 200-årsnedbør med varighet på 24 timer for simulering av ekstremnedbør for SP10 og SP11.	74
6.4	Fordeling av arealbruks- og jordtyper i nedbørfelt SP10.	79
6.5	Ni HRU-er for nedbørfelt SP10 definert av SWAT etter dominerte arealbruk, jordtype og feltelevasjon.	80
6.6	Simulert vannføring, Q [l/s] fra nedbørfeltene, SP1-SP11 i simuleringsperioden 1. september 2010 til 31. august 2015.	82

Kapittel 1

Innledning

1.1 Introduksjon

Flom er den naturkatastrofen som forekommer mest og som forårsaker størst skader (15). Det er flere grunner til flom, som for eksempel intense nedbørsepisoder og kombinasjon av ugunstige miljøforhold som fører til høy avrenning. I Norge de siste årene, har det blitt observert at vårfloppen kommer tidligere enn før, og at antall flommer i løpet av et år har økt (16). Et tema som har fått stor oppmerksomhet innenfor hydrologien de siste årene er virkningen av menneskelig aktivitet på det hydrologiske systemet. Det er spesielt to studieområder som har vært av stor interesse og blitt analysert i flere studier. Dette er menneskelig klimaendringer og endringer i arealbruk (17).

I følge klimaframskrivninger vil Norges fremtid bestå av høyere temperaturer og nedbørmengder (3). I kombinasjon med endringer i arealbruk, som for eksempel urbanisering vil dette resultere i økt avrenning og større risiko for nedbørflom. Stor avrenning og flom kan medføre oversvømmelser, ras og erosjon, som kan gjøre store skader på miljø, infrastruktur, og i verste fall kan det ta liv. For å redusere skadeomfanget og tilpasse dagens infrastruktur til fremtidens vannføringer, er det viktig å ha gode metoder for analyse, dimensjonering og planlegging. Hydrologisk modellering er et ledende verktøy innenfor simulering av hydrologisk respons (18). Nøkkelen til nøyaktig simulering er meteorologiske (nedbør og temperatur) og hydrologiske data (vannføring). Observerte data benyttes til modellkalibrering og validering av resultatene.

Store deler av Norges vei- og jernbanenett ligger langs elver og er svært utsatt for flomskader. Vanlige flomskader i små nedbørfelt er oversvømmelser av veier og skred, som ofte kommer av kulvertfeil. Registreringer av slike flomskader viser at de forekommer ofte og er både tidkrevende og kostbare å reparere (4). Hydrologisk modellering i små felt blir ofte oversett, selv om de potensielle skadene kan være store. Dermed er det mangel på kunnskap og liten forståelse om de hydrologiske prosessene som oppstår i små nedbørfelt.

Hovedgrunnen for få analyser av små nedbørfelt er mangel på nødvendig observasjonsdata. Små felt er ofte umålte, som vil si at det ikke eksisterer hydrologiske data fra feltene. Dette gjør det svært vanskelig å utføre kalibrering og validering av henholdsvis modeller og resultater. Det jobbes aktivt med å utvikle og forbedre modeller og verktøy som effektivt kan simulere hydrologisk respons. Både prosjektet Naturfare - Infrastruktur - Flom - Skred (NIFS) og forskningssenteret Klima 2050 har hatt stor fokus på flomberegninger og flomprognoser i små og umålte nedbørfelt (19).

I dette studiet er hensikten å analysere virkninger av både endringer i klima og arealbruk i små og umålte felt, med spesielt fokus på avrenning. Oppgaven er basert på Klima 2050 sitt arbeid med å tilpasse den hydrologiske modellen, Distance Distribution Dynamics (DDD) til umålte felt. Det valgte casestudiet er dannet på grunnlag av 11 observerte skadepunkter i Soknedal i Trøndelag fylke. Skadepunktene representerer kulvertfeil langs jernbanestrekningen Garli til Støren, registrert mellom perioden 2000-2017. Kulvertfeilene er definert som utløp for 11 små og umålte nedbørfelt og er det samme casestudiet som er analysert tidligere i (4).

Det er valgt å benytte to hydrologiske modeller for hydrologisk simulering av de valgte nedbørfeltene. DDD er benyttet for å kontrollere kulvertkapasitet ved simulering av 200-års dimensjonerende ekstremnedbør for kulverter, samt for analysering av klimaeffekter. SWAT er en hydrologisk modell valgt på grunnlag av prosjektoppgaven "Effekter av arealbruksendringer på avrenning", som er forarbeidet til denne masteroppgaven. I dette studiet er SWAT-modellen valgt for å studere effekter av arealbruksendringer. I tillegg var det av interesse å simulere sedimenttransportering i feltene, som en mulighet for å bestemme årsak til kulvertfeil.

Neste kapittel vil gi en generell beskrivelse av teorien bak hydrologisk respons og avrenning, og gi en grunnleggende oversikt over klima- og arealbruksendringer, samt effektene av dem. Norsk dimensjoneringspraksis med fokus på kulverter og vanlige årsaker til kulvertfeil er også beskrevet. I Kapittel 3 presenteres metodene benyttet i forbindelse av dette studiet for innhenting av data, samt modeller og verktøy brukt ved hydrologisk modellering av klima- og arealbruksendringer. Kapittel 4 presenterer simuleringresultatene og disse blir nærmere diskutert og analysert i kapittel 5. I siste og sjette kapittel blir oppgavens konklusjon presentert.

Teori og litteratur

2.1 Avrenning

Nedbør som lander på jorda vil til dels fordampes bort gjennom transpirasjon og evapotranspirasjon (fordamping gjennom planter og vegetasjon), infiltrere ned i jorda eller renne av på overflaten. Avrenning oppstår når feltkapasiteten overskrides, slik at det overflødig vannet renner ukontrollert på og i terrenget (20). Store norske leksikon definerer avrenning som: *Vann som renner fra nedbørfeltene og ut i vassdragene og derfra ut i havet* (21). Avrenning fyller opp vassdrag, elver og grunnvannsmagasiner, og er dermed et viktig element i vannkretsløpet. Avrenningsmengden er avhengig av flere faktorer, som for eksempel nedbørmengde, temperatur, jordas infiltrasjonsevne, feltets topografi og arealbruk. Disse feltparameterene varierer fra område til område, og kombinasjonen er unik for hvert felt. Dermed varierer også avrenning fra nedbørfelt til nedbørfelt.

2.1.1 Avrenning fra små nedbørfelt

Definisjonen på små nedbørfelt varierer. Det er vanlig å dele nedbørfelt inn i grupper basert på feltets areal. I (22) er det definert tre grupper: Svært små felt (mikrofelt) ($< 1 \text{ km}^2$), små felt ($< 50 \text{ km}^2$) og store felt ($> 50 \text{ km}^2$).

Den hydrologiske responstiden i små nedbørfelt er mye kortere enn for store felt. Eksempelvis, kan avrenningen etter en intensiv nedbørsepisode i et lite felt komme innen en time, mens det for store felt kan ta opptil flere dager (4). Forhold som ofte fører til rask respons kan være fjell, myr, tynt jordsmonn eller bratt terreng (23). Små felt opplever som regel også høyere flomtopper på grunn av mindre demping (lav effektiv sjøprosent) i området. Avrenningen i små nedbørfelt er dermed avhengig av lokale parametere og er svært sensitiv til lokale endringer (24). Det er hovedsakelig nedbør som skaper flom i mindre felt.

Små nedbørfelt kan oppleve lokale, intense og kortvarige nedbørshendelser som resulterer i plutselige og store vannføringer, såkalte styrtflommer (25). Det er derimot ikke alltid slik at større nedbørsmengder fører til store flommer. De høyeste flomtoppene oppstår som regel ved en kombinasjon av flere ugunstige forhold. Dette kan være snøsmelting, jordas metningsnivå (jordas vanninnhold) og tidligere nedbørsforløp (26).

Hydrologisk modellering av små nedbørfelt kan være problematisk nettopp på grunn av den korte hydrologiske responstiden. For å oppnå god og nøyaktig simulering kreves det små nok tidssteg for å inkludere alle vannføringene som oppstår i løpet av kort tid. I tillegg, er de fleste små nedbørfelt umålte. Det foreligger i dag svært få lange måleserier i små nedbørfelt, som gjør det utfordrende å gjøre gode analyser. Som følge av det svært begrensede datagrunnlaget i denne kategorien er det ekstra vanskelig å vurdere presentasjonen av resultatene (23). Dermed er det dannet spesifikke metoder for flomberegning i små nedbørfelt (4; 26).

2.2 Metoder for flomberegning i små nedbørfelt

Det finnes ingen bestemt metode for å forutsi vannføring i små nedbørfelt og det jobbes aktivt med å utvikle metoder for akkurat dette formålet (27). Metodene benyttet kan variere fra sted til sted og er avhengig av flere faktorer. Valg av metode bør baseres på studiets formål, datatilgang og ønsket nøykatighetsnivå (4). Tre metoder for flomberegning i små nedbørfelt som er mye benyttet i Norge er beskrevet i de neste avsnittene.

2.2.1 Den rasjonale formel

Den rasjonale formel er basert på den direkte sammenhengen mellom nedbør og avrenning, og gir et svært enkelt overslag på avrenningen. Metoden benyttes ofte ved planlegging og dimensjonering av infrastruktur i Norge, og som regel når det ikke er behov for hele hydrografien. Formelen anbefales til bruk av flomberegninger i svært små og små nedbørfelt (23). Formelen beregner flomtoppen, Q_p [m^3/s] som en funksjon av jordas infiltrasjonsevne og nedbørintensitet (22), se Ligning 2.1.

$$Q_p = c \cdot i \cdot A. \quad (2.1)$$

Her er c avrenningskoeffisienten [-], i [l/s, km^2] er nedbørintensitet og A er feltets areal [km^2]. Formelen sier at vannføringen, Q_p vil øke med økende verdier for både i og c .

Nedbørsintensiteten, i antas i formelen å være uniform over hele feltet og bestemmes ut fra en Intensitet-Varighet-Frekvens kurve (IVF-kurve). IVF-kurver gir estimater av returperioder for nedbørintensitet med forskjellige varigheter. Slike verdier er tilgjengelig for alle på Norsk klimaservicessenter hvor det er mulig å velge ulike varigheter (1 min - 24 t) og gjentakintervaller (2 - 200 år) (14). Nedbørens varighet settes lik feltets konsentrasjonstid, T_c . Dette er tiden vannet bruker på å bevege seg gjennom feltet ved å velge den

lengste strømningsdistansen mulig, til utløpet. For små og uregulerte felt benyttes formelen 2.2.

$$T_c = 0.6 \cdot L \cdot H^{-0.5} + 3000 \cdot A_{SE}, \quad (2.2)$$

hvor L er den maksimale strømningsdistansen [m] i feltet, H er elevasjonsdifferansen i feltet [m] og A_{SE} er effektiv sjøprosent.

Avrenningskoeffisienten, c er avhengig av arealbruk og arealdekke, og definerer andelen av den totale nedbørsmengden som ikke infiltreres ned i jorda. Grenseområdet for c er mellom 0-1, hvor 0 definerer 0 avrenning og at total nedbørsmengde som treffer bakken infiltreres ned i jordsmonnet, og c lik 1 definerer impermeabel flate, hvor hele nedbørsmengden som treffer bakken går til avrenning. Avrenningskoeffisienten kan bestemmes etter erfaring eller hentes ut fra tabeller. Tabell 2.1 viser eksempler på ulike overflatetyper og tilhørende avrenningskoeffisienter.

Tabell 2.1: Veiledende avrenningsfaktor, c for ufrosset dekke med returperiode 10 år (1).

Overflatetype	Avrenningskoeffisienten, c
Betong, asfalt, bart fjell, frosset mark	0.6 - 0.9
Grusveger	0.3 - 0.7
Dyrket mark og parkområder	0.2 - 0.4
Skogsområder	0.2 - 0.5

Tabell 2.1 viser at tette flater som asfalt og betong, gir mer avrenning enn for eksempel skogsområder med høyere infiltrasjonsevne. For felt med ulike arealbrukstyper er det vanlig å beregne en midlere eller vektet avrenningsfaktor, c_{gj} . c_{gj} er gitt ved Ligning 2.3.

$$c_{gj} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot A_i}{A}, \quad (2.3)$$

der c_i er avrenningsfaktorer for ulike overflatetyper og A_i er arealet av de ulike overflatetyperne og A er totalt areal.

Den rasjonale metode har mange usikkerheter. Det oppstår blant annet usikkerheter ved bestemmelse av både nedbørsintensitet og avrenningskoeffisient. I tillegg blir usikkerheten større desto større feltarealet er. Men på grunn av metodens enkle form, blir den fortsatt mye brukt over hele verden (22).

2.2.2 Nasjonalt formelverk for små og uregulerte nedbørfelt

NIFS-prosjektet er et samarbeid mellom NVE, Jernbaneverket og Statens vegvesen. Prosjektet jobber med forebygging og håndtering av naturfarer, som inkluderer flom (28). Det ble i forbindelse av NIFS-prosjektet utviklet en metode for flomberegning i små felt under

50 km², kalt Nasjonalt formelverk for flomberegning i små og uregulerte felt (23). Formelen er basert på statistisk analyse av flere nedbørfelt i Norge og resultatet er Ligningene 2.4, 2.5 og 2.6.

Regresjonsanalyse gir middelfloppen, Q_M , med følgende sammenheng:

$$Q_M = 18.97 \cdot Q_N^{0.864} \cdot e^{-0.251\sqrt{A_{SE}}}. \quad (2.4)$$

Her er Q_N den gjennomsnittlige observerte vannføringen [m³/s] for perioden 1961-1990 og kan hentes ut fra avrenningskart. A_{SE} er effektiv sjøprosent [%], som representerer feltets dempingseffekt. Ligning 2.4 sier at middelfloppen øker med Q_N , mens den reduseres ved økt dempingseffekt (23).

Forholdet Q_T/Q_M beskriver vekstkurven:

$$\frac{Q_T}{Q_M} = 1 + 0.308 \cdot q_N^{-0.137} [\Gamma(1+k)\Gamma(1-k) - (T-1)^{-k}]/k. \quad (2.5)$$

Her er Q_T [m³/s] en flomtopp med gjentaksintervall T år, Q_M [m³/s] er middelvannføringen for perioden 1961-1990, q_N er også middelvannføringen, bare i [l/s, km²], Γ er gammafunksjonen (satt til 1) og konstanten, k er gitt ved ligning 2.6:

$$k = -1 + 2/\left[1 + e^{0.391+1.54A_{SE}/100}\right]. \quad (2.6)$$

Ligning 2.5 viser at T -års flommen vil øke med den observerte gjennomsnittsvannføringen. Vekstkurven er satt opp slik at dempingseffekten reduseres ved høyere gjentaksintervaller, som for eksempel 200-årsnedbør (23).

Ligningene 2.4 til 2.6 består av tre parametere: Areal, effektiv sjøprosent og gjennomsnittlig observert vannføring, hvor sistnevnte er identifisert til å gi størst usikkerheter. Grunnen er fordi avrenningskartet har vist seg å ha varierende resultater. En fordel ved metoden er at usikkerheten lar seg kvantifisere, i motsetning til andre metoder (23).

2.2.3 Regionalisering av parametere

Som nevnt tidligere, er mangel på data en stor utfordring ved hydrologisk modellering av små felt. En løsning kan være å benytte data fra målte felt, som er nærliggende det aktuelle umålte feltet. Ved sammenligning av to slike nedbørfelt kan det estimeres parametere for det umålte feltet. Denne prosessen kalles for regionalisering, hvor et sett med atferdparametere dannes for det umålte nedbørfeltet basert på det målte feltet (27). Videre er tre regionaliseringsmetoder utviklet av Klima 2050 beskrevet.

Metode basert på regresjon

Data fra målte nedbørfelt kalibreres og feltbeskrivelser (Fber) brukes for å anta individuelle parameterverdier til det umålte feltet. Dette er basert på fysiske feltegenskaper. Metoden kan beskrives som (29):

$$\Theta_L = H_R\left(\frac{\Theta_R}{\phi}\right) + v_R, \quad (2.7)$$

hvor Θ_L er en estimert modellparameter for det umålte feltet, $H_R\left(\frac{\Theta_R}{\phi}\right)$ er en funksjonell relasjon for Θ_L , som bruker geografisk og meteorologisk Fber, ϕ . Θ_R er basert på regionale modellparametere og v_R er metodens korreksjonsledd. Én regresjonsmodell bygges for hver parameter, slik at det komplette ligningsettet danner uavhengige estimerte parametere.

Metode basert på fysisk likhet

Denne metoden er lik regresjonsmetoden, ved at den bruker Fber til identifisering av målte nedbørfelt som har fysisk likhet med det umålte. Forskjellen er at metoden overfører *hele* ligningsettet fra det målte til det umålte nedbørfeltet (27). Transformasjonen kan utføres fra ett eller flere donorfelt valgt på grunnlag av en likhetsindeksen (30):

$$\phi = \sum_{i=1}^k \frac{|X_i^G - X_i^U|}{\Delta X_i}, \quad (2.8)$$

hvor k er en FB-identifikator, X^G er en FB-verdi for det målte feltet, mens X^U er for det umålte. ΔX er definisjonsområdet av mulige verdier for X^G . Det målte nedbørfeltet som minimerer likhetsindeksen, ϕ brukes som donorfelt for det umålte feltet (27).

Metode basert på romlig nærhet

Denne metoden er den enkleste av de tre metodene beskrevet, fordi den kun antar feltkarakteristikk isteden for å kreve innhenting av data for å beregne Fber. Metoden antar at feltenes romlige nærhet alene sikrer en viss homogenitet i FBene og eventuelle avvik er tilfeldige og faller under måleusikkerhet. Som forrige metode (metode basert på fysisk likhet) blir *hele* ligningsettet transformert fra donorfeltet til det umålte feltet (27).

2.2.4 Beregningsforutsetninger

Ved planlegging og utbygginger i nærheten av elver og bekker må det tas hensyn til krav om sikkerhet mot flom. Dette for å unngå oversvømmelser og flom i bebygde områder. Det

er viktig å være klar over hvilke forutsetninger og krav som skal ligge til grunn ved beregning av flom. Kravene er basert på blant annet selve tiltaket som skal utføres, varighet og risikovurdering. Dette kan være med på å bestemme hvilke metoder som skal benyttes og eventuelle flomstørrelser det skal dimensjoneres for (23). All infrastruktur som bygges i Norge idag, har krav om å tåle en vannføring som kommer av en nedbør med en spesifikk returperiode, også kalt for nedbør med gjentaksintervall. I (31) blir gjentaksintervall definert som et mål for antall år det i gjennomsnitt er mellom hver gang en bestemt nedbørsmengde overskrides. Det påpekes i (22) at ved hydrologisk modellering bør en nedbørsintensitet som gir størst flom velges og at nedbørsvarigheten bør være minst 24 timer. Det skal i denne masteroppgaven utføres analyser på 11 små nedbørfelt knyttet til kulvertfeil registrert langs en jernbanestrekning i Soknedal. Derfor vil de neste avsnittene fokusere eksplisitt på dimensjonering av kulverter.

2.2.5 Dimensjonering av kulverter

Kulverter og stikkrenner sikrer vannstrøm gjennom veger eller fyllinger, uten at oppstrøms vannstand øker til et uønsket nivå (31). Kulverter er et dreneringssystem som beskytter nærliggende infrastruktur mot flomskader. Statens vegvesen sin håndbok definerer kulverter som et rør med diameter opptil 2.5 m og stikkrenner ved rørdiameter mindre enn 1.8 m (1). Kulverter er veldig ofte et inngrep i et naturlig miljø og er som regel alltid knyttet til et mindre nedbørfelt (31; 32). Derfor foregår dimensjonering av kulverter ofte etter erfaringsdata fra felt med hydrologisk likhet. Viktige krav ved utforming og utbygging av en kulvert er (28; 31; 33):

- Kulverten skal fungere både ved dimensjonerende flom og lavere vannføringer
- Kulverten skal sikres mot gjentetting og tilstopping
- Det skal tas hensyn til risiko for adkomst av dyr og mennesker
- Kulverten skal ha sikker fiskeoppgang
- Kulverten skal tilpasses terrenget på en estetisk måte

Dimensjonering av kulverter skjer som regel sammen med prosjektering av veg (34). Ved veibygging angis en dimensjonerende flom med gjentaksintervall på 200 år. Dette inkluderer bruer, kulverter og stikkrenner (1; 23). Vannføringen som beregnes gjelder for nedbørfeltet som dreneres av kulverten. Det er viktig med hydraulisk kontroll ved dimensjonering av kulverter. Ved lave vannføringer vil en kulvert ofte fungere som en kanal med frispeilstrømming, og ved større vannføringer kan kulverten være delvis fylt (28; 31). Kapasiteten til en kulvert bestemmes av flere faktorer. Dette kan være forholdene ved innløpet (innløpskontroll) eller forholdene i selve kulvertløpet (utløpskontroll). Korte kulverter eller kulverter med større fall ($> 10 - 20 \%$) har som regel innløpskontroll, mens utløpskontrollerte kulverter er ofte lange med lite fall (31; 34).

Av erfaring og kartlegging av store flomskader, er det dokumentert at de fleste skadene er forårsaket av menneskeskapte inngrep (35). Kulvertfeil kan oppstå av mange ulike grunner. En vanlig årsak er underdimensjonering og dårlig utforming. Dette kan for eksempel føre

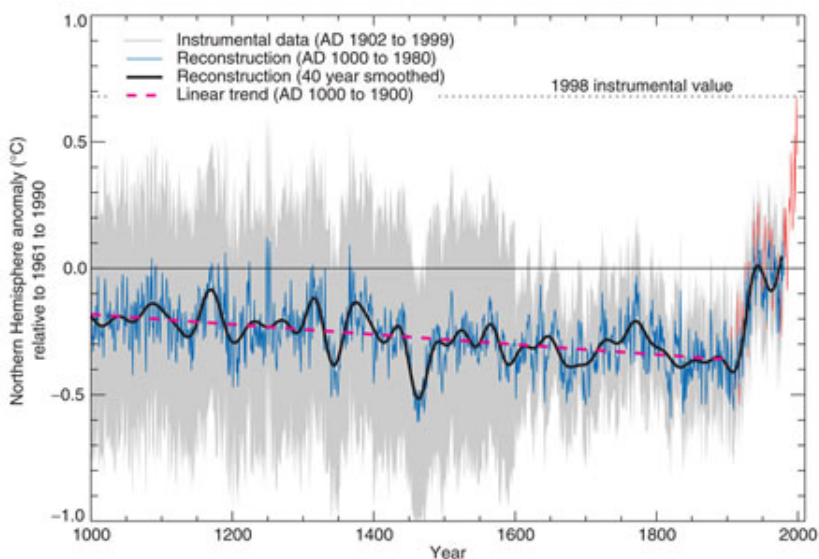
til oversvømmelser og skader på vegger. En annen kulvertfeil er redusert kapasitet grunnet tilstopping på grunn av sedimenter og annet drivgods, som ofte resulterer i overbelastning av kulverten og erosjon (32). Regelmessig vedlikehold av kulverten etter utbygning er derfor et viktig og nødvendig arbeid, da det både er kostbart og tidkrevende å reparere flomskader (4).

2.3 Effekter av menneskelig aktivitet

Dagens samfunn er sterkt preget av menneskelig aktivitet, og effektene av antropologisk aktivitet har vært et tema som har fått stort fokus innenfor hydrologien de siste årene. Befolkningsvekst, sosiologisk og teknologisk utvikling har ført til et økende behov av jordas ressurser, inkludert vann og areal (36). Såkalte antropogene forstyrrelser har ført til modifiseringer av det naturlige miljøet på jorda (37). Som nevnt tidligere, skal det i denne masteroppgaven fokuseres på effektene av klimaendringer og arealbruk på det hydrologiske systemet i nedbørfelt og vassdrag. Klimaendringer og arealbruk påvirker et hydrologisk respons både direkte og indirekte, ved at værforholdene og feltkarakteristikk, som har innvirkning på avrenningen blir endret. Det er viktig å vite hvordan menneskelig aktivitet kan påvirke de hydrologiske prosessene og eventuelle konsekvenser av dem.

2.3.1 Klimaendringer

Klimaendringer defineres som en endring i klima som indirekte eller direkte skyldes menneskelig aktivitet, ved sammensetningen av den naturlige globale atmosfæren har blitt endret (38). Klimaendringer er et fenomen som har blitt omdiskutert blant forskere, politikere og i samfunnet generelt. Men endringer i klima har alltid eksistert fra år, til tiår og århundre. Det er derimot ulike årsaker til disse endringene, både naturlige og ikke naturlige. Før den industrielle revolusjonen var hovedårsaken til klimaendringer naturlige. Dette er variasjoner og endringer i klima som kommer med de ulike årstidene og sesongene. Etter revolusjonen skyldes endringene i klimaet hovedsakelig menneskelig aktivitet (3). En av de første publikasjonene om klimaendringer og menneskelig aktivitet kom allerede på slutten av 1900-tallet, og ble presentert gjennom den såkalte "hockeykølle-grafen" (39). Grafen i Figur 2.1 viser en tydelig og drastisk temperaturøkning på jorda rundt 1950-tallet som kan kobles til menneskelig forbruk av fossilt brensel, som kull, gass eller olje. Dette har ført til et økt utslipp av klimagasser, som igjen har resultert i global oppvarming (39). Det bør påpekes at grafen fikk stor kritikk da den ble presentert, men har i senere tid fått støtte av flere organisasjoner, blant annet NASA (40).



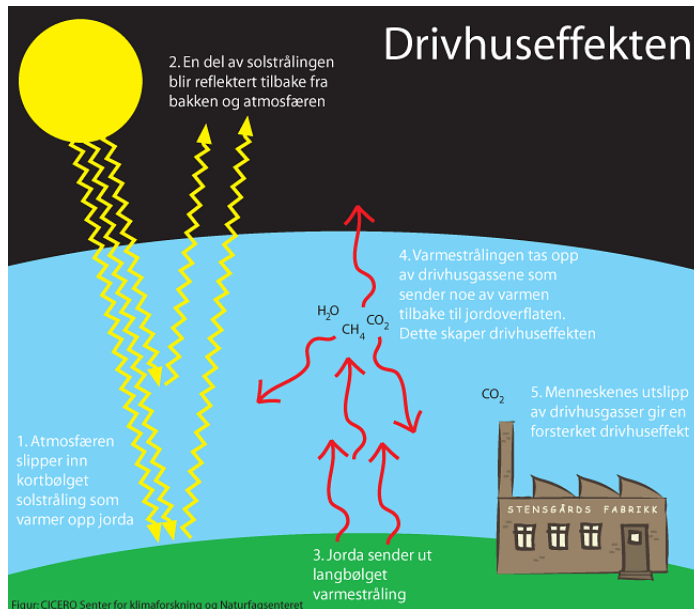
Figur 2.1: ”Hockeykølle-grafen” viser gjennomsnittlig temperatur på den nordlige halvkulen fra år 1000 og frem til idag. Temperaturen har vært jevn i nesten 900 år, frem til de siste tiårene hvor gjennomsnittlig temperatur har økt drastisk. Grafen får en form som ligner en hockeykølle, derav navnet (6).

Drivhuseffekten og global oppvarming

Begrepet ”drivhuseffekt” ble for første gang benyttet av fysikeren og matematikeren Joseph Fourier (41). Drivhuseffekten er en naturlig prosess som er essensiell for alt liv på jordkloden. Uten denne effekten hadde den gjennomsnittlige temperaturen på jorda vært $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, isteden for $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, som den er idag (42). Drivhuseffekten sørger for en temperatur som det er mulig å leve i. Energien som sola sender ut til jorda er hovedsakelig kortbølgede strålinger, i form av lys. Deler av denne strålingen som kommer gjennom atmosfæren trefter jordoverflaten og blir reflektert som langbølgede strålinger, i form av varme. Det er drivhusgassene, også kalt klimagassene i atmosfæren som absorberer denne varmen og varmer opp jorda. Det er altså drivhusgassene som holder på varmen fra energien som kommer fra sola. Rundt 30 % av strålingen fra sola reflekteres tilbake til verdensrommet, mens de resterende 70 % blir absorbert av drivhusgassene (43). Det er registrert en global økning av jordas gjennomsnittstemperatur på omtrent $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ siden 1880. Den globale oppvarmingen som observeres idag er hovedsakelig forårsaket av økt mengde drivhusgasser i atmosfæren grunnet menneskelig aktivitet. Figur 2.2 viser en grafisk presentasjon av drivhuseffekten.

De viktigste drivhusgassene i atmosfæren er vanddamp (H_2O), karbondioksid (CO_2), metan (CH_4), dinitrogenoksid (N_2O) og ozon (O_3). De økte klimagassene i atmosfæren som skyldes menneskelig aktivitet er hovedsakelig CO_2 og CH_4 , som kommer av henholdsvis energiproduksjon og jordbruk (38). CO_2 utgjør den største menneskelige

klimagassen på ca. 70 % av de totale unaturlige klimagassutslippene (42).



Figur 2.2: Drivhuseffekten er den naturlige prosessen som er nødvendig for alt liv på jorda. Drivhusgasser absorberer en del av solstrålingen og varmer opp jorda (7).

De menneskelige klimagassutslippene kommer derimot ikke bare fra energiproduksjon og jordbruk. En annen spesifikk årsak til økt drivhuseffekt, er nedhugging og fjerning av store skogsområder (42). Skog, myr og hav er de største og naturlige karbonlagrene på jordkloden (44). Et karbonlager tar opp karbondioksid fra atmosfæren og lagrer det over tid gjennom fotosyntese. Når for eksempel et tre blir brutt ned, vil den lagrede CO₂-en bli naturlig frigjort tilbake i atmosfæren. Ved avskoging og fjerning av trær og annet vegetasjon blir lagringstiden av CO₂ forkortet og jordas evne til å fange opp og lagre CO₂ vil bli redusert. Dette vil føre til økt CO₂-mengde i atmosfæren (42). I 2004 beregnet FNs klimapanel at avskoging utgjør hele 17 % av det globale klimagassutslippet (45). Det har derfor blitt et stort fokus på bevaring av skog og vegetasjon for å redusere utslippene og den globale oppvarmingen (46). Et globalt mål er å redusere de menneskelige klimagassutslippene for å begrense temperaturøkningen fra 1850 til 2100, til 2 °C. Dette er det såkalte *togradersmålet*. For å kunne oppnå dette målet, må det globale klimagassutslippet være mellom 40-70 % lavere enn det var i 2010 (47). I Parisavtalen av 2006 ble det også enighet om å forsøke å begrense økningen til kun 1.5 °C (48).

2.3.2 Arealbruksendringer

Miljøstatus definerer areal som en begrenset naturressurs som mennesker bruker til flere ulike formål (36). Menneskelig aktivitet har ført til modifisering av det naturlige landskapet, slik at det har oppstått en endring i arealets bruksområde og verdi. Endringer i arealbruk oppstår hovedsakelig på grunn av demografisk utvikling, sosioøkonomiske forhold, klimatiske endringer og vannforvaltningspraksisk (18). Andre faktorer som defineres som drivere for arealbruksendringer er topografi, avstand fra elver, byer og hovedveier, sannsynlighet for erosjon og befolkningstetthet (49). Arealbruksendring defineres som en kumulativ endring, fordi endringen oppstår lokalt og på grunn av lokale grunner. Dermed vil arealbruksendringer kun gi effekt på nedbørsskala og ha liten innvirkning på den globale hydrologiske responsen (50). Eksempelvis, blir arealbruksendringer i (49) delt inn i fem ulike grupper: Gruvedrift, jordbruk, urbanisert område, avskoging og påskoging.

Arealbruk knyttes ofte til arealdekke, men ordene er ikke synonymer og må ikke forveksles (49). Arealdekket beskriver det fysiske materialet på jordoverflaten i et område, som for eksempel vegetasjonstype skog eller gress. Et område med én type arealdekke kan benyttes til flere ulike formål eller da arealbruk. Dermed vil en endring av arealbruk ofte føre til en endring i arealdekket i tillegg. Som for eksempel ved avskoging hvor store deler av et skogsområdet fjernes for at arealet skal benyttes til andre formål, som veger eller bebyggelse (51).

2.3.3 Effekter av klima- og arealbruksendringer på avrenning

Det hydrologiske systemet er kompleks og består av mange komponenter, som er avhengig av og påvirker hverandre. Både endringer i klima og arealbruk vil påvirke avrenningen i et nedbørfelt. Det er mulig å trekke denne konklusjonen bare ved å studere Den rasjonale formel (se Ligning 2.1), som kun er en forenkling av nedbør-avrenningsprosessene. Mer nedbør vil automatisk føre til mer avrenning, og endringer i både arealbruk og arealdekke vil påvirke fordamping og mengden vann som kan bli infiltrert ned i jordsmonnet.

Klimaendringer i Norge

Klimaendringene påvirker været, som blant annet inkluderer temperatur, nedbør, vind og skydekke (3). Klimaendringer vil dermed ha direkte innvirkning på avrenning og hydrologisk respons i et nedbørfelt. Endringer i nedbørsmønstre vil også endre vannføringsmengden i elver og den tidsmessige forekomsten av vannføringene. Temperatur bestemmer nedbørstype og fordamping i feltet. I tillegg vil temperaturen kunne påvirke snømengde og tidspunkt for snøsmelting. Jordfuktigheten vil også bli påvirket av nedbørsmengden og temperaturen. Det sies at klimaendringer vil føre til en intensivering av de klimatiske forholdene på jorda. Det vil si at tørre områder vil bli enda tørrere, og våte områder enda våtere (40).

For Norge vil global oppvarming og klimaendringer føre til en økt temperaturer på ca. 4.5 °C og omtrent 18 % mer nedbørsmengde, i slutten av dette århundre (3). Det vil også

oppstå flere ekstreme nedbørsepisoder og dermed flere og større regnflommer. Den økte temperaturen vil føre til tidligere snøsmelting, som forårsaker at vårfloppen kommer tidligere enn før, men med lavere flomtopp. Det er også antatt flere antall flommer i løpet av høst og vinter. Klima i Norge 2100-rapporten sier at det er mulighet for at snøsesongen blir kortere i fremtiden (52).

Arealbruksendringer i Norge

Arealbruksendringer påvirker de hydrologiske parameterene i et felt, som igjen har innvirkning på en rekke faktorer. Dette er faktorer som intersepsjon, infiltrasjon, evapotranspirasjon og avrenning (50). Endringer i arealbruk og arealdekke har i likhet med klimaendringer effekt på avrenning og tidsmessig forekomst av vannføringen, men også vannkvalitet. Oversikt over eventuelle virkninger av arealbruksendringer på avrenning er presentert i Tabell 2.2. Arealbruksendringer gjennomføres som regel for alle andre formål enn å modifisere hydrologisk respons, derfor er effektene av arealbruksendringer ofte uventet og uforutsigbare (49).

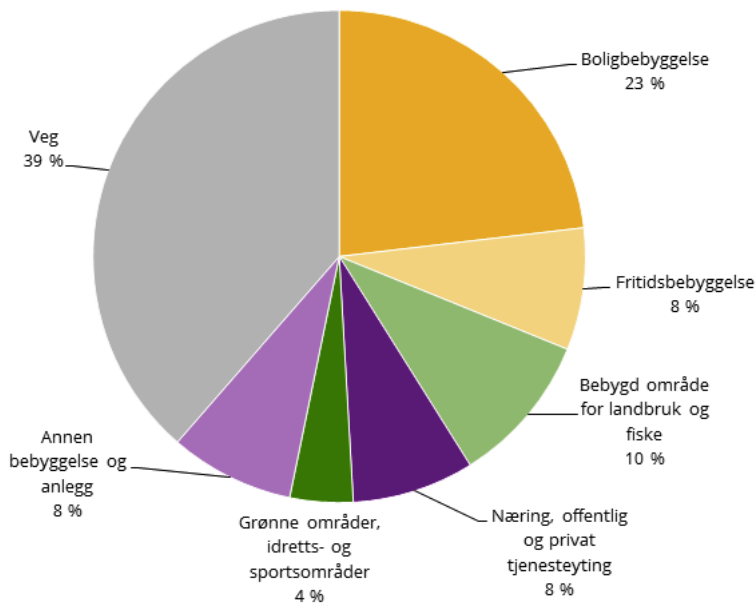
Tabell 2.2: Oversikt over effekter av arealbruksendringer på avrenning, basert på resultatene fra prosjektoppgaven "Effekter av arealbruksendringer på avrenning" (2).

Arealbruksendring	Effekt
Avskoging	Økt avrenning
Påskoging	Redusert avrenning
Økt urbanisert område (urbanisering)	Økt avrenning
Økt gressområder	Økt avrenning

Arealbrukseffekter på avrenning presentert i Tabell 2.2 er basert på utvalgte studier i forbindelse med prosjektoppgaven skrevet høsten 2017 (2). Studiene som ligger til grunnlag for resultatene er blant annet (53), (54), (55) og (56). Når det skjer endringer i arealbruk, endres som nevnt også arealdekket. Dette vil kunne påvirke nedbørsmengden som infiltreres ned i jorda. Ved for eksempel urbanisering er det vanlig at andelen impermeable flater (asfalt, veier, bygninger osv.) øker, slik at mer nedbør renner av som overflatevann og går til avrenning. Samtidig, vil vegetasjonstype i feltet kunne påvirke feltkapasiteten, ved at røtter også tar opp vann. I tillegg vil høy vegetasjon kunne føre til økt fordamping. Derfor er avrenningen i et område med mye gress høyere, sammenlignet med for eksempel skogsområder.

Norge består i utgangspunktet av store naturområder. I dag er omtrent 2 % av landets areal bebygde. Hedmark registreres som landets mest bebygde areal, mens Oslo har størst andel bebygde areal (57). Figur 2.3 viser en oversikt over arealbruksfordelingen i Norge per 2015. Figuren viser at den største arealbruksandelen er veg, deretter kommer bebyggelse og jordbruk. Denne utviklingen kommer av urbanisering, og med en befolkning som fortsetter å øke vil også andelen bebygde og/eller urbaniserte områder øke. Samtidig har det blitt et større fokus på klimatilpasning og flomdemping, hvor skogsområder vernes og implementasjon av flere miljøvennlige tiltak, som grønne tak på bygninger eller mer

vegetasjon og regnbed i parker (58). Dermed kan det være vanskelig å forutsi fremtidige effekter av arealbruksendringer.



Figur 2.3: Oversikt over arealbruksfordelingen i Norge per 2015 (8).

2.3.4 Analyse av klima- og arealbrukseffekter

Det hydrologiske systemet drives av naturlige variasjoner, som med tiden har blitt påvirket av menneskelig aktivitet. Det eksisterer flere studier som beviser innvirkningen av menneskelig aktivitet på det hydrologiske systemet, men det kan være vanskelig å skille mellom naturlige og ikke-naturlige drivkrefter. Usikkerheten ligger i størrelsen på effekten av menneskelig aktivitet og antropogene forstyrrelser (49; 50; 53).

Det eksisterer flere metoder for å analysere effektene av klima- og arealbruksendringer. Metodene er hovedsakelig basert på observasjoner (50):

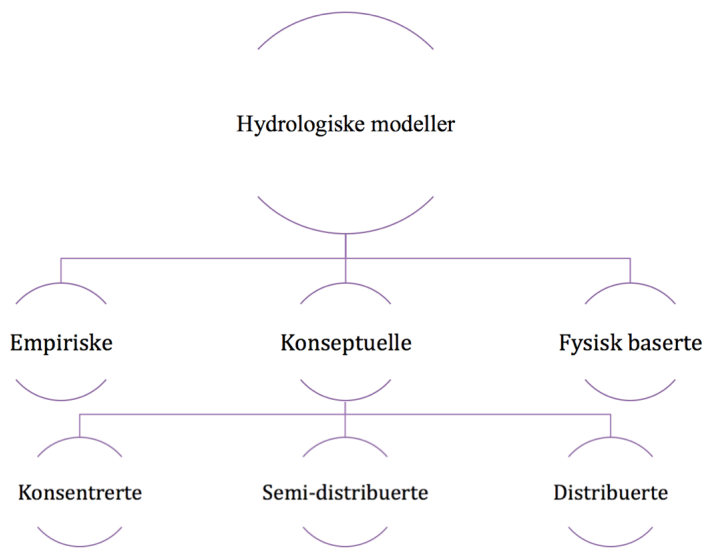
1. Enkeltfeltsstudier
2. Flerfeltsstudier
3. Referansefeltsstudier
4. Modellstudier

I feltstudier utføres det sammenligninger av observerte vannføringsdata, før og etter en endring i et mindre nedbørfelt, eller i forhold til et referansefelt. Forskjellen på avrenning etter endringene brukes som grunnlag for å se på innvirkning av klima- og arealbruksendringer. Utførelsen er enkel, men har enkelte svakheter. Noen utfordringer er man-

gel på data for sammenligning eller at referansefeltene ikke har likhetstrekk i størrelse, topografi og jordforhold. I dag er det som regel modellstudier og hydrologisk modellering som benyttes. Fordelene ved hydrologiske modeller er mer kontroll over parametere, slik at det kun fokuseres på analysens formål. På denne måter blir forstyrrelsen av andre påvirkningskrefter eliminert. Usikkerheten for denne type studier ligger i kvaliteten på inngangsdata og selve modellens egenskaper til å representere dynamikken mellom hydrologiske parametere og respons (50).

Hydrologisk modellering

Hydrologisk modellering har en ledende rolle innenfor simulering av det hydrologiske systemet. Det har blitt et nødvendig hjelpemiddel for blant annet vannregulering, arealforvaltning, flomkontroll, prosjektering og evaluering av fremtidige scenarier (18). Ved hydrologisk modellering er det som regel meteorologiske data som er viktigst for å kunne simulere nedbør-avrenningsprosesser. Deretter er det vanlig å kalibrere og validere modellen med hydrologiske data, for å teste modellens presentasjon av hydrologisk respons. Det jobbes idag aktivt med å utvikle og forbedre modeller for å finne effektive metoder for å simulere hydrologisk respons og avrenning. Det har også vært en økt interesse for integrering av tilleggsverktøy, som for eksempel et geografisk informasjonssystem (GIS) (20).

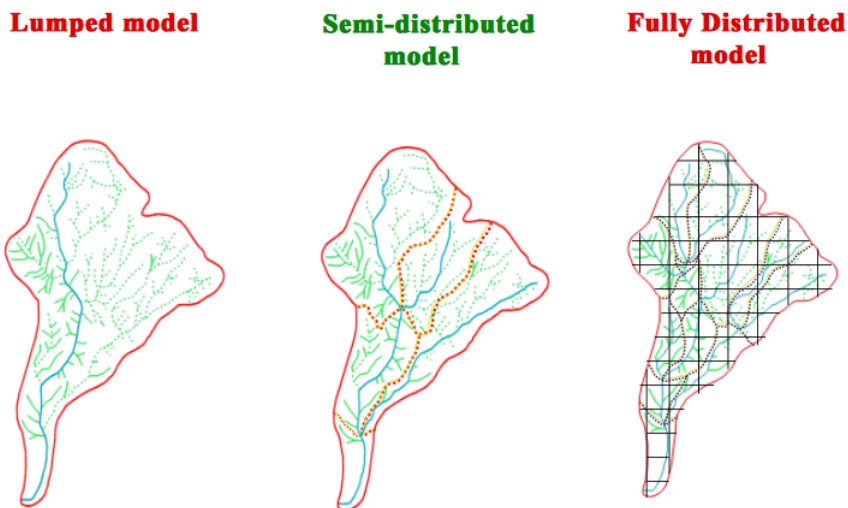


Figur 2.4: Tre typer klassifisering av hydrologiske modeller basert kompleksitet og beskrivelse av romlig og tidsmessig variasjon.

En hydrologisk modell er en matematisk forenkling eller representasjon av et virkelig hydrologisk system i naturen (59). En hydrologisk modell er bygget opp av definerte ma-

tematiske formler som beskriver dynamikken i systemet. Det hydrologiske systemet er som nevnt kompleks, bestående av flere komponenter som påvirker og er avhengig av hverandre. Modellens matematiske representasjon av et hydrologisk system varierer i kompleksitet og bør derfor velges ut ifra formål, bruksområde og ønsket nøyaktighet. Som regel skiller det mellom tre ulike modellstrukturer (18).

Det skiller mellom empiriske, konseptuelle og fysisk baserte hydrologiske modeller, se Figur 2.4. Empiriske modeller er vanligvis enkle analytiske modeller som er basert på observerte data (60). Disse modellene beskriver ikke fysiske transformasjonsfunksjoner mellom inn- og utgangsdata. Det vil si at omgjøringen fra inn- til utgangsdata utføres uten hensyn til underliggende prosesser som opptrer i realiteten. Konseptuelle modeller beskriver de ulike prosessene i det hydrologiske systemet på en forenklet måte, basert på observasjoner av spesifikke prosesser (18). De hydrologiske prosessene blir altså representert implisitt gjennom forenklete empiriske funksjoner. Konseptuelle modeller er typisk benyttet ved modellering av vannmagasiner. Fysisk baserte, også kalt prosessbaserte modeller beskriver derimot eksplisitt de fysiske prosessene i et hydrologisk system, ved hjelp av bevaringslover. I teorien vil inngangsdata være målbare parametere som kan bestemmes logisk ut fra kunnskap (60). Med en økende tilgjengelighet av høyt oppløste og romlige distribuerte datasett, samt regnedyktige datamaskiner er det og blitt mer vanlig å benytte seg av fysisk baserte modeller (60).



Figur 2.5: Inndelinger av hydrologiske modeller basert på modellens distribusjon av nedbørfeltet for hydrologisk simulering. Konsentrerte modeller (lumped) og distribuerte modeller (distributed) (9).

Hydrologiske modeller fordeles også inn i kategorier basert på deres beskrivelser av tidsmessig og romlig variasjon av nedbørfeltet, se Figur 2.5. Faktorer som er romlige og tidsmessige varierende i et felt er for eksempel væreparametere som nedbør og temperatur, samt topografi, og dette må inkluderes for riktig beskrivelse av systemet. Romlig kon-

sentrerte (engelsk: lumped) modeller ser på nedbørfeltet som én enhet. Romlige og tidsmessige variasjoner blir i slike modeller ikke tatt hensyn til og representeres som en gjennomsnittlig verdi av alle feltparameterene. Distribuerte og semi-distribuerte modeller deler nedbørfeltet i mindre deler, henholdsvis i ruter med konstante størrelser og i hydrologiske respons enheter, HRU. Såkalte HRUer blir som regel delt inn etter områder med hydrologisk likhet basert på forholdene i feltet (18). Hver rute i rutenettet eller HRU beskrives av egne parametere og hydrologisk respons beregnes separat for hver enhet. Slik bevares den romlige og tidsmessige variasjonen i terrenget og de hydrologiske prosessene som oppstår i nedbørfeltet (61). Ved hydrologisk modellering har det blitt vanlig å benytte seg av romlig konsentrerte eller distribuerte modeller (62). For modellering av små nedbørfelt er det viktig at både den romlige og tidsmessige oppløsningen er fin/liten nok, slik at lokale variasjoner i terrenget ikke skal bli ”oversett” eller ”flatet ut”. På denne måten vil for eksempel en flomtopp som oppstår raskt etter en nedbørsepisode bli inkludert i simuleringen.

Som nevnt tidligere, er utfordringen innenfor utvikling og forbedring av hydrologiske modeller at de fleste modellene krever mange parametere for å kunne utføre simuleringer. Dette gjør derimot modellstrukturen og variablene mer usikker. Vanlige simuleringsavvik er under- og overestimering av flomtopper, mens den generelle hydrografen er god (2). Det jobbes med å redusere denne usikkerheten, uten at det går på bekostning av beskrivelsen av det hydrologiske systemet. Klima 2050 har for eksempel hatt spesielt fokus på dette i sin Arbeidspakke 2 (se Del 2.2.3).

I forhold til hydrologisk simulering av arealbrukseffekter, eksisterer det få hydrologiske modeller som eksplisitt ser på effekten av arealbruksendringer. Det har blitt utført mange studier innenfor dette feltet og modelleringen har opplevd stor fremgang. Dette gjelder både for beskrivelse av parameterene, kalibrering og reduisering av usikkerheter, men metodene krever fortsatt forbedring (63). Det er viktig at modellen som benyttes beskriver alle de hydrologiske prosessene som påvirkes av arealbruk og arealdekke (se Del 2.3.2). Det benyttes ofte modifiserte eller tilpassede hydrologiske modeller ved analysing av spesifikke forhold, som klima- og arealbruksendringer.

2.4 Fremtidige prognoser av klima- og arealbruksendringer

For å kunne utføre hydrologisk modellering av fremtidige klima- og arealbruksendringer, må det dannes prognoser for fremtidig utvikling av både klima og arealbruk. Det finnes spesifikke metoder for å anta fremtidige forhold av klima og arealbruk.

2.4.1 Klimaframskrivninger og nedskaleringmetoder

Beregninger av fremtidens klima blir kalt for klimaframskrivninger og er basert på resultater fra globale klimamodeller. Norsk klimaservicesenter har klimaframskrivninger for hele

Norge tilgjengelig på deres nettsider (64). Her er det mulig å velge mellom ulike framskrivninger (for eksempel nedbør, temperatur eller avrenning) og geografisk område. FNs klimapanel benytter i sin femte hovedrapport to modeller: Globale klimamodeller (GCM) og jordsystemmodeller (ESM). Disse modellene beregner klimasystemet via matematiske formler og variasjoner i klima beregnes på grunnlag av ubalanse i energiutveksling (65).

Grunnlaget for global klimamodellering er antagelser av antropogene klimagassutslipp i fremtiden, såkalte utslippsscenarioer. Utslippsscenarioene beregner fremtidig ekstra klimapådriv til atmosfæren og blir presentert som Representative Concentration Pathways (RCP) og styres hovedsakelig av befolkningsvekst, utvikling av teknologi og næring, samt politiske krav (65). Det beskrives hovedsakelig tre utslippsscenarioer for Norge i FNs klimapanel sin femte hovedrapport, se Tabell 2.3.

Tabell 2.3: Oversikt over de tre utslippsscenarioene benyttet for Norge ved klimaframskrivninger, etter FNs klimapanel sin femte hovedrapport (3).

RCP	Klimagassutslipp	Beskrivelse
RCP2.6	Lavt utslipp	Stabile klimagassutslipp frem til 2020 og deretter drastisk reduksjon
RCP4.5	Middels klimagassutslipp	Stabile eller svakt økende utslipp fram til 2050 og deretter reduserte utslipp
RCP8.5	Høyt utslipp	Kontinuerlig økning av klimagassutslipp (Fortsettelse av dagens utslipp)

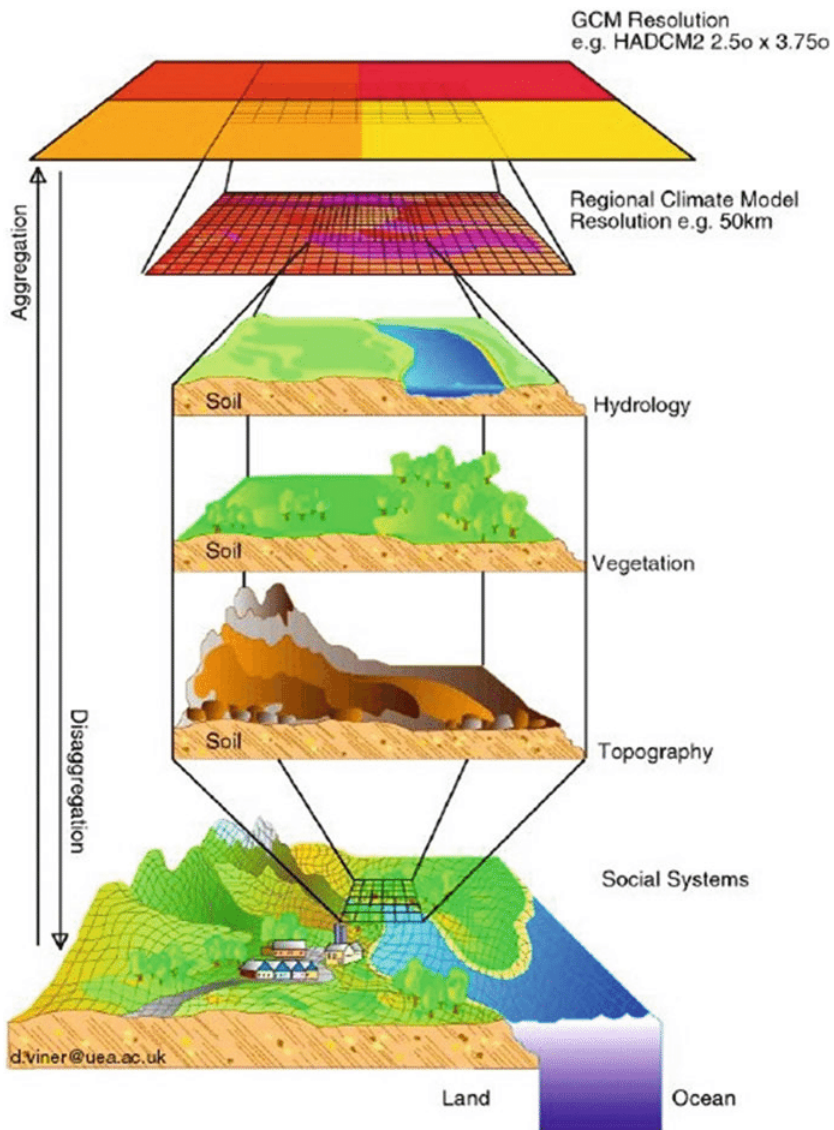
Tallet tilknyttet RCPene beskriver ekstra klimapådriv til atmosfæren på slutten av dette århundre sammenlignet med forholdene i år 1765 (3). Det vil for eksempel si at for utslippsscenario, RCP2.6 er ekstra varmetilførsel til atmosfæren 2.6 W/m² høyere enn i 1765 (65). I motsetning til de andre scenariene er det idag for akkurat dette scenario (RCP2.6) kun framskrivninger av fremtidig temperatur og havnivå. RCPene har sine usikkerheter, blant annet fordi utviklingen av klimagassutslipp i fremtiden kun er basert på antagelser. Usikkerhetene begrenses til et intervall ved å benytte resultater fra flere modellberegninger, også kalt ensembler (3). Scenariene gjør det derimot lettere å se hvilken utviklingsbane ulike klimatiltak vil kunne føre til. Det er ikke mulig analysere klimaeffekter for Norge og norske vassdrag direkte fra GCM-resultatene. Dette fordi den romlige og tidsmessige oppløsningen i en GCM er for stor. Oppløsningen kan for eksempel være på 100 x 100 km² rutenett, med månedlige tidssteg. De hydrologiske modellene krever finere oppløsning og kortere tidssteg for å kunne modellere effektene på nedbørskala. Klimaet lokalt i et område påvirkes av globale klimaforhold, men også lokale forhold (topografi, arealbruk og arealdekke) som kan føre til varierende klima over terrenget (3). For å løse dette problemet har det blitt utviklet en teknikk kalt nedskalering for å få finere oppløsning og øke nøyaktigheten av resultatene. Formålet ved nedskalering av klimadata er å oppnå en sammenhengende og nøyaktig beskrivelse av klimadata med en liten romlig oppløsning, i forhold til dataene fra GCM. Klima i Norge 2100-rapporten beskriver to metoder for nedskalering av GCM-resultater (3) Disse metodene er beskrevet i videre avsnitt.

Empirisk statistisk nedskalering, ESD

Det benyttes statistiske analyser av måledata og observasjoner for å danne en sammenheng mellom klima lokalt i et område og klima på storskala. Når klima på storskala er kjent, kan det gjøres beregninger for det lokale klima og et grunnlag for empirisk statistisk nedskalering kan bli dannet. Basert på globale klimaendringer benyttes de empiriske sammenhengene for å beregne lokale klimaendringer via hydrologisk modellering (65).

Dynamisk nedskalering/regional klimamodellering, RCM

Dynamisk nedskalering kalles også for regional klimamodellering, RCM. Denne metoden er bygget opp likt som en GCM, bare at rutenettet har mindre ruter for å forbedre representasjonen av lokale forhold, se Figur 2.6. Rutenettet legges til i et geografisk begrenset område. Denne metoden kan bestå av systematiske avvik sammenlignet med observerte klimadata. Det kan for eksempel være at de modellerte dataene skal ha en realistisk absoluttverdi, som antall dager hvor temperatur eller nedbør overgår er terskelverdi. Det er viktig å biaskorrigere slike systematiske avvik (3).



Figur 2.6: Oversikt over nedskaleringsprosessen ved dynamisk nedskalering, også kalt regional klimamodellering (RCM) (10)

2.4.2 Arealbrukscenarier og arealbruksmodeller

Arealbruksmodeller brukes til å danne såkalte arealbruksscenarier (56). Modellene benyttes til flere ulike formål, blant annet innenfor arealplanlegging og ved politiske bestemmelser (18). Grunnlaget for alle arealbruksscenarier er menneskelig aktivitet, spesielt demografisk utvikling (18). Noen modeller fokuserer på dynamikken mellom enkeltindivider, mens andre ser på sosioøkonomiske eller biofysiske forhold. I (66) presenteres ulike arealbruksmodeller som er basert på spesifikke drivkrefter.

Et arealbruksscenario er et potensielt arealbruksforhold og/eller arealdekke i et område (66). Det er mulig å dele arealbruksscenarier i to grupper, basert på hvordan de blir dannet og formålet av dem. Det kan dannes et hypotetisk arealbruksscenario for analyse av arealbrukseffekter. Hypotetiske scenariene er som regel mer ekstreme og er ikke nødvendigvis realistiske forhold i fremtiden. Dette kan for eksempel være fullstendig avskoging eller påskoging i et område. I andre studier kan fokuset være den faktiske utviklingen av arealbruksforhold i et område. Slike arealbrukscenarier er sannsynlige fremtidige forhold, som ofte er dannet på grunnlag av observerte trender eller en tydelig utvikling som har skjedd over tid, hvor deler av et område har endret seg gradvis. I (18) er ulike arealbruksscenarier som ofte er benyttet ved analyse av arealbrukseffekter presentert.

2.4.3 Fremtidig tilpasning ved dimensjonering

Både endringer i klima og arealbruk vil kunne føre til større vannmengder i fremtiden og det er de bebygde områdene som er mest utsatt for oversvømmelser og flomskader. Arealplanlegging legger krav innenfor arealbruk og klimatilpasning. Det er nødvendig å planlegge arealbruk for å kunne utnytte arealressursene på best mulig måte, samtidig som å minimere klimagassutslippene. Dette kan for eksempel være å unngå å bygge ut i flom- og skredutsatte områder (67). Men det kan også være å samle bebygde områder sammen med kollektivtrafikk, for å redusere lange distanser som fører til mye pendling og økt antall biler (36).

Med grunnlag i de teoretiske effektene av arealbruk og klimaframskrivninger, er det utviklet anbefalinger for klimatilpasset dimensjonering. Disse er basert på det mest ekstreme utslippsscenarioet (RCP8.5), etter "føre-var"-prinsippet (68). Det anbefales at det legges til et klimapåslag eller en klimafaktor (K_f) på dimensjonerende nedbørsintensitet. Det er foreslått tre ulike klimapåslag, 0 %, 20 % og 40 %, avhengig av hvor i landet vassdraget befinner seg (22). Det finnes forskjellige måter å beregne klimafaktor på, men felles for alle metodene er at det benyttes klimaframskrivninger fra RCM og GCM for estimering av fremtidige nedbørintensiteter og at forventede nedbørintensiteter i fremtiden sammenlignes med en kjent nedbørintensitet fra en referanseperiode (16).

I (65) anbefales det en klimafaktor på 1.2 i små nedbørfelt og urbane områder. Det rådes også at installasjoner som kulvert er med dimensjonerende nedbør med gjentakintervall på 200 år, bør ha et klimapåslag på 20 %. Det legges til at det bør gjøres egne vurderinger for om et høyere klimapåslag skal benyttes, for eksempel om feltet responderer veldig raskt til ekstreme nedbørsepisoder (68).

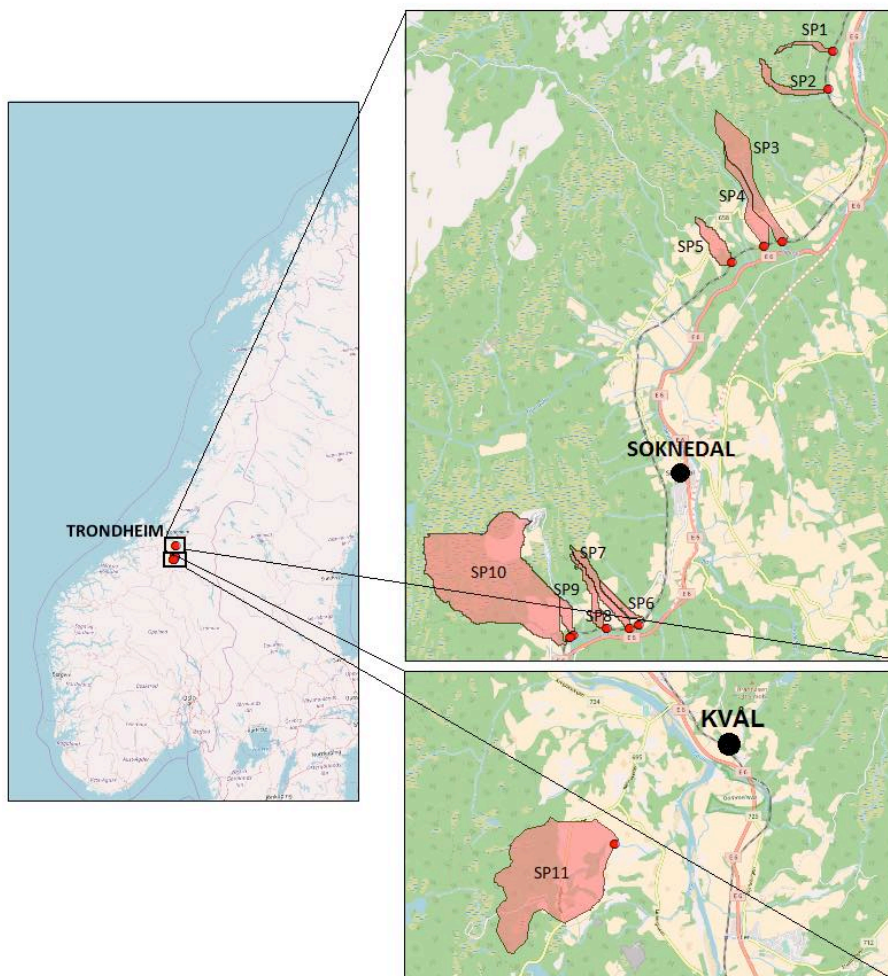
Kapittel 3

Metode - Modeller og materiale

Denne delen av oppgaven beskriver framgangsmåten og metodene benyttet for å analysere effekter av både klima- og arealbruksendringer. Beskrivelse av hvordan nødvendige data er hentet inn, samt modellene og verktøy benyttet til hydrologisk modellering av små og umålte nedbørfelt.

3.1 Observasjonsområde

Observasjonsområde valgt i denne masteroppgaven er 11 små og umålte nedbørfelt i Soknedal i Trøndelag fylke. Alle feltene har utløp i elven Gaula, som er hovedelven i Midt-Norge og drenerer et areal på totalt 3660 km². Gaula er 145 km lang og starter i Holtålen og renner ut i Trondheimsfjorden i Leinstrand. Gaula-elven er kjent for sine store og plutselige flommer. Området består av få elver og har dermed lite demping, som fører til rask avrenning etter en nedbørepisode. Elven Sokna tilfører mest vann til Gaula. Sokna-området er bratt med mange små bekker som renner inn i elven. Området er hovedsakelig dekket av skog, men i de høyere områdene er det også dyrket mark og myrområder (4). Figur 3.1 viser kart over observasjonsområdet valgt for dette studiet.



Figur 3.1: Observasjonsområde og de registrerte kulvertfeil med tilhørende nedbørfelt (SP1-SP11).

Som nevnt tidligere, er observasjonsområdet definert av kulvertfeil registrert langs jernbanestrekningen mellom Garli og Støren i Soknedal. Disse 11 skadepunktene er blitt satt som utløp og avgrensers 11 tilhørende umålte nedbørfelt. Med andre ord dreneres nedbørfeltene av disse 11 kulvertene. Nedbørfeltene studert i denne oppgaven har et areal mellom 0.05 og 2.1 km² og kan defineres som svært små (mikrofelt) eller små nedbørfelt (se Del 2.1.1). Tabell 6.1 i Vedlegg 1 viser informasjon om nedbørfeltene feltkarakteristikk. De samme feltene ble også studert i (4), og mye informasjon og data er hentet fra dette arbeidet. Feltene har i dette studiet fått tilegnet navnene SP1, SP2,... og SP11, hvor

SP står for ”skadepunkt” og de tilknyttede tallene beskriver ”rekkefølgen” på kulvertfeilene langs jernbanen. Kulvertfeilene er registrert i løpet av perioden 2000-2017. Tabell 3.1 viser informasjon om skadepunktene.

Tabell 3.1: Kulvertfeil, definert som skadepunkter (SP) registrert langs jernbanestrekningen mellom Garli og Støren, i perioden 2000 og 2014. ”-” betegner en ukjent verdi (4).

SP	Beliggenhet	Dato	Rest-type	Volum av rester [m ³]	Distanse fra jernbane [m]
SP1	Soknedal–Støren	27.03.12	Jord	25-100	<10
SP2	Soknedal–Støren	19.06.10	Stein	25-100	>100
SP3	Soknedal–Støren	21.04.00	Jord	25-100	10-30
SP4	Soknedal–Støren	14.03.12	Jord/Stein	>500	30-100
SP5	Soknedal–Støren	21.04.00	Jord	25-100	10-30
SP6	Garli–Soknedal	21.04.00	Jord	5-25	10-30
SP7	Garli–Soknedal	13.03.12	Jord/Stein	25-100	<10
SP8	Garli–Soknedal	28.04.14	Jordskred	100-500	10-30
SP9	Garli–Soknedal	21.04.00	Jord	5-25	-
SP10	Garli–Soknedal	23.04.00	Jord	5-25	10-30

Kulverten for nedbørfelt SP11 ligger ikke på jernbanestrekningen, men en mindre veg i Kvål i nærheten av Melhus. Dermed er spesifikk informasjon om installasjonen og kulvertfeilen ikke tilgjengelig. Skaden ble registrert 11. juni 2017 etter en ekstrem nedbørsepisode. Intensiteten var på ca. 60 mm i løpet av én time og tilhørende flomtopp ble målt til omtrent 8300 l/s (4).

3.2 Modeller og verktøy

Valg av modeller og verktøy bør baseres på flere faktorer, blant annet studiets formål og tilgjengelige ressurser, både i form av data og tid. For denne oppgaven er to ulike hydrologiske modeller valgt for å studere effekter av henholdsvis klimaendringer og arealbruk. Den hydrologiske modellen, DDD er blitt valgt på grunnlag av Klima 2050 sitt arbeid med å tilpasse modellen til hydrologisk modellering av umålte felt. Det ble bestemt å teste ut modellen SWAT basert på prosjektoppgaven ”Effekter av arealbruksendringer på avrenning” (2), hvor fire hydrologiske modeller (LANDPINE, SWAT, MIKE SHE og WaSIM-ETH) som tidligere har blitt benyttet til å analysere arealbrukseffekter er beskrevet. Både DDD og SWAT krever et geografisk informasjonssystem (GIS), for innhenting av data og simulering.

3.2.1 DDD-modellen

Hovedproblemet ved modellering av små felt er overparameterisering, fordi feltene ofte er umålte og det sjeldent eksisterer data for modellkalibrering og validering av simuleringene. Dette problemet ble angrepet i studiet til (11), hvor resultatet var utviklingen av den hydrologiske modellen DDD. Hensikten var å redusere usikkerheten ved modellering av umålte nedbørfelt, ved å danne en modell som kun krevde få kalibrerte parametere. DDD er en såkalt ”parameterfattig” modell som henter nødvendige parametere hovedsakelig fra karttjenester (GIS). Dette gjør modellen svært godt egnet for modellering av umålte felt.

DDD er skrevet og kjøres i R (se Del 3.3.1) og simulerer idag med daglige og timelige tidssteg. Det skal i denne oppgaven utføres simuleringer på timelige tidssteg, da nedbørfeltene som skal studeres har rask hydrologisk respons. En utfordring ved å utføre simuleringer med kortere tidssteg er tilgjengelig data med lik oppløsning. Inngangsdata for modellen er hovedsakelig nedbør, temperatur og vannføring. For å bevare den romlige variasjonen over feltet blir de meteorologiske dataene fordelt over terrenget basert på feltets topografi.

Modellen er bygget opp av to hovedmoduler, en dynamisk modul som beskriver prosessene over jordoverflaten og en annen modul som beskriver prosessene som skjer under jordoverflaten, etter (69). Volumet av grunnens vannreservoar, M [mm] er delt mellom en mettet sone med volum, S [mm] og en umettet sone med volum, D [mm]. Det vil si at $M = S + D$. Det virkelige vanninnholdet i den umettede sonen betegnes som Z [mm] og tomrommet kalles S' , slik at $D = Z + S'$. Grunnens tilstand påvirkes av jordas nåværende vanninnhold, $Z(t)$, innkomne nedbør og snøsmelting, $G(t)$. $Q(t)$ er avrenning fra S , som oppstår når feltkapasiteten, R overskrides. R er fastsatt til 0.3 (30 %). Dynamikken som oppstår under jordoverflaten beskrives av sammenhengene i Ligning 3.1 til 3.5 (69):

Overflødig vann:

$$X(t) = \text{Max} \left\{ \frac{G(t) + Z(t)}{D(t)} - R, 0 \right\} D(t). \quad (3.1)$$

Grunnvann:

$$\frac{dS}{dt} = X(t) - Q(t). \quad (3.2)$$

Jordas vanninnhold:

$$\frac{dZ}{dt} = G(t) - X(t) - Ea(t). \quad (3.3)$$

Jordvannssonen:

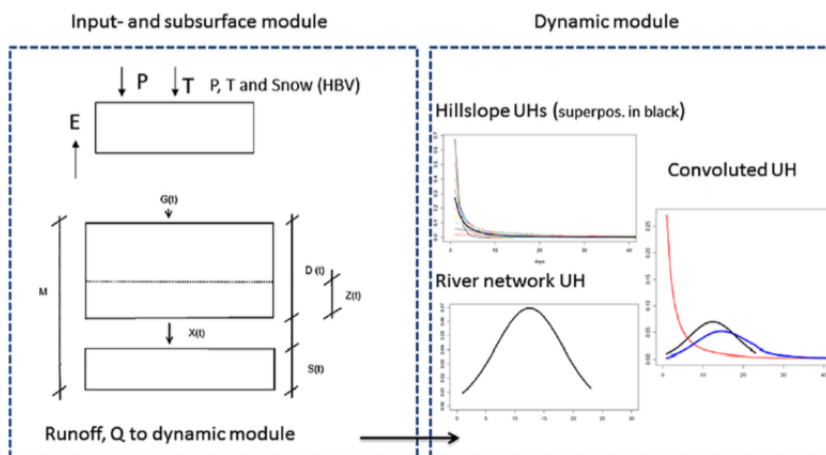
$$\frac{dD}{dt} = -\frac{dS}{dt}. \quad (3.4)$$

Potensiell evapotranspirasjon:

$$E_p = C_{ea} \cdot T. \quad (3.5)$$

$Ea(t)$ faktisk evapotranspirasjon som estimeres fra potensiell evapotranspirasjon, lagringsnivå og grad-time-faktor, C_{ea} som er positiv for plussgrader og 0 for minusgrader. Det

overflødig vann, X i jorda blir deretter sendt videre gjennom terrenget (routing) og inn i den dynamiske modulen av modellen.



Figur 3.2: Modellstruktur av DDD-modellen. Figuren viser at modellen består av to moduler som beskriver prosessene som skjer over og under jordoverflaten (11).

Figur 3.2 viser DDD-modellens struktur og oppbygning. Modulen som beskriver prosessene under jordoverflaten er kompleks og er kjent for å gi god presentasjon av metningsprosessene som oppstår når vann infiltreres ned i jorda og fyller opp jordsmonnets lagringskapasitet (11). Dette er spesielt viktig ved modellering av små nedbørfelt, fordi mengden og tidspunkt for hydrologisk respons er svært avhengig av jordas metningsnivå. Strømningsdynamikken gjennom terrenget beskrives av avstandsfordelingen mellom ulike punkter i feltet til nærmeste elvnettverk, mens strømmingen i elver beskrives av avstandsfordeling mellom punkter på elva til feltets utløp (derav navnet Distance Distribution Dynamics) (11). Denne type feltkarakteristikk kan hentes fra karttjenester, GIS.

Modellen beskriver vannstrømning gjennom terrenget som bølgehastighet:

$$v = \frac{\Lambda d_{mean}}{\Delta t}, \tag{3.6}$$

hvor

$$\Lambda(t) = \log(Q(t)) - \log(Q(t + \Delta t)). \tag{3.7}$$

Parameteren Λ er helningen per endring i tid, δt i nedgangen av et log-log-område og er gamma fordelt med to parametre. d_{mean} er den gjennomsnittlige verdien av avstandsfordelingen i feltet. Bølgehastigheten er avhengig av det faktiske vanninnholdet i jorda:

$$Q(t) = Q_0 \Lambda^{-\lambda(t-t_0)}. \tag{3.8}$$

Her er Q_0 flomtoppen rett før nedgang av flomtoppen starter.

Volumet av grunnens vannreservoar, M [mm] deles også inn i ulike nivåer (i), som representerer kvantilene av fordelingen av Λ . Det antas at verdien av Λ blir større ved større lagring. Hvert nivå tildeles en bølgehastighet:

$$v_i = \frac{\lambda_i d_{mean}}{\Delta t}. \quad (3.9)$$

λ_i er enhetshydrograf-parameteren for hvert lagringsnivå, i og avrenningen fra flere nivåer vil sammenlagt gi en enhetshydrograf, UH som er eksponentielt lik hydrografen med parameter Λ_i . Det antas at resesjonen og resesjonsfordelingen gir informasjon om lagringsfordelingen på feltskala og at den tidsmessige lagringsfordelingen på feltskala er en skalert versjon av Λ , $S(t)$. $S(t)$ modelleres med en gammafordeling med to parametere.

De nødvendige parameterene i DDD kan deles inn i tre grupper:

- Gruppe 1: Parametere som krever kalibrering
- Gruppe 2: Parametere estimert fra observerte hydrologiske og meteorologiske data
- Gruppe 3: Parametere som kan hentes fra geografiske data

En liste over alle modellparametere for DDD er presentert i Tabell 6.2 i Vedlegg 2.

Det ble bestemt å benytte regionalisering basert på regresjon på grunnlag av Klima 2050 sitt arbeid, for å beregne nødvendige parameterene (se Del 2.2.3). Denne metoden presenterte best av de tre metodene i både (4) og i Klima 2050 sitt arbeid. Regresjonsformlene benyttet i denne masteroppgaven er en revidert versjon av ligningene benyttet i (4). Her ble modellen evaluert for 41 norske små nedbørfelt, hvor kalibrering ble utført med 2-3 år observert data og validering med 1-2 år observert data. For simuleringer hvor skjevheten mellom gjennomsnittlig simulert vannføring og gjennomsnittlig observert årlig vannføring var mindre enn 0.8, ble det utført biaskorrigeringsfaktor. Dette gjøres med en korrigeringsfaktor, P_{korr} ved re-simulering. P_{korr} , defineres i Ligning 3.10:

$$P_{korr} = \frac{Q_{obs}}{Q_{sim}} \quad (3.10)$$

I dette studiet er 0.8 for forholdet, Q_{sim}/Q_{obs} satt som grenseverdi for re-simulering med P_{korr} .

De parameterene som skal regionaliseres er listet opp i Tabell 3.2 og inkluderer alle parameterene i Gruppe 1, samt fire parametere fra Gruppe 2. Det er til sammen 11 parametere som bestemmes ut fra regionaliseringen.

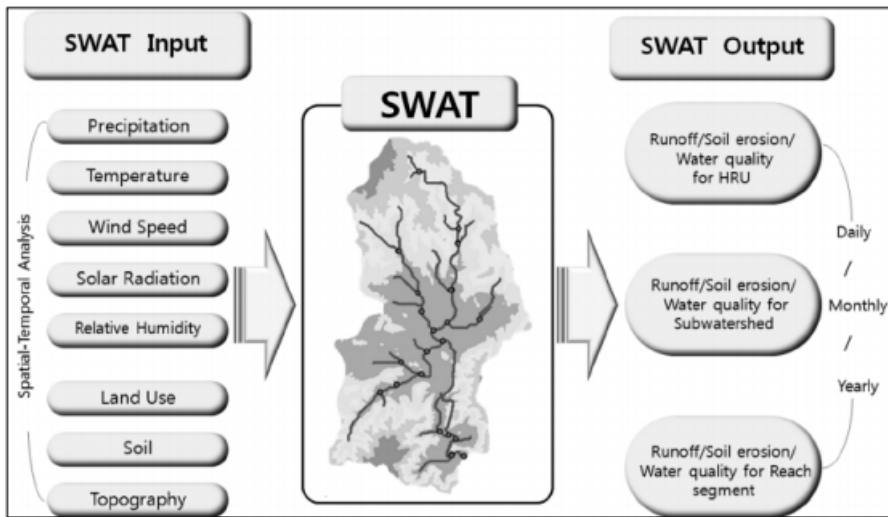
Tabell 3.2: Parametere i DDD som estimeres gjennom regionaliseringsmetoden basert på regresjon.

Parameter	Beskrivelse
Gshape	Formparameter
Gshl	”
Gscale	Skalaparameter
Gscl	”
Cea	Grad-time faktor for evapotranspirasjon
rv	Bølgehastighet
CFR	Gjenfrysningfaktor
Pro	Flytende vann i snø
Cx	Grad-time faktor for snøsmelting
Tx	Temperaturterskel for snø/regn
Ts	Temperaturterskel forsnøsmelting

Noen av parametere presentert i Tabell 3.2 har fastsatte verdier etter erfaring og litteratur. I regresjonsmetoden ble det utført korrelasjonsanalyse mellom modellparameterene og 19 ulike FBer, samt intern korrelasjon mellom FBene. Dette danner grunnlaget for regionaliseringen. Den overordnede regresjonsmodellen for parameteren CFR ble definert som statistisk ubetydelig og dermed satt til en konstant på 0.007, som er gjennomsnittsverdien av faktoren for de 41 evaluerte feltene i analysen til Klima 2050. Temperaturterskelen for regn eller snø og snøsmelting er henholdsvis satt til 0.5 °C og 0.0 °C basert på litteratur (70). Resultatet av regresjonen er et ligningsett bestående av åtte ligninger (se Ligning 6.1 til 6.8 i Vedlegg 3). Ved beregning av parametere for felt med FB-verdi lik 0 i et logaritmisk uttrykk, settes hele ”log”-uttrykket til 1.

3.2.2 SWAT-modellen

SWAT (71) ble først og fremst valgt på grunnlag av tidligere studier som har benyttet modellen til å studere arealbrukseffekter. I tillegg var det av interesse å undersøke mengde sedimenter som kan føre til tilstopping, som en årsak til kulvertfeil. Som nevnt tidligere er det få modeller som eksplisitt ser på effekten av endringer i arealbruk. SWAT er en modell som kan gjøre akkurat dette. To av de essensielle inngangsparameterene i modellen er detaljert beskrivelse av jordforhold og arealbruk i det aktuelle feltet. SWAT simulerer transporteringen av vann, sedimenter og næringsstoffer (Nitrogen (N) og Fosfor(F)), både på og under jordoverflaten. Modellen er utviklet av United States Department of Agriculture (USDA) som et rådgivende verktøy ved vannforvaltningspraksis, typisk for bruk i områder med jordbruk (72; 73). Modellen brukes ofte for simulering av hydrologisk respons og analyser av vannkvalitet. Modellen har tidligere blitt benyttet med månedlig eller daglig tidsoppløsning, men i sammenheng med denne oppgaven skal modellen kjøres på timelig oppløsning. Dette har kun blitt gjort få ganger i tidligere studier, blant annet (62).



Figur 3.3: Inn- og utgangsdata i SWAT (12).

SWAT er en fysisk basert, semi-distribuert og kontinuerlig modell. Modellen er kjent for sin detaljerte beskrivelse av feltets arealbruks- og jordforhold. SWAT sin database inneholder innebygde arealbruks- og jordtyper som kan benyttes. Modellen er brukervennlig da de ulike inngangsparameterene lett kan endres eller modifiseres. Inngangsparametere for SWAT er klima, topografi, type arealdekke, jord- og løsmasseforhold, se Figur 3.3. SWAT-modellen inngangsdata kan deles inn i to grupper:

1. Gruppe 1: Meteorologiske data
2. Gruppe 2: Data hentet fra karttjenester (GIS)

Det er valgt å benytte ArcSWAT 2012 i dette studiet, som må kobles opp mot et geografisk informasjonssystem, GIS. Det er i dette studiet benyttet ArcMap 10.4 som er kompatibel versjon med den valgte ArcSWAT 2012. GIS gjør det enklere å beskrive romlig variasjon i feltet, blant annet parametere som vær og arealbruk. De meteorologiske dataene varierer både timelig og daglig, mens arealdekket og avlinger varierer med sesongene. Arealdekke påvirker transpirasjon, infiltrasjon i jordsmonnet og plantenes opptak av næringsstoffer. Disse endringene beskrives av en enkel plantevekst og avlingsmodell. Plantenes opptak av vann er avhengig av vanninnholdet i jorda, som igjen påvirkes av fordamping, bladarealindeks og dybde på røtter (54). Den hydrologiske syklusen i SWAT beskrives av en vannbalanseligning (Ligning 3.11):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t \left(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - W_{gw} \right). \quad (3.11)$$

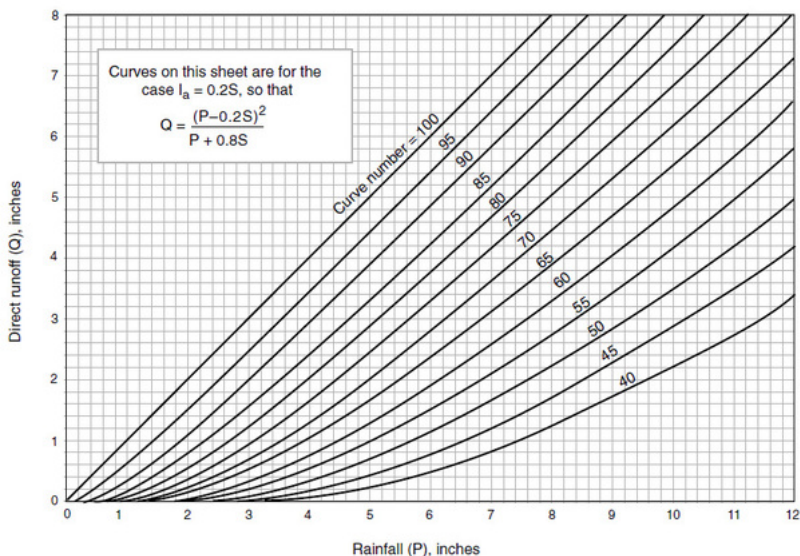
Her er SW_t endelig vanninnhold i jordsmonnet, SW_0 er initial vanninnhold, R_{day} er nedbørmengden i løpet av tid i , Q_{surf} er avrenning, E_a er evapotranspirasjon, W_{seep} er mengde

infiltrert vann i jorda og W_{gw} er returstrøm (54).

Modellen bruker de mest generelle hydrologiske ligningene ved kalkulasjoner (63). Avrenning kan beregnes på flere måter, men en Soil Conservation Service, SCS-kurve er den vanligste metoden (54). I SWAT oppstår avrenning når:

$$P > 0.2S \quad \text{og} \quad S = \left(\frac{25400}{CN} \right), \quad (3.12)$$

hvor P er nedbør og CN er kurvenummer (CNII - Curve Number for Antecedent Moisture II).



Figur 3.4: SCS-kurve, som viser sammenhengen mellom nedbør og avrenning benyttet i modellen SWAT (13).

SCS-kurven i Figur 3.4 viser sammenhengen mellom nedbør og avrenning og er avhengig av et kurvenummer, CN . SWAT sin database inneholder over 100 ulike arealbrukstyper, som hver av de identifiseres med et unikt CN .

Fordamping eller evapotranspirasjon kan beregnes på tre forskjellige måter i SWAT: Priestley og Taylor, Hargreaves og Samani eller Penman-Montieth, hvor sistnevnte er benyttet i dette studiet. Transpirasjon beregnes ut fra en potensiell evapotranspirasjon, maksimal intersepsjonskapasitet og forholdet mellom faktisk potensiell maksimal bladarealindeks.

3.3 Tilleggsverktøy

3.3.1 R

DDD er som nevnt skrevet i R og benyttes i dette studiet for å kjøre den hydrologiske modellen. R er et programmeringsspråk og system som er mye benyttet for statistiske kalkuleringer. R er dannet av R Development Core Team (74) siden 1997 og er en åpen kildekode som er tilgjengelig for alle. R er en del av Free Software Foundation også kalt for GNU-prosjektet, som er et prosjekt om fri og åpen programvare fra 1993. R er et objektorientert programmeringsspråk og er en videreføring av programmeringsspråket S (75).

R er godt egnet til manipulering av data, beregning og grafiske fremstillinger. R er kjent for grafiske resultater med ”publikasjons-kvalitet”, som inkluderer grafer, matematiske utrykk og formler. Programmeringsspråket krever mye datahukommelse og benyttes av flere millioner mennesker, både ved utdanning og i jobbsammenheng (76). R kan enkelt utvides med tilleggspakker og er stadig under oppdatering og utvikling. Programmeringsspråket kan lastes ned på R sine hjemmesider (77) og kommer med åtte innebygde tilleggpakker, med flere pakker tilgjengelige for nedlasting.

3.3.2 GIS

Et Geografisk informasjonssystem, GIS er en sofistikert database for innsamling, håndtering og analysing av data. Programvaren er basert på geografi og representerer romlig data i et forståelig format (78). Nøkkelordet ved en GIS er geografisk eller stedfestet informasjon som er en forenklet versjon av virkeligheten (79).

GIS kan gi innsikt i store datamengder, blant annet mønstre og sammenhenger som kan benyttes til flere formål. Dette er vanlig bruke GIS spesielt innenfor arealplanlegging og forvaltning (79). Det har i de siste årene blitt mer vanlig å anvende GIS for både innhenting data og som et tilleggsverktøy for å effektivisere hydrologisk modellering. Dette er for eksempel gjort i (20). Implementering av GIS sammen med hydrologiske modeller danner et svært kraftig verktøy for å analysere romlig data.

I forbindelse med denne masteroppgaven er ArcGIS Desktop, ArcMap 10.5 benyttet til å innhente informasjon og data for de aktuelle nedbørfeltene. ArcMap ble deretter nedgradert til ArcMap 10.4 for å kjøre ArcSWAT 2012.

3.4 Innhenting av data

Dataene hentet inn i forbindelse av denne oppgaven er mellom simuleringsperioden 1. september 2010 til 31. august 2015. Simuleringene starter 1. september, som er begynnelsen av det norske hydrologiske året. På dette tidspunktet er det antatt null snø. De 11

nedbørfeltene som studeres i denne oppgaven ble også analysert i (4), noe data er hentet fra dette arbeidet.

3.4.1 Meteorologiske data

Nedbør- og temperaturdata med timelige oppløsning basert på et 1 x 1 km² rutenett er hentet fra Meteorologisk institutt (80). Disse dataene er tilgjengelige for hele Norge og har blitt registrert siden 1. september 2010 og frem til idag. Andre meteorologiske data med daglig oppløsning er hentet fra Norsk institutt for bioøkonomi (NIBIO), gjennom AgroMetBase (81) og Meteorologisk institutt sin eKlima (82). Det ble valgt å hente data fra to stasjoner, Rennebu (66620) og Soknedal (67280) som ligger i nærheten av observasjonsområdet. Det var på NIBIO sine nettsider påpekt at spesielt data på relativ fuktighet består av usikkerheter.

Ekstremnedbør fra IVF-kurver er hentet fra Norsk klimaservicesenter (14). Det ble konkludert å benytte stasjonsdata fordi de estimerte IVF-verdiene fra et 1 x 1 km² rutenett kun er interpolerte verdier med store usikkerheter. Blakli stasjon (SN68190) med måleperiode fra 1974-1985 ble valgt for SP1-SP9 og Risvollan stasjon (SN68230) med måleperiode fra 1986-2018 for SP10 og SP11.

3.4.2 Hydrologiske data

Hydrologiske data, spesifikt vannføring fra de studerte nedbørfeltene eksisterer ikke da feltene er umålte. Gjennomsnittlig vannføring for de studerte nedbørfeltene fra NVEs NEVINA (83) er benyttet som vurderingsgrunnlag for simuleringene med DDD. Verdiene er basert på perioden 1961-1990. For felt som ikke kunne defineres i NEVINA, er gjennomsnittlig vannføring i nærmeste nedbørfelt benyttet.

3.4.3 Feltkarakteristikk

Det er mulig å danne nedbørfelt og hente ut feltkarakteristikk gjennom NVEs NEVINA. NEVINA danner et nedbørfelt ut fra et valgt punkt på elvnettverket, som automatisk defineres som et utløp. Sluttresultatet er en NEVINA-rapport som beskriver feltparametere som feltets klima og middel vannføring, se eksempel av NEVINA-rapporten for nedbørfelt SP11 i Vedlegg 4. Da skadepunktene ligger langs en jernbanestrekning og derav utenfor elvnettverket, var det flere av nedbørfeltene som ikke kunne genereres i NEVINA. Disse feltene ble derfor dannet i ArcMap 10.5. Feltparametere kan også hentes ut fra GIS, som blant annet hypsografisk kurve og distanser fra elv eller myr ved å benytte en digital terrengmodell (DTM). DTM for hele Norge med rutenett 50 x 50 m² er lastet ned fra Kartverkets geoNorge - nedlastningsløsning (84). Elvnettverks- og strømningskart er lastet ned fra NVE (85). Til slutt er informasjon om arealbruk av feltene hentet fra (4) via GeoNorge. Informasjon om løsmasse- og jordforhold er tilgjengelige fra Norges geologiske undersøkelse (NGU) (86).

3.5 Simuleringer med DDD

DDD-modellen er i dette studiet benyttet til å analysere klimaeffekter, samt kontrollere kulvertkapasitet. Det er valgt en simuleringsperiode på fem år, fra 1. september 2010 til 31. august 2015. Regionaliserte inngangsparametere er beregnet med regresjonsformlene, Ligning 6.1 og 6.8, som er presentert i Vedlegg 3. Meteorologisk timedata er fordelt på 10 elevasjonssoner (kvantiler) over terrenget, definert av feltets hypsografiske kurve. For elevasjonssoner bestående av flere ruter (i det 1 x 1 km² rutenettet), er gjennomsnittlig verdi benyttet. Inngangsdata for vannføring er satt til verdien 0. Det ble utført totalt tre ulike simuleringer med DDD.

3.5.1 Vannføring

Unike feltparametere hentet fra GIS og beregnet med regresjonsformler ble klargjort for alle 11 nedbørfelt. Observerte nedbør- og temperaturdata ble benyttet som meteorologisk inngangsdata og er igjen unik for hvert felt. Avrenning fra feltene ble simulert for perioden september 2010 til august 2015. Resultatene benyttes til videre analyse av klimaeffekter.

3.5.2 Dimensjonerende nedbør

Det ble bestemt å simulere ekstremnedbør for å kontrollere kulvertkapasitet. Dimensjonerende 200-års nedbør for kulvertene ble satt inn i de originale nedbørdataene ved tre ulike ekstreme forhold:

1. Fullmettet jord + snøsmelting
2. Fullmettet jord + ingen snøsmelting
3. Umettet (tørr) jord + ingen snøsmelting

Ekstreme nedbørsepisoder ved fullmettet jord med snøsmelting anses som det ugunstigste forhold, da jordas infiltrasjonsevne vil være lik 0 og total innkommende nedbørsmengde som treffer jordoverflaten vil gå til avrenning. Denne tilstanden oppstår som regel i løpet våren, spesifikt i april og mai når snøsmelting begynner. Fullmettet jord uten snøsmelting kan forventes i løpet av høsten, spesielt i august og september, hvor det som regel er mye regn og all snøen allerede har smeltet bort. Det siste forholdet kan forventes på sommeren hvor temperaturen er høy og det oppstår lite nedbør, normalt i juni og juli. Simuleringsresultatene på vannføring fra feltene er benyttet til å avgjøre jordas metningsnivåer i løpet av de fem årene simulert. 200-års nedbør ble derfor satt inn i det originale nedbørsforløpet, i perioder hvor metningsnivået enten er fullmettet eller umettet.

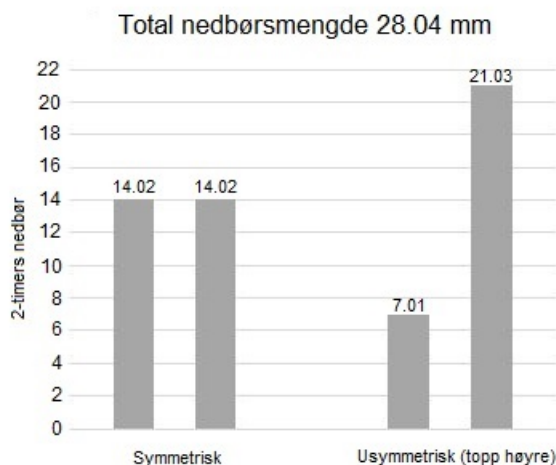
To ulike nedbørsintensiteter for 200-års nedbør ble simulert: Nedbørsintensitet med tilhørende nedbørsvarighet lik feltenes konsentrasjonstid og den nedbørsintensitet med høyest verdi og som vil gi størst avrenning (nedbørsintensiteten valgt har varighet på 24 timer). Tabell 3.3 viser beregnende konsentrasjonstid for alle de 11 nedbørfeltene, kalkulert med Ligning 2.2.

Tabell 3.3: Beregnet konsentrasjonstid med Ligning 2.2 i minutter, for nedbørfeltene SP1-SP11. For videre analyse er konsentrasjonstidene rundet til nærmeste time.

SP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
T _c	30.7	43.1	76.3	62.8	36.6	52.8	66.9	53.1	35.2	136.9	135.0

Da modellen kjører med timelige tidssteg er den minste konsentrasjonstiden satt til én time. Det vil si at konsentrasjonstiden for nedbørfeltene SP1-SP9 ved videre analyse er satt til én time. For de to siste nedbørfeltene (SP10 og SP11) er konsentrasjonstiden rundet ned til to timer. Av IVF-kurvene leses det av tre ulike nedbørsintensiteter med varighet på én time, to timer og 24 timer, henholdsvis 25.60 mm, 28.04 mm og 90.7 mm. Se IVF-kurver for Blakli og Soknedal stasjon i Vedlegg 5.

Ved nedbørsvarighet mer enn én time, som benyttet for nedbørfeltene SP10 og SP11 må den totale nedbørsmengden fordeles over to timer. To ulike hyetografer er benyttet og vises i Figur 3.5. Hyetografer er en grafisk presentasjon av fordelingen av den totale nedbørsmengden over tid. Nedbørsfordelingene for nedbør med varighet på 24 timer å finne i Vedlegg 6.

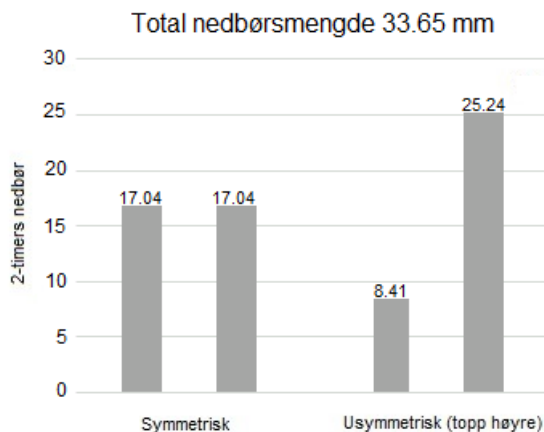


Figur 3.5: Hyetografer som viser fordelingen av 200-års nedbør med varighet på to timer for simulering av ekstremnedbør, for nedbørfelt SP10 og SP11.

Ved simulering av 200-års nedbør med varighet på 24 timer, ble tidligere nedbørsforløp på 24 timer fra én periode i høsten (hvor det ofte er mer nedbør enn på våren og sommeren) satt inn før ekstremnedbøren. Dette for å danne konstante miljøforhold for å *kun* studere effekten av jordas metningsnivå ved ekstremnedbør.

3.5.3 Klimafaktor

For å studere effektene av klimaendringer på avrenning, ble det avgjort å legge til en klimafaktor på dimensjonerende nedbør. Disse simuleringene ble også benyttet til å kontrollere kulvertkapasitet for fremtidige vannføringer. Klimafaktoren ble satt til 1.2 (20 %), som er vanlig klimapåslag for kulverter og installasjoner dimensjonerende nedbør med gjentakintervall på 200 år (se Del 2.4.3).



Figur 3.6: To ulike hyetografer av 200-års dimensjonerende nedbør med varighet på to timer med klimapåslag på 20 %, brukt ved simuleringer av ekstremnedbør for nedbørfelt SP10 og SP11.

Klimafaktoren multipliseres med 200-års nedbøren og danner dermed nye nedbørsintensiteter for dimensjonerende nedbør for kulverter. Nedbørsfordelingen er den samme som tidligere, men et klimapåslag på 20 % er lagt til nedbørsverdiene. Nedbørsfordelingen av 200-års nedbør med varighet på to timer med klimapåslag vises i Figur 3.6.

3.6 Simuleringer med SWAT

For simuleringer med SWAT er ArcSWAT 2012 benyttet. Dette er den nyeste programvaren av ArcSWAT og er kompatibel med ArcMap 10.4. Dermed er alle ArcSWAT simuleringer utført via ArcMap 10.4. På grunn av tidsbegrensninger ble det ikke utført sensitivitetsanalyse eller modellkalibrering av SWAT, med simulerte vannføringsdata fra DDD som planlagt. ArcSWAT sin veileder (5) og relevante videoer fra SWAT sin hjemmeside er benyttet som rådgivende kilder ved simuleringer med SWAT (87).

Det ble valgt å utføre simuleringer på nedbørfelt SP10 for perioden mellom 1. september 2010 til 31. august 2015, uten "oppvarmingsår". Det er som regel benyttet alt fra et til fem år med oppvarming for lengre simuleringstidspersoder på 10-20 år, slik at modellen får tid til å

varme opp og optimalisere simuleringene. Tabellene 3.4 og 3.5 viser at nedbørfeltet består av fire ulike arealbrukstyper og fem forskjellige jordtyper/løsmasser.

Det ble valgt å benytte innebygde arealbruk og jordtyper for inngangsparametere i SWAT. Dette ble først og fremst bestemt fordi det ikke ble utført feltstudie av nedbørfeltet, og heller ikke hentet inn *detaljert* informasjon om de faktiske jordforholdene i feltet som modellen krever. Innebygde arealbruk og jordtyper er standardiserte etter amerikanske forhold, men ble antatt å gi mer realistiske forhold i feltet ved simulering. De valgte jordtypene er derfor ikke representative av de virkelige løsmasseforholdene i feltet, da de faktiske forholdene er ukjente. På grunn av usikkerheter ved de valgte jordtypene ble disse holdt konstante for alle simuleringene utført med SWAT. Tabell 3.4 og 3.5 viser de valgte arealbruks- og jordtypene som ble benyttet i simuleringene.

Tabell 3.4: Arealbrukstyper benyttet som inngangsparametere i SWAT, for SP10. Innebygde arealbrukstyper i SWAT er benyttet. Se Tabell 6.3 i Vedlegg 7 for mer detaljert beskrivelse av arealbrukstypene.

Arealbruk i SP10	Arealbruk i SWAT	Definisjon
Urbant område (1%)	URML	Urban Medium Density
Jordbruk (21%)	AGRL	Agriculture Generic
Skog (35 %)	FRSD	Deciduous Forest
Myr (43 %)	WETL	Wetlands-Mixed

Tabell 3.5: Jorddata benyttet som inngangsparametere i SWAT, for SP10. Innebygde jordtyper i SWAT er benyttet. Se Tabell 6.4 i Vedlegg 7 for mer detaljert beskrivelse av jordtypene.

Jordforhold i SP10	Jordtype i SWAT
Tynn morenemateriale (46 %)	AMENIA
Glasfluvial avsetning (0.8 %)	BELGRADE
Tykk morenemateriale (15 %)	CARLISLE
Humusdekkende materiale (0.2 %)	COLRAIN
Organisk materiale (torv og myr) (38 %)	PINNEBOG

Grafisk fremstilling (fra ArcMap) av fordelingen av både arealbruk og jordtypene i nedbørfelt SP10, er presentert i Figur 6.4 i Vedlegg 8.

Simuleringene er utført med timelig oppløsning og modellen krever kun nedbørsdata med timelige tidssteg. Andre meteorologiske data som temperatur, vind, solstråling og relativ fuktighet, er lagt inn med daglig oppløsning. Disse dataene er hentet fra Rennebu og Soknedal stasjon. Nedbørsdata er gitt fra tre ruter i det 1 x 1 km² rutenettet fra Meteorologisk institutt, som dekker hele nedbørfeltet.

Tabell 3.6: Informasjon om feltkarakteristikk av de ni dominante HRU-ene, definert i SWAT.

HRU	Arealbruk	Jordtype	Elevasjon [%]
1	WETL	PINNEBOG	0-10
2	AGRL	PINNEBOG	0-10
3	WETL	PINNEBOG	0-10
4	WETL	PINNEBOG	0-10
5	WETL	AMENIA	0-10
6	WETL	AMENIA	0-10
7	FRST	AMENIA	10-20
8	AGRL	CARLISLE	10-20
9	FRST	CARLISLE	20-100

Det ble valgt å dele terrenget inn i tre høydekategorier (0-10 %, 10-20 % og 20-100 %) og ni dominante HRU-er ble definert i SWAT. Modellen har innebygd ”routing” og det totale nedbørfeltet deles inn i mindre delfelt for å beskrive transporten av vann gjennom feltet. Dominante HRU-er er basert på samme inndeling som delfeltene. HRU-ene defineres deretter etter dominerende feltkarakteristikk i de ulike delfeltene. Tabell 3.6 viser dominerende feltkarakteristikk i hver HRU for nedbørfelt SP10 og Figur 6.5 i Vedlegg 9 viser grafisk inndeling av HRU-ene.

3.6.1 Arealbruksscenario

Det ble bestemt å utføre simulering av et hypotetisk arealbruksscenario med en ikke-kalibrert SWAT. Arealbruksscenarioet valgt er av den ekstreme typen som er et godt scenario for å studere arealbrukseffekter, fordi de teoretiske effektene er kjente. Det er ikke hentet informasjon om tidligere eller planlagte arealbruksendringer i området. Det hypotetiske scenarioet er omgjøring av hele feltet til urbant område. Dette arealbruksscenarioet vil heretter bli kalt for ”Scenario 1” og eksisterende arealbruksforhold i feltet vil bli betegnet som ”Scenario 0”:

- Scenario 0: Eksisterende arealbruksforhold i feltet idag
- Scenario 1: Alle områder gjøres om til urbant

Tabell 3.7: Arealbrukstyper benyttet ved de to arealbruksscenariene i SWAT.

Arealbruk i SP10	Scenario 0	Scenario 1
Urbant område	URLM	URLM (Residential-Med/Low Density)
Jordbruk	AGRL	URLD (Residential-Low Density)
Skog	FRSD	URMD (Residential-Medium Density)
Myr	WETL	URBN (Residential)

Ulike ”former” for arealbrukstypen urbant område fra databasen til SWAT ble valgt som inngangsparametere for arealbruk ved Scenario 1. Tabell 3.7 viser arealbrukstypene valgt

for de to scenariene. Tabell 6.5 i Vedlegg 10 viser nærmere beskrivelse av arealbruktypene valgt.

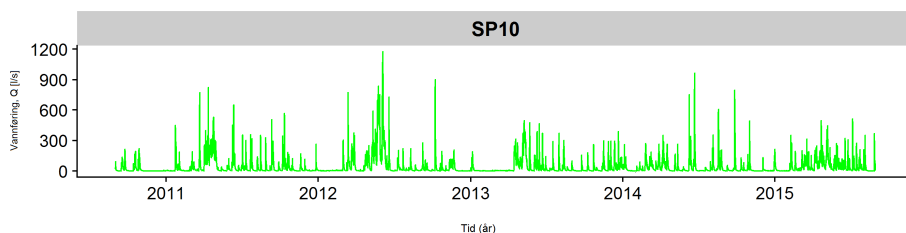
Kapittel 4

Resultater

Denne delen av oppgaven presenterer simuleringresultatene utført med de to hydrologiske modellene, DDD og SWAT. Resultatene er presentert både grafisk og som tallverdier i tabellform. Dette for å gjøre sammenligninger av resultatene mer oversiktlig.

4.1 Simuleringer med DDD

Fem år med avrenning ble simulert med modellen DDD for nedbørfeltene SP1-SP11. Simuleringsperioden er mellom 1. september 2010 til 31. august 2015. Grafen i Figur 4.1 viser simulert avrenning fra nedbørfelt SP10 for alle fem årene.



Figur 4.1: Simulert vannføring, Q [l/s] for nedbørfelt SP10 i perioden 1. september 2010 til 31. august 2015. Simulering er utført med modellen DDD.

Simuleringresultatene i Figur 4.1 viser varierende avrenning i løpet av fem år. Gjennomsnittlig simulert vannføring, Q_{sim} er beregnet til å være 45 l/s og det er ikke observert noen typiske nedbørmønstre fra hydrografen. Vedlegg 11 viser grafisk representasjon av vannføring fra alle nedbørfeltene, SP1-SP11.

Tabell 4.1 presenterer simulert, $Q_{m_{sim}}$ og observert vannføring, $Q_{m_{obs}}$ for alle de elleve nedbørfeltene.

Tabell 4.1: Gjennomsnittlig simulert, $Q_{m_{sim}}$ og observert vannføring, $Q_{m_{obs}}$ for perioden 1961-1990, for nedbørfeltene SP1 til SP11. Alle verdier er gitt i l/s.

SP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$Q_{m_{sim}}$	1.2	2.5	9.5	4.8	3.3	1.3	2.9	2.2	1.4	44.8	63.3
$Q_{m_{obs}}$	1.2	2.6	8.0	3.6	2.9	1.3	3.0	2.6	1.5	50.9	38.4

Gjennomsnittlig observert vannføring er hentet fra NVEs databaser (NEVINA) og er basert på perioden 1960-1991. Å sammenligne resultatene med disse verdiene er ikke optimalt da de simulerte verdiene kun er basert på fem år. NVE sine verdier ble derimot benyttet som vurderingsgrunnlag for re-simulering av feltene med korrigeringsfaktor, P_{korr} . Tabellen viser god korrelasjon mellom observert og simulert vannføring, hvor forholdet Q_{sim}/Q_{obs} er beregnet til å være over 0.8 for alle nedbørfelt. Dermed ble det ikke utført re-simuleringer med korrigeringsfaktor for noen av feltene.

4.1.1 Effekten av miljøforhold

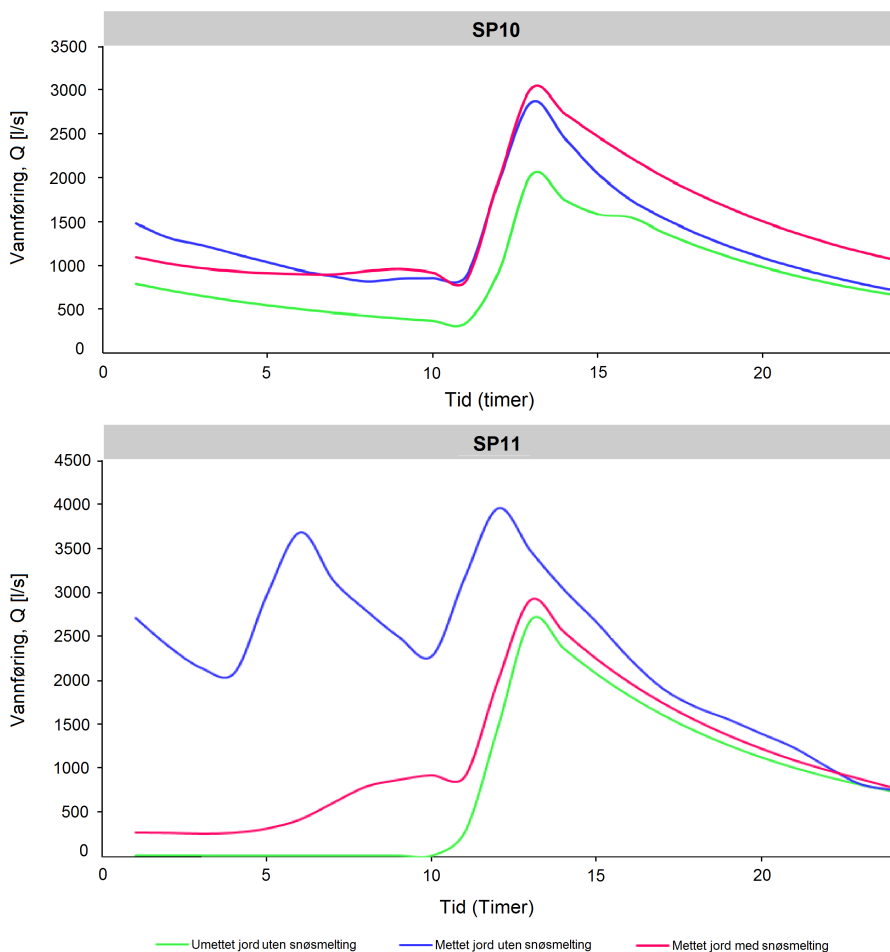
200-års dimensjonerende nedbør for kulverter ble benyttet som ekstremnedbør for simuleringene. For validering av modellens presentasjon av flomtopper ble det kalkulasjoner maksimale flomverdier med ofte brukte metoder for flomberegning av små nedbørfelt. Tabell 4.2 viser maksimal flomtopp beregnet med Den rasjonale formel og Nasjonalt formelverk for små og uregulerte nedbørfelt.

Tabell 4.2: Maksimal vannføring, Q_p etter 200-års nedbør, beregnet med Den rasjonale formel (R) og Nasjonalt formelverk for små og uregulerte nedbørfelt (N). Alle verdier gitt i l/s.

SP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Q_p (R)	141	298	1082	541	408	174	389	308	188	2526	2822
Q_p (N)	166	317	842	431	323	158	317	259	165	3413	3188

Beregningsmetodene ble nærmere beskrevet i Del 2.2 og de benyttede verdiene er oppsummert i Vedlegg 12. Nedbørintensitet med varighet lik feltenes konsentrasjonstid er hentet fra IVF-kurver i Vedlegg 5 og benyttet ved beregning med Den rasjonale formel.

Modellens beskrivelse av metningsprosessene ble undersøkt ved å simulere ekstremnedbør ved ulike miljøforhold. Det ble utført simuleringer ved tre ekstreme forhold: Umettet jord uten snø (juni og juli), mett jord uten snø (august og september) og mett jord med snøsmelting (april og mai).



Figur 4.2: Hydrografer for nedbørfelt SP10 og SP11 ved 200-års nedbør med to timers varighet og symmetrisk hyetograf, for tre ulike miljøforhold. Hvor grønn linje representerer umettet jord, blå linje er mettet jord og rosa linje er mettet jord med snøsmelting.

Grafen i Figur 4.2 viser resultater av simuleringene for nedbørfelt SP10 og SP11 med dimensjonerende nedbør, for tre ulike miljøforhold. For små nedbørfelt som SP10 og SP11 er det mest sannsynlig at de høyeste flomverdiene er forårsaket av større nedbørshendelser. Den kjente vårfloppen forekommer som regel på grunn av store nedbørsepisoder på våren, i tillegg kommer snøsmelting på grunn av økt temperatur. For begge nedbørfelt gir umettet jordforhold lavest vannføring (grønn linje). Derimot oppstår maksimal verdi for vannføring for nedbørfelt SP10 og SP11 ved to forskjellige miljøforhold. Dette gjelder for flere felt. Resultatene for de andre feltene er presentert i Tabell 4.3.

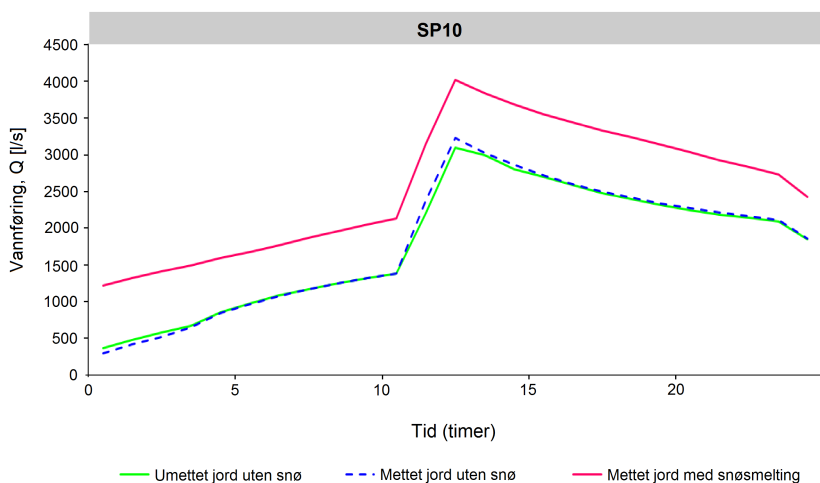
Tabell 4.3: Sammenligning av kulvertens kapasitet og maksimal avrenning etter 200-års nedbør ved tre ulike miljøforhold. Q_U står for maksimal vannføring ved umettet jord, Q_M er vannføring ved mettet jord og Q_{MS} er vannføring ved mettet jord med snøsmelting. Alle verdier er gitt i l/s.

SP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Q_U	27	62	303	119	60	47	89	104	20	2035	2701
Q_M	51	95	516	227	137	63	124	124	61	2865	3966
Q_{MS}	48	104	530	223	142	61	168	127	63	3019	2983
Kul. kap.	426	426	5880	870	5880	426	714	870	840	8850	-

For å kontrollere kulvertene er også kulvertkapasitet presentert i Tabell 4.3. Kapasiteten for kulvertene for nedbørfelt SP1-SP10 ligger mellom 426 til 8850 l/s. Verdiene er hentet fra BaneNOR sitt banekart. For kulverten som drenerer nedbørfelt SP11 var ikke informasjon om installasjonen tilgjengelig. Denne kulverten ligger ikke på jernbanen og kapasiteten er dermed betegnet som ukjent ("?-") i tabellen.

4.1.2 Effekten av jordas metningsnivå

For å kun analysere effekten av jordas metningsnivå på avrenning ble det valgt å simulere 200-års nedbør med varighet på 24 timer. For å utføre dette er nedbørsforløpet 24 timer før 200-års nedbøren det samme for alle de tre ulike miljøforholdene.

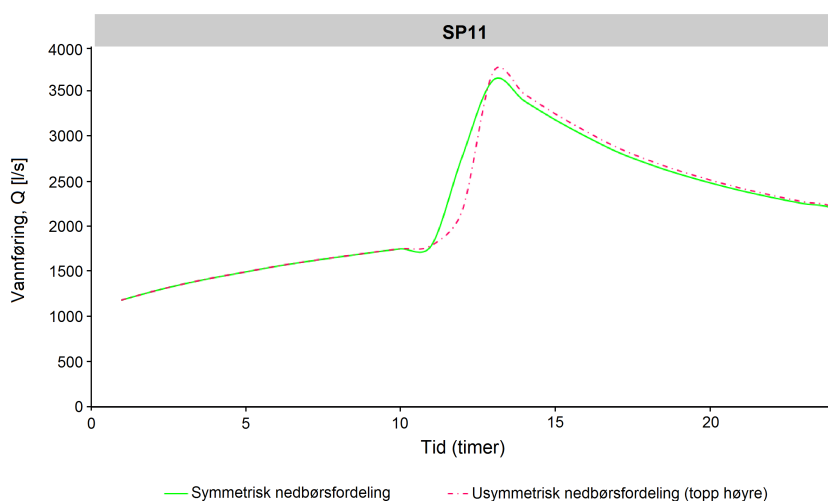


Figur 4.3: Hydrograf for nedbørfelt SP10 ved 200-års nedbør med varighet på 14 timer og symmetrisk nedbørfordeling, for tre ulike miljøforhold. Det er lagt inn det samme 24 timers nedbørsforløp før 200-års nedbøren for å danne konstante miljøforhold, for å kun studere effekten av jordas metningsnivå.

Figur 4.3 viser avrenning etter 200-årsnedbør med 24 timers varighet med symmetrisk nedbørsfordeling. Resultatet presenteres kun for nedbørfelt SP10, men er representativ for alle nedbørfeltene og ved nedbørsfordelinger. Figuren viser at flomtoppen er lavere ved umettet jord enn ved mettet jord. Samtidig øker avrenningsmengden ved snøsmelting.

4.1.3 Effekten av hyetografen

To ulike hyetografer ble dannet ved simulering av 200-års nedbør for nedbørfeltene SP10 og SP11. Dette fordi DDD-modellen ble simulert med timelig oppløsning og nedbørfeltens konsentrasjonstid ble satt til to timer. Disse simuleringene er benyttet for å undersøke effekten av hyetografen på avrenningen.



Figur 4.4: Hydrograf som viser effekten av 200-års nedbør ved to ulike hyetografer, symmetrisk og usymmetrisk med topp høyre for nedbørfelt SP11.

Figur 4.4 viser at usymmetrisk nedbørsfordeling gir høyere flomtopp enn ved symmetrisk nedbørsfordeling. Grafen i Figur 4.4 viser kun resultater for nedbørfelt SP11, men er også representativ for nedbørfelt SP10.

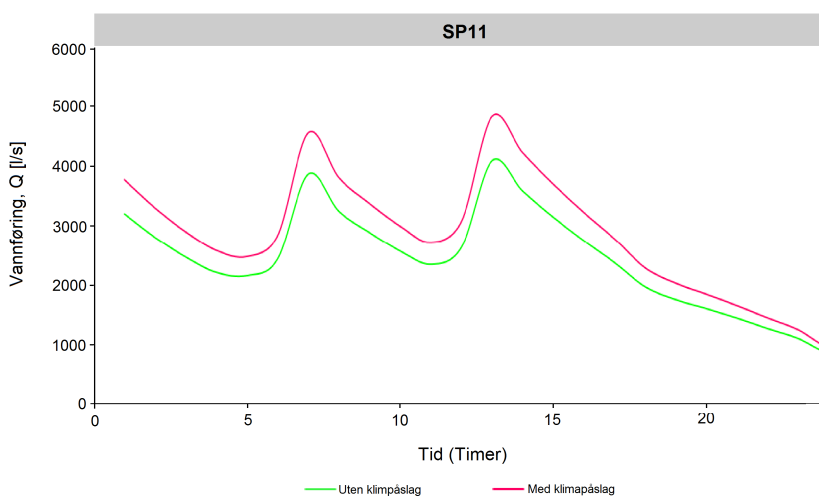
Tabell 4.4: Effekten av to ulike nedbørsfordelinger, symmetrisk (sym) og usymmetrisk (usym) på avrenning for nedbørfelt SP10 og SP11. To ulike nedbørsintensiteter er benyttet, hvor "tc" står for nedbørsvarighet på 2 timer og "24" for varighet på ett døgn. Alle verdier i l/s.

Nedbørsfordeling	SP10	SP11
$Q_{sym_{tc,MS}}$	3019	2921
$Q_{usym_{tc,MS}}$	3101	3005
$Q_{sym_{tc,M}}$	2892	3966
$Q_{usym_{tc,M}}$	2982	4096
$Q_{sym_{tc,U}}$	2035	2701
$Q_{usym_{tc,U}}$	2037	2752
$Q_{sym_{24}}$	4027	3623
$Q_{usym_{24}}$	4110	3707

Tabell 4.4 viser effekten av hyetografen for nedbørfelt SP10 og SP11 ved alle de ulike miljøforholdene simulert. De ulike miljøforholdene er betegnet som umettet (U), mettet (M) og mettet jordforhold med snøsmelting (MS). De to nedbørsintensitetene er betegnet som "24" for varighet lik 24 timer og "tc" for varighet lik to timer.

4.1.4 Klimafaktor

Klimaeffekter ble analysert ved å legge til en klimafaktor på 1.2 på dimensjonerende 200-års nedbør for kulverter. Figur 4.5 viser effekten av klimapåslaget på høyeste flomtopp i nedbørfelt SP11.



Figur 4.5: Hydrograf som viser effekten av dimensjonerende nedbør med klimapåslag på 20 %, for nedbørfelt SP11.

Figur 4.5 viser den største flomtoppen for nedbørfelt SP11. Effekten av klimapåslaget på 20 % gir en økning av flomverdien på ca. 30 %. For de andre nedbørfeltene er resultatet fra dimensjonerende nedbør med klimafaktor presentert i Tabell 4.5. Tabellen viser kun maksimale flomverdier for nedbørfeltene SP1-SP11, og forholdet Q_{klima}/Q viser økningen på avrenning ved 200-års ekstremnedbør med klimafaktor.

Tabell 4.5: Maksimal vannføring ved ulike miljøforhold, etter dimensjonerende 200-års nedbør med klimafaktor på 20 %. Tabellen viser også forholdet mellom vannføring for 200-års nedbør med klimapåslag og vannføring uten klimapåslag, Q_{klima}/Q . *U, M* og *MS* står for de ulike metnings- og miljøforholdene som tidligere. Alle vannføringer er gitt i l/s.

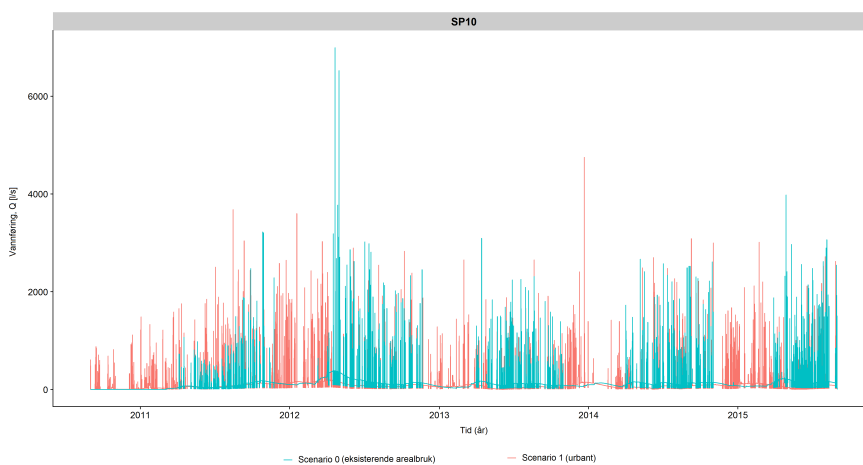
SP	1	2	3	4	5	6	7
Q_{klima,U}	27	62	361	146	72	57	110
$Q_{klima,U}/Q_U$	1	1	1.19	1.23	1.21	1.19	1.23
Q_{klima,M}	59	116	95	263	161	72	146
$Q_{klima,M}/Q_M$	1.15	1.23	1.15	1.16	1.17	1.15	1.18
Q_{klima,MS}	56	120	610	262	166	70	198
$Q_{klima,MS}/Q_{MS}$	1.15	1.16	1.15	1.18	1.17	1.15	1.18

SP	8	9	10 (sym)	10 (usym)	11 (sym)	11 (usym)
Q_{klima,U}	125	22	2349	2303	3003	3135
$Q_{klima,U}/Q_U$	1.10	1.10	1.15	1.13	1.11	1.14
Q_{klima,M}	143	72	3358	4037	4681	4841
$Q_{klima,M}/Q_M$	1.16	1.17	1.17	1.11	1.18	1.29
Q_{klima,MS}	147	74	3457	3557	3366	3470
$Q_{klima,MS}/Q_{MS}$	1.16	1.17	1.15	1.15	1.13	1.15

Sammenlignet av vannføring fra dimensjonerende nedbør uten klimapåslag med Tabell 4.5, viser at et klimafaktor på 1.2 vil gi økt avrenning på 0 til ca. 30 % for nedbørfeltene SP1-SP11.

4.2 Simuleringer med SWAT

SWAT-modellen ble valgt for å kunne analysere arealbrukseffekter og kun nedbørfelt SP10 ble studert. Simuleringsresultatene kommer fra en ikke-kalibrert modell. Resultater av ti-melig simuleringer er presentert med hydrografer fra hver HRU (ni stykker). Den totale vannføringen for nedbørfeltet er den sammenlagte vannføringen fra alle HRU-er. Hydrografene ved begge arealbruksscenarioer, eksisterende arealbruksforhold (Scenario 0) og kun urbant område (Scenario 1) for perioden september 2010 til august 2015 er grafisk fremtitt i Figur 4.6.



Figur 4.6: Simulering av vannføring fra nedbørfelt SP10 i perioden september 2010 til august 2015, med eksisterende arealbruk (blå graf) og kun urbant (rød graf). Gjennomsnittlig verdier av timelige vannføringer er også presentert som daglige verdier i grafen.

Av grafen i Figur 4.6 er det mulig å se endrete avrenningsmønstre fra feltet etter arealbruksendringen. Det er mulig å se høyere vannføringer (rød graf) i områder hvor det har vært lave eller ingen avrenning ved eksisterende arealbruk (blå graf).

I tillegg til vannføringsdata, ble også verdier for sedimentkonsentrasjon hentet ut fra resultatene. Disse resultatene ble først og fremst funnet interessante fordi det var antatt at kulvertfeilene kunne være forårsaket av tilstopping.

Tabell 4.6: Sedimentkonsentrasjonen i vannet [mg/L] for hvert simuleringsår 2010-2015 for nedbørfelt SP10, både før og etter arealbruksendringen. Scenario 0 definerer eksisterende arealbruksforhold i feltet og Scenario 1 er ved omgjøring av feltet til kun urbant område.

År	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Sedimentkons. Scen. 0 [mg/L]	2.46	4.03	5.35	5.23	5.23	4.94
Sedimentkons. Scen. 1 [mg/L]	5.29	2.49	3.32	4.14	3.39	3.77

Tabell 4.6 viser sedimentkonsentrasjonen i vannet for hvert år i perioden september 2010 og frem til august 2015. Sedimentkonsentrasjonen i vannet ved Scenario 1 er oftest lavere enn ved eksisterende arealbruksforhold. Men derimot for år 2010 er sedimentkonsentrasjonen ved Scenario 1 nesten dobbelt så høy som konsentrasjonen simulert for Scenario 0.

Kapittel 5

Diskusjon

Det femte kapittelet av denne masteroppgaven er diskusjonsdelen. Resultatene lagt frem i forrige kapittel blir i dette kapittelet analysert og diskutert nærmere. Diskusjonen er delt inn i to deler som tar for seg hver hydrologisk modell benyttet i studiet og de tilhørende resultatene presentert i Kapittel 4.

5.1 Simuleringer med DDD

Det var vanskelig å kontrollere kvaliteten av simuleringene utført av DDD-modellen, da det kun ble gjort hydrologisk modelleringer av umålte felt. Dermed eksisterer ikke observerte data for sammenligning og validering av resultatene. Tilliten til DDD er basert på tidligere studier som arbeidet utført i Klima 2050, (11) og (4). DDD betegnes som en ”parameterfattig” modell og derfor definert som godt egnet for modellering av umålte felt. Modellens nødvendige inngangsparametrene hentes hovedsakelig ut fra karttjenester (GIS), og parametre som krever kalibrering beregnes i dette studiet ved regionaliseringsmetoden basert på regresjon. Både informasjon hentet fra GIS og timelige nedbørdata er definert som gode kilder med liten usikkerhet. Det bør derimot påpekes at regresjonsformlene er i stadig oppdatering og at ligningssettet benyttet i dette studiet (se Vedlegg 3) er den nyeste versjonen per idag, utarbeidet av Klima 2050 i Arbeidspakke 2.

Figur 6.6 i Vedlegg 11 presenterer simulerte hydrografer for alle de 11 nedbørfeltene i perioden september 2010 til august 2015. Som forventet viser grafene variasjoner i løpet av de fem simuleringsårene. Norge har fire sesonger i løpet av ett år som består av ulike nedbørsmønstre og temperaturforhold, som igjen vil føre til varierende avrenningsmønstre. Resultatene krevde ingen re-simulering ved sammenligning av gjennomsnittlig observerte verdier fra NVE, i Tabell 4.1. Resultatene ble derfor benyttet som grunnlag for videre analyse.

5.1.1 Miljøforhold og metningsnivå

Det påpekes i litteraturen at DDD-modellen består av en kompleks modul som beskriver metningsprosessene som oppstår når vann infiltreres ned i jordsmonnet (se Figur 3.2). Det ble dermed utført simuleringer av 200-års dimensjonerende nedbør for kulverter for å evaluere modellens presentasjon av flomtopper og hydrologisk respons ved ulike miljøforhold. Figur 4.2 viser maksimal flomtopp for nedbørfelt SP10 og SP11 ved simulering av 200-årsnedbør med varighet på to timer (lik feltenes konsentrasjonstid), ved tre ulike miljøforhold. Det forventes høyest vannføring ved mettet jordforhold *med* snøsmelting og lavest vannføring ved umettet forhold. Dermed vil flomtoppen ved mettet jord *uten* snøsmelting havne mellom flomtoppene ved mettet og umettet jord. Dette gjelder for nedbørfelt SP10, men derimot ikke for nedbørfelt SP11. Ved første øyekast kan de to hydrografene virke misvisende da resultatene ikke er det samme. Ved nærmere analysing av resultatene viser det seg derimot at avrenningsforholdene som oppstår for nedbørfelt SP11 kan være både logiske og realistiske. Ekstremnedbør ble satt inn i perioder med forskjellige miljøforhold og disse oppstår ikke på samme tidspunkt: 1. Mai og april, når det er mye nedbør og snøsmelting (mettet med snøsmelting), 2. Juni og juli, når det er lite nedbør og høyere temperaturer (umettet jord) og 3. August og September, når det ikke er snø, men ofte mye regn (mettet uten snøsmelting). Én årsak til at flomtoppen ved mettet jordforhold *uten* snøsmelting er høyere enn ved forhold *med* snøsmelting (som i resultatet for nedbørfelt SP11) kan være fordi nedbørsforholdene i løpet av de ulike sesongene ikke er den samme. En rask beregning av timelige nedbørdata viser at gjennomsnittlig nedbørsforhold mellom disse to periodene kan være så mye som 50 %. Det er mange faktorer som påvirker avrenningsmengden. Dette inkluderer også nedbørsforløpet som kommer før ekstremnedbøren som kommer, og den har innvirkning på jordas metningsforhold og dermed også på avrenningen. Det ble derfor valgt å utføre simuleringer hvor nedbørsforløpet 24 timer før ekstremnedbøren er det samme for alle tre miljøforhold/perioder. Det ble for disse simuleringene benyttet 200-års nedbør med varighet på 24 timer, som anbefalt ved hydrologisk modellering i (22). Resultatet i Figur 4.3 støtter teorien og viser høyeste flomtopp ved mettet jord *med* snøsmelting og lavest flomtopp ved umettet jordforhold.

For nedbørfelt SP10 og SP11 med konsentrasjonstid satt til to timer er to ulike nedbørsfordelinger benyttet, symmetrisk og usymmetrisk med topp høyre (se Figur 3.5 og 6.3). Simuleringsresultatene i Tabell 4.4 viser at usymmetrisk hyetograf gir høyest flomtopp ved alle forhold. Hovedårsaken til dette er at mer regn vil føre til mer avrenning. Den totale nedbørmengden i løpet av én time i hyetografen med usymmetrisk nedbørsfordeling er mye høyere (21.03 mm) enn for symmetrisk fordeling (14.02 mm). Figur 4.4 viser at flomtoppen oppstår på samme tidspunkt, men at grafen ved usymmetrisk nedbørsfordeling er smalere, samt brattere før maksimal flomverdi. Den totale flommengden kan være den samme, men flommen kommer mer plutselig ved høye nedbørsintensiteter. Resultatene viser at avrenningen i DDD er svært avhengig av både mengden nedbør og forholdene i jorda, og at modellens beskrivelse av metningsprosessene er tilnærmet lik virkeligheten.

Tabell 6.6 viser maksimale flomverdier beregnet med Den rasjonale formel og Nasjonalt

formelverk for små og uregulerte felt. Sammenlignet med de simulerte maksimale verdiene i DDD er de beregnende en del høyere. Spesielt for de mindre nedbørfeltene kan de beregnede vannføringerne være opptil 60 % høyere enn de simulerte. Dette kan være en indikasjon på at DDD-modellen underestimerer flomtoppene som oppstår. Underestimering av flomtopper i DDD har blitt påpekt både i (11) og (4). Dette kan være en svakhet i modellens struktur, men det er vanskelig å bestemme hvor en eventuell feil ligger uten data for analyse og validering. For de minste nedbørfeltene var det flere som hadde konsentrasjonstid mindre enn én time. Det kan dermed hende at det er flere flomtopper som kan ha blitt "flatet" ut på grunn av for store tidssteg benyttet ved simulering. Simuleringer med enda finere oppløsning enn timelig kan være nøkkelen til bedre simuleringssnøyaktighet ved høye vannføringer. Et utfordring ved slike analyser med små tidssteg vil være tilgjengeligheten av data med like fin oppløsning.

5.1.2 Klimafaktor

Klimaanalyse kan utføres på flere måter som nevnt i Kapittel 2. Metoden benyttet ble sett på som mest relevant på grunn av oppgavens fokus på kulverter. En klimafaktor på 1.2 % legges til den dimensjonerende 200-års nedbøren for kulverter. Med for eksempel Den rasjonale formel vil avrenningen øke sammen med den økte nedbørmengden. Resultatene i Tabell 4.5 viser derimot at 20 % mer nedbør fører til en økt avrenning fra 0 % til nesten 30 %. Den maksimale økningen av avrenningen på 30 % oppstår for nedbørfelt SP11 ved usymmetrisk nedbørsfordeling. Dette er et av de større feltene med areal på over 2 km² og det kan tenkes at klimaeffektene er større for et større nedbørfelt. Den nest største økningen på 23 % oppstår for nedbørfelt SP7 og SP4, som er et av de mindre feltene studert, med et areal på henholdsvis 0.14 og 0.2 km². Økningen av avrenningen på grunn av klimaendringer vil dermed være unik for hvert område og nedbørfelt, basert på feltets karakteristikk og forhold. Det burde dermed gjøres egne analyser av de aktuelle feltene for å oppnå riktig klimatilpasset dimensjonering av nye installasjoner.

5.1.3 Kulvertkapasitet

200-års ekstremnedbør ble valgt i simuleringene på grunnlag av dimensjoneringskravene for kulverter. Simuleringresultatene er videre benyttet for kontroll av kulvertkapasitet for nedbørfelt SP1-SP10. Ved sammenligning av Tabell 4.3 viser at de maksimale simulerte vannføringerne er mye lavere enn kulvertkapasitetene. Tabell 4.5 viser at kulvertkapasiteten for nedbørfelt SP10, på 8850 l/s fortsatt er over to ganger så stor som den maksimale simulerte vannføringen for feltet. Dette med et klimapåslag på 20 % lagt til på den dimensjonerende nedbøren. Sannsynligheten for kulvertfeil på grunn av underdimensjonering er derfor svært liten, for de 10 nedbørfeltene, SP1-SP10. Lignende resultater ble også funnet i (4).

For nedbørfelt SP11 og tilhørende kulvert ble skaden registrert etter en ekstrem nedbørsepisode med intensitet på 60 mm på omtrent én time (se Del 3.1. Denne nedbørsepsoden kan være et resultat av klimaendringene på grunn av den høye

nedbørmengden og korte varigheten. Den registrerte nedbørsintensiteten er 200 % høyere enn største nedbørsintensitet benyttet ved simulering av 200-års nedbør med DDD (30.07 mm med klimafaktor). I tillegg er den tilhørende flomtoppen observert til å være omtrent 8300 l/s, som er mye høyere enn simulerte flomverdier og faktisk ikke langt unna kulvertkapasiteten for nedbørfelt SP10. Det kan derfor antas at kulverten i nedbørfelt SP11 feilet på grunn av overskredet kapasitet. Kapasiteten til en kulvert er derimot ikke konstant, som nevnt i Del 2.2.5. Kulvertenes kapasitet kan bli redusert blant annet ved tilstopping av røret på grunn av sedimenter og annet drivgods. Dette er en vanlig årsak til kulvertfeil om installasjonen ikke blir regelmessig vedlikeholdt.

5.2 Simuleringer med SWAT

På grunn av tidsbegrensninger er simuleringene utført med SWAT svært begrenset. Vanlig og optimal prosedyre før simulering er ikke gjort. Det ble først om fremst ikke utført analyse av modellens sensitivitet på de ulike parameterne og modellen ble heller ikke kalibrert med simulerte vannføringsdata fra DDD som planlagt. Det understrekes derfor at det kun har blitt utført innledende undersøkelser for simuleringer med SWAT og resultatene presentert i Kapittel 4 legges til grunn for vurderingen av modellens potensiale for analyse av arealbruksendringer og effekten på avrenning. Mangel på modellkalibrering er definert som hovedkilden til feil og usikkerheter i resultatene.

Andre feilkilder er også usikre og ukjente inngangsparametere. Innebygde arealbruks- og jordtyper fra SWAT sin database ble valgt for mer realistiske forhold i feltet. Det ble først og fremst ikke innhentet data med gode nok detaljer for å finne samsvarende arealbruks- og jordtyper. Ett eksempel er å se i Figur 6.4 hvor myr er definert på ulike områder i feltet, som både arealbruk og som en jordtype. Forskjellen på de faktiske forholdene i feltet er ukjent. Samtidig er værparametere benyttet i SWAT mer usikre enn ønsket. SWAT krevde kun timelige oppløsning av nedbør ved hydrologisk simulering med timelige tidssteg. Daglige værparametere som temperatur, solstråling, vind og relativ fuktighet var inneholdt flere usikkerheter enn de timelige dataene som ble innhentet. Data på relativ fuktighet fra AgroMet er definert som usikre og er antatt å være lavere enn de virkelige verdiene. Daglige data på både temperatur og vind besto av flere manglende verdier. Dette vil påvirke gjennomsnittlige verdier benyttet i beregninger av for eksempel fordampning.

5.2.1 Arealbruksscenario

Med viten om usikkerhetene og feilkildene er resultatene presentert kun benyttet som et grunnlag for mulig analyse av arealbruksendringer. Det ble utført simulering av vannføring mellom perioden september 2010 til august 2015, ved eksisterende arealbruksforhold (Scenario 0) og et hypotetisk arealbruksscenario, hvor hele nedbørfeltet omgjøres til urbant område (Scenario 1). Figur 4.6 viser at arealbruksendringen i feltet har ført til synlige endringer i avrenningsmønsteret i løpet av simuleringsårene. For Scenario 1 oppstår avrenning i perioder hvor det har vært svært liten eller ingen

vannføring ved Scenario 0. Dette indikerer at ved mindre nedbørsepisoder har en stor del av nedbørmengden infiltrert ned i jorda ved eksisterende arealbruksforhold. Etter arealbruksendringen består feltet av en større andel impermeable flater, som for eksempel asfalt og bebyggelse. Dermed har feltets infiltrasjonskapasitet blitt redusert og en større mengde med nedbør vil renne av på overflaten som avrenning. Dette passer godt med teorien og resultatene fra (2) presentert i Tabell 2.2. Det bør også påpekes at de ulike urbane arealbrukstypene valgt kan ha hatt stor innvirkning på infiltrasjonsevnen i feltet. Dette er ikke helt optimalt å benytte seg av forskjellige typer for urbant område, men det oppsto et problem ved gjennomførelse av simulering når det ble satt inn identisk arealbrukstype for ulike eksisterende arealbrukstyper i nedbørfeltet.

SWAT simulerer også transport av sedimenter og var en av grunnene til at modellen ble valgt og benyttet i dette studiet. Dette fordi at kulvertfeil som oppstår ofte skyldes opphoping av sedimenter og tilstopping av røret. Dette kan eventuelt endre på forholdene i kulverten og redusere kulvertkapasiteten betraktelig. Tabell 4.6 viser sedimentkonsentrasjonen i vannet for hvert simuleringsår, september 2010 til august 2015. Reduksjonen av sedimentkonsentrasjonen etter arealbruksendringer er logisk og realistisk. I Scenario 0 er nedbørfelt SP10 bestående av jordbruk (21 %), som er jord som har lett for å erodere, selv ved små vannføringer. Dermed blir konsentrasjonen redusert når arealbruken omgjøres til urbant område, hvor de fleste overflater er "faste" og svært lite eroderbar. Derimot er det i 2010 simulert en mye høyere verdi for sedimentkonsentrasjonen ved Scenario 1 enn for Scenario 0. Ved simuleringer med SWAT kan modellen behøve "oppvarming" for å få i gang prosessene i det hydrologiske systemet dannet. Det ble i dette studiet valgt å *ikke* legge inn noen "oppvarmingsår" på grunn av den korte perioden simulert, på kun fem år. Dette kan være en grunn til at sedimentkonsentrasjonen er mye høyere ved Scenario 1 i det første simuleringsåret. Om året 2010 defineres som en oppvarmingsperiode, viser de andre årene at modellen tar hensyn til de arealbruksforholdene i feltet ved simulering av sedimenttransportering. Gjennomsnittlig vannføring kan benyttes til å beregne størrelsen av sedimentmengden som kan bli erodert og transportert ut fra feltet hvert år, og eventuell sedimentmengde som kan tette igjen kulverten kan estimeres.

Kapittel 6

Konklusjon

Dette kapittelet er oppgavens sjette og siste kapittel. Her presenteres oppgavens konklusjon basert på arbeidet utført og resultatene, som ble diskutert i forrige kapittel (Kapittel 5). Til slutt gis det også anbefalinger ved videre arbeid eller for eventuelle studier med samme tematikk.

6.1 Konklusjon og videre arbeid

Dette studiet hadde som hovedoppgave å studere effekter av både klimaendringer og arealbruk i små og umålte felt, med spesifikt fokus på avrenning. Det valgte observasjonsområde for dette studiet er 11 nedbørfelt definert ut fra kulvertfeil registrert langs jernbanestrekningen Garli-Støren, i Soknedal. Derfor har dette studiet hatt et spesielt fokus på kulverter, og simuleringene utført danner grunnlaget for å undersøke mulige årsaker til kulvertfeil. To hydrologiske modeller, DDD og SWAT er vurdert på grunnlag av modellernes presentasjon av hydrologisk respons som ble dokumentert i Kapittel 4.

I Klima 2050, Arbeidspakke 2 har et arbeid fokusert på å tilpasse modellen DDD for modellering av umålte felt. Kalibrering av parametere er blitt erstattet med regionalisering for å redusere usikkerhetene ved simuleringer av umålte felt. Regionaliseringsmetoden basert på regresjon er benyttet til å sette opp modellen for de 11 nedbørfeltene. Modellen DDD viste seg å være relativ enkel å sette opp for umålte felt, både ved innhenting av nødvendige data fra GIS og beregning av parametere med regresjonsformler. Resultatene viser at modellen er svært pålitelig, med troverdige og realistiske beskrivelser av jordas metningsprosess. Modellens beskrivelse av de hydrologiske prosessene under jordoverflaten har blitt påpekt som et av de sterke sidene ved DDD. Samtidig viser resultatene at DDD har en tendens til å underestimere de høyeste flomtoppene, som kan indikere en svakhet i modellens oppbygning. Spesifikt kan feilen ligge i den dynamiske modulen som

beskriver prosessene på jordoverflaten. Analyser av modellens struktur vil kunne forbedre modellens prestasjon ved høye vannføringer.

Det ble utført simulering av avrenning for dimensjonerende 200-års nedbør for kulverter, ved ekstreme miljøforhold for fem år i perioden september 2010 til august 2015. Resultatene viser at til og med ved ekstremt ugunstige forhold var de simulerte flomtoppene betydelige lavere enn kulvertkapasitetene. Det ble deretter lagt til en klimafaktor på 1.2 (20 %) på dimensjonerende 200-års nedbør for å analysere klimaeffektene. Resultatene viser derimot ingen effekt til økt avrenning på nesten 30 %, som tilsier at effektene er unike for hvert felt. Det bør derfor gjøres egne analyser for det aktuelle område og installasjon for å kunne utføre riktig klimatilpasset dimensjonering. Selv med en 20 % økning på nedbørmengde og en maksimal økningen av avrenningen på 30 % er flomverdiene ikke i nærheten av å overskride kulvertkapasitetene. Det konkluderes derfor med at kulvertene for nedbørfelt SP1-SP10 ikke feilet på grunn av for høye vannføringer eller underdimensjonering.

Det antas også at kulvertfeil kan ha oppstått på grunn av redusert kapasitet, forårsaket av sedimenter eller annet drivgods som kan ha tilstoppet eller redusert fri strømming gjennom røret. Ved mangel på regelmessig vedlikehold er dette en ofte forekommende årsak til kulvertfeil. For nedbørfelt SP11 og tilhørende kulvert er det derimot høyest sannsynlig at feilen oppsto på grunn av høye vannføringer som har overskredet kulvertkapasiteten. Den registrerte nedbørsepisoden er over dobbelt så intensiv som benyttede nedbørsintensiteter ved simulering av 200-års dimensjonerende nedbør for kulverter. Det kan derfor tenkes at slike ekstreme nedbørsepisoder også kan oppstå for de andre feltene fremtiden. Det hadde vært interessant å utføre simuleringer med en nedbørsintensitet lik den observerte i nedbørfelt SP11 som et sannsynlig klimascenario, samt for å teste og eventuelt forbedre DDD-modellens presentasjon av tilhørende flomtopp. Det vil også være mulighet å utføre klimaanalyse ved nedskalering av globale klimamodeller for å danne mer realistiske klimaforhold ved simuleringer. Det hadde vært interessant å undersøke om det oppstår noen nedbørstilfeller tilnærmet lik den observerte i nedbørfelt SP11.

Etter arbeidet med DDD kan både modellen og metoden regresjonsbasert regionalisering for beregning av parametere sterkt anbefales videre, både for hydrologisk modellering av umålte felt og flomberegninger. Modellen er enkel, effektiv og har i flere studier, inkludert dette studiet vist seg å gi realistiske simuleringresultater.

SWAT ble valgt som hydrologisk modell for å analysere arealbrukseffekter. På grunn av tidsbegrensinger ble det kun utført innledende undersøkelser av modellen, og det kan i dette studiet kun konkluderes med at SWAT-modellen har stort potensial for å simulere realistiske effekter av arealbruksendringer, både på avrenning og sedimenttransport. Resultatene fra en ikke-kalibrert modell viser logiske effekter etter valgt arealbruksendring i det aktuelle feltet. Det antas derfor at ved riktig kalibrering av modellen og detaljerte inngangsdata for arealbruk og jordforhold, vil modellen kunne gi gode simuleringresultater som samsvarer med teoretiske arealbrukseffekter. Sensitivitetsanalyse av modellen bør også utføres for god optimalisering av modellen.

Det er ønskelig å påpeke at tid er en av de viktigste ressursene ved hydrologisk modellering, som erfart i dette studiet. Dette gjelder tid for å kunne danne et godt kjennskap til

modellen, spesielt ved bruk av en ukjent modell, samt nok tid for innhenting av nødvendige data. Ved simuleringer med SWAT anbefales det feltstudier og fysiske analyser av forholdene i feltet. Spesifikke analyser på jordtypene i feltet vil være behjelpelig. SWAT gir brukeren mulighet og stor frihet til å beskrive jordtyper basert på en rekke parametere.

Ved videre arbeid med SWAT ville det vært svært interessant å kalibrere modellen med simulerte vannføringsdata fra for eksempel DDD, først og fremst fordi denne metoden ikke har blitt utført tidligere. Samtidig er det fortsatt av stor interesse å undersøke sannsynligheten for tilstopping av kulvertene tilhørende for nedbørfeltene studert i denne oppgaven. SWAT simulerer også transport av både sedimenter og næringsstoffer, og ved antagelse om lav eller ingen vedlikeholding av kulverten, kan det bestemmes en sedimentmengde og størrelse på redusert kulvertkapasitet og utføre ny kontroll av kulvertkapasiteter. Simuleringer av flere arealbruksscenarioer vil også kunne evaluere modellens pålitelighet.

Ellers er det verdt å nevne at SWAT er ganske intuitiv ved klargjøring av modellen og ved bruk. Og det finnes god veiledning for bruk av modellen, både i form av dokumentasjon, andre brukere av modellen og instruksjonsvideo på SWAT sine hjemmesider.

Referanseliste

- [1] Statens vegvesen, "Vegbygging Håndbok N200," *Vegdirektoratet*, p. 528, 2014.
- [2] B. Huynh, "Effekter av arealbruksendringer på avrenning," Prosjektoppgave, NTNU, 2017.
- [3] I. Hanssen-Bauer m. fl., "Klima i Norge 2100," rapport, Miljødirektoratet, 2015.
- [4] S. Vauclin, "Use of a Parsimonious Rainfall-Runoff Model for Flood Peak Modelling in Small Ungauged Catchments in Norway," Bacheloroppgave, NTNU, 2017.
- [5] M. Winchell m. fl., "ArcSWAT Interface for SWAT2012 - User's Guide," *SWAT*, p. 464, 2013.
- [6] P. Sinclair, "Ray Bradley: The Hockey Stick is a Brick Out-house," *Climate Rocks*, vol. 26, no. 6, pp. 759–762, Tilgjengelig fra: <https://climatecrocks.com/2011/06/08/ray-bradley-the-hockey-stick-is-a-brick-outhouse/> (Sist lest: 23.03.18).
- [7] CICERO, "Drivhuseffekten," Tilgjengelig fra: <http://cicero.oslo.no/no> (Sist lest: 15.05.18).
- [8] Statistisk sentralbyrå, "Oversikt over fordeling av arealbruk i Norge per 2015," Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/arealstat/aar/2015-09-11> (Sist lest: 11.05.18).
- [9] Deltares USA, "Models and Modeling in FEWS Part I, slide 8," Tilgjengelig fra: <http://slideplayer.com/slide/3719993/> (Sist lest: 06.12.17).
- [10] A. Adem, A. Melesse og S. Admasu, "Statistical downscaling sds, slide 7," Tilgjengelig fra: <https://www.slideshare.net/ipsantika/statistical-downscaling-sds> (Sist lest: 13.05.18).
- [11] T. Skaugen og C. Onof, "A Rainfall-Runoff Model Parameterized From GIS and Runoff Data," *Hydrological Processes*, vol. 28, pp. 4529–4542, 2014.

-
- [12] ResearchGate, "Inngangs- og utgangsdata i swat. overview of the swat-model - input/output parameters, fig. 2.," Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/figure/259527294_fig2_Fig-2-Overview-of-the-swat-model-model-inputoutput-parameters (Sist lest: 06.12.17).
- [13] ProfessorPatel.com, "Scs-kurve. urban hydrology for small watersheds," Tilgjengelig fra: <http://www.professorpatel.com/uploads/76/5/6/7656897/tr55.pdf> (Sist lest: 15.10.17).
- [14] Norsk klimaservicesenter, "Nedbørsintensitet," Tilgjengelig fra: <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml> (Sist lest: 15.02.18).
- [15] IFCR, "Worlds Disaster Report 2016, Resilience: Saving Lives Today, Investing for Tomorrow," rapport, IFCR, 2016.
- [16] Miljødirektoratet, "Metoder for beregning av klimafaktor for fremtidig nedbørsintensitet," *Miljødirektoratet*, vol. 292, 2014.
- [17] T. Rinde, A. Njøs og B. Kløve, "Endringer i landbrukets arealbruk i glommas nedbørsfelt. hydra-rapport nr. 02," *NVE*, vol. 2, 1999.
- [18] G. Dwarakish og B. Gansari, "Impact of land use change on hydrological systems: A review of current modeling approaches," *Cogent Geoscience*, vol. 4, 2015.
- [19] Klima 2050, "Klima 2050," Tilgjengelig fra: <http://www.klima2050.no/what-we-do/> (Sist lest: 04.02.18).
- [20] P. Viréhn, "Water on Devious Ways - A GIS Analysis," Masteroppgave, NTNU, 2017.
- [21] K. Rosvold, "Avrenning," *Store norske leksikon*, Tilgjengelig fra: <https://snl.no/avrenning> (Sist lest: 06.03.18).
- [22] S. Stenius m. fl., "Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt," *NVE*, vol. 7, 2015.
- [23] S. Stenius og P. Glad, "Anbefale metoder for flomberegninger i små uregulerte felt," *NVE, Norges vassdrags- og energidirektorat*, 2015.
- [24] C. Parmesan og G. Yohe, "A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems," *NATURE*, vol. 421, pp. 37–42, 2003.
- [25] M. Hetland Olsen, "Effekten av menneskelige inngrep på avrenning og materialtransport under en større nedbørshendelse. case studier fra gudbrandsdalen flommen 2013," Masteroppgave, NTNU, 2014.
- [26] A. Tsegaw og K. Alfredsen, "Comparison of Continuous Time Rainfall-Runoff Model, Event Based Model and Statistical Methods to Estimate Floods at Ungauged Rural Small Catchments.," *Geophysical Research Abstracts*, vol. 20, 2018.

-
- [27] R. Arsenault og F. Brissette, "Continuous Streamflow Prediction in Ungauged bBasins: The Effects of Equifinality and Parameter Set Selection on Uncertainty in Regionalization Approaches," *Water Resources Research*, vol. 50, no. 7, 2014.
- [28] NIFS, "NATURFARE - INFRASTRUKTUR - FLOM - SKRED," Tilgjengelig fra: www.naturfare.no (Sist lest: 06.04.18).
- [29] T. Wagener og H. Wheater, "Parameter Estimation and Regionalization for Continuous Rainfall-Runoff Models Including Uncertainty," *Journal of Hydrology*, vol. 320, no. 1, 2006.
- [30] N. McIntyre m. fl., "Ensemble Predictions of Runoff in Ungauged Catchments," *Water Resources Research*, vol. 42, no. 12, 2005.
- [31] NVE, *Vassdragshåndboka - Håndbok i vassdragsteknikk*. Fagbokforlaget, 2010.
- [32] NIFS, "Drenering for veg og jernbane," 2016.
- [33] Direktoratet for naturforvaltning, "Slipp fisken fram! fisken vandringsmulighet gjennom kulverter og stikkrenner," *Miljødirektoratet*, vol. 22, 2002.
- [34] T. Fergus m. fl., "Skogsveger og skredfare - veileder," *Landbruks- og matdepartementet*, 2011.
- [35] J. Sellevold og D. Edvardsen, "Vannrelaterte skader langs E6 Biri-Otta," *Vegdirektoratet*, vol. 323, 2013.
- [36] Miljødirektoratet, "Arealbruk og klima," *Miljøstatus - Miljøinformasjon fra offentlige myndigheter*, Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/tiltak-klimagassutslipp/klimaarbeid-i-kommunene/> (Sist lest: 01.03.18).
- [37] R. DeFries og K. Eshleman, "Land-use Change and Hydrologic Processes: A Major Focus for the Future," *Hydrological Processes*, vol. 18, p. 2183–2186, 2004.
- [38] FN-Sambandet, "Klimaendringer," Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/Tema/Klima-og-miljoe/Klimaendringer> (Sist lest: 07.03.18).
- [39] M. Mann og R. Bradley, "Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium' Inferences, Uncertainties, and Limitations," *Geophysical Research Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 759–762, 1999.
- [40] H. Ganesh, "Impacts of Climate Change on Flow Regimes in Central Norway," Masteroppgave, NTNU, 2017.
- [41] C. Sjøgren-Erichsen, "Klimaendringer: Kunnskap og holdninger," Masteroppgave, NTNU, 2015.
- [42] Naturvernforbundet, "Global oppvarming og klimaendringer," Tilgjengelig fra: https://naturvernforbundet.no/klima/fakta_om_klimaproblemet/global-oppvarming-og-klimaendringer-article81-751.html (Sist lest: 15.05.18).
-

-
- [43] Miljødirektoratet, “Drivhuseffekten,” Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/drivhuseffekten/> (Sist lest: 15.05.18).
- [44] T. Mhyre, “Karbonlager,” *Store norske leksjon*, Tilgjengelig fra: <https://snl.no/karbonlager> (Sist lest: 15.05.18).
- [45] Miljødirektoratet, “Skog og klima,” Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/tema/klima/skog-og-globale-klimaendringer/> (Sist lest: 07.03.18).
- [46] Skogfondet, “Regnskogen bremser klimaendringene,” Tilgjengelig fra: <https://www.regnskog.no/no/om-regnskogen/regnskogen-bremser-klimaendringene> (Sist lest: 07.03.18).
- [47] Miljødirektoratet, “Togradersmålet,” Tilgjengelig fra: <http://www.miljostatus.no/togradersmaalet> (Sist lest: 07.03.18).
- [48] FN-Sambandet, “Parisavtalen,” Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/Om-FN/Avtaler/Miljoe-og-klima/Parisavtalen> (Sist lest: 07.03.18).
- [49] N. Arnell, *Change in the Catchment, Hydrology and Global Environmental Change*. New York, USA: Routeledge, 2014.
- [50] T. Rinde, A. Njøs og A. Grønlund, “Overordnet struktur i landpine-modellen. virkninger av arealbruksendringer på avrenningsforhold. hydra-rapport,” *NVE*, vol. 5, 2000.
- [51] T. Brænd, “Avskoging,” *Store norske leksikon*, Tilgjengelig fra: <https://snl.no/avskoging> (Sist lest: 13.05.18).
- [52] C. Liu og R. Allan, “Observed and Simulated Precipitation Responses in Wet and Dry Regions 1850-2100,” *Environmental research letters*, vol. 8, no. 3, 2013.
- [53] T. Rinde, “Landpine – a hydrological model to simulate the influence of land- use changes on runoff,” *SINTEF*, vol. HYDRA-rapport, 2000.
- [54] S. Wang m. fl., “Modelling Hydrological Response to Different Land-use and Climate Change Scenarios in the Zamu River Basin of Northwest China,” *Hydrological Processes*, vol. 22, 2008.
- [55] S. Im, H. Kim og C. Jang, “Assessing the Impacts of Land Use Changes on Watershed Hydrology Using MIKE SHE,” *Environment Geology*, vol. 22, 2008.
- [56] U. F. o. A. B. D. Niehoff, “Land-use Impacts on Storm-runoff Generation: Scenarios of Land-use Change and Simulation of Hydrological Response in a Meso-scale Catchment in SW-Germany,” *ResearchGate*, vol. 22, 2002.
- [57] Statistisk sentralbyrå, “Arealbruk og arealressurser, 1. januar 2015,” Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/natur-og-miljo/statistikker/arealstat/aar/2015-09-11> (Sist lest: 14.04.18).

-
- [58] Miljødirektoratet, “Overvannshåndtering,” Tilgjengelig fra: <http://www.klimatilpasning.no/sektorer/vann-og-avlop/oppgaver/handtering-av-overvann/> (Sist lest: 06.05.18).
- [59] J. Refsgaard, “Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes. distributed hydrological modelling,” *Springer*, vol. 22, 1990.
- [60] I. Eggen, “Hydrologisk modellering av nedbørflom i Gaula,” Masteroppgave, NTNU, 2016.
- [61] I. Pechlivanidis m. fl., “Catchment scale hydrological modeling: Review of Models Types, Calibration Approaches and Uncertainty Analysis Methods in the Context of Recent Developments in Technology and Application,” *Global NEST*, vol. 13, no. 3, pp. 193–214, 2011.
- [62] T. Sith og K. Nadaoka, “Comparison of swat and gssha for high time resolution prediction of stream flow and sediment concentration in a small agriculture watershed,” *Hydrology*, vol. 4, no. 27, 2017.
- [63] J. Arnold. m. fl., “SWAT: Model Use, Calibration, and Validation,” *Biological Systems Engineering; Papers and Publications*, vol. 406, 2012.
- [64] Norsk klimaservicesenter, “Klimaframskrivninger,” Tilgjengelig fra: <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/scenarios.xhtml> (Sist lest: 16.02.18).
- [65] Norsk klimaservicesenter, “Klima i Norge 2100,” Tilgjengelig fra: <https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/klima-i-norge-2100> (Sist lest: 07.03.18).
- [66] P. Verburg m. fl., “Land use change modelling: current practice and research priorities,” *GeoJournal*, vol. 61, 2004.
- [67] Klimatilpasning.no, “Arealplanlegging,” Tilgjengelig fra: <http://www.klimatilpasning.no/kommuneplanlegging/oppgaver/arealplanlegging/> (Sist lest: 16.05.18).
- [68] NVE, “Tillegg til retningslinjer for flomberegninger (2011),” NVE, 2016.
- [69] T. Skaugen og Z. Mengistu, “Estimating Catchment-Scale Groundwater Dynamics From Recession Analysis Enhanced Constraining of Hydrological Models,” *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 20, pp. 4963–4981, 2016.
- [70] T. Soloranta, “Simulating snow maps for norway: Description and statistical evaluation of the senorge snow model,” *The Cryosphere*, vol. 6, no. 6, pp. 1323–1337, 2012.
- [71] SWAT, “Swat,” Tilgjengelig fra: <https://swat.tamu.edu/> (Sist lest: 23.05.18).
- [72] T. Worku, D. Khare og S. Tripathi, “Modeling Runoff-Sediment Response to Land-

use/Land cover Changes Using Integrated GIS and SWAT-model in the Beressa Watershed,” *Environmental Earth Sciences*, 2017.

- [73] L. Øygarden og J. Deelstra, “Hvilke er det kritiske prosessene for modellering av avrenning fra landbruket? Har vi tilstrekkelig kunnskap for tiltaksanalyser i landbruket?,” 2008.
- [74] R Development Core Team, “R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing,” *R Project*, Tilgjengelig fra: <http://www.R-project.org> (Sist lest: 13.05.18).
- [75] J. Chambers, “The S System,” Tilgjengelig fra: <http://ect.bell-labs.com/sl/S/> (Sist lest: 22.05.18).
- [76] H. Aarnes, “Bruksanvisning for statistikkprogrammet og programmeringsspråket R,” *UiO*, 2009.
- [77] R Cran, “The Comprehensive R Archive Network,” Tilgjengelig fra: <https://cran.r-project.org/> (Sist lest: 13.05.18).
- [78] V. Tsihrintzis, R. Hamid og H. Fuentes, “Use of Geographig Information System (GIS) in Water Resources: A Review,” *Water Resources Management*, vol. 10, 1996.
- [79] E. Ørstavik, “Geografisk informasjonssystem,” Tilgjengelig fra: https://snl.no/geografisk_informasjonssystem (Sist lest: 23.05.18).
- [80] Met.no, “Meterologisk institutt - nedlastningsside,” Tilgjengelig fra: <http://thredds.met.no/thredds/catalog.html> (Sist lest: 12.03.18).
- [81] NIBIO, “AgroMetBase,” Tilgjengelig fra: <http://lmt.bioforsk.no/agrometbase/getweatherdata.php> (Sist lest: 26.05.18).
- [82] eKlima.no, “eKlima - Gratis tilgang til Meteorologisk institutts vær- og klimadata fra historiske data til sanntidsobservasjoner,” Tilgjengelig fra: <http://eklima.met.no/> (Sist lest: 26.05.18).
- [83] NVE, “NEVINA Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse,” Tilgjengelig fra: <http://nevina.nve.no/> (Sist lest: 14.04.18).
- [84] GeoNorge, “geoNorge - Nedlastningsløsning,” Tilgjengelig fra: <https://download.geonorge.no/skd12/nl2prot/nl2> (Sist lest: 18.03.18).
- [85] Norsk vassdrags- og energidirektorat, “Nedlasting av fagdata fra nve.,” Tilgjengelig fra: <http://nedlasting.nve.no/gis/> (Sist lest: 06.02.18).
- [86] NGU, “Datsett og nedlasting,” Tilgjengelig fra: <http://nedlasting.nve.no/gis/> (Sist lest: 06.02.18).
- [87] SWAT, “Instructional videos,” Tilgjengelig fra: <https://swat.tamu.edu/workshops/instructional-videos/> (Sist lest: 23.05.18).

-
- [88] T. Saloranta, “Simulating snow maps for Norway: Description and statistical evaluation of the seNorge snow model,” *The Cryosphere*, vol. 6, no. 13, pp. 1324–1336, 2012.

VEDLEGG

Vedlegg 1 - Feltkarakteristikk av de 11 nedbørfeltene.

Tabell 6.1: Feltkarakteristikk for de 11 nedbørfeltene, SP1 - SP11. I tabellen er arealbrukene definert som S = skog, J = jordbruk, M = myr og U = urbant område.

SP	Areal [km ²]	Gj. helning [°C]	Gj. årlig temp. [°C]	Gj. årlig nedbør [mm]	Gj. årlig vannføring [m ³ /s]	Arealbruk
1	0.05	21.2	3.3	817	0.008	81 % S 9.5 % J 9,5 % M
2	0.11	13.9	3.3	817	0.008	91 % S 9 % M
3	0.40	10.2	3.3	874	0.008	76 % S 24 % M
4	0.20	11.7	3.4	870	0.004	50 % S 50 % J
5	0.14	16.9	2.9	876	0.003	35 % S 65 % J
6	0.063	8.8	2.5	817	0.001	19 % S 81 % J
7	0.14	7.7	2.5	817	0.003	51 % S 49 % J
8	0.11	10.6	2.2	830	0.003	51 % S 43 % J 6 % M
9	0.07	9.3	2.2	830	0.002	18% S 82 % J 35 % S
10	2.19	3.7	2.1	835	0.050	21 % J 43 % M 1 % U
11	2.10	10.4	4.8	859	0.036	60 % S 30 % J 8 % M 2 % U

Vedlegg 2 - Inngangsparametere for DDD.

Tabell 6.2: Inngangsparametere for modellen DDD.

Parameter	Beskrivelse	Enhet	Kilde	Verdi
Hypsografisk kurve	10 elevasjonssoner (10-100%)	m	GIS	Individuelt for felt
Pro	Flytende vann i snø	Fraksjon	Klima 2050	Ligning 6.1
hfelt	Gj. elevasjon i feltet	m	GIS	Individuelt for felt
tgrad	Temperatur-gradient	°C100/m	Konstant	0
pgrad	Nedbørs-gradient	°C100/m	Konstant	0
pkorr	Korrigeringsfaktor for regn	Helt tall	Konstant	1
skorr	Korrigeringsfaktor for snø	Helt tall	Konstant	1
TX	Grenseverdi regn/snø	°C	(88)	0.5
TS	Grenseverdi snøsmelting	°C	Saloranta	0
CX	Grad-time faktor for snøsmelting	mm/c,day	Klima 2050	Ligning 6.2
CFR	Grad-time faktor for gjenfrysing	mm/c,day	Klima 2050	0.007
CGLAC	Grad-time faktor for bresmelting	mm/c,day	Beregning	1.5* CX
a0	Param. for ny romlig fordeling av SWE, formfaktor	Helt positivt tall	(11)	22.75
d	Param. for ny romlig fordeling av SWE, dekorrelasjon lengde	Helt positivt tall	(11)	250.01
Tid	Timelig tidssteg	sek.	-	3600
MAD	Gj. årlig vannføring	m ³ /s	Observert	Individuelt for felt
Areal	Nedbørfeltets areal	km ²	GIS	Individuelt for felt
maxLbog	Maks distanse for myr til elv	m	GIS	Individuelt for felt
midLbog	Gj. distanse for myr	m	GIS	Individuelt for felt
bogfrac	Arealfraksjon av myr	Fraksjon	GIS	Individuelt for felt
Zsoil	Arealfraksjon av jord	Fraksjon	GIS	Individuelt for felt
	(areal med 0 m til elv)			
Zbog	Arealfraksjon av myr (areal med 0 m til elv)	Fraksjon	GIS	Individuelt for felt
NoL	Antall lagringslag	Helt tall	Konstant	5

Cea	Dag-time faktor for evapotranspirasjon	mm/c,day	Klima 2050	Ligning 6.3
R	Feltkapasitet	Fraksjon	Klima 2050	0.3
Gshape	Formfaktor for gamma fordeling med liten lambda	Reelt positivt tall	Klima 2050	Ligning 6.6
Gscale	Skalafaktor for gamma fordeling med liten lambda	Reelt positivt tall	Klima 2050	Ligning 6.5
Gshl	Formfaktor for gamma fordeling for stor lambda	Reelt positivt tall	Klima 2050	Ligning 6.7
Gscl	Skalafaktor for gamma fordeling for stor lambda	Reelt positivt tall	Klima 2050	Ligning 6.8
rv	Bølgehastighet for elvstrømning	m/s	Klima 2050	Ligning 6.4
midFL	Gj. Distanse for elvstrømning	m	GIS	Individuelt for felt
stdFL	Standardavvik for distanser for elvnettverk	m	GIS	Individuelt for felt
maxFL	Maks distanse for elvstrømning	m	GIS	Individuelt for felt
maxDL	Maks distanse for jord til elv	m	GIS	Individuelt for felt
gtcel	Kvantil av fordeling av lagring under jordoverflaten	-	Konstant	0.999
midGL	Gj. distanse for breer til elv	m	GIS	Individuelt for felt
stdGL	St. avvik for distanser for breer til elv	m	GIS	Individuelt for felt
maxGL	Maks distanse for breer til elv	m	GIS	Individuelt for felt
Gfrac	Arealfraksjon for breer i elevasjonssoner	Fraksjon	GIS	Individuelt for felt

Vedlegg 3 - Regresjonsligninger for beregning av parametere i DDD.

$$Pro = 0,017 + 0,026\log(Mm) - 0,066\log(Ms) + 0,038\log(Mr) + 0,013\log(Me) - 0,029U \quad (6.1)$$

$$Cx = e^{-4,2+0,41\log(\log(Me))} + 0,87\log(M_p) - 0,95\log(M_s) \quad (6.2)$$

$$C_{ea} = e^{-8,75+0,28\log(M_e)+1,7\log(M_m)-0,26\log(M_m)+0,22\log(M_r)+0,003F} \quad (6.3)$$

$$r_v = 0,83 + 0,05\log(R_s) + 0,003B \quad (6.4)$$

$$G_{scale} = e^{-5,12-0,12L_e+0,22\ln(S_q)+0,3\log(M_e)} \quad (6.5)$$

$$G_{shape} = 0,82 + 0,0005M_p - 0,009S_q \quad (6.6)$$

$$G_{shl} = 2,047G_{shape} - 0,658 \quad (6.7)$$

$$G_{scl} = 0,49G_{scale} - 0,0014 \quad (6.8)$$

Vedlegg 4 - NEVINA-rapport for nedbørfelt SP11 (83).

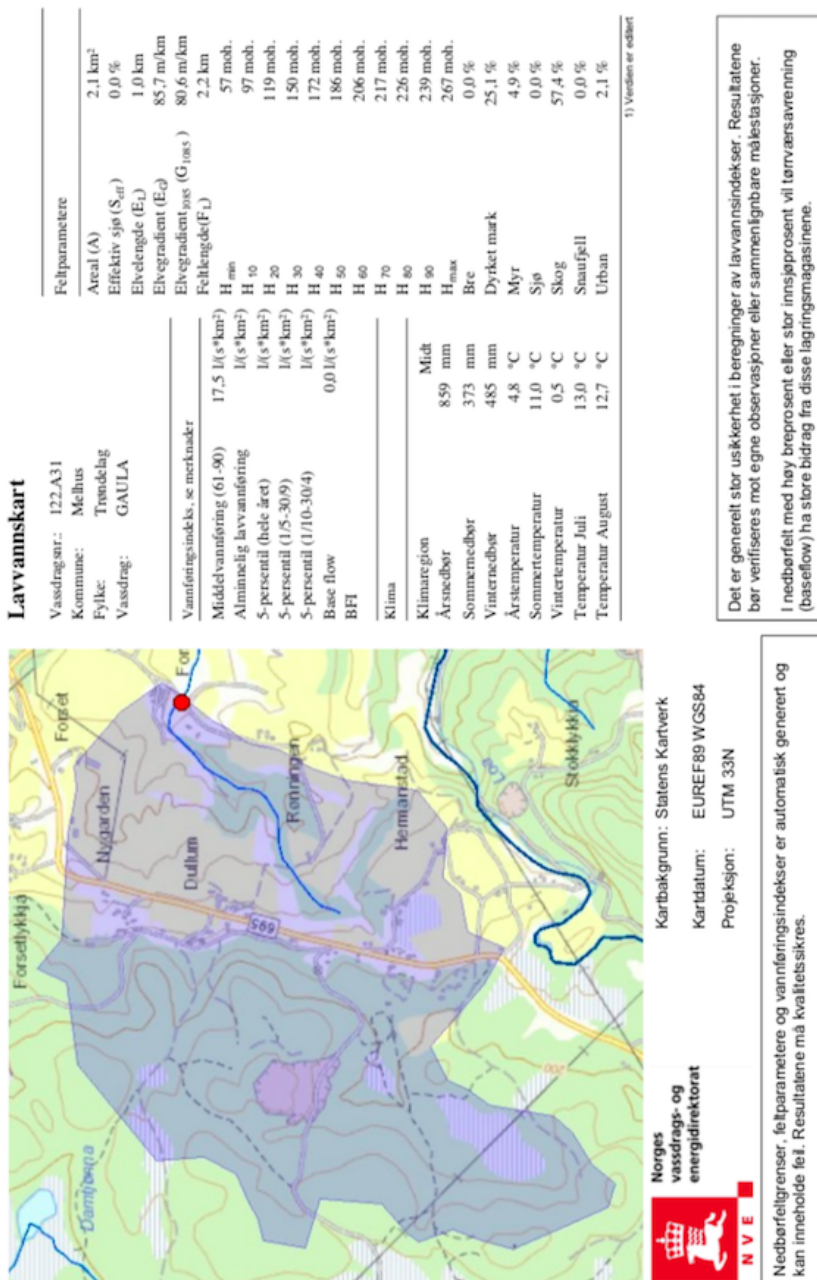
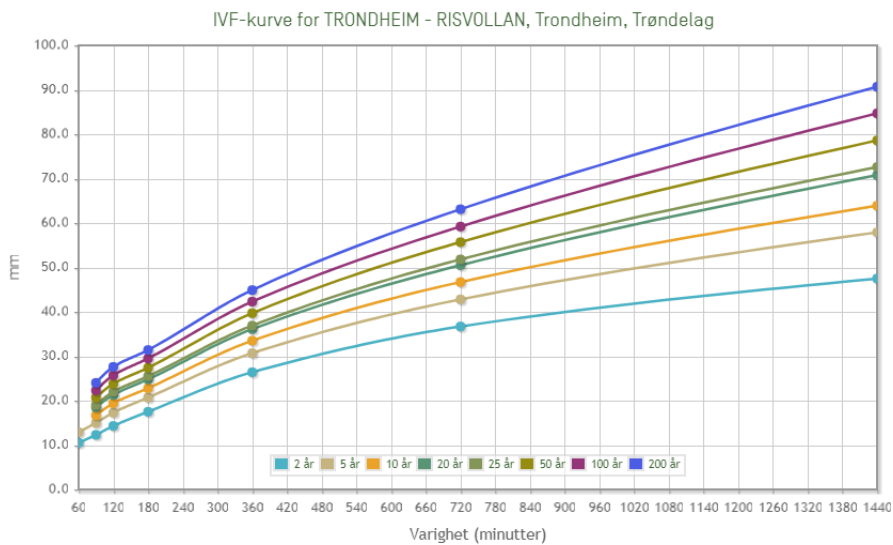
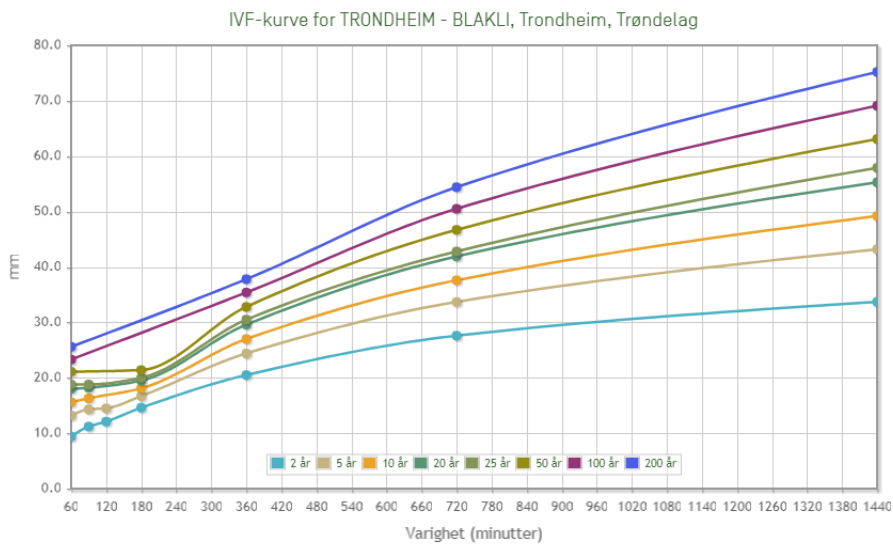


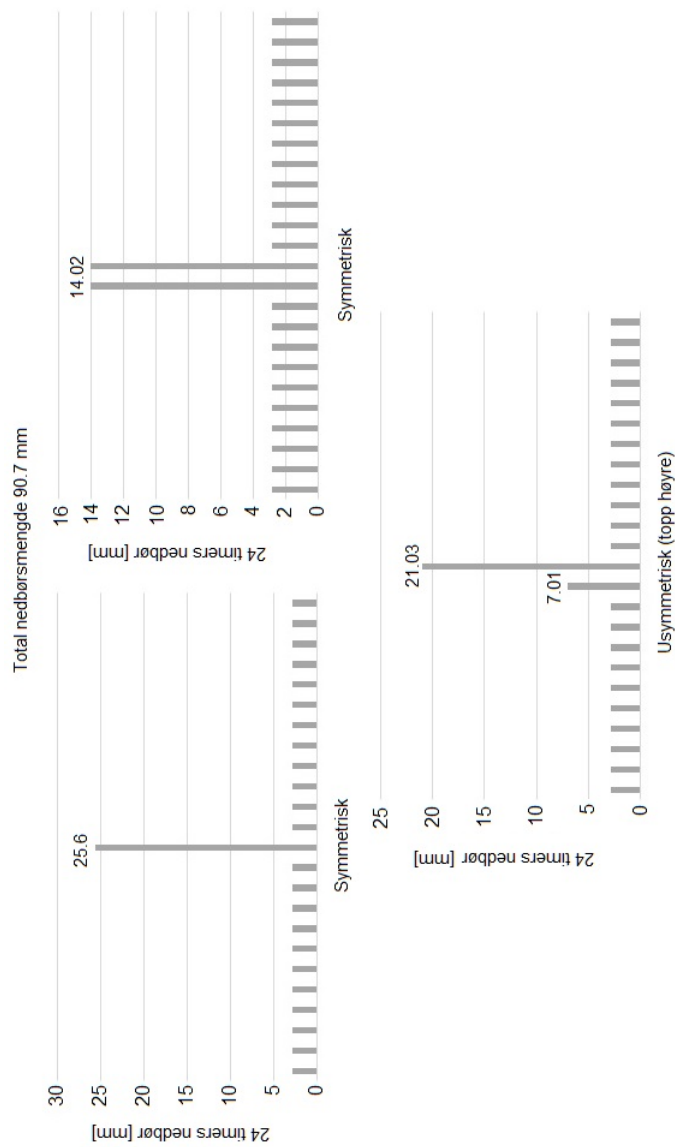
Figure 6.1: Example of NEVINA report for precipitation field SP10

Vedlegg 5 - IVF-kurver for Blakli og Risvollan stasjon.



Figur 6.2: IVF-kurver for Blakli og Risvollan stasjon (14).

Vedlegg 6 - Hyetografer benyttet ved simulering av 200-års nedbør med varighet på 24 timer.



Figur 6.3: Hyetografer som viser fordelingen av 200-årsnedbør med varighet på 24 timer for simulering av ekstremnedbør for SP10 og SP11.

Vedlegg 7 - Beskrivelse av de valgte arealbruks- og jordtypene i SWAT-modellen.

Tabell 6.3: Detaljert informasjon om de valgte arealbrukstypene i SWAT ved simulering av eksisterende arealbruksforhold (Scenario 0) i nedbørfelt SP10. For definisjoner, se tabellene "urban/urbandefault" "crop/cropdefault" i (5), på henholdsvis s. 438 og 422.

AREALBRUK	URML		FRSD	AGRL	WETL
FIMP	0.2	IDC	7	4	6
FCIMP	0.17	BIO_E	15	33.5	47
CURBDEN	0.24	HVSTI	0.76	0.45	0.9
URBCOEF	0.18	BLAI	5	3	6
DIRTMX	225	FRGRW1	0.05	0.15	0.1
THALF	0.75	LAIMX1	0.05	0.05	0.2
TNCONC	460	FRGRW2	0.4	0.5	0.2
TPCONC	196	LAIMX2	0.95	0.95	0.95
TNO3CONC	6	DLAI	0.99	0.64	0.7
OV_N	0.1	CHTMX	6	1	2.5
CN2A	31	RDMX	3.5	2	2.2
CN2B	59	T_OPT	30	30	25
CN2C	72	T_BASE	10	11	12
CN2D	79	CNYLD	0.002	0.0199	0.016
URBCN2	98	CPYLD	3E-04	0.0032	0.002
		BN1	0.006	0.044	0.035
		BN2	0.002	0.0164	0.015
		BN3	0.002	0.0128	0.004
		BP1	7E-04	0.006	0.001
		BP2	4E-04	0.0022	0.001
		BP3	3E-04	0.0018	7E-04
		WSYF	0.01	0.25	0.9
		USLE_C	0.001	0.2	0.003
		GSI	0.002	0.005	0.005
		VPDFR	4	4	4
		FRGMAX	0.75	0.75	0.75
		WAVP	8	8.5	8.5
		CO2HI	660	660	660
		BIOEHI	16	36	54
		RSDCO_PL	0.05	0.05	0.05
		OV_N	0.1	0.14	0.05
		CN2A	45	67	49
		CN2B	66	77	69
		CN2C	77	83	79

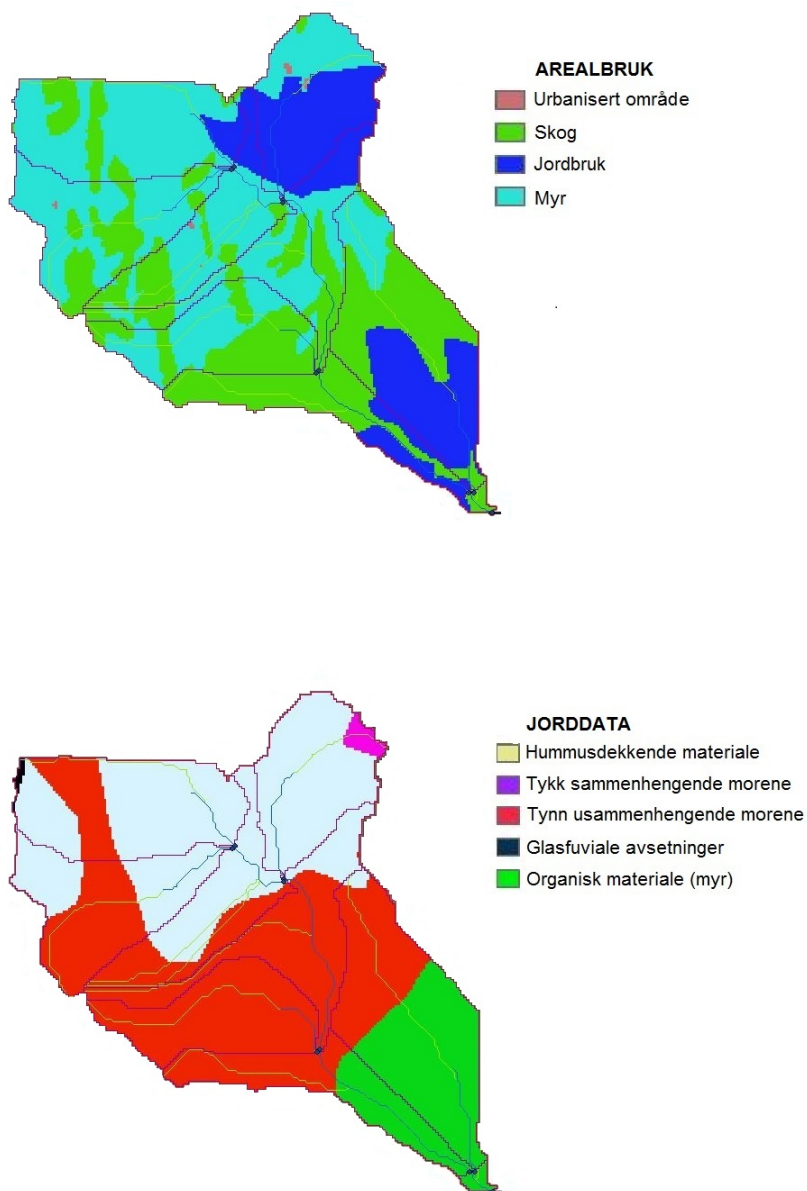
AREALBRUK	URML		FRSD	AGRL	WETL
		CN2D	83	87	84
		FERTFIELD	0	1	0
		ALALMIN	0.75	0	0
		BIO_LEAF	0.3	0	0
		MAT_YRS	10	0	0
		BMX_TREES	1000	0	0
		EXT_COEF	0.65	0.65	0.65
		BM_DIEOFF	0.1	0.1	0.1

Tabell 6.4: Detaljert informasjon om de valgte jordtypene i SWAT ved simulering av SP10. For definisjoner, se Tabell "Usersoil/usersoildefault" i (5) på s. 440.

JORDTYPE	AMENIA	BELGRADE	CARLISLE	COLRAIN	PINNEBOG
CMPPCT	5	3	2	5	5
NLAYERS	3	3	1	3	3
HYDGRP	B	B	A	B	A
SOL_ZMX	1524	1524	1676	1651	1524
ANION_EXCL	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
SOL_CRK	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
SOL_Z1	203.2	228.6	1676.4	152.4	863.6
SOL_BD1	1.3	1.1	0.3	1.1	0.3
SOL_AWC1	0.1	0.2	0.4	0.2	0.4
SOL_K1	21.0	6.8	17.0	350.0	300.0
SOL_CBN1	0.0	1.7	9.9	2.9	9.9
CLAY1	11.5	9.5	10.0	5.0	10.0
SILT1	43.2	69.2	45.0	34.5	45.0
SAND1	45.3	21.3	45.0	60.5	45.0
ROCK1	40.0	1.0	1.2	4.4	0.0
SOL_ALB1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
USLE_K1	0.24	0.49	0.1	0.24	0.1
SOLEC1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SOL_Z2	711.2	1066.8	0.0	838.2	1270.0
SOL_BD2	1.5	1.3	0.0	1.2	0.3
SOL_AWC2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.4
SOL_K2	36.0	58.0	0.0	300.0	240.0
SOL_CBN2	0.0	0.6	0.0	1.0	9.9
CLAY2	11.5	9.5	0.0	5.0	10.0
SILT2	26.0	28.5	0.0	16.4	45.0
SAND2	62.5	62.1	0.0	78.7	45.0
ROCK2	20.3	1.2	0.0	7.3	0.0
SOL_ALB2	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
USLE_K2	0.2	0.6	0.0	0.2	0.1
SOLEC2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
SOL_Z3	1524.0	1524.0	0.0	1651.0	1524.0
SOL_BD3	1.8	1.3	0.0	1.5	0.3
SOL_AWC3	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4

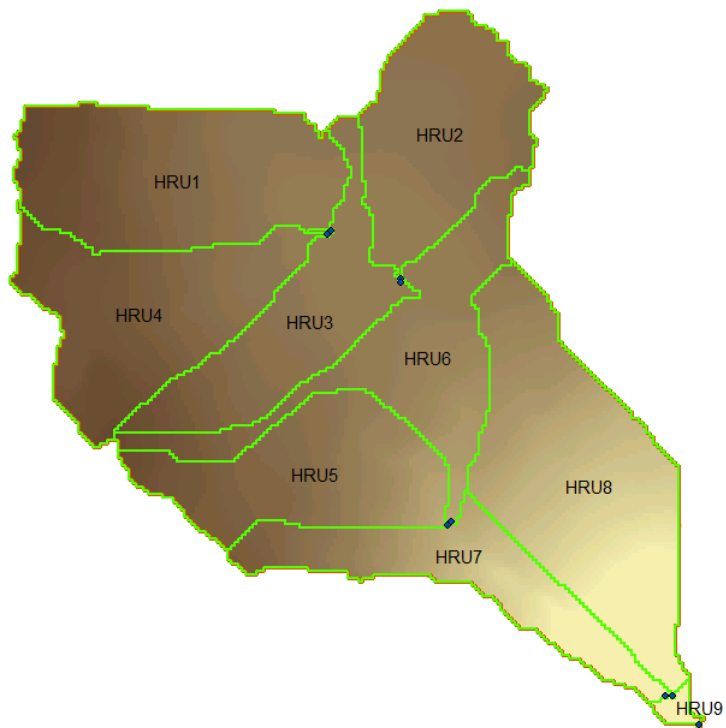
JORDTYPE	AMENIA	BELGRADE	CARLISLE	COLRAIN	PINNEBOG
SOL_K3	30.0	2.7	0.0	270.0	300.0
SOL_CBN3	0.0	0.2	0.0	0.3	9.9
CLAY3	11.5	11.0	0.0	5.0	10.0
SILT3	26.0	68.0	0.0	16.4	45.0
SAND3	62.5	21.0	0.0	78.7	45.0
ROCK3	33.5	12.5	0.0	14.7	0.0
SOL_ALB3	0.2	0.2	0.0	0.1	0.0
USLE_K3	0.2	0.6	0.0	0.2	0.1

Vedlegg 8 - Fordeling av ulike arealbruk og jordtyper i nedbørfelt SP10 ved Scenario 0, for simulering i SWAT.



Figur 6.4: Fordeling av arealbruks- og jordtyper i nedbørfelt SP10.

Vedlegg 9 - Inndeling av de ni dominante HRU-ene for nedbørfelt SP10 i SWAT.



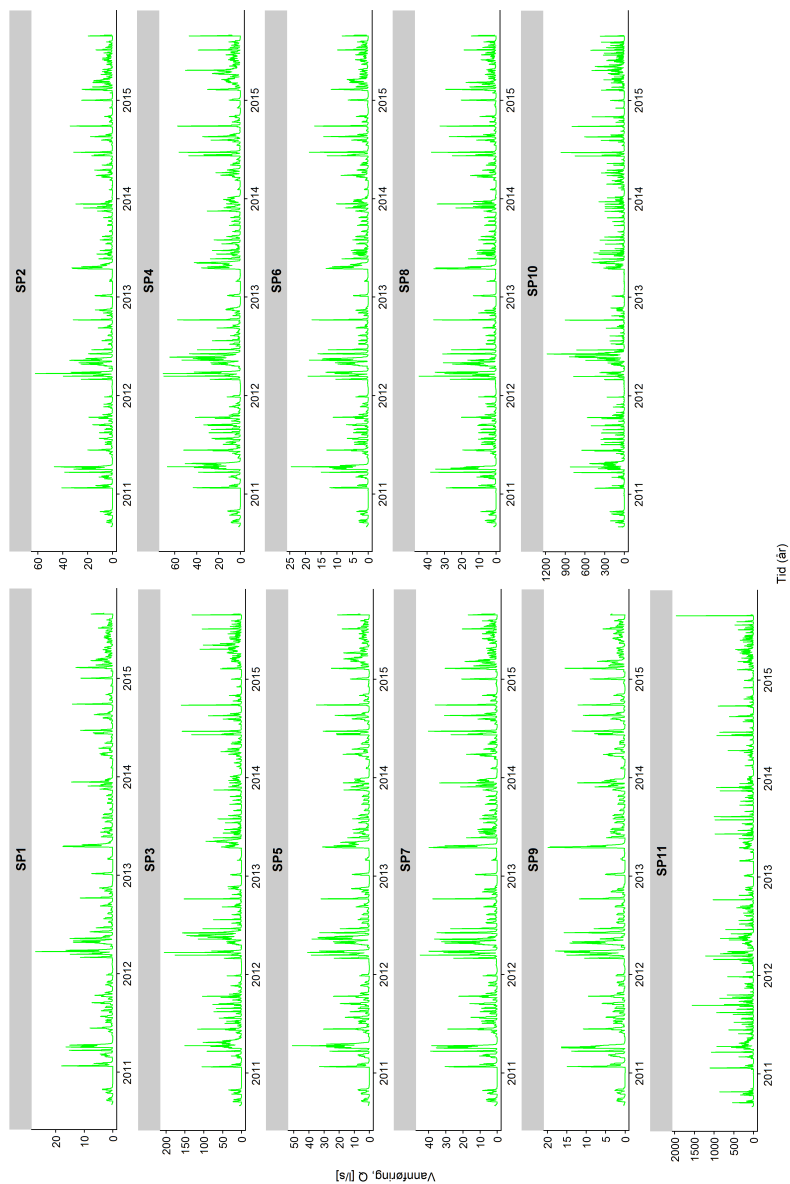
Figur 6.5: Ni HRU-er for nedbørfelt SP10 definert av SWAT etter dominerte arealbruk, jordtype og feltelevasjon.

Vedlegg 10 - Arealbrukstyper valgt for Scenario 1 for simulering med SWAT.

Tabell 6.5: Arealbrukstyper valgt for Scenario 1 (kun urbant) for analysering av arealbrukseffekter. For definisjoner se Tabell "urban/urbandefault" på s. 438 i (5).

Scenario 1	URML	URLD	URMD	URBN
FIMP	0.2	0.12	0.38	0.38
FCIMP	0.17	0.1	0.3	0.3
CURBDEN	0.24	0.24	0.24	0.24
URBCOEF	0.18	0.18	0.18	0.18
DIRTMX	225	225	225	225
THALF	0.75	0.75	0.75	0.75
TNCONC	460	460	550	550
TPCONC	196	196	223	223
TNO3CONC	6	6	7.2	7.2
OV_N	0.1	0.1	0.1	0.1
CN2A	31	31	31	31
CN2B	59	59	59	59
CN2C	72	72	72	72
CN2D	79	79	79	79
URBCN2	98	98	98	98

Vedlegg 11 - Hydrografer for nedbørfeltene SP1-SP11, simulert med DDD.



Figur 6.6: Simulert vannføring, Q [l/s] fra nedbørfeltene, SP1-SP11 i simuleringssperioden 1. september 2010 til 31. august 2015.

Vedlegg 12 - Verdier benyttet ved beregning med Den rasjonale formel og Nasjonalt formelverk for små og uregulerte felt.

Tabell 6.6: Verdier benyttet for beregning av flomtopp med Den rasjonale formel og Nasjonalt formelverk for å og uregulerte felt.

SP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Den rasjonale formel										
Areal [ha]	5.21	11.02	40	20	14.32	6.26	14	11.08	6.59	219.28
i [l/s,ha]	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	71.2	38.4
c	0.38	0.38	0.38	0.38	0.4	0.39	0.39	0.39	0.4	0.4
Nasjonalt formelverk for små og uregulerte felt										
Areal [km²]	0.0521	0.1102	0.4	0.2	0.1432	0.0626	0.14	0.1108	0.0659	2.1928
q_N [l/s km²]	23.4	23.4	19.6	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9	17.9
Q_N [m³/s]	0.0012	0.0026	0.0078	0.0036	0.0026	0.0011	0.0025	0.0020	0.0012	0.0393
