

Avrenningsmodell fra urbane felter til Stangelandsåna i Sandnes

Håkon Børtveit
Sigmund Wiig Petersen

Master i Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2017
Hovedveileder: Sveinung Sægvog, IBM
Medveileder: Tone Muthanna, IBM
Ashenafi Gragne, IBM
Per Møller-Pedersen, Storm Aqua

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Dette masterprosjektet inngår i emnet TVM4905 Vannforsynings- og avløpsteknikk og er utformet ved Institutt for vann- og miljøteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Prosjektet er utarbeidet av Håkon Eskeland Børtveit og Sigmund Wiig Petersen i løpet av våren 2017. Arbeidet tilsvarer 30 studiepoeng, og inngår som avsluttende del av mastergrad i vann- og miljøteknikk.

Prosjektets hensikt har vært å bygge opp, samt modellere avløpssystemet til vassdraget Stangelandsåna i Sandnes. Bearbeiding av data samt simuleringsprosesser ble i hovedsak gjort i ArcGIS og SWMM. Det forelå ingen ferdigheter eller kunnskaper om programvaren før arbeidet startet og mye tid ble derfor benyttet på å lære programmene å kjenne.

Prosjektets problemstilling ble valgt på bakgrunn av sammenfallende interesseområde for prosjektforfatterne. Det ble lagt vekt på at kunnskaper tilegnet gjennom prosjektet kunne benyttes videre etter endt studie ved valg av problemstilling. Prosjektet har bydd på mange utfordringer, men også har beriket prosjektforfatterne med lærerike og interessante diskusjoner. Tidligere tilegnet kunnskap fra studier er benyttet gjennom arbeidet, samt ny kunnskap som er tilegnet prosjektforfatterne.

Vi vil gjerne takke hovedveileder professor Sveinung Sægrov for gode råd og drøftinger, konstruktive tilbakemeldinger samt faglig støtte til masterarbeidet. Det rettes også en takk til støtteveileder, postdoktor Ashenafi Gragne, da prosjektet til tider har vært avhengig av Gragne sin ekspertise innenfor blant annet programvare og fremgangsmetode. Støtteveileder førsteamanuensis Tone Muthanna sine gode innspill vil vi også takke. Videre ønskes det å takke alle som støttet opp om prosjektet:

- Sandnes Kommune, da spesielt Odd Arne Vagle og Kirsten Vike for prosjektmateriale, befaringsrunder og lokalkunnskap for prosjektområdet.
- Storm Aqua som satte opp måleutstyr i vassdraget og tilgjengeliggjort måledata.
- Dimensjon AS for prosjektmateriale knyttet til eksisterende kulvert

Trondheim, 25.06.2017

Sted, dato

Sigmund Wiig Petersen

Sigmund Wiig Petersen

Trondheim, 25.06.2017

Sted, dato

Håkon Eskeland Børtveit

Håkon Eskeland Børtveit

Sammendrag

For å imøtekomme en framtid med mer nedbør og intense regnbyger, høyere avrenningstopper og andre utfordringer knyttet til overvann, er det planlagt å bygge en ny kulvert under Sandnes sentrum. Denne skal erstatte den eksisterende kulverten som frakter Stangelandsåna fra Rv. 44 til fjorden. Dimensjoneringsgrunnlaget for kulverten baserer seg på en 200-års regnhendelse og vannføringen regnskyllet medfører. Målet med prosjektet er å finne nevnte vannføring. En kalibrert og distribuert hydrologisk-hydraulisk modell i SWMM er anvendt for å beregne en estimert vannføring for Stangelandsåna vassdrag. Måledata fra en nedbør- og avløpsmåler, begge montert innenfor nedslagsfeltets vannskille, ble brukt i simulerings- og kalibreringsprosessen. I tillegg ble det utført infiltrasjonsforsøk for å evaluere området sine infiltrasjonsevne.

Prosjektområdet, som utgjør 9,51 km², er lokalisert i Sandnes, og strekker seg fra sentrumsområdet innerst i fjorden og sørvest til Julebygda. Øverste del av vassdraget (SC1) blir brukt som jordbruksareal og utgjør om lag 60% av vassdragets areal. Nederste del av vassdraget (SC2, SC3 og SC4) består imidlertid av rekkehus- og eneboligbebyggelse, samt sentrumsområde, med høyere andel impermeable flater.

Ved bruk av metoden Modified Philip-Dunne (MPD) infiltrometer ble det utført infiltrasjonsmålinger på to lokasjoner i Sandnes. På hver testlokasjon ble det utført seks MPD infiltrasjonstester for å gjøre dataen så representativ som mulig, tatt tilgjengelig tid i betraktning. Det ble funnet at den vannmettede hydrauliske konduktiviteten kunne bli klassifisert som *moderat høy*, og målt til 2,99 cm/time og 1,40 cm/time i henholdsvis SC2 og SC3. Det anses derfor som gunstig å tilrettelegge for infiltrasjonsbaserte LOD-tiltak i vassdraget på bakgrunn av feltforsøkene. Resultatene er imidlertid basert på et begrenset antall forsøk, og viser stor spredning. Det kan dermed være anbefalt å gjøre separate forsøk for å vurdere infiltrasjonsevnen til området av interesse.

Et geografisk informasjonssystem (GIS) ble brukt for å bygge opp og endre den romlige geometrien til ledningssystemet. I tillegg ble GIS benyttet til å bygge opp en digital terrengmodell (DTM) som tok hensyn til topografi, bygninger, vegnettverk, åpne kanaler og andre vannflater. DTM ble videre brukt til å identifisere inntakspunkt og automatisere inndelingen av SC2, SC3 og SC4 inn i 462 mindre delnedslagsfelt. Den romlige geometrien til ledningssystemet og måledata ble senere importert til en SWMM-kompatibel input-fil.

Fire optimale parametersett ble funnet ved kalibrering som inkluderte fire enkelthendelser og benyttet Shuffle Complex Evolution (SCE) som optimaliseringsmetode og Nash-Sutcliffe-effektivitet (NSE) som objektiv funksjon. Ved å bruke samme objektiv funksjon ble internoverførbarheten til andre kjente nedbørhendelser vurdert og brukt videre til å finne vektall for hvert kalibreringssett. Hydrogrammene for 200-års nedbørhendelsen for de fire optimale parametersettene ble senere kombinert med vektallene for å finne en forventet vannføring.

Resultatet fra valideringen viste at parametersettene evne til å reprodusere andre kjente enkelthendelser kunne anses for å være særdeles god. For de reproduserte hydrogrammene lå NSE mellom 0,430 og 0,844, der NSE-verdi lik 1 impliserte en perfekt tilpasning mellom simulert og observert vannføring. Resultatet for simulering med 200-års nedbørhendelse og klimafaktor 1,2, viste at estimert vannføring ut fra Stangelandsåna vassdrag til Gandsfjorden lå innenfor intervallet 8,7 og 26,9 m³/s. En forventet vannføring innenfor intervallet ble imidlertid beregnet til 19 m³/s. Ved samme scenario ble forventet vannføring 1,2 og 9,4 m³/s, henholdsvis for lokasjonen ved vannmåleren og kryssingen under brua ved Rv. 44. Den hydrologiske modellen vil imidlertid være gjenstand for usikkerhet på grunn av inngangsdata og modellering. Derfor må vannføringsverdiene anses som en forventet verdi eller et anslag, fremfor en endelig vannføring. Til tross for usikkerheten, anses modellen som tilfredsstillende med tanke på formålet med prosjektet.

Abstract

Sandnes is facing a future of increased precipitation and peak flows, urbanization and other local storm water challenges. To meet these challenges the plan is, among others, to design and build a new culvert. This will replace the old culvert conveying Stangelandsåna from Rv. 44 to the fjord. The design criterion, also known as the design flow, is calculated based on a rainfall of 200 years recurrence. A calibrated and distributed hydrologic-hydraulic model in Storm Water Management Model (SWMM) is used to calculate the estimated flow of the event in the urban catchment. Data from a rain gage and a water meter, both located within the boundaries of the catchment, are used in the calibration process. In addition, infiltration measurements have been conducted to evaluate the infiltration capacity.

The project area is located in Sandnes, and stretches from the centrum of Sandnes to the south-west and the upper reaches of Julebygda. The most upstream area (SC1), which account for 60% of the total area, is characterized by its flat, rolling farmlands. The remaining areas (SC2, SC3, and SC4), however, are getting more urbanized as they get closer to the fjord and the flat city center.

The infiltration method Modified Philip-Dunne (MPD) infiltration test has been conducted at two locations in Sandnes. At each location six MPD infiltration tests were conducted to make the data as representative as possible, considering the available time. It was found that the saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) could be classified as *moderately high*, being 2,99 cm/hour and 1,40 cm/hour at the test sites in SC2 and SC3, respectively. The infiltration rate may be classified as *high* at the best. Hence, it is considered favorable to facilitate infiltration measures as a low impact development (LID) tool to reduce excess storm water runoff. However, the results are based on a limited number of tests, showing a great range in measured K_{sat} . Therefore, it can be recommended to do separate infiltration tests for the infiltration area of interest.

A geographic information system (GIS) was used to track the spatial geometry of the network of pipes and manholes, and to do manual modifications were needed. In addition, GIS was used to make a digital elevation model (DEM), which considered the following: topography, buildings, roads, and open channels. Secondly, the DEM was utilized to automatically delineate SC2, SC3, and SC4 in 462 smaller subcatchments, making the model distributed. Moreover, the spatial information of pipes and manholes were imported to a SWMM input file, including reference to the gaged rainfall data.

Four optimal parameter sets were found during the calibration which included four single events. Shuffle Complex Evolution (SCE) and Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) were used as optimization algorithm and

objective function respectively. The same objective function was used in the evaluation of the parameter sets performance of the transferability and reproduction of known events. Based on the evaluation, each parameter set could be given a unique weight. Later, a weighted mean could be found using the weights and the 200-year rainfall event hydrograph for each parameter set. This would give an expected flow.

It appears that the parameter sets' performance of reproducing other known events could be considered as quite good. The NSE-value ranged between 0,430 and 0,844 for the reproduced hydrographs, whereas a NSE-value of 1 is considered a perfect correlation between observed and simulated flow. The results of the simulation of the 200-year rainfall event with a climatic factor of 1,2 showed that an estimated flow at the catchment's outlet to Gandsfjorden ranged between 8,7 and 26,9 m³/s. An expected flow within the interval was calculated to be 19 m³/s. Using the same scenario, the expected flow was estimated to be 1,2 and 9,4 m³/s at the location of where the open channel flows under the Rv. 44 bridge and in the culvert where the water meter is installed, respectively.

Moreover, the hydrologic model is subject to uncertainty and error due to input data and modeling. Thus, the flow values should not be seen as final values, but need to be considered as estimates or expected values. Despite the uncertainty, the model is considered to be satisfactory for the purpose of the project.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag.....	iii
Abstract.....	v
Figurliste.....	xiii
Tabelliste.....	xix
Liste over forkortelser.....	xxi
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Mål for prosjektet.....	2
1.3 Fremgangsmåte og struktur.....	3
1.4 Avgrensninger.....	3
1.5 Tidligere studier.....	4
2 Teori.....	5
2.1 Klima.....	5
2.1.1 Klima i Norge.....	5
2.1.2 Klimaendring.....	6
2.1.3 Klimaendring i Norge.....	6
2.2 Hydrologi.....	8
2.2.1 Hydrologiske prosesser og begreper.....	8
2.2.2 Flom.....	9
2.2.3 Urbanhydrologi.....	10
2.2.4 Urbane vassdrag.....	11
2.3 Overvannshåndtering.....	11
2.3.1 Lokal overvannsdiskonering og lokal overvannshåndtering.....	12
2.3.2 Treleddsstrategi.....	13

2.3.3	Dimensjonerende gjentakintervall	14
2.3.4	Flomvei	14
2.4	Lover og retningslinjer for overvann	15
2.4.1	Generelle krav	15
2.4.2	Veiledere for Sandnes kommune	17
2.5	Infiltrasjonsmålinger og jordprøver	17
2.5.1	Kornfordelingsanalyse	18
2.6	Nedbør, nedbørdata og avrenningsmåling	19
2.6.1	Nedbørmåling	19
2.6.2	IVF-kurve	20
2.6.3	Dimensjonerende gjentakintervall	20
2.6.4	Konstruert og symmetrisk nedbørhendelse	21
2.6.5	Avløpsmåling	22
2.6.6	Avrenningssituasjoner / sesongvariasjoner	22
2.6.7	Klassifisering av usikkerhet i utstyr	22
2.7	Manuelle beregningsmetoder for overvann	23
2.7.1	Den rasjonelle metode	23
2.7.2	Avrenningskoeffisient	24
2.7.3	Konsentrasjonstid	25
2.7.4	Klimafaktor	26
2.8	Avrenningsmodeller/Matematiske modeller/EDB-verktøy	26
2.9	ArcGIS	27
2.9.1	ArcCatalog	27
2.9.2	ArcMap	28
2.9.3	ArcToolbox	28
2.9.4	Modelbuilder	29

2.9.5	Arc Hydro	29
2.9.6	Verktøy.....	29
2.10	SWMM	32
2.10.1	Modellkomponenter	33
2.10.2	Hydrologiske komponenter	36
2.10.3	Kalibrering og verifikasjon.....	39
3	Prosjektområdet	40
3.1	Sandnes.....	40
3.2	Lokalklima i Sandnes	40
3.3	Nedbørfeltet Stangelandsåna vassdrag	41
3.4	Landtopografi.....	41
3.4.1	Subcatchment 1 – SC1.....	42
3.4.2	Subcatchment 2 – SC2.....	43
3.4.3	Subcatchment 3 – SC3.....	43
3.4.4	Subcatchment 4 – SC4.....	44
3.5	Avløpsnettet.....	45
3.6	Overvannshåndtering i Sandnes	48
3.7	Grunnforhold og løsmasser (infiltrasjonsevne)	48
3.8	Måleutstyr i vassdraget.....	50
3.8.1	Nedbørmåler	51
3.8.2	Avløpsmåler	51
4	Infiltrasjonsmålinger og jordprøver	53
4.1	Modified Philip-Dunne infiltrrometer	53
4.1.1	Inngangsdata til MATLAB-skriptet	56
4.2	Kornfordelingsanalyse.....	57
4.3	Resultater og diskusjon av infiltrasjons- og sikteprøver	58

4.3.1	Identifisering av usikkerheter	59
4.3.2	Vurdering av potensial for lokal infiltrasjon av overvann	61
5	Metode.....	62
5.1	Programvare	62
5.2	Innhenting og bearbeiding av nedbør- og avløpsdata	63
5.2.1	Webportal	63
5.2.2	Nedbørdata	64
5.2.3	Avløpsdata	64
5.3	ArcGIS Metodikk	65
5.3.1	Terrengmodell og shape-filer.....	65
5.3.2	Informasjon om Gemini VA shape-filer.....	66
5.3.3	Kontroll av tilsendt data.....	67
5.3.4	Sortering og korrigerings av Gemini VA-data	68
5.3.5	Identifisering av forgreninger til kulvert	70
5.3.6	Identifisering av inntakspunkt til overvannssystemet	71
5.3.7	Arc Hydro watershed delineation	72
5.4	SWMM	89
5.4.1	Valg av komponenter.....	89
5.4.2	Importerings fra ArcGIS	91
5.4.3	Fordampningsdata	91
5.4.4	Spillvannsvariasjon over døgnet	92
5.4.5	Nedbør for dimensjonering.....	94
5.4.6	Kalibrering av modell	98
5.4.7	Validering av modell og simulering med dimensjonerende regn	102
6	Resultat	103
6.1	Kalibrering av modell	104

6.1.1	Kalibreringsforsøk 1 (KF1)	104
6.1.2	Kalibreringsforsøk 2 (KF2)	107
6.2	Validering av kalibrert SWMM-modell	111
6.3	Simulering med dimensjonerende regn	114
7	Diskusjon	119
7.1	Vurdering av metode	119
7.1.1	Nedbør- og avløpsmåler.....	119
7.1.2	ArcGIS.....	122
7.1.3	SWMM	125
7.2	Vurdering av resultat	130
7.2.1	Kalibrering av modell	130
7.2.2	Validering av modell	133
7.2.3	Simulering med dimensjonerende regn.....	134
7.2.4	Sammenligning med rasjonell metode	136
8	Konklusjon.....	138
9	Videre arbeid.....	139
10	Referanser.....	140
Vedlegg A	Jordklassetrekant	145
Vedlegg B	IVF-kurve	146
Vedlegg C	Standardverdier og klassifisering for mettet hydraulisk konduktivitet	147
Vedlegg D	Matlab-skript for beregning av mettet hydraulisk konduktivitet (Paus, 2016)	148
Vedlegg E	Utstysliste	152
Vedlegg F	Utrekning av vektall for forventet hydrogram	153
Vedlegg G	Utrekning med rasjonell formel.....	155

Figurliste

Figur 1: Delfelt for Stangelandsåna (Gragne og Sægrov, 2016).....	2
Figur 2: Viser midlere årsnedbør i mm i referanseperioden 1971-2000 (I. Hanssen-Bauer, 2015).....	5
Figur 3: Gjennomsnittlig årsnedbør fra perioden 1986 - 2005 til 2081-2100 (IPCC, 2014).	6
Figur 4: Framskrivning av kraftig nedbør (NOU 2015:16).	7
Figur 5: Effekt av urbanisering (Byggforsk, 2012).	10
Figur 6: Avrenningsintensitet for ulike typer overflater (COWI, 2013).	11
Figur 7: Konvensjonell overvannshåndtering og lokal overvannshåndtering (Lindholm, et al., 2008). ...	12
Figur 8: Treleddsstrategi (NOU 2015:16).	13
Figur 9: Kapasitet i ledningsnett med klimafaktor (Lindholm, 2013).	14
Figur 10: Siktekurve (Statens vegvesen, 2014a).	19
Figur 11: IVF-kurve for Sandnes-Rovik (Meteorologisk institutt, 2017).	20
Figur 12: Symmetrisk regnhyetogram (Lindholm, et al., 2008).	21
Figur 13: Forskjellen mellom nøyaktighet og repeterbarhet (Mosevoll, Wedum og Sægrov, 1991).	23
Figur 14: Omdanning av regnhyetogram til avrenning (Lindholm, et al., 2008).....	27
Figur 15: Arbeidsrom i ArcMap versjon 10.5 (Skjermdump).	28
Figur 16: ArcToolbox med tilhørende verktøykasser (ESRI, 2017d).	29
Figur 17: Verktøylinje for Arc Hydro versjon 2.0 (skjermdump).....	29
Figur 18: Tverrsnitt før og etter korrigerings (LI, 2014).....	30
Figur 19: Fylte forsenkinger med Fill-verktøyet (ESRI, 2017a).....	30
Figur 20: Senket topper med Fill-verktøyet (ESRI, 2017a).	30
Figur 21: Tallfesting av høydedifferanser mellom celler (ESRI, 2017h).	31
Figur 22: Flow accumulation (ESRI, 2017g).....	31

Figur 23: Hvordan watershed-verktøyet fungerer(ESRI, 2017b).	32
Figur 24: Overflateavrenning i SWMM (Rossman, 2015).	36
Figur 25: Modell verifisering (Butler og Davies, 2011).	39
Figur 26: Nedbør og temperatur for målestasjon i Sola (Dannevig, 2009).	40
Figur 27: Vassdragets lokasjon Kartverket (2017).	41
Figur 28: Venstre: Lengdeprofil (Kartverket, 2017). Høyre: Høydekart (Skjermdump).....	42
Figur 29: Venstre: Ortofoto av SC1 (Kartverket, 2017). Høyre: Landskapsbildet av SC1 (Google, 2017)...	42
Figur 30: Ortofoto av SC2 (Kartverket, 2017).	43
Figur 31: Venstre: nordlig del av SC3. Høyre: sørlig del av SC3 (Kartverket, 2017).	44
Figur 32: Ortofoto av SC4 (Kartverket, 2017).	44
Figur 33: Kart over Stangelandsånas trasé (Torvik og Oddane, 2015).....	45
Figur 34: Kulverttrasé i vassdraget (skjermdump).....	46
Figur 35: Overvannsnett i vassdraget (skjermdump).	47
Figur 36: Venstre: overløpskum i ledningsnett. Høyre: Overløpskum med en strupet fellesledning Lende (2013).....	47
Figur 37: Løsmassekart over Stangelandsåna vassdrag NGU (2017).	49
Figur 38: Kart over infiltrasjonsevne i Stangelandsåna vassdrag NGU (2017).....	49
Figur 39: Målestasjonenes lokasjon i nedslagsfeltet (skjermdump).....	50
Figur 40: Venstre: nedbørmåler (Foto: Håkon Eskeland Børtveit) Høyre: produktbilde (Lambrecht, u.a.).	51
Figur 41: Venstre: innsiden av kulvert. Høyre: dataoverføring (Foto: Sigmund Wiig Petersen).	52
Figur 42: MDP-infiltrrometer (Gulliver, Erickson og Weiss, 2010).	53
Figur 43: Lokasjoner for infiltrasjonsmåling i Sandnes (skjermdump).....	54
Figur 44: Oversiktsbilder over infiltrrometerplasser. (Foto: Sigmund Wiig Petersen).....	55

Figur 45: Ventre: MDP infiltrometer for infiltrasjonsmålinger. Høyre: Utstyr (Foto: Håkon Eskeland Børtveit).	55
Figur 46: Siktemaskin for utførelse av sikteprøve (Foto: Sigmund Wiig Petersen).	58
Figur 47: Overordnet flytskjema over metodologien.	62
Figur 48: Oppsett av målerverdiene på serveren til Storm Aqua (skjermdump).	63
Figur 49: Tidsserie for nedbør.	64
Figur 50: Tidsserie, fra øverst til nederst, for vanddybde, hastighet og vannføring (skjermdump).	65
Figur 51: Forgreninger ut fra kulverten (skjermdump).	71
Figur 52: Inntakspunkt i overvannssystemet (skjermdump).	72
Figur 53: Oversiktsbilde av original DEM (skjermdump).	74
Figur 54: Forstørret bilde av original DEM (skjermdump).	74
Figur 55: Effekt av fusjon mellom bygningsraster og DTM (skjermdump).	76
Figur 56: Forstørret bilde av oversiktsbilde (skjermdump).	76
Figur 57: Terrengmodell summert med vegraster (skjermdump).	77
Figur 58: Forstørret bilde av sentrumsområdet (skjermdump).	78
Figur 59: Oversiktsbilde av brent strømningslinjer for den åpne kanalen (skjermdump).	79
Figur 60: Forstørret bilde av brent strømningslinjer for den åpne kanalen (skjermdump).	79
Figur 61: Arbeidsflytskjema til studie av ulike fremgangsmetoder (skjermdump).	81
Figur 62: Ombygd arbeidsflytskjema for inndeling av nedslagsfelt (skjermdump).	81
Figur 63: Fordypningsanalyse med verktøyet Sink før Fill-verktøyet er benyttet (skjermdump).	82
Figur 64: Fordypningsanalyse med verktøyet Sink etter Fill-verktøyet er benyttet (skjermdump).	83
Figur 65: Strømningsretninger ved bruk av verktøyet Flow direction (skjermdump).	84
Figur 66: Strømningsakkumulasjon med verktøyet Flow Accumulation (skjermdump).	85

Figur 67: Prinsippskisse av vegg som endrer retning på strømningslinjer i Build walls verktøyet (skisse).	86
Figur 68: Prinsippskisse av vegg som inneholder breach line i Build walls verktøyet (skisse).....	86
Figur 69: Modifisert terrengmodell der Rv. 44 fungerer som vegg.	87
Figur 70: Nedslagsfelt for alle inntakskummer i Sandnes sentrum (skjermdump).....	88
Figur 71: Forstørret figur av inndelingen av nedslagsfelt for alle inntakskummer i Sandnes sentrum (skjermdump).....	89
Figur 72: Spillvannsvariasjon benyttet for fellessystemene. Figuren er hentet fra Lende (2013).....	93
Figur 73: Symmetrisk hyetogram med og uten klimafaktor.	97
Figur 74: Skjematisk oppbygging av automatisk kalibreringsscript.	100
Figur 75: Illustrasjon av residual mellom observert og simulert hydrogram (Beven, 2012).	101
Figur 76: Avrenningstopper og tidsserier for kalibrering. Tidsseriene markert med svart skrift ble brukt i KF1, og flomtoppene markert med rød bokstav ble brukt i KF2 (skjermdump).....	102
Figur 77: Hydrogram for KF1-a60 (Plot fra script).....	105
Figur 78: Hydrogram for KF1-m60 (Plot fra script).	106
Figur 79: Hydrogram for KF1-m30 (Plot fra script).	107
Figur 80: Hydrogram for KF2-A (Plot fra script).	108
Figur 81: Hydrogram for KF2-B (Plot fra script).	109
Figur 82: Hydrogram for KF2-C (Plot fra script).	110
Figur 83: Hydrogram for KF2-D (Plot fra script).	111
Figur 84: Hydrogram for reproduksjon av nedbørhendelser. Øverst til venstre: flomtopp A. Øverst til høyre: flomtopp B. Nederst til venstre: flomtopp C. Nederst til høyre: flomtopp D (Plot fra script).	112
Figur 85: Punktlokasjon for hydrogrammene fra simulering med 200-års nedbørhendelse.	115
Figur 86: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1 (Plot fra skript).	116

Figur 87: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1,2 (Plot fra skriptet).....	117
Figur 88: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1,5 (Plot fra skriptet).....	118
Figur 89: Diagram med samme tidsserie, over nedbør, dybde og hastighet (skjermdump).....	120
Figur 90: Spredning på nivåmålingene ved fravær av nedbør, og måleperioder uten vannføringsverdi (skjermdump).....	121
Figur 91: Kalibreringsresultat som var basert på et for stort parameterrom (Plot fra script).....	128

Tabelliste

Tabell 1: Minimum dimensjonerende gjentakintervall for avløpssystem (Lindholm, et al., 2008).	14
Tabell 2: Vanndirektoratets klassifiseringssystem for økologisk tilstand til vannforekomst.	17
Tabell 3: A.M Atterbergs skala (Christensen, 2015).	18
Tabell 4: Avrenningskoeffisienter for noen type flater (Norsk Vann, 2014).....	25
Tabell 5: Oversikt over prosentvis andel leire, silt og sand, og resulterende jordart.....	59
Tabell 6: Oversikt over mettet hydraulisk konduktivitet for område 1 og 2.	59
Tabell 7: Oversikt over viktige informasjonskategorier for punkt i Gemini VA shape-filene.	67
Tabell 8: Oversikt over viktige informasjonskategorier for linjer i Gemini VA shape-filene.....	67
Tabell 9: Oversikt over hvordan frekvente feil og mangler i datagrunnlaget ble håndtert.....	69
Tabell 10: Kriterier for definering av inntakspunkt.....	71
Tabell 11: Oversikt over komponenter i SWMM.	89
Tabell 12: Antall importerte objekter i input-filen.....	91
Tabell 13: Verdier fra målestasjon 447030 Sandnes -Rovik (Meteorologisk institutt, 2017).....	94
Tabell 14: Data for symmetrisk hyetogram.	96
Tabell 15: Intensiteter med og uten klimafaktor.	97
Tabell 16: Kalibreringsparametere benyttet i KF1 og KF2 (* markerer parametere ekskludert i KF2).	98
Tabell 17: Oversikt over kalibreringsperiodenes varighet i KF1	104
Tabell 18: Oversikt over kalibreringsperiode og navn på optimalt parametersett for ulike flomtopper.	108
Tabell 19: Oversikt over NSE-verdier for reproduksjon av observert hydrogram. Kan ses i sammenheng med Figur 84.	112
Tabell 20: Oversikt over MSE-verdier for reproduksjon av observert hydrogram. Kan ses i sammenheng med Figur 84.	113

Tabell 21: Vekttall for hvert parametersett.....	114
Tabell 22: Forventet vannføring ved nedbør med 200-års gjentaksintervall for klimafaktorene 1, 1,2 og 1,5.	115
Tabell 23: Sammenligning av vannføring mellom rasjonell metode og EDB-modell.....	136

Liste over forkortelser

AF	Avløp felles
AR5	Fifth Assessment Report
DEM	Digital elevation model
DTM	Digital terrengmodell
DWF	Dry weather flow
EDB	Elektronisk databehandling
EPA	Environmental Protection Agency
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EU	Den europeiske union
GIS	Geografisk informasjonssystem
Inf.	Infiltrasjon
Int.	Intersepsjon
Kf	Klimafaktor
KF1/KF2	Kalibreringsforsøk 1 eller 2
K_{sat}	Mettet hydraulisk konduktivitet
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVF-kurve	Intensitet-varighet-frekvens-kurve
LOD	Lokal overvannsdiskonering
LOH	Lokal overvannshåndtering
MSE	Mean Squared Error
MPD	Modified Philip-Dunne infiltrrometer
NGU	Norges geologiske undersøkelse
NSE	Nash-Sutcliffe-effektivitet
OV	Overvann
PC	Personal computer
PE	Personekvivalent
RCP	Representative Concentration Pathways
RDII	Rainfall dependant inflow and infiltration
Rv.	Riksveg
SC	Subcatchment
SCE	Suffle complex evolution
SP	Spillvann
SSR	Sum of squared residuals
SWMM	Storm Water Management Model

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

For å dimensjonere ny kulvert på delstrekninger i Sandnes sentrum skal det beregnes vannføring ved en 200-års nedbørhendelse for Stangelandsåna. Den nye kulverten er et samarbeidsprosjekt mellom Sandnes kommune, Storm Aqua og NTNU for imøtekomme å framtidige utfordringer knyttet til overvannsproblematikk i Sandnes sentrum. Stangelandsåna vassdraget er delt inn i fire deler som vist på Figur 1. SC1 er karakterisert ved høy andel dyrket mark med åpne kanaler. SC2 inneholder spredt bebyggelse, tillegg til både åpen kanal og kulvert. SC3 og SC4 er preget av sentrumsbebyggelse med lukket overvannssystem. Vassdraget utgjør et areal på 9,51 km².

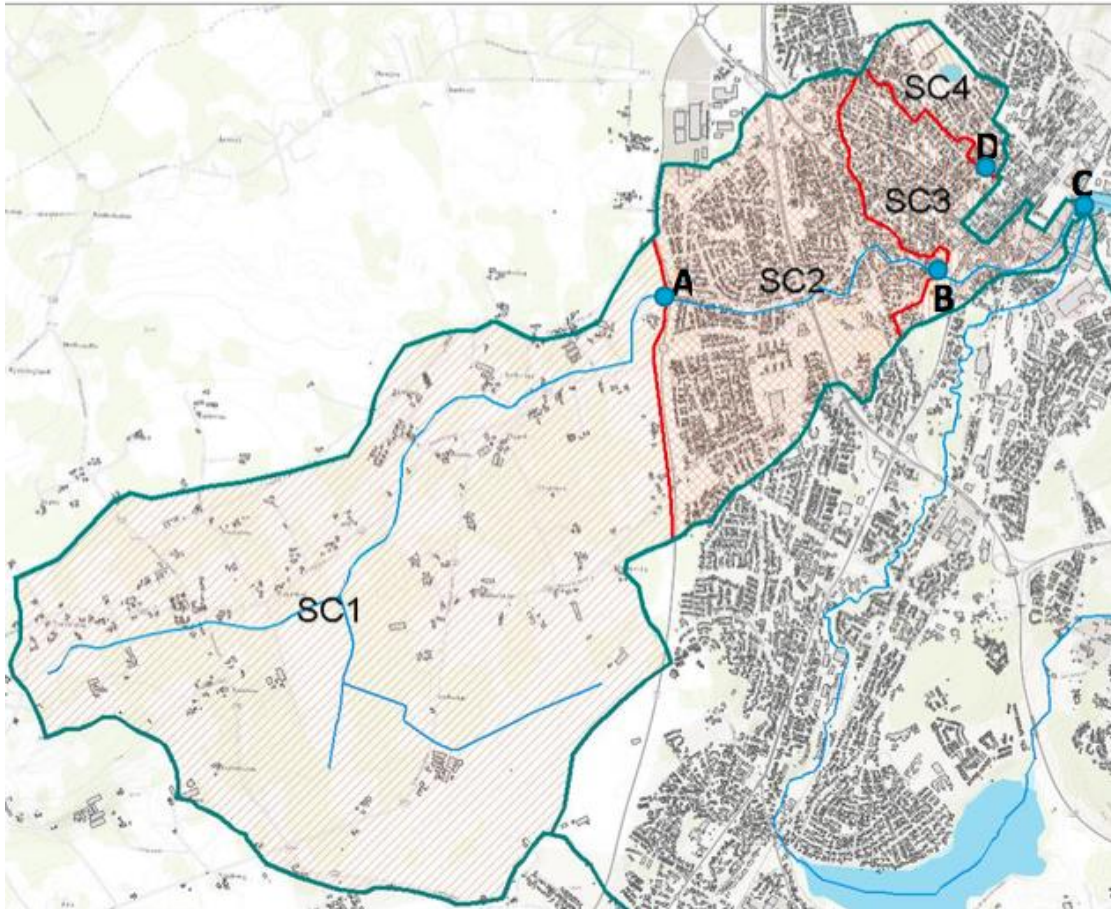
Tidligere er det beregnet et vannføringsestimat for vassdraget. Det er ønskelig å presentere et nytt estimat av avrenningen knyttet til Stangelandsåna ved å lage en distribuert modell for de bebygde områdene SC2, SC3 og SC4.

For å lage en distribuert modell av området er det valgt å benytte EDB-verktøyet EPA SWMM, slik at det ble gitt et mer nøyaktig bilde på avrenningen for områdene. For å kalibrere modellen er det samlet nedbørdata fra en lokal målestasjon i vassdraget, samt vannføringsdata fra en avløpsmåler nær gravplassen ved rådhuset i Sandnes. Målerne ble satt opp av Storm Aqua i midten av januar 2017.

Spesifisert oppgave i prosjektet innebærer:

1. Hente inn data for ledningsnett i områdene SC1, SC2, SC3 og SC4 av Stangelandsåna og bygge samt kalibrere en avrenningsmodell i SWMM for disse områdene. I den forbindelse skal ytterligere punkt inngå:
 - a. Identifisere inntakspunkt i overvannssystemet til Sandnes kommune.
 - b. Utarbeide en automatisk inndelingsprosess for nedslagsfelt i urbant område.
 - c. Samle og bearbeide nedbør- og avrenningsdata fra målestasjonene i Stangelandsåna. Presentere og drøfte måleresultatene.
 - d. Kalibrere den hydrologisk/hydraulisk modellen opp mot bearbeidet nedbør- og avrenningsdata.
2. Å bruke modellen til å beregne avrenning fra de urbaniserte områdene under en ekstrem nedbørhendelse med 200-års gjentakintervall og diskutere dimensjoneringsgrunnlaget for planlagt kulvert i Stangelandsåna.

3. Gjennomføre infiltrasjonsmålinger og jordprøveanalyser, og vurdere dem som potensielle inngangsdata til modellen samt som utgangspunkt for å anslå potensiale for lokal infiltrasjon av overvann.



Figur 1: Delfelt for Stangelandsåna (Gagne og Sægrov, 2016).

1.2 Mål for prosjektet

Prosjektet har som mål å opparbeide en SWMM-basert modell for nedslagsfeltet til Stangelandsåna i Sandnes. Modellen skal simulere dimensjonerende avrenning for et 200-års nedbørhendelse langs Stangelandsåna. Dette gir delmålene:

- Opparbeide beregningsgrunnlag som kan benyttes av aktører involverte i prosjektet til dimensjonering av planlagt kulvert i sentrum for å imøtekomme overvannsproblematikk knyttet til fortetning av bykjerne og forventede klimaendringer.

- Benytte data fra ny nedbør- og avløpsmåler til å kalibrere den hydrologisk-hydraulisk modellen samt evaluere overførbarheten til parametersettene.
- Tilegning av erfaring i EDB-verktøy, analyse av måledata, databehandling som utarbeidelse av skript og bearbeiding av data i Excel.

1.3 Fremgangsmåte og struktur

Det er valgt å belyse viktige teoretiske aspekt relatert til arbeidet først i prosjektet. Her vil temaene klima og klimaendringer, hydrologi og hydrologiske prosesser bli beskrevet. De vil bli etterfulgt av retningslinjer og lover gjeldende for overvann, overvannshåndtering, nedbørdata og manuelle beregningsmetoder for overvann. Siste del av teoridelen vil bestå av avrenningsmodellen sine metoder og moduler. Deretter tar prosjektet for seg prosjektområde Stangelandsåna, der en beskrivelse av feltets karakteristikk inngår.

Videre deles prosjektet inn i to deler, henholdsvis 1) infiltrasjonsmålinger og jordprøveanalyser, og 2) hydrologisk-hydraulisk modell. For infiltrasjonsmålinger og jordprøveanalyser vil metode, resultat og diskusjon sett opp imot punkt 3 i kapittel 1.1, fremgå som et separat kapittel. Merk at vurderingen av infiltrasjonsdataen som inngangsdata til den hydrologisk-hydrauliske modellen vil bli drøftet i diskusjonskapitlet for SWMM.

Neste del av prosjektet består av metode for oppbygging og kalibrering av hydrologisk-hydraulisk modell, resultater av simulering og diskusjon med utgangspunkt i punkt 1 og 2 under kapittel 1.1. Merk at gjennomførelse og usikkerhet knyttet til metode og resultat drøftes i diskusjonskapitlet.

Prosjektets konklusjon med grunnlag i problemstillingen og resultater oppnådd vil foreligge til slutt, sammen med forslag til videre arbeid for prosjektet.

1.4 Avgrensninger

Det ble gjort avgrensninger for å styrke prosjektets kvalitet og sikre tid for å komme i mål med hovedmålene. Prosjektet avgrenser omfatter følgende punkt:

- Vannkvalitet i vassdraget
- Simulering av overvannstiltak i vassdraget
- Studier av prestasjonen til delelementer av overvannsnettet og fellessystemet. Eksempelvis hvor oversvømmelser kan finne sted, og skadeomfanget av disse.

1.5 Tidligere studier

Sidevassdraget Storåna er fra tidligere modellert og kalibrert. Videre har data fra dette sidevassdraget blitt brukt til å sette opp en modell for Stangelandsåna, da det tidligere ikke er utført målinger for Stangelandsåna. Rapporten heter «*Beregning av nedbørsavrenning i Stangelandsåna, Sandnes*» (Gragne og Sægrov, 2016). Den bruker data fra vannføringsmålinger gjort i Storåna. Ved å sammenligne egenskapene til de to nedslagsfeltene er det mulig å overføre hydrogrammer fra Storånas nedslagsfelt til Stangelandsåna, korrigert for arealer. Dette forutsatte at nedslagsfeltene hadde sammenfallende hydrologiske egenskaper.

Det er gjort en tidligere studie av hydraulisk kapasitet gjennom infiltrasjonsmålinger i Sandnes kommune. Denne studien inngår som en del av masterprosjektet *Modellering av avrenningsreducerende tiltak i Trones-feltet, Sandnes* (Lende, 2013). Prosjektet viser blant annet til infiltrasjonsmålinger gjort ved Gisketjern i Trones-feltet, som er en del av SC4. Det er hentet ut veiledende verdier for infiltrasjonsevne fra dette masterprosjektet for å bruke videre i den hydrologisk-hydrauliske modellen som inngår i dette prosjektet, ettersom Torsnes-feltet og vassdraget til Stangelandsåna har antatt like grunnforhold og infiltrasjonsevne.

2 Teori

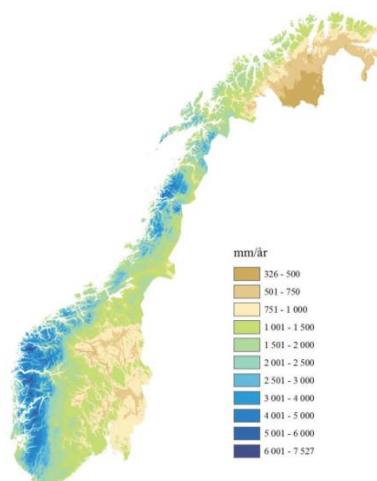
2.1 Klima

Klima kommer fram av statistikk fra systematiske enkeltobservasjoner og er en beskrivelse av gjennomsnittsværet for et område. Dette er en funksjon av normaler, variasjoner og ekstremalverdier. Klimaet omfatter blant annet nedbør, luftfuktighet, temperatur, vind, skydekke og lufttrykk (Meteorologisk Institutt, 2016). Ut i fra variabilitet kan man fastslå variasjoner for klimaet. Variabiliteten er sannsynligheter for avvik fra normalene. Variasjoner beskriver hvor mye klimaet kan variere naturlig. Ekstremalverdier gir viktig informasjon, som for eksempel regnskyl- og flomhyppighet gjennom statistiske beregningsmetoder (Meteorologisk Institutt, 2016).

2.1.1 Klima i Norge

I Norge er klimaet sterkt påvirket av luft- og havstrømmer som kommer fra sørligere breddegrader. Golfstrømmen og «vestavindsbeltet» bidrar til en temperaturøkning på rundt 15°C sammenlignet med opprinnelig strålingstemperatur. Vestavindsbeltet fører også med seg mye nedbør til Norge. Mildere årsnedbør er ca. 1600 mm. Klimaet i Norge er derfor veldig avhengig av faktorer knyttet til luft- og havstrømmene, og lokalklimaet i Norge vil være svært sårbart dersom endringer vil oppstå (I. Hanssen-Bauer, 2015).

Også nedbørintensiteten er geografisk avhengig og varierer mye i Norge. Midlere årsnedbør for Norge er vist på Figur 2. Flommer i Norge skyldes enten 1) kraftig regnskyl, 2) snøsmelting, 3) langvarig regnskyl eller 4) en kombinasjon av disse. De varierer gjennom sesongen og geografisk (I. Hanssen-Bauer, 2015).

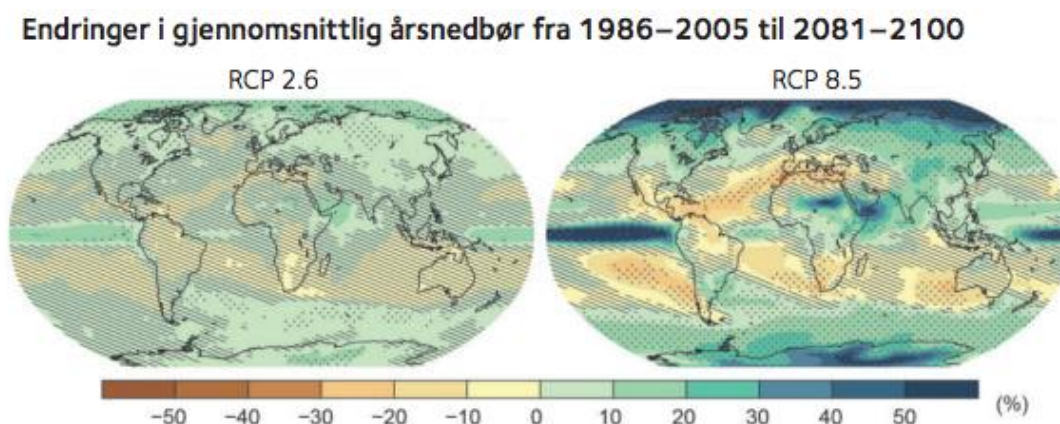


Figur 2: Viser midlere årsnedbør i mm i referanseperioden 1971-2000 (I. Hanssen-Bauer, 2015).

2.1.2 Klimaendring

Klimaendring viser til endringer i klimaet i fortid, nåtid eller i framtid. Endringen fremkommer av innstråling-, utstråling- og/eller albedoendringer mellom jordkloden og verdensrommet. Det er to hovedfaktorer for slike endringer: (1) jordas interne dynamikk og (2) ytre klimapådriv. Dette påvirker klimaparameter som vindstrømmer, temperaturer og nedbørmønster. (I. Hanssen-Bauer, 2015).

FNs klimapanel (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) har som formål å utarbeide rapporter om klimaendringer. Det blir lagt stor vekt på nåværende og framtidig klimaendring for å kunne påpeke tilpasningstiltak for imøtekomme klimaendringer. I 2014 ble femte evalueringsrapport (AR5) utgitt. Det fremkommer av rapporten at menneskelige påvirkning har gitt betraktelig økt konsentrasjon av klimagasser i atmosfæren de siste 150 årene. Dette har ført til oppvarming av hav, forstyrrelse av den naturlige vannbalansen, smelting av breer og økning av havnivået. Figur 3 viser estimeringer av endring i gjennomsnittlig årsnedbør (IPCC, 2014).



Figur 3: Gjennomsnittlig årsnedbør fra perioden 1986 - 2005 til 2081-2100 (IPCC, 2014).

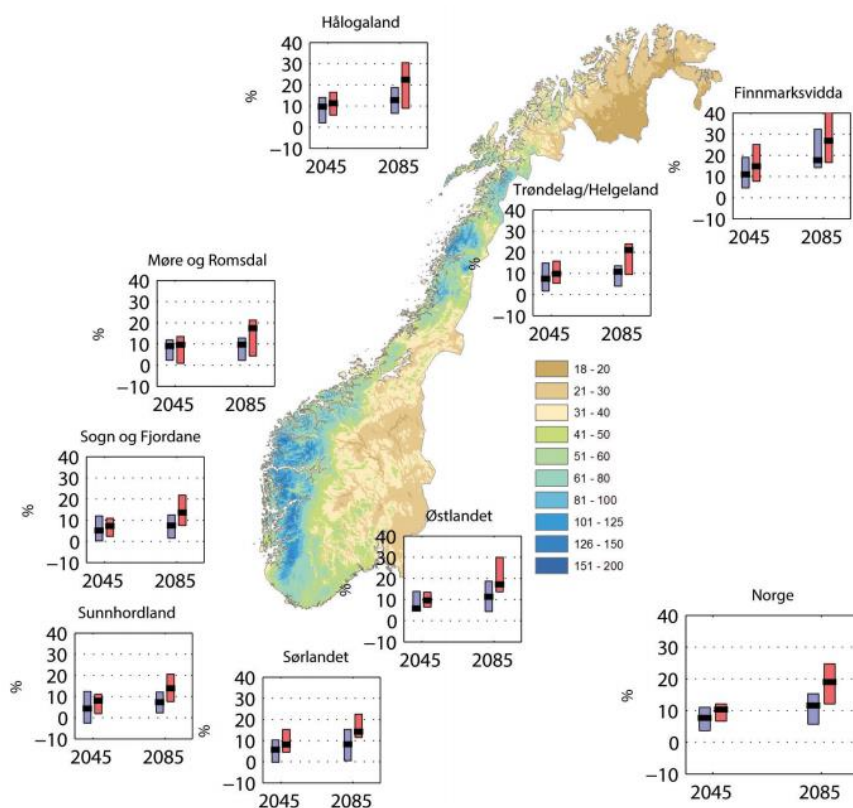
2.1.3 Klimaendring i Norge

Det har vært en økning i nedbørmengde gjennom de siste hundre årene. Fastlands-Norge har opplevd en økning i årsnedbøren på 18 % de siste 115 år. Størst økning (27 %) har vært på våren og minst på sommeren (12 %). Norge har også opplevd en endring i både nedbørintensitet og hyppighet for kraftig nedbør. Dette har gjort at det nå er stadig flere oversvømmelser enn før (I. Hanssen-Bauer, 2015).

Videre fram mot neste århundre har rapporten «Klima i Norge 2100 – Kunnskapsgrunnlag for klimatilpassing oppdatert 2015» benyttet klimaforskning fra FNs klimapanel til å anslå følgende sammendrag for medianverdier for klimaet i Norge. De vil gjelde dersom klimagassutslippene forsetter å vokse fram slik som ved dagens situasjon (I. Hanssen-Bauer, 2015):

- Årstemperaturen vil øke med 4,5°C
- Årsnedbøren vil øke med 18 %
- Frekvensen og styrken av styrtnebbørhendelser vil øke
- Oversvømmelser som skyldes overvann vil ha økt vannføring og frekvens
- Isbreer vil enten forsvinne eller bli mye mindre
- Havnivået vil øke. Avhengig av lokalitet vil stigningen være på mellom 15 og 55 cm.

Det er gjort framskrivinger for styrtnebbør i Norge. Relativ forandring i prosent i nedbørintensitet på dager med kraftig nedbør vil ha store regionale forskjeller, slik som boksene på Figur 4 illustrerer. Norgeskartet illustrerer 1-døgns kraftig nedbør i mm for perioden 1971-2000 (NOU 2015:16).



Figur 4: Framskriving av kraftig nedbør (NOU 2015:16).

2.2 Hydrologi

2.2.1 Hydrologiske prosesser og begreper

Overflateavrenning er den andel av nedbøren som er igjen, etter man har tatt hensyn til initiale tap grunnet andre hydrologiske prosesser. Disse er i hovedsak evapotranspirasjon, infiltrasjon og magasinert vann (intersepsjon¹, gromagasinerings², snø og is). Overflatevann transporteres på jordoverflaten mot nærmeste tilgjengelige utløp. Dette kan for eksempel være i form av et sluk, en kanal eller en elv (Butler og Davies, 2011). Vannbalansen gir sammenhengen mellom overflateavrenning og nedbør. Vannbalansen er gitt i formel 1:

$$Q = N - F - Int. - Inf. - G - X \quad (1)$$

<i>Q</i>	Overflateavrenning [m ³ /s eller l/s]
<i>N</i>	Nedbørsmengden over et tidsrom
<i>F</i>	Fordampning / evapotranspirasjon [mm]
<i>Int.</i>	Intersepsjon [mm]
<i>Inf.</i>	Infiltrasjon [mm]
<i>G</i>	Gromagasinerings [mm]
<i>X</i>	Andre tap [mm]

Fordampning, også kalt evapotranspirasjon er den hydrologiske prosessen der vann går fra flytende form til gassform. Om lag 90 % av alt vann som fordampes kommer fra overflatevann, slik som hav, innsjøer og elver. De resterende 10 % kommer fra planter, trær og vegetasjon og kalles transpirasjon (U. S. Geological Survey, 2016).

Nedbør er definert som alle former for vann som kommer fra atmosfæren og når bakken. Enten det er i flytende eller fast form (Dingman, 2015). Nedbør blir ansett som den viktigste prosessen både i det hydrologiske kretsløpet, og den mest sentrale faktoren for å beregne avrenning. Det er derfor vesentlig å få tilgang til god og høyoppløselig nedbørdata enten gjennom måling eller eksisterende tilgjengelig data.

¹ Intersepsjon er vannet som blir fanget opp og midlertidig lagret av vegetasjonsdekket, før det senere blir fordampet (Butler og Davies, 2011)

² Gromagasinerings er vann som blir liggende i små lommer på overflaten, før det senere blir fordampet (Butler og Davies, 2011)

Sentrale begreper og mål innenfor nedbør er intensitet, varighet, frekvens og arealfordeling, og disse varierer over tid og sted (Norsk Vann, 2014).

Infiltrasjon er den hydrologiske prosessen der vannet trekker ned i den øverste delen av jorda. Videre kan vannet enten trenge dypere ned til et dypere lag, eller kunne renne ut til en åpen vannflate (Norsk Vann, 2014). Hvor mye vann som trenger ned i grunnen er avhengig av overflaten og de stedlige jordmassene, og dens evne til å transportere vann. Sand, grus og sprenget stein har stor kornstørrelse og god infiltrasjonskapasitet, mens leire og silt består av små tettpakkede jordpartikler som gir dårlig infiltrasjonskapasitet. Morene, et usortert materiale, vil også ha dårlig infiltrasjonskapasitet på grunn av små jordpartikler som fyller igjen rommet mellom de større jordpartiklene (Byggforsk, 2012). Vannets evne til å transporteres gjennom porerommet i et porøst medium kan beskrives som hydraulisk konduktivitet. Den avhenger av væskens og materialets egenskaper, og er gitt av formel 2 (Muthanna, 2016b).

$$K = \frac{k * g * \rho}{\mu} \quad (2)$$

K	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
k	Permeabilitet til porøst medium [m ²]
g	Tyngdeakselerasjon [m/s ²]
ρ	Væskens densitet [kg/m ³]
μ	Væskens dynamiske viskositet [Ns/m ²]

Nedbørfelt er det området som bidrar med avrenning til et utløp eller et gitt punkt i terrenget, ofte en kanal eller elv. Vannet som renner gjennom utløpet blir ansett å stamme fra nedbør som har falt innenfor nedbørfeltets grenser. Nedbørfeltets form og egenskaper er bestemmende for feltets respons på nedbøren (Dingman, 2015).

2.2.2 Flom

Flom kan defineres som forholdsvis stor vannføring, forårsaket av ulike årsaker. De flommene som forekommer i Norge er vanligvis forårsaket enten av ekstreme nedbørsmengder eller av snøsmelting. En kombinasjon av disse kan også forekomme (Tollan, 2015).

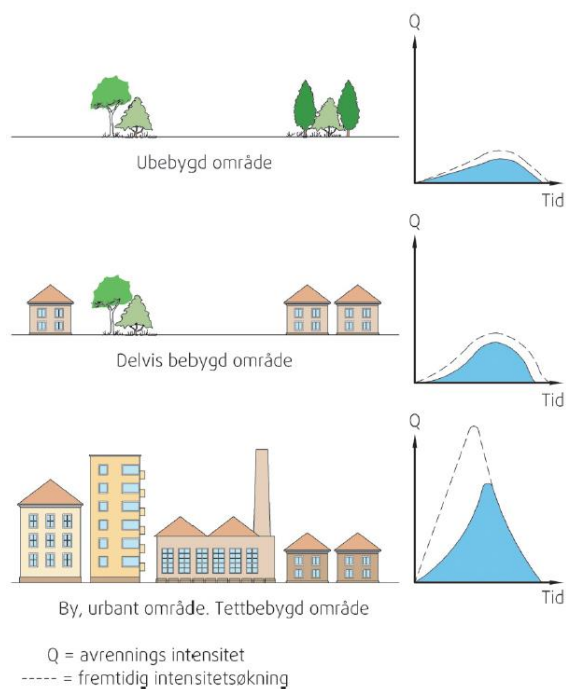
Flommens størrelse, varigheten og hendelsesforløp avhenger av nedbørfeltets egenskaper og form, samt hvordan regnskyellet eller snøsmeltingen utarter seg. Snøsmelteflommer med varighet på 2-3 uker på grunn av jevn snøsmelting er ikke uvanlig i Norge. Regnflommer gir gjerne høy vannføring med kort

varighet på grunn intens regnskyll. Om feltet har stor grad av impermeable flater og en større andel av feltarealet ligger i nærheten av utløpet vil responsen i fra feltet være rask (Tollan, 2015).

For flommer i urbane områder gjelder de samme prinsippene. Om forutsetningene ligger til rette vil ledningsnettets sin kapasitet bli overskredet. Oppstuvning i ledningsnettets og overflateavrenning som ikke får tilgang til avløpsnettets på grunn av overskredet kapasitet, resulterer i oversvømmelse (Butler og Davies, 2011).

2.2.3 Urbanhydrologi

Urbanhydrologi er delen av det hydrologiske kretsløpet som er knyttet til urbane og bebygde områder. Urbanhydrologien tar for seg den effekten utbygging i naturlige områder har på de naturlige hydrologiske prosessene. De viktigste prosessene som blir påvirket er infiltrasjon, evapotranspirasjon, vannavrenning på overflaten og grunnvannstanden (NVE, 2015).



Figur 5: Effekt av urbanisering (Byggforsk, 2012).

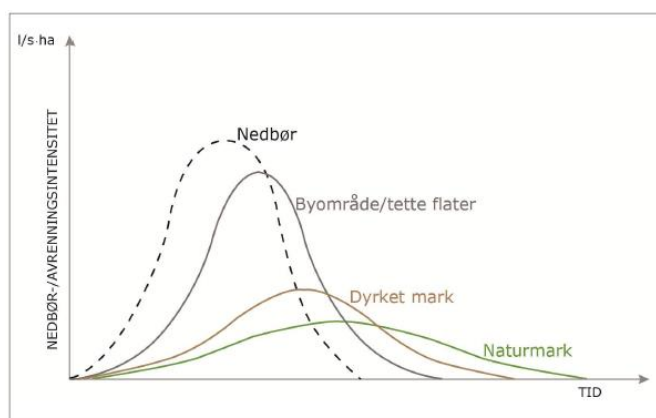
Videre vil urbanisering og fortetning av byer gi hurtigere avrenning og større flomtopper. Dette har konsekvenser for flomskader og forurensing. En kort responstid gir større hastighet på avrenningen, som igjen gir større sannsynlighet for at avrenningen tar med seg forurensende partikler og sedimenter med seg videre nedstrøms (NOU 2015:16). Effekten av urbanisering på overflateavrenningen, flomtopp og responstid er illustrert på Figur 5.

2.2.4 Urbane vassdrag

Et vassdrag består av et nettverk med kanaler og elver. Som en del av det hydrologiske kretsløpet er det bekker, elver og kanaler som drenerer og transporterer vannet til en resipient. Naturlige vassdrag har ofte fungerende elvesletter som blir oversvømt når det er flom, en gradvis økning i vannføring ved økt nedbør og deretter en gradvis redusert vannføring etter endt regnskyll. I urbane vassdrag vil det forekomme endring av bekkeløpet eller elven nedstrøms utbyggingen. På grunn av en større andel impermeable flater i vassdraget vil transporttid i elven og infiltrasjon reduseres, samt vannavrenning vil øke etter en nedbørhendelse. Vanlige konsekvenser av dette er dypere elver, erodering av elvesider, jordskred og elvesletter som ikke fungerer som flomløp. Denne prosessen er naturlig, men hastigheten den foregår i er unaturlig på grunn av endring av det naturlige hydrogrammet (Muthanna, 2016a).

2.3 Overvannshåndtering

Overvann er nedbør og smeltevann som er i kontakt med utbygde områder. Dersom overvannet ikke blir håndtert på sikkert vis vil det kunne resultere i forstyrrelser, skader, flommer og helseplager for miljø og mennesker. For å ivareta sikkerheten er det viktig å forstå hvordan avrenningsprosessene opptre. I det naturlige hydrologiske kretsløpet vil noe nedbør stige opp i atmosfæren gjennom evapotranspirasjon, noe vil infiltrere ned til grunnvannsspeilet og noe gi avrenning til nærmeste vannflate. Andelen av nedbøren som går til hva varierer med topografi, jordegenskaper og nedbørvarighet (Butler og Davies, 2011). Avrenningsintensiteter for ulike typer overflater er vist på Figur 6. Klimaendringene viser at nedbørintensiteten ikke vil øke like raskt som bestemte hendelser for regnskyll. Samtidig vil økning i havnivå bidra til å øke mottrykket og dermed redusere hydraulisk kapasitet for ledningsnett i kystnære områder. (NOU 2015:16).



Figur 6: Avrenningsintensitet for ulike typer overflater (COWI, 2013).

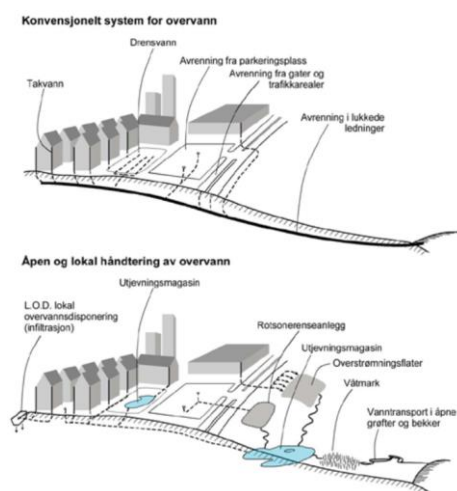
2.3.1 Lokal overvannsdiskonering og lokal overvannshåndtering

Målet med lokal overvannsdiskonering (LOD) og lokal overvannshåndtering (LOH) er å tilbakeføre det naturlige hydrologiske kretsløpet tilbake til området i størst mulig grad for å forebygge skader, utnytte overvann som en ressurs samt sørge for at biologisk mangfold trives i utbygde strøk. For å redusere skadevirkninger fra overvann er det viktig med god planlegging. Ved detaljert planlegging kan man finne helhetlige løsninger som ivaretar overvannet på en god måte (Byggforsk, 2012).

Gjennom LOH identifiseres løsninger som skal sørge for å ivareta ønsket vannmengde og vannkvalitet i systemet. Dette gjøres ved å tilpasse løsningene etter lokalt miljø og behov. Ulike metoder vil være:

- Infiltrasjonssystemer
- Fordrøyning
- Opparbeide våtmarksområder
- Opparbeide områder med vegetasjon
- Filtersystemer

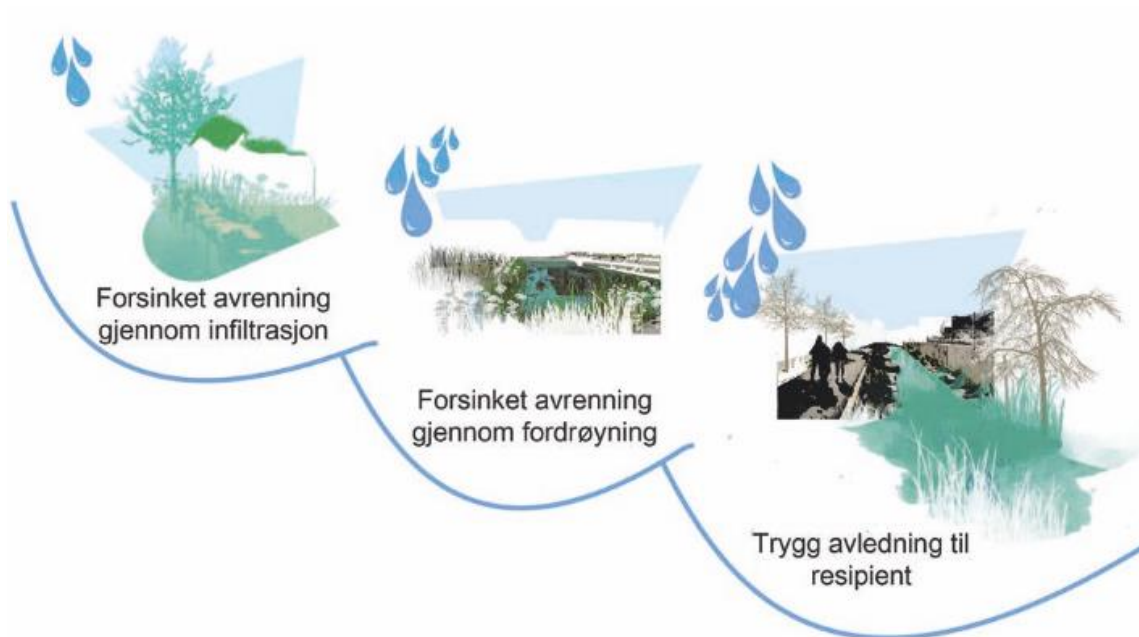
Fordampning, infiltrasjon og forsinking av vannmengder vil redusere intensiteten for avrenningen på overflaten og i ledninger. Dette kan skje naturlig eller ved hjelp av kunstige installasjoner. Her vil flomtoppreduksjon, volumreduksjon samt vannkvaliteten kunne forbedres. Områder som er sårbare for overvann er mulig å kartlegge og en vil kunne gjennomføre forebyggende tiltak. Tiltakene bør dimensjoneres med hensyn til endringer i klima, havnivå og urbanisering. Illustrasjonsbilde av konvensjonelt overvannssystem mot lokal håndtering av overvann er vist på Figur 7 (Byggforsk, 2012).



Figur 7: Konvensjonell overvannshåndtering og lokal overvannshåndtering (Lindholm, et al., 2008).

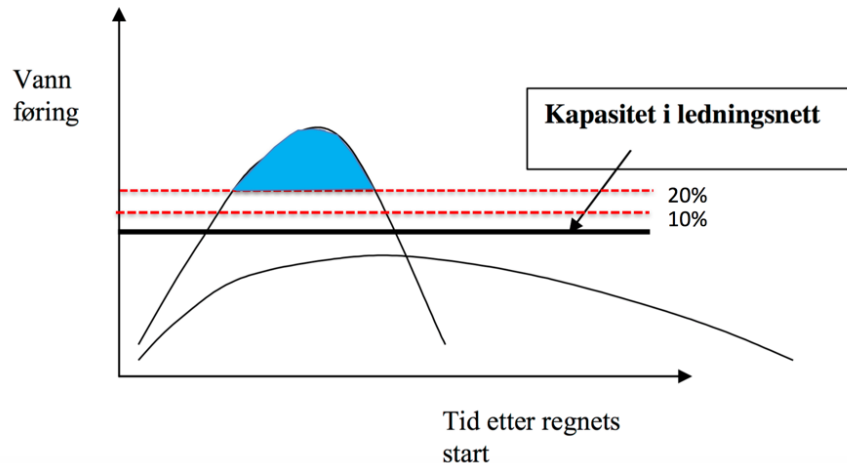
2.3.2 Treleddsstrategi

Treleddsstrategien viser en plan for å håndtere nedbør med blågrønne løsninger, som vist på Figur 8. Essensen av strategien er å infiltrere og fange opp nedbør inn til en viss vanndybde i alle tilfeller. Videre ønskes en fordrøyning i større anlegg for mellomstore regnhendelser. Ved ekstreme nedbørhendelser er det ønskelig å sikre trygge åpne flomveier for å lede vannet bort på en sikker måte (Lindholm, *et al.*, 2008).



Figur 8: Treleddsstrategi (NOU 2015:16).

Et prinsipp ved dimensjonering av overvannsystemet er å dimensjonere ledninger for daglig drift og flomveier for ekstreme nedbørhendelser. På den måten vil overdimensjonering av overvannsanlegg som er kostbare og vanskelig å drifte, bli unngått. Ved å implementere risikoanalyse i planleggingsgrunnlaget vil kommuner kunne ivareta sikkerheten ved nye utbygginger av infrastruktur og bebyggelse. Figur 9 viser at ledningsnettets vil fortsatt få oppstuvingsproblem i fremtiden selv med klimafaktor i beregningsgrunnlaget (øverste kurve). Det er heller ønskelig å bruke LOD til å gjenskape den naturlige avrenningen til området for å bedre imøtekomme klimaendringene (nederste graf). (Lindholm, 2013).



Figur 9: Kapasitet i ledningsnett med klimafaktor (Lindholm, 2013).

2.3.3 Dimensjonerende gjentaksintervall

Norsk Vann har utarbeidet anbefalinger for minimum dimensjonerende gjentaksintervall for separat- og fellessystem som vist i Tabell 1. Dimensjonering av overvannssystemene beregnes ut fra regnskyllhyppighet, det vil si når røyr fylles til ledningstopp. Deretter kartlegges hyppighet av oversvømmelse. Oppstuvning på 90 cm fører karakteriseres som oversvømmelse. Tabellen viser anbefalte minimumsverdier og man bør gjøre mer detaljerte undersøkelser der det er mulig (Norsk Vann, 2014).

Tabell 1: Minimum dimensjonerende gjentaksintervall for avløpssystem (Lindholm, et al., 2008).

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

2.3.4 Flomvei

Det er viktig at LOD-løsninger har overløp til sikre åpne flomveier. Spesielt ved områder som har stor risiko for flomskader er etablering av flomvei på overflaten et viktig tiltak for å redusere flomskader. Flomveier er lavpunkt i terrenget og bebygde områder som fylles opp med vann ved flomsituasjoner. . Planleggingen av flomveier bør være en integrert del av overvannsplanleggingen for å kunne sikre gode og helhetlige løsninger. Dette er på grunn av at verken overvannssystemet eller lokale overvannsløsninger vil ha

kapasitet nok til de største nedbørhendelsene. Det er ønskelig at avrenningen ledet bort til områder som gir mindre skadeomfang via flomveiene (COWI, 2013).

En flomveiløsning kan enten være åpen eller lukket. Man ønsker i størst mulig grad å ha åpne flomveier da åpne løsninger bidrar til å opprettholde vannets naturlige kretsløp. Kommunedelplaner fører ofte retningslinjer der opp mot 100-årsflom skal sikres ved trygge åpne flomveier. Nye tiltak skal ikke hindre eksisterende flomveier til vannet. Videre bør konstruksjoner i flomveiene vurderes fjernet eller flyttet for å unngå skader, samtidig som ny bebyggelse sin plassering gi økt risiko for flomskader(Lindholm, *et al.*, 2008).

Ved dimensjonering og kapasitetsvurderinger av foreslåtte flomveier bør kostnadene for opparbeidingen av flomveien veies opp mot skadeomfanget en eventuell oversvømmelse vil utgjøre i området. Dimensjonering bør også strebe for at flomveier fordrøyer overvannet i størst mulig grad, for å redusere flomtopp i andre vassdrag nedstrøms. Det er ønskelig at anleggskostnader, drift- og vedlikeholdskostnader, skadekostnader ved oversvømmelse og forstyrrelser knyttet til oversvømmelse er minst mulig. (Lindholm, *et al.*, 2008).

Gjennom digitale analyser kartlegges avrenningsveier i urbane strøk basert på terrengets form og helning. Kartleggingen gjøres for eksempel gjennom en lasermode. Mer nøyaktig terrengmodell gir mer detaljerende beskrivelse av flomveien. Det benyttes registrerte overvannshendelse samt eksisterende elver og bekker fra grunnkartet sammen med offisielle nedbørfelt til å måle opp mot analyseresultatet for å kunne verifisere dataene (Geodata, u.å.).

2.4 Lover og retningslinjer for overvann

2.4.1 Generelle krav

På et strategisk nivå vil kommuner gjennom hovedplaner fastsette generelle krav til overvannshåndtering i kommuner. Dette kan være prinsipper som (Lindholm, *et al.*, 2008):

- Overvann- og flomhåndtering i elver og bekker skal planlegges for hvert nedbørfelt
- Det skal brukes åpne løsninger fremfor lukkede systemer der dette er mulig.
- Ny bebyggelse skal følge treleddsstrategi med infiltrasjon, fordrøyning og sikre flomveier ved nedbørhendelser.
- Prinsipper for forbedring av eksisterende bebygde områder (frakople takrenner fra offentlig nett der det er mulig).

Andre lover og veiledere som påvirker retningslinjer og krav i reguleringsplaner eller bebyggelsesplaner er blant annet(Lindholm, *et al.*, 2008):






- Vannforskriften § 1
- Vannressursloven §§ 7,8
- Plan- og bygningsloven §§ 25, 26, 27-2 28-2, 68
- Forurensingsloven kap. 4 §§ 21, 22
- Forurensingsforskriften § 11-1
- TEK10 §15-10

De gir blant annet krav og veiledning til hvordan ivareta vann som en ressurs, hvordan man beskytter miljøet samt plassering og utforming av byggt tekniske konstruksjoner og uteområder som skal opparbeides i områder på grunnlag av flomhyppigheter. Videre skal krav til sikkerhet mot flom i vassdrag være i tråd med NVE retningslinje nr. 1/2007 (Lindholm, *et al.*, 2008).

EUs vanddirektiv er et utarbeidet rammedirektiv for vann, som skal gi felles vannpolitikk innad i EU. Gjennom EØS-avtalen er vanddirektivet innført i Norge. Det er Vannforskriften som ivaretar implementeringen av vanddirektivet. Dette gir et grunnlag for mer samordnet forvaltning, med hovedformål å sikre sikkerhet og bærekraftig bruk av vannmiljøet (Vannportalen, 2014).

Forurenset overvann har stor påvirkning på kvaliteten til vannforekomster. Dette kan forekomme ved blant annet tilsig til vannforekomst fra forurenset overvannskilder eller overløpshendelser til resipient. Vanddirektivet har opprettet et klassesystem på grunnlag av ulike kriterier, for å oppnå målet om god økologisk tilstand i alle vannforekomster. Overordnet mål om god tilstand skal finne sted på alle forekomster i hele Norge innen 2021, inkludert Sandnes kommune. Klassifiseringen gir veiledning om miljømål er tilfredsstilt, eller om tiltak er nødvendig. Tabell 2 viser sammenheng mellom klassifiseringssystemet for tilstand og nødvendighet for handling. Det skal fullføres tiltak i tråd med miljømålene der miljømålene ikke er tilfredsstilt. Vannforekomster med økologiske kvalitet som tilfredstiller miljøkravene skal sørge for at tilstanden ikke forverres (Sandnes Kommune, 2010).

Tabell 2: Vanndirektoratets klassifiseringssystem for økologisk tilstand til vannforekomst.

Tilstand	Fargekode	Tiltak
Svært god		Miljømål tilfredsstilt
God		
Moderat		Tiltak nødvendig for å nå miljømål
Dårlig		
Meget dårlig		

2.4.2 Veiledere for Sandnes kommune

Sandnes kommune har laget egen hovedplan for avløp og vannmiljø for perioden 2015 til 2025. Det fremkommer retningslinjer for klimatilpasning og overvann av hovedplanen. Hovedplanen er et politisk styrende dokument som skal sørge for at (Sandnes Kommune, 2014a):

- 1) Miljøstandarden kommunen har satt følges
- 2) Se til at myndigheters krav om et rent vannmiljø blir ivaretatt

Hovedplanen for avløp og vannmiljø inneholder strategier for håndteringen av overvannet, planleggingsprinsipper, overvåking og kvalitetskontroller, informasjon og kundeservice, eierskap og forvaltning og kostnader (Sandnes Kommune, 2014a).

Det er også utarbeidet en kommunalteknisk norm for vann- og avløpsanlegg gjeldene for kommunene Stavanger, Randaberg, Sandnes, Sola, Klepp, Gjesdal, Forsand og Haugesund. Normen har som formål å fastslå krav og føringer for overvannshåndtering. Videre gir normen grunnlag for dimensjonerende parametere som bør benyttes i prosjekteringsarbeid for gjeldene kommuner. Her inngår valg av nedbørdata, tilpasning til endringer i klima, avrenningskoeffisienter, dimensjoneringsmetoder for lokal overvannshåndteringsanlegg (Sandnes Kommune, 2015a).

2.5 Infiltrasjonsmålinger og jordprøver

Infiltrasjonsmålinger brukes for å kartlegge infiltrasjonskapasiteten til et område. Infiltrasjon er mye brukt for å løse overvannsproblematikk, enten som eneste løsning for et område, eller i kombinasjon med andre overvannsløsninger. Infiltrasjonen vil kunne ha stor effekt på vannbudsjettet og det er derfor viktig med gode data for å kunne oppnå gode og helhetlige løsninger for overvannet. Også for overvannsmodeller vil

gode data på infiltrasjon kunne gi bedre kvalitet på utdataen fra modellen (Gulliver, Erickson og Weiss, 2010).

Infiltrasjonen kan variere mye selv ved korte avstander. Dette kan være grunnet varierende jordegenskaper, rotsystemer i bakken, porøsitet, metthetsgrad med mer. For å oppnå gode data er det derfor viktig å utføre tilstrekkelig antall målinger for samme området slik at man får ut et representativt resultat. I mange av tilfellene vil tilhørende jordartprøve fra område styrke kartlegging infiltrasjonsegenskapene (Gulliver, Erickson og Weiss, 2010).

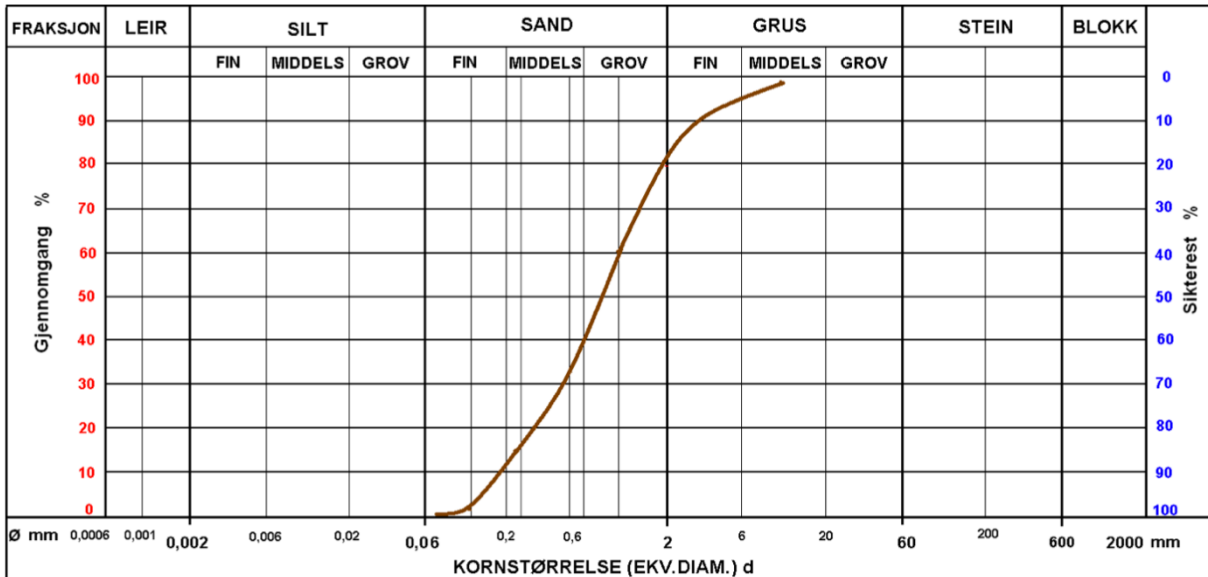
2.5.1 Kornfordelingsanalyse

Sikting brukes til å sortere et materiale inn i forskjellige kornstørrelser. I sorteringen benyttes ulike sikter med forskjellige åpningsstørrelser. Siktene består som regel av metalltråder med kvadratiske masker. For sikting av mindre materialer som grus, jord eller lignende brukes presisjonssikter av metallduk med lysåpning ned til 38 μm (Store norske leksikon, 2009). Sorteringen kan brukes videre til diverse jordanalyser, som blant annet klassifisere jordarten etter størrelsen på kornene. I nordiske land benyttes ofte A.M Atterbergs skala over kornstørrelsen. Denne er gjengitt i Tabell 3 (Christensen, 2015).

Tabell 3: A.M Atterbergs skala (Christensen, 2015).

Navn	Størrelse [mm]
Blokk	>200
Stein	20 – 200
Grus	2 – 20
Grovsand	0,20 – 2,00
Finsand	0,02 – 0,20
Grov leire	0,002 – 0,02
Fin leire	<0,002

Ofte benyttes en kornfordelingskurve også kalt siktekurve for å finne hvilke partikler som utgjør største prosentandel. Siktekurven er et plott av sikteanalysen inn et diagram som vist på Figur 10 (Statens vegvesen, 2014a). Videre kan prosentandel av hver fraksjon brukes i en jordklassetrekant for å finne rett betegnelse på jordarten. Klassifiseringen av jordarten kan sees i sammenheng med standardverdier for hydraulisk konduktivitet for å estimere infiltrasjonsevnen til et område. Jordklassetrekanten er lagt ved i Vedlegg A (NRCS, 2008).



Figur 10: Siktekurve (Statens vegvesen, 2014a).

2.6 Nedbør, nedbørdata og avrenningsmåling

Det er mange typer nedbørdata og ulike tilnærminger som kan benyttes ved estimering av overflateavrenning. I forbindelse med hydrologisk-hydraulisk modell vil målte regndata fra målestasjon for å kalibrere modellen samt konstruert regn basert på en IVF-kurve kunne benyttes for å estimere overflateavrenning.

2.6.1 Nedbørmåling

I Norge er det Meteorologisk Institutt som har ansvaret for å innhente meteorologiske data, og som gir tilgang til målte data. Korttidsnedbør er blitt målt fra 60- og 70-tallet, og i hovedsak på sommerhalvåret på grunn av snø- og frostproblematikk. Mange målestasjoner er utstyrt med varmeelement og kan måle korttidsnedbør hele året (Thorolfsson, 2013).

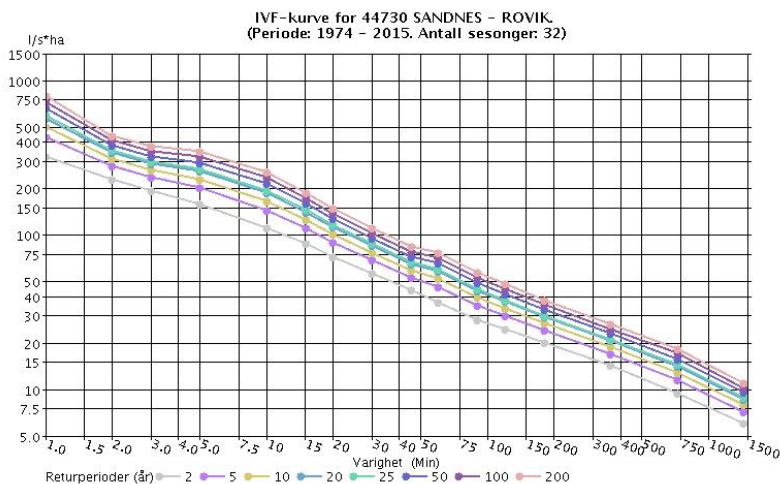
Det finnes to hovedtyper nedbørmålere, manuelle og automatiske. Manuelle nedbørmålere består av en bøtte med en kjent diameter i toppen. Ved måling blir vannet tømt over i et måleglass, og man leser av mm nedbør fra måleglasset (Meteorologisk institutt, 2010b). Automatiske nedbørmålere leser av nedbør automatisk. Avlesningen kan skje med en vekt, som kontinuerlig veier innholdet i beholderen, og kan videre beregne hvor mye det har regnet (Meteorologisk institutt, 2009). En type måler som er godt egnet for å måle nedbørintensitet er pluviometre. Moderne pluviometre bruker gjerne vippeprinsippet, der regnet faller i en sylinder og blir videre ført ned med en trakt. Under trakten er det plassert to små vippekar, som normalt sett kan romme 0,1 eller 0,2 mm. Når ett av vippekarene er fullt, vippes karene slik

at det andre karet kan ta imot nedbør. Slike nedbørmålere har mulighet for å gi høy oppløsning på målingene, noe som er en nødvendighet ved analyse av nedbørhendelser. Eksempelvis vil 5 vipp med et 0,2 mm vippekar på 1 minutt tilsa en nedbørintensitet på 1 mm/min, eller 166,7 l/sha (Thorolfsson, 2013, Meteorologisk institutt, 2010a).

2.6.2 IVF-kurve

Hvert registrerte nedbørhendelse blir omgjort til et «kasseregn» som kan defineres som et tenkt regnskyll med konstant regnintensitet over hele måleperioden, med likt regnvolum som den virkelige nedbørhendelsen. Etter statistisk bearbeidelse av nedbørhendelsen fremstilles frekvensdiagrammer ved bruk av Gumbels fordeling, kalt IVF-kurver (intensitet-varighet-frekvens). IVF-kurver viser sammenhengen mellom intensitet, varighet og frekvens for en gitt nedbørhendelse. IVF-kurven er basert på data fra lange historiske nedbørsserier. Den vertikale aksene viser nedbørintensitet i l/sha, og den horisontale aksene viser regnvarighet i minutter (Alfredsen, *et al.*, 2013, Thorolfsson, 2013).

Ved å ha kjennskap til regnvarighet og gjentaksintervall til dimensjonerende nedbørhendelse vil forventet nedbørintensitet estimeres ved benyttelse av IVF-kurver. Figur 11 viser IVF-kurven til Sandnes-Rovik, som også vises i sin helhet i Vedlegg B.



Figur 11: IVF-kurve for Sandnes-Rovik (Meteorologisk institutt, 2017).

2.6.3 Dimensjonerende gjentaksintervall

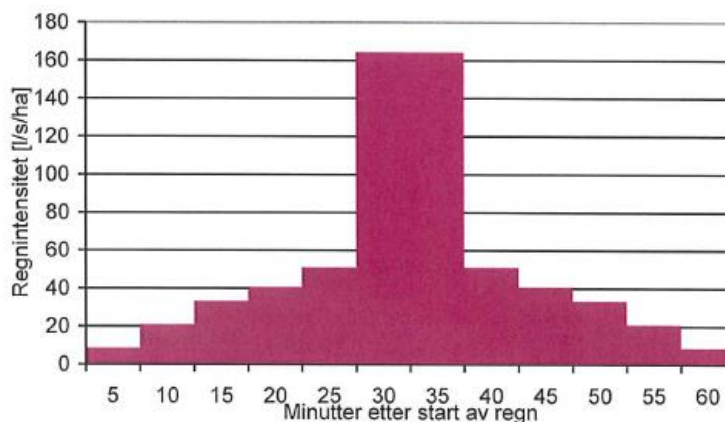
Frekvens, også kalt gjentaksintervall, beskriver hvor stor sannsynlighet det er for at en gitt hendelse forekommer i et gitt år. Sannsynligheten for forekomsten baserer seg på historiske hydrologiske data om nedbør og vannføring, og varierer derfor fra sted til sted. Størrelsesordenen for en nedbørhendelse med returperiode på 200 år er ikke konsekvent gjennom rom. Sannsynligheten for at et 200-års og 100-års

regnskyll skal forekomme for et gitt år er henholdsvis 0,5 % og 1%. Med andre ord vil ikke nødvendigvis en 100-års nedbørhendelse forekommer nøyaktig en gang hvert hundrede år, men at dette er forventet frekvens (Norsk Vann, 2014).

2.6.4 Konstruert og symmetrisk nedbørhendelse

Ved bruk av «kasseregner» benyttes verdier fra IVF-kurvene. Ved analyse av overvannsnett vil bruk av «kasseregner» bare gi dimensjonerende vannmengder i de punkter der konsentrasjonstiden er lik varigheten på nedbørhendelsen (Norsk Vann, 2014).

Nedbør har sjeldent konstant nedbørintensitet slik som «kasseregnet» impliserer, og inneholder ofte et forregn og en etterregn sammen med toppen av nedbørhendelsen. For å omgå kasseregner og prinsippet om at konsentrasjonstiden er lik varigheten på nedbørhendelsen, er bruk av symmetrisk regn et alternativ. Symmetrisk regn er et regnhyetogram³ som blir konstruert med basis i IVF-verdier. Fordelene med symmetrisk regn som grunnlag for dimensjoneringen er at dimensjonerende vannmengder kartlegges for samtlige ledningsnettsnoder i samme utregning. Dette kommer av at de øverste delene av ledningsnett blir dimensjonert for kort regnvarighet og den høye regnintensiteten som følger med, hvorimot de nedre delene av nettet blir dimensjonert for hele regnhyetogrammet og lengre regnvarighet (Norsk Vann, 2014). På Figur 12 vises et eksempel på symmetrisk hyetogram av en nedbørhendelse, med intensitet på vertikalaksen og tidssteg på horisontalaksen.



Figur 12: Symmetrisk regnhyetogram (Lindholm, et al., 2008).

³ Et hyetogram viser nedbørintensiteten som en funksjon av tiden (Norsk Vann, 2014)

2.6.5 Avløpsmåling

Avrenningen fordeler seg ulikt gjennom året, blant annet på grunn av at nedbøren fordeler seg ujevnt over samme tidsrom. Derfor er det av interesse å vite og måle vannføringen på enkelte steder, både i lukkede tverrsnitt og i åpne kanaler. Det er forskjellige måter å måle vannføringen på. For høyoppløselige avlesninger av vannføring over en lengre periode i åpne og lukket kanaler er det ofte brukt metoder basert på kritisk dybde, eller areal-hastighetsbestemmelser. Observasjon av samtiddata er ofte mulig ved bruk av nettportaler, der oppdaterte måledata blir presentert på nettsiden i det måledataene blir sendt fra målestasjonen. Sendefrekvensen av vannføringsdata kan man bestemme ut i fra behov (Thorolfsson, 2013).

For å oppnå tilstrekkelig gode resultater av planlegging, dimensjonering og drift av ledningsnett er målte avløpsdata nødvendig. I denne prosessen blir EDB-modeller brukt for å beregne representativ avrenning og vannføring for nedbørfeltet, og gode avløpsdata er svært viktig for å gjennomføre kalibreringen av modellen (Lindholm, *et al.*, 2008, Thorolfsson, 2013).

2.6.6 Avrenningssituasjoner / sesongvariasjoner

Gjennom året vil man i Norge har ulike avrenningssituasjoner avhengig av årstid. Nedenfor er de ulike sesongvariasjonene beskrevet (Lindholm, *et al.*, 2008):

- Sommer: Impermeable flater vil gi avrenning fra korte, men intense regnskyll. Permeable flater vil gi liten avrenning.
- Høst: På grunn av langvarige regn og våt mark, vil man ha høyere grunnvannstand, avrenning fra samtlige flater, og betydelig avrenning fra permeable flater.
- Vinter: Alle flater vil gi avrenning, blant annet betydelig avrenning fra permeable flater, på grunn av snødekt eller frossen mark.
- Vår: Alle flater vil gi avrenning på grunn av mettete, våt mark, og snøsmelting.

2.6.7 Klassifisering av usikkerhet i utstyr

Nedbør- og vannføringsmålinger som blir benyttet som inngangsdata i hydrologisk-hydraulisk modell, bør inneholde en høy grad av nøyaktighet for å sikre pålitelige estimeringer ved simulering. Nøyaktigheten av simuleringer vil alltid henge sammen med nøyaktigheten til inngangsdataen.

Det kan deles inn i to hovedtyper målingsfeil, systematiske og tilfeldige feil. Systematiske feil kan videre deles inn i konstante og variable systematiske feil. Systematiske feil karakteriseres ved målinger som styres i en bestemt retning, også kalt gjentakende feil. Årsaker til slike feil kan være interne feil i

måleutstyret, feilkalibrering eller eksterne påvirkninger fra nærmiljøet. Et eksempel på en konstant systematiske feil vil være vannmåler med feilinnstilling, slik at den alltid viser en konstant overestimert verdi sammenlignet med virkelig verdi. En variabel systematisk feil kan for eksempel være målefeilen som oppstår ved vanndybdemålinger når det er små bølger på vannoverflaten, sammenlignet med rolig vannoverflate. Målinger med systematiske feil kan ha dårlig nøyaktighet, men allikevel god repeterbarhet. Det er viktig å være klar over at et slikt resultat kan gi et feilaktig bilde av ønsket måleresultat, slik Figur 13 viser. Selv om man tar høyde for systematiske feil kan tilfeldige variasjonene som skiller målingene ikke kontrolleres. Med andre ord produseres tilfeldige feil av ukontrollerte og tilfeldige påvirkninger. Om målingene viser liten spredning og god repeterbarhet, er utstyret presist, og målefeilene påvirker måleresultatet i mindre grad (Lem og Syslak, 2017, Mosevoll, Wedum og Sægrov, 1991).



Figur 13: Forskjellen mellom nøyaktighet og repeterbarhet (Mosevoll, Wedum og Sægrov, 1991).

2.7 Manuelle beregningsmetoder for overvann

Det er helt nødvendig å ha god kjennskap til overvannsmengder for å kunne håndtere overvannsproblematikk og for å opparbeide gode tiltak. Overvannsplaner, utarbeidelse av flomveger, risikovurderinger i forbindelse med oversvømmelse og dimensjonering av VA-systemer er alle basert på eller knyttet til overvannsmengder (COWI, 2014).

For å kunne gjøre raske overslag over overvannsmengder er det hensiktsmessig å ha innsikt i ulike manuelle beregningsmetoder for overvann. Beregningsmetodene gir rask oversikt over ukompliserte situasjoner, eller kan benyttes til å kontrollere resultater fra en EDB-modell. Sandnes Kommune setter krav om manuelle kontrollberegninger ved bruk av EDB-modeller (Sandnes Kommune, 2015a).

2.7.1 Den rasjonelle metode

Den rasjonelle metode er hyppig benyttet som manuell beregningsmetode på små nedbørfelt, og fremkommer av formel 3 (COWI, 2014):

$$Q = A \cdot \varphi \cdot I \cdot K_f \quad (3)$$

Q	Vannføring [l/s]
A	Areal av nedbørfelt [ha]
φ	Avrenningskoeffisient [-]
I	Nedbørintensitet hentet fra IVF-kurve [l/sha]
K_f	Klimafaktor [-]

Den rasjonelle metode baserer seg på antagelsen om at området er ensartet. Med andre ord baserer den seg på gjennomsnittlig avrenningsfaktor for hele feltet. I tillegg antar formelen at konsentrasjonstiden på avrenningen er lik regnvarigheten. Dette gir et verst tenkelig tilfelle og høyest vannføring, da man i dette tilfellet sikrer at hele nedbørfeltet bidrar med avrenning samtidig. Videre går formelen ut ifra at nedbørfeltet er rektangulært, noe som bidrar med usikkerhet til formelen (Butler og Davies, 2011, Norsk Vann, 2014). Ifølge NS-EN 752:2005 er den rasjonelle metode gyldig på areal under 200 ha eller en konsentrasjonstid på under 15 minutter (Standard Norge, 2008), men som NIVA (2003) poengterer skal det sannsynligvis stå 20 ha.

På grunn av at formelen gir økt usikkerhet på store felt, anbefales det at man bare bruker den rasjonelle metode på areal under 20-50 ha (Statens Vegvesen, 2014b).

2.7.2 Avrenningskoeffisient

Avrenningskoeffisienten er et forhold mellom overflateavrenningen og nedbøren over det samme området, og en gjennomsnittlig verdi beregnes i formel 4 (Norsk Vann, 2014):

$$\varphi_{snitt} = \frac{\varphi_1 A_1 + \varphi_2 A_2 + \dots + \varphi_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (4)$$

φ_{snitt}	Gjennomsnittlig avrenningskoeffisient [-]
φ_n	Avrenningskoeffisient for delfelt n [-]
A_n	Areal for delfelt n [m ² , km ² eller ha]

Norsk vann har opparbeidet veiledende standardverdier for avrenningskoeffisienter for ulike typer flater, men flere kommuner har også egne veiledende avrenningskoeffisienter som ofte beskriver flere typer flater. Lokale forhold er viktig å ta hensyn til i vurderingen av avrenningskoeffisient, som videre er avhengig av permeabiliteten til dekket, fall, nedbørintensitet og nedbørvarighet, og foregående nedbørhendelser. I Tabell 4 kan man se veiledende avrenningskoeffisienter (Norsk Vann, 2014).

Tabell 4: Avrenningskoeffisienter for noen type flater (Norsk Vann, 2014).

Type flater	Avrenningskoeffisient φ_{spiss}
Tak	0,8 – 0,9
Asfalterte veger og gater	0,7 – 0,8
Grusveger	0,4 – 0,6
Plen	0,05 – 0,1
<i>Sammensatte flater:</i>	
Bysentrum	0,7 – 0,9
Blokkbebyggelse	0,4 – 0,6
Rekkehusområder	0,3 – 0,4
Åpne eneboligstrøk	0,2 – 0,3

Videre er det også viktig å ta hensyn til andre faktorer som om det langt ned til grunnvannstand brukes lave verdier i intervallet, og høye verdier benyttes om det er bratt, ved frossen overflate, om regnvarigheten er lang og ved økende nedbørintensitet. I tillegg må fremtidig utbygging som bidrar til mer avrenning bli tatt hensyn til (COWI, 2015).

2.7.3 Konsentrasjonstid

Konsentrasjonstiden T_k er tiden det tar vannet å renne fra ytterste punktet i nedbørfeltet til utløpet for en gitt nedbørhendelse. Konsentrasjonstiden deles inn i tiden det tar for vannet å nå utløpet, og strømningstiden for vannet i ledningen. Konsentrasjonstiden fremkommer av formel 5 (Norsk Vann, 2014):

$$T_k = T_t + T_s \quad (5)$$

T_k	Konsentrasjonstid [min]
T_t	Tilrenningstid, strømningstid på overflaten [min]
T_s	Strømningstid i ledning [min]

Strømningstiden i ledning beregnes ved formel 6 (Norsk Vann, 2014):

$$T_s = \frac{L}{v} \quad (6)$$

L	Strømningslengde [m]
v	Vannhastighet [m/s]

Vannhastigheten antas gjerne som en verdi på 1,5 – 2 m/s. Antagelsen skal deretter etterprøves for å kunne validere antagelsen. Strømningstiden på overflaten T_t kan blant annet bli estimert ved hjelp av monogrammer. Mannings formel kan også benyttes for å estimere vannhastigheten på overflatevannet der strømningslengde og helning er identifisert (Norsk Vann, 2014).

2.7.4 Klimafaktor

I fremtiden er det ventet mer frekvente og ekstreme nedbørhendelser, som videre øker dimensjonerende overvannsmengdene. For å ta hensyn til økt vannføring benyttes klimafaktor K_f . Klimafaktoren multipliseres med dagens dimensjonerende vannmengde for å estimere prosentvis økning i vannføringen. (se formel 3 rasjonell metode). Ved utarbeidelse av en klimafaktor er det ulike metoder og kriterier som kan bli brukt. Forskjellige land og kommuner opererer med ulike verdier. Normalt sett ligger den i Norge på mellom 1,2 – 1,5 (COWI, 2014). Ved dimensjonering av overvannsystemer har Sandnes Kommune et 20% økt påslagskrav for IVF-kurvene. Dette vil tilsvare klimafaktor på 1,2 (Sandnes Kommune, 2015a).

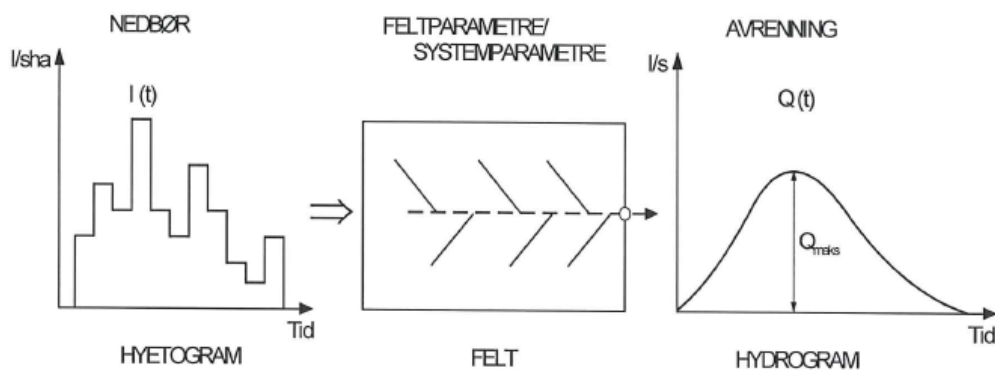
2.8 Avrenningsmodeller/Matematiske modeller/EDB-verktøy

En modell har hensikten å beskrive et system fra virkeligheten. For en hydrologisk-hydraulisk modell vil hensikten være å etterligne og beskrive responsen systemet gir for et nedbørfelt med tilhørende overvannssystem ved ulike nedbørhendelser (Butler og Davies, 2011). Den hydrologisk-hydrauliske modellen baserer seg på inn- og utdata, og matematiske ligninger som beskriver sammenhenger i systemet (Thorolfsson og Matheussen, 2005).

En hydrologisk-hydraulisk modell kan blant annet benyttes i forbindelse med nybygg av anlegg og simulering av eksisterende anlegg. Ved oppføring av nytt anlegg kan modellen bestemme de fysiske komponentene før byggestart, slik at man tilfredsstiller krav som er satt. Ved simulering av eksisterende anlegg foreligger allerede de fysiske komponentene, og videre analyse vil kunne identifisere hvordan systemet responderer på ulike nedbørhendelser. I tillegg er det mulighet for å kartlegge parameterne som er mest sensitive ved en eventuell endring (Butler og Davies, 2011). Eksempelvis kan endring av impermeable flater ved utbygging, påvirke vannføringen i systemet i høy grad.

En av fordelene ved bruk av matematiske hydrauliske modeller er muligheten til å kjøre beregning etter dynamisk bølgeteori. I praksis vil det si at modellen blant annet tar hensyn til oppstuvning i ledningsnett, noe som er en begrensende faktor i manuelle beregninger. Den rasjonelle metode anser det aktuelle

avrenningsområdet som ensartet med konstant nedbørintensitet og gjennomsnittlig avrenningskoeffisient, hvorimot EDB-modeller tar hensyn til endring av nedbørintensitet og avrenningskoeffisient over tid og rom (Lindholm, *et al.*, 2008). EDB-modeller oppnår en bedre tilnærming til virkeligheten, men det vil alltid være knyttet usikkerhet til resultatet. Modellen vil alltid være en simplifikasjon av den virkelige verden. Figur 14 viser hvordan nedbørsdata blir omgjort til avrenningsdata gjennom en hydrologisk-hydraulisk modell. Nedbørsdataen blir skrives til et hyetogram, som videre samhandler med feltparametere i modellen. Til slutt vil foreligger et hydrogram som viser avrenningen for feltet.



Figur 14: Omdanning av regnhyetogram til avrenning (Lindholm, *et al.*, 2008).

2.9 ArcGIS

ArcGIS er et EDB-verktøy som baserer seg på geografisk informasjonssystem (GIS). Verktøyet er utviklet av ESRI (Environmental Systems Research Institute) (ESRI, 2004). ArcGIS finnes blant annet for Desktop (PC), server, web og mobilordning. Videre består ArcGIS av flere moduler der ArcCatalog, ArcMap og ArcToolbox er mye benyttet (Strømsholm, 2017). ArcGIS har flere bruksområder (ESRI, 2004):

- Analyseverktøy
- Geoprosesseringsverktøy
- Kartproduksjon
- Visualiseringsverktøy
- Nettverkbasert løsninger for enkel deling av kart, data og analysefunksjoner

2.9.1 ArcCatalog

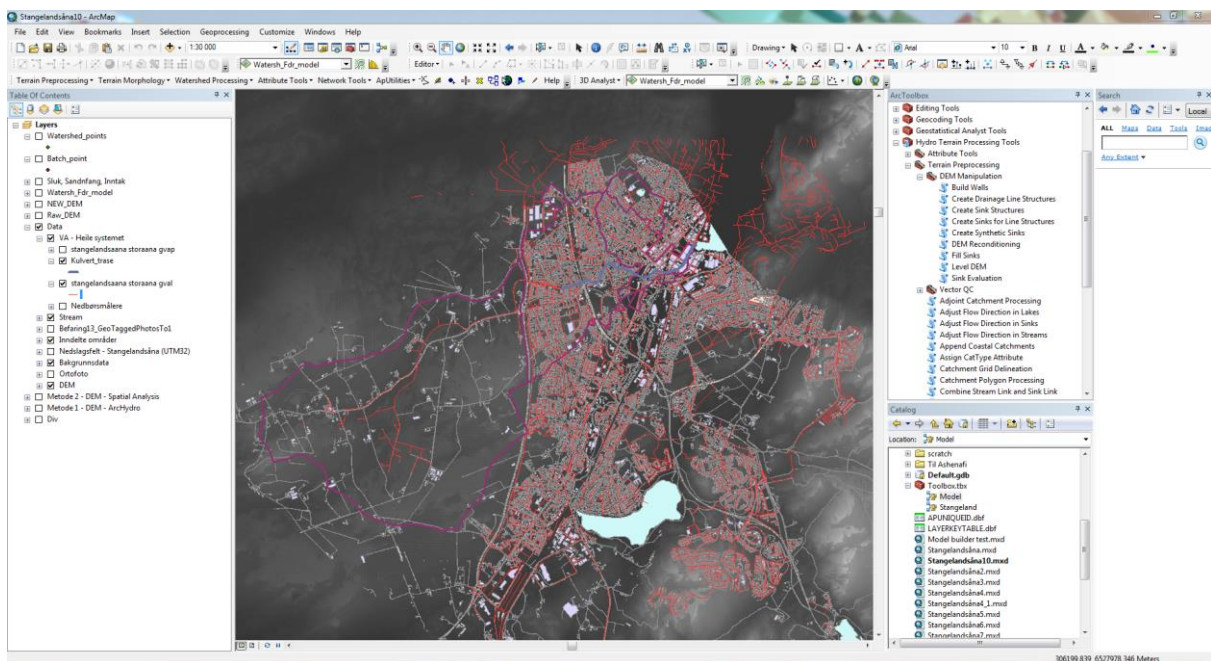
ArcCatalog benyttes til å administrere og organisere geografisk databaser på en oversiktlig og ryddig måte. Informasjon som blir lagret og organisert her er for eksempel geodatabaser, raster- og vektorfiler,

metadata, toolbox, kartgrunnlag og andre lagfiler. ESRI lister tre hovedbruksområder til ArcCatalog (ESRI, 2017c):

- Organisere GIS datafiler og ArcGIS dokumenter
- Søke og utforske filinformasjon
- Administrere lagrede filer

2.9.2 ArcMap

ArcMap er en av applikasjonene i ArcGIS-programpakken. ArcMap benyttes blant annet til å fremstille kartoppsett og for å lage eller endre datasett og kartografi. ArcMap viser geografisk informasjon som er organisert i ulike lag og geodatabaser (ESRI, 2017c). Figur 15 viser arbeidsrommet i ArcMap. Til venstre er *Table of Contents* som inneholder kart- og andre datalag som er tatt inn i modellen. I midten av arbeidsvinduet er selve kartvinduet. Til høyre er *ArcToolbox* og *ArcCatalog* med henholdsvis verktøyer og mappesystem som organiserer geodatabaser, kart- og andre GIS-datafiler.



Figur 15: Arbeidsrom i ArcMap versjon 10.5 (Skjermdump).

2.9.3 ArcToolbox

En annen applikasjon er ArcToolbox, illustrert på Figur 16. Verktøylinjen brukes for å organisere egenspesifiserte samlinger av geoprosessingsverktøy, modeller og scripter. ArcToolbox inneholder blant annet *Management Toolbox*, *Conversion Toolbox* og *Spatial Analyst Toolbox* (ESRI, 2011).



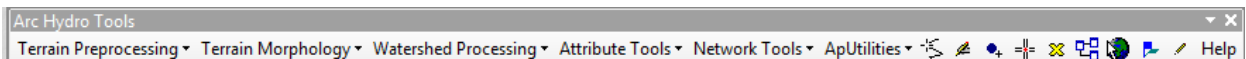
Figur 16: ArcToolbox med tilhørende verktøykasser (ESRI, 2017d).

2.9.4 Modelbuilder

Ettersom mange av prosessene i ArcMap er iterative operasjoner vil et arbeidsflytsskjema gjøre arbeidet mindre tidkrevende. I Modelbuilder har man mulighet til å bygge opp flere geoprosesseringsverktøy og knytte de mot hverandre. Arbeidsflytsskjemaet vil gi evaluering av samme uttrykk når inndata endres, slik at man får automatisert arbeidsprosessen (ESRI, 2017e).

2.9.5 Arc Hydro

Arc Hydro er en serie av datamodeller og verktøy satt sammen av *geospatial* og midlertidige data analyser. Serien kan dele inn nedslagsfelt for et vassdrag, definere og analysere hydrogeometriske nettverk samt eksportere numeriske data. Mange av kommandoene i Arc Hydro er kombinasjoner av *spatial analyst*-verktøy og geoprosesseringsverktøy. I ArcMap vises Arc Hydro som en oppgavelinje med rullemenyer, som illustrert på Figur 17 (ESRI, 2017f).



Figur 17: Verktøylinje for Arc Hydro versjon 2.0 (skjermdump).

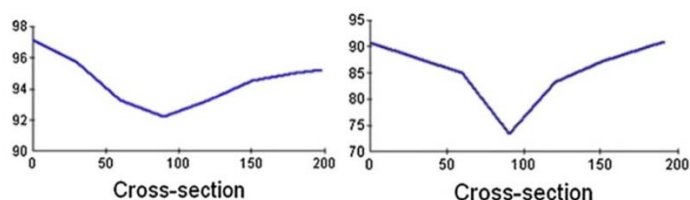
2.9.6 Verktøy

Under er det nevnt ulike verktøy som benyttes til bearbeiding av hydrologiske terrengeanalyser i urbane områder gjennom ArcMap.

AGREE DEM Reconditioning

Den digitale terrenge modellen kan modifiseres for å optimalisere strømningsretninger gjennom AGREE DEM Reconditioning. Verktøyet gjør drenslinjen i vektorform om til et raster datasett, som tilsvarer dimensjonene til rasterfilen for terrenget. Det gjør det mulig å kartlegge avstanden mellom hver enkel gridcelle til den nærmeste drenslinjen. Videre blir *MapAlgebra* benyttet til å lage et uttrykk for å senke høydene på alle gridceller langs drenslinja (Tarboton, 2012). Gjennom utvidelsen ArcGIS 3D analyst kan resultatet av DEM Reconditioning illustreres. Figur 18 viser effekten av verktøyet langs

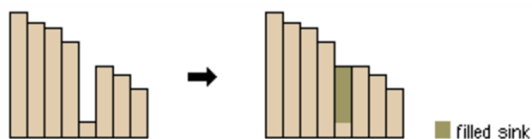
dreneringsstrømmen. Den digitale terrenngmodellen har tilegnet seg lavere kotehøyde og tverrsnittet er mer definert etter DEM Reconditioning (LI, 2014).



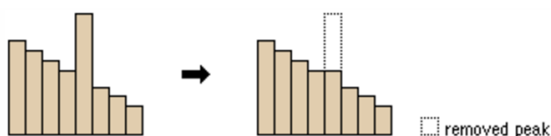
Figur 18: Tverrsnitt før og etter korrigering (LI, 2014).

Fill

For å oppnå troverdig inndeling av nedslagsfelt i et vassdrag er det viktig at den digitale terrenngmodellen ikke er usammenhengende. Dersom terrenngmodellen inneholder *sinks* (forsenkinger) eller *peaks* (topper) vil drenslinjer kunne få kontinuitetsbrudd. *Sinks* er celler der alle omliggende celler har høyere verdier, hvorimot *peaks* er celler der alle omliggende celler er lavere. Gjennom verktøyet *Fill* vil alle *sinks* og *peaks* henholdsvis heves og senkes slik at man får en sammenhengende terrenngmodell. Prinsippet er vist på Figur 19 og Figur 20. Høydeverdien på *sinken* eller *peaken* blir satt lik høydeverdiene på omliggende celler, og man får ut *depressionless* (helt sammenhengende) terrenngmodell (ESRI, 2017a).



Figur 19: Fylte forsenkinger med *Fill*-verktøyet (ESRI, 2017a).

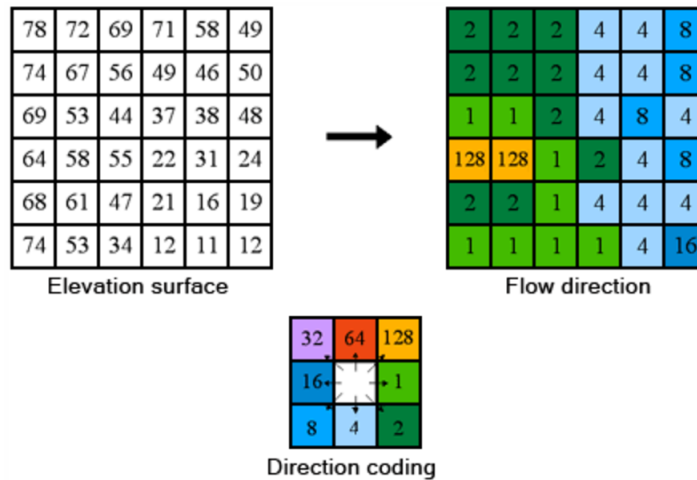


Figur 20: Senket topper med *Fill*-verktøyet (ESRI, 2017a).

Flow Direction

I *flow direction*-verktøyet er det mulig å bestemme strømningsretningen til hver enkelt celle i rasterfilen. ArcGIS benytter *D8-strømningsalgoritme* som gir åtte mulige strømningsretninger fra en celle. Strømningsretningen kan gå videre til en av de åtte omliggende cellene i *D8*-algoritmen, og blir ofte omtalt som *Single Flow*. Strømningsretning blir bestemt av verktøyet ved at høydedifferanse mellom cellene blir

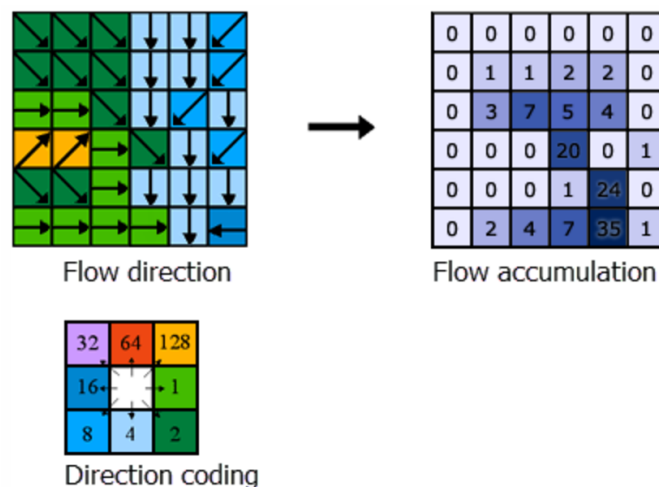
kartlagt. Cellene får deretter tallverdier som representerer differansen. Vannstrømmingen blir bestemt videre ut i fra de cellene med brattest eller størst fall fra celle til celle, som vist på Figur 21 (ESRI, 2017h).



Figur 21: Tallfesting av høydedifferanser mellom celler (ESRI, 2017h).

Flow Accumulation

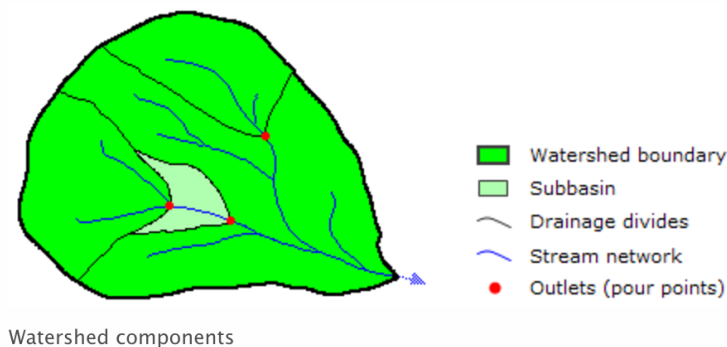
Beregning av strømningsakkumulering utføres ved hjelp av verktøyet *Flow Accumulation*. Verktøyet basere seg på strømningsretningen og beregner antall celler som strømmer til hver enkel nedstrøms rastercelle. Figur 22 illustrerer hvordan strømningsretningen til venstre side blir omgjort til akkumuleringsraster ved beregning av antall celler som strømmer videre til neste celle til høyre side. Nederst illustreres farge- og retningskode som dreneringslinjen kan styres til (ESRI, 2017g).



Figur 22: Flow accumulation (ESRI, 2017g).

Watershed

Watershed-verktøyet blir brukt for å finne nedslagsfeltet til et område. Verktøyet oppretter en raster med polygoner av nedslagsfeltene, med bakgrunn i strømningsretningen fra *Flow Direction* og en definert minimumsverdi av cellenummer som skal utgjøre en drenslinje. Prinsippet til verktøyet illustrert på Figur 23. Inndelingen av nedslagsfeltene benytter definerte utløpspunkt, kallet *pour points*. Punktene vil være laveste punkt langs grenselinjen til nedslagsfeltet for et naturlig felt (ESRI, 2017b).



Figur 23: Hvordan watershed-verktøyet fungerer(ESRI, 2017b).

2.10 SWMM

Storm Water Management Model (SWMM) er en hydrologisk-hydraulisk simuleringsmodell, utviklet av United States Environmental Protection Agency (EPA). Simuleringsmodellen oppdateres jevnlig, med siste store oppdatering i 2004 til versjon 5 (SWMM5). Den har også fått mindre oppdateringer i ettertid (Butler og Davies, 2011, United States Environmental Protection Agency, 2016). Kildekoden er åpen og ligger ute på EPAs nettsider (Butler og Davies, 2011).

Avrenningsdelen i SWMM baserer seg på en samling av definerte delfelt eller nedslagsfelt med tilknyttet nedbørhendelser. Routing-delen transporterer overvannet som blir generert gjennom et overvannssystem av ledninger, kanaler, lagringsenheter, vannbehandlingsenheter, pumper og regulatorer. Modellen beregner overvannsmengde fra hvert delfelt, samt hastighet og dybde på vannet i hver ledning per tidssteg. Beregningene kan SWMM gjøre enten for enkeltstående nedbørhendelser, eller for flere nedbørhendelser over en lengre periode (kontinuerlig) (Rossman, 2015).

2.10.1 Modellkomponenter

Delfelt (*Subcatchments*)

Egenskaper til landareal samt aktivitetsutvikling og bruk av område blir beskrevet i modellkomponenten «delfelt». Delfeltene beskriver de egenskapene som påvirker hydrologien i området. Områdene blir definert av utslippspunkt som er mest nedstrøms området. Utslippspunktene er ofte noder i avløpssystemet, eller hvor to nedslagsfelt møtes. Det skilles mellom nedslagsfelt med permeable og/eller impermeable flater. I permeable delfelt vil overflatevann infiltrere ned i grunnen hvorimot impermeable delfelt styrer all overflateavrenningen til inntak i avløpssystemet. Delfeltene må ta hensyn til følgende parametere i SWMM (Rossman, 2015):

- Delfeltets areal
- Karakteristisk bredde
- Helning på overflate
- Andel impermeable flater i prosent
- Friksjonskoeffisient for permeable og impermeable flater
- Grop-magasinerings for permeable og impermeable flater
- Prosentvis andel impermeable flater uten grop-magasinerings
- Infiltrasjonslikninger

Noder (*Nodes*)

Noder blir delt inn i tre forskjellige kategorier i SWMM, 1) kumpunkt (*Junction nodes*), 2) utløpspunkt (*Outfall nodes*), og 3) overløpspunkt (*Flow Divider nodes*). Kumpunkt er noder i avløpssystemet der ledninger møtes. De kan representere både fysiske komponenter som kummer, eller virtuelle punkt der ledninger får vinkelendringer. I kumpunkt er det mulig å legge inn vannføring inn i avløpssystemet. Ved å benytte *surcharge* tillater modellen magasinerings over kum som omsider føres inn i avløpssystemet igjen når kapasiteten er tilstrekkelig (Rossman, 2015).

Utløpspunkt er siste punkt nedstrøms i systemet, når *Dynamic Wave Flow routing* er benyttet. Dersom annen form for routing er benyttet vil utløpspunktet fungere som en vanlig kumpunkt. Det er også mulig å la avrenning fra systemet strømme til en tilhørende overflate for et delfelt. Overløpspunkt er noder i avløpssystemet der vannstrømning kan ledes inn til utpekte ledninger. I SWMM er overløpspunkt begrenset til å bare kunne ha to ledninger som fører vannstrømmen videre. Overløpspunktene fungerer

bare under *Steady Flow* og *Kinematic Wave routing* og vil fungere som et vanlig kumpunkt dersom *Dynamic wave routing* blir benyttet. Andre viktige parametere som inngår for noder er (Rossman, 2015):

- Høyde på innvending bunn
- Maksimal dybde på kum
- Magasineringsmulighet over kum
- Ledningslengde
- Ledningsform og dimensjon
- Friksjonskoeffisient i ledning
- Måleenhet
- Routing-metode
- Pumpekarateristikk

Ledninger (Links)

Ledninger eller rør blir brukt for å transportere vann i avløpsnett fra node til node. Ledningsgeometrien bestemmes på grunnlag av et variert utvalg av former for åpne og lukkede kanaler. For åpne kanaler er geometriene rektangel og trapes samt egendefinerte tverrsnitt mye brukt og for lukkede systemer er sirkulære ledninger og elliptiske kulverter ofte benyttet (Rossman, 2015).

Mannings formel benyttes ved simuleringer av hydraulisk aktivitet i ledningsnett av SWMM. Det hydrauliske systemet uttrykker forholdet mellom strømmingen Q , areal på tverrsnitt A , hydraulisk radius R , og helning S i delvis fylte lukkede ledninger og i åpne kanaler. Formelen er vist i formel 7 (Rossman, 2015):

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Q	Vannføring
A	Tverrsnittsareal
R	Hydraulisk radius
S	Helning
n	Mannings ruhetskoeffisient

Dersom det oppstår trykk i ledningen på grunn av full ledning eller trykkøkingsanlegg vil Mannings formel byttes ut med Hazen-Williams eller Darcy-Weisbach sine formler i SWMM-modellen. Formlene er henholdsvis vist i formel 8 og 9.

$$Q = \sqrt{\frac{8g}{f}} * A * R^{\frac{1}{2}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Q	Vannføring
A	Tverrsnittsareal
R	Hydraulisk radius
S	Helning
g	Tyngdeakselerasjon
f	Darcy-Weisbachs friksjonsfaktor

$$Q = 0,849 * C * A * R^{0,63} * S^{0,54} \quad (9)$$

Q	Vannføring
A	Tverrsnittsareal
R	Hydraulisk radius
S	Helning
C	Hazen-Williams C-faktor

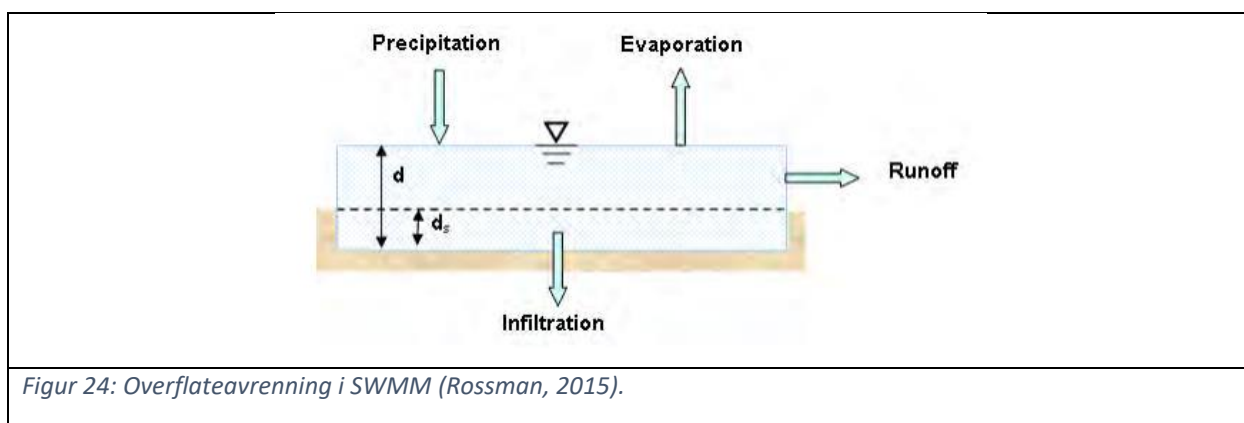
Det er også mulig å modellere lekkasje fra ledninger i millimeter per time. Dersom kinematisk bølgestrømning eller stabil strømning er valgt som routingmetode, vil helningen S være beskrevet som helningen til ledningstraseen. Dersom dynamisk bølge routing er valgt vil helningen S være beskrevet som tapshøyde per lengde. Andre egenskaper som må tilegnes ledningene er (Rossman, 2015):

- Navn på inn- og utløpspunkt
- Høyde over havet ved inn- og utløpspunkt
- Ledningslengde
- Mannings ruhetskoeffisient
- Geometri på ledningstversnitt
- Friksjonstap ved inn- og utløp.

2.10.2 Hydrologiske komponenter

Overflateavrenning

Hvert nedslagsfelt i SWMM-modellen vil fungere som et ikke-lineært reservoar, som vist på Figur 24. Tilsiget til nedslagsfeltet kommer fra nedbørhendelser og tilknyttede nedslagsfelt som ligger oppstrøms området. Utløp i reservoaret vil blant annet være infiltrasjon, fordampning og overflateavrenning. Videre vil grop-magsinering til overflaten bestemme oppstuvingskapasiteten til feltet. Dersom det blir tilført vannmengder d større enn kapasiteten til grop-magasineringsen d_s vil man få overflateavrenning Q . Vannstanden for nedslagsfeltet blir kontinuerlig behandlet over tid ved numerisk løsning av vannbalanseligningen for nedslagsfeltet (Rossman, 2015).



Figur 24: Overflateavrenning i SWMM (Rossman, 2015).

Nedbørmåler (Rain gauges)

Nedbørdata kan bli hentet inn i modellen fra nedbørmålere i vassdraget. Nedbørdataen kan enten være en egendefinert tidsserie eller bli hentet fra ekstern kilde. Dataene inneholder som regel følgende egenskaper (Rossman, 2015):

- Type nedbørdata (for eksempel intensitet, volum, kumulativt volum)
- Registrert tidsintervall (for eksempel timebasis, hver kvarter eller lignende)
- Datakilde (for eksempel egendefinert tidsserie eller ekstern fil)
- Navn på datakilde

Infiltrasjon (infiltration)

SWMM benytter seg av fem forskjellige alternativer for å simulere infiltrasjonen i modellen. I tillegg er det mulig å legge til varierende fordampningsverdier og grunnvannstand for å ta hensyn til sesongvariasjoner i modellen. De forskjellige alternativene for å simulere infiltrasjon i modellen er (Rossman, 2015):

- Hortons metode
- Modifisert Hortons metode
- Green-Ampt metode
- Modifisert Green-Ampt metode
- Curve Number metode

Fordampning (*Evaporation*)

Dersom SWMM skal ta hensyn til fordampning må stillestående vannflater, vannflater i åpne kanaler og andre vannoverflater tilegnes spesifisert fordampningsdata. Fordampningsdata som mates inn i modellen vil være potensiell fordampning, da virkelig verdi av fordampning vil være avhengig av vann tilgjengelig i modellen. Fordampningsdata som mates inn i modellen kan være i form av (Rossman, 2015):

- En konstant verdi
- Et sett med gjennomsnittlige månedsverdier
- En egendefinert tidsserie med verdier
- Verdier beregnet fra dagstemperatur
- Direkte avlesning av fordampningsdata fra ekstern fil

Routing av vannet (*Flow Routing*)

I ledninger bruker SWMM to ligninger for å bestemme strømming, bevaring av masse og momentligningen for gradvis varierende, ustødig strømming. De to likningene blir også omtalt som *Saint Venants* likninger. Alle routing-alternativene bruker Mannings formel for delvis fylte ledninger og åpne kanaler, og Hazen-Williams eller Darcy Weisbach for ledninger under trykk. SWMM gir mulighet til å benytte tre forskjellige variasjoner av strømningsformlene (Rossman, 2015):

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

Kinematisk wave routing tar for seg kontinuitetsligninger sammen med en forenklet form av momentligninger i hver ledning i modellen. Her antas helningsgradienten på overflaten til vannet er lik helningsgradienten på ledningen. I Kinematic Wave Routing har strømmingen og areal mulighet til å variere både i rom og tid. Dette kan resultere i forsinket og dempet hydrogram da strømmingen blir rutet gjennom systemet. Ulempen med Kinematic Wave Routing er at routingene ikke fanger opp

oppstuvningseffekt, tap ved inn- og utløp samt at routing-metoden krever et ledningsnett bygd opp på trestrukturprinsipp *dendritic network* (Rossman, 2015).

Formelen for Kinematic Wave routing er gitt ved henholdsvis momentligningen formel 10, og kontinuitetsligningen formel 11 (Butler og Davies, 2011):

Kontinuitetslikningen:

$$\frac{\delta Q}{\delta x} + \frac{\delta A}{\delta t} = 0 \quad (10)$$

Q	Vannføring
x	Avstand
A	Areal vannføringstversnitt
t	Tid

Momentlikning for kinematisk wave routing:

$$S_f = S_o - \frac{\delta y}{\delta x} - \frac{v}{g} * \frac{\delta v}{\delta x} \quad (11)$$

S_f	Friksjonshelning
S_o	Bunnhelning
y	Strømningsdybde
x	Helning
v	Hastighet
g	Tyngdeakselerasjon

Rainfall dependant inflow and infiltration (RDII)

Overvann som infiltrerer avløpsnettets kan modelleres gjennom RDII (*Rainfall-Dependent Infiltration and infiltration*) i SWMM. RDII modelleres for en gitt nedbørhendelse ved å definere kort, medium og lang strømningsrespons for hver periode av nedbørhendelsen (Rossman, 2015).

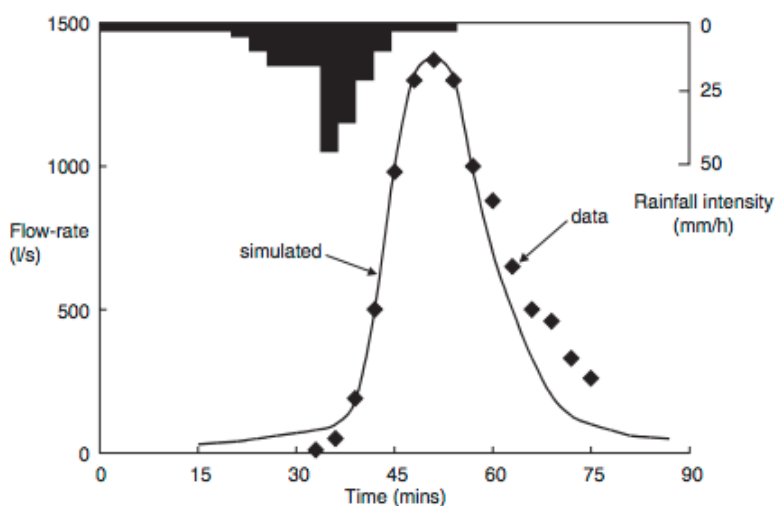
Oppstuvning og trykk (*Pounding and Pressuriazation*)

Det er to alternativer for oppstuvning i SWMM. Et alternativ er å la vannvolum som overstiger kapasiteten til systemet blir fjernet fra modellen. Det andre alternativet er å la vannvolumet som overgår kapasiteten til systemet bli lagret over noder i systemet, og deretter la vannvolumet gå ned i systemet igjen når kapasiteten blir tilstrekkelig. Oppstuvingsalternativene gjelder også for ledninger under trykk (Rossman, 2015).

2.10.3 Kalibrering og verifikasjon

Ved kalibrering er det ønsket å teste modellen mot et spenn av verdier for å finne ut hvilken av verdiene som gir mest mulig virkelighetsnært resultat. Kalibrering gjøres gjerne opp mot mange nedslagsfelt, ved ulike avrennings situasjoner for å sørge for tilstrekkelig nøyaktighet. Det er ulike måter å kalibrere på, som alle innehar ulike former for usikkerhet. Blant annet kan kalibrering utføres ved å bruke manuelle kalibreringsmetoder som eksempelvis prøve-og-feile-teknikk eller automatisk kalibrering med valg av optimaliserings algoritmer (Butler og Davies, 2011).

Verifisering av modellen å se om modellen greier å reprodusere kjente datasett, som for eksempel målt vannføring fra en avløpsmåler etter den er kalibrert. En modell vil bare være verifisert for det spesifiserte området samt de inngangsdataene den i utgangspunktet er kalibrert opp mot. Figur 25 illustrerer verifisering av modellen der sammenligning mellom målte og simulerte verdier utføres (Butler og Davies, 2011).



Figur 25: Modell verifisering (Butler og Davies, 2011).

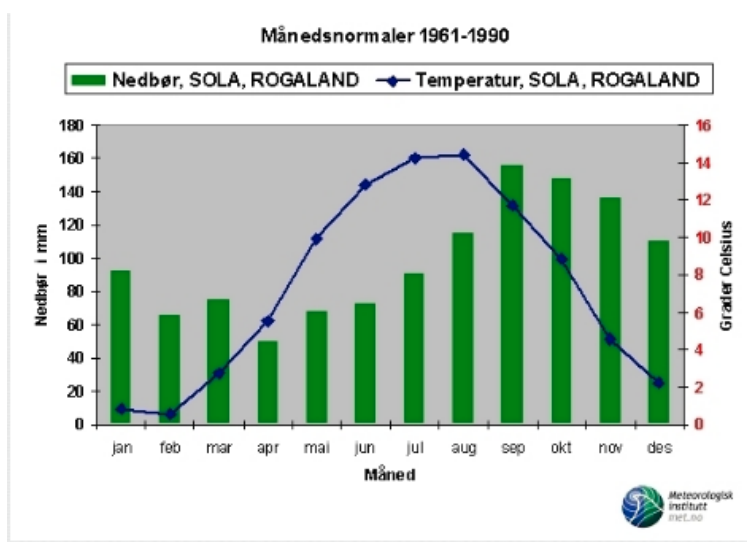
3 Prosjektområdet

3.1 Sandnes

Sandnes Kommune ligger i Rogaland fylke sør for Stavanger, med et bysenter som ligger innerst i Gandsfjorden. Kommunen hadde 74.820 innbyggere i 2016. Dette gjør kommunen til landets 8. største, og byen Sandnes til Norges 7. største (Sandnes Kommune, 2016). Totalt sett har regionen rundt 300.000 innbyggere. Sandnes opplever en sterk befolkningsvekst, en av de høyeste i landet, og det er forventet at veksten skal fortsette. Befolknings- og tilflytningsveksten vil gi fortetting og øke utnyttelsesgraden av eksisterende byområde. Fortetningen prioriteres og dirigeres i retning Sandnes Øst. Slik blir nedbygging av eksisterende landbruksarealer og byspredning unngått (Sandnes Kommune, 2015b).

3.2 Lokalklima i Sandnes

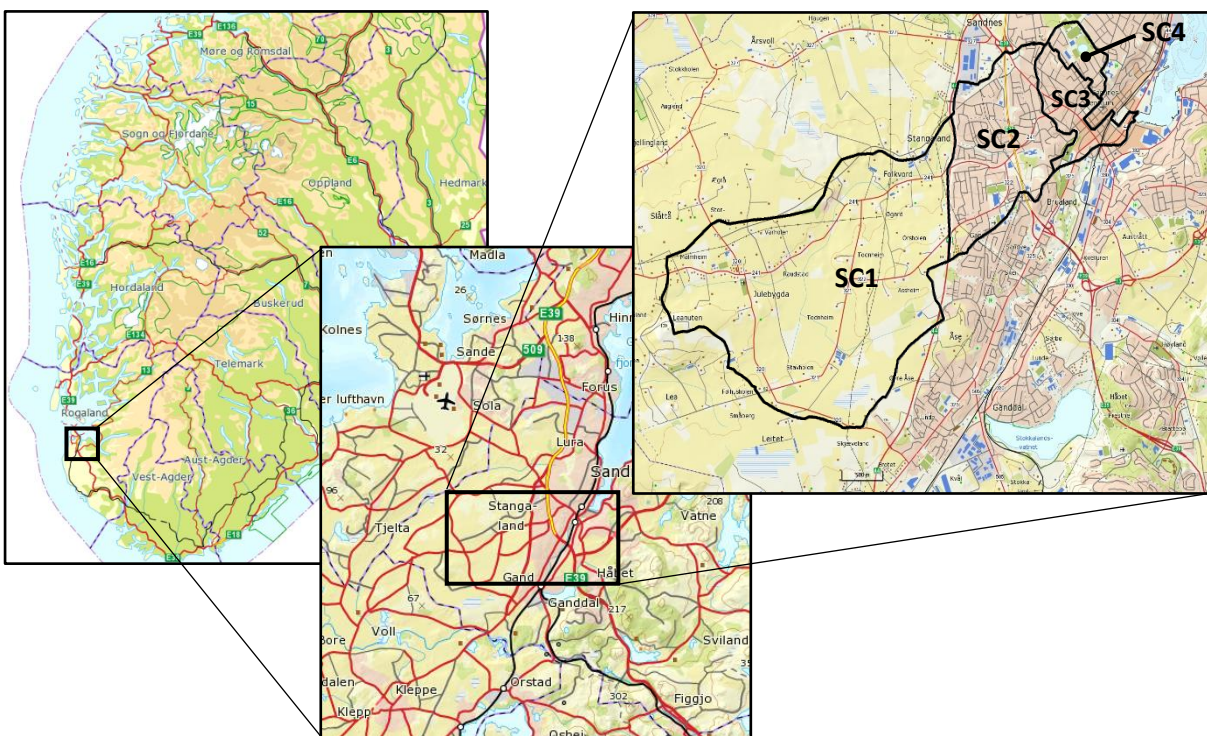
Sandnes er preget av et kystnært vestlandsklima, der høye fjell og hav påvirker klimaet i stor grad. Figur 26 viser månedsnormaler med henholdsvis nedbør og temperatur i perioden 1961-1990 for målestasjonen på Sola som ligger rundt 7 km fra Sandnes (Dannevig, 2009). Sammenlignet med resten av Norge kan Rogaland, hvor Sandnes befinner seg, beskrives som varmt og fuktig. Det er stor variasjon i årlig temperaturen. I 2016 var gjennomsnittstemperaturen 4,0°C. På årsbasis er det 1500-2000 mm nedbør, som dannes av front- og ortografisk nedbørhendinger. Også vindforholdene varierer stort i Rogaland. Sommeren bringer ofte med seg markante vindstyrker (Meteorologisk Institutt, u.a., Yr, 2017c, Dannevig, 2009).



Figur 26: Nedbør og temperatur for målestasjon i Sola (Dannevig, 2009).

3.3 Nedbørfeltet Stangelsåna vassdrag

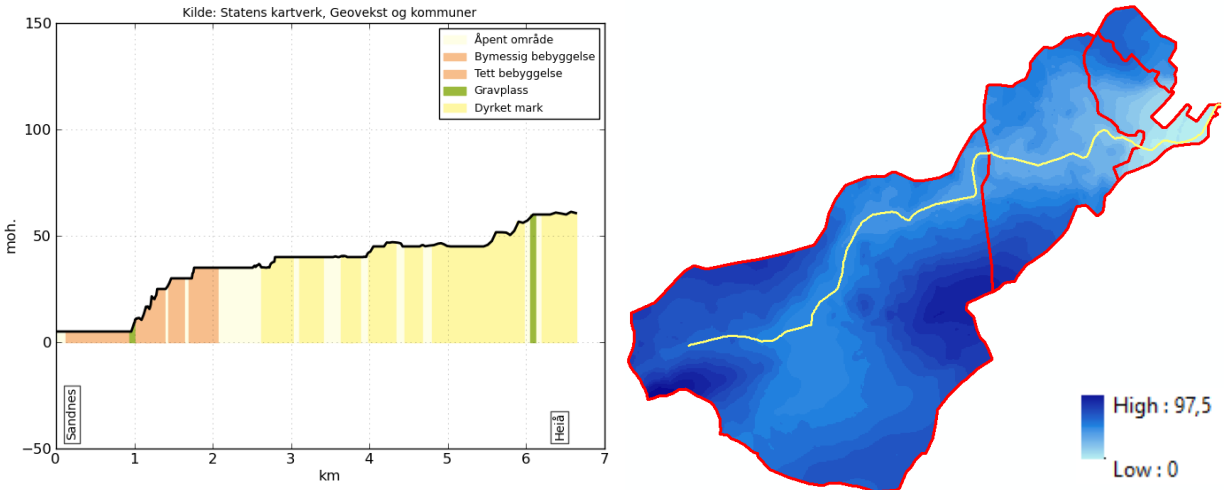
Nedbørfeltet til Stangelsåna er langstrakt, og følger kanalens strømningsretning fra Julebygda sørvest til utløpet i Gjestehavna i Sandnes Sentrum nordøst, som Figur 27 illustrerer. Totalt tilsigsareal summerer seg til ca. 9,63 km², der det naturlige nedslagsfeltet utgjør om lag 9,51 km².



Figur 27: Vassdragets lokasjon Kartverket (2017).

3.4 Landtopografi

Nedbørfeltets topografi preges generelt av flatt landskap med brå endring av helningen enkelte steder. Sørvest i vassdraget, er terrenget flatt. Her finnes vassdragets høyeste punkt på 97,5 moh. Terrenget heller slakt ned mot bebyggelsen lengre øst i feltet, med unntak av et bratt parti på veg ned mot det lavtliggende og flate sentrumsområdet. Lengdeprofil og høydekart av landtopografien er illustrert henholdsvis til venstre og høyre på Figur 28. Gul linje på høydekartet viser til lengdeprofilets trasé, som følger vassdragets kanal og kulvert til nedstrøms utløp.



Figur 28: Venstre: Lengdeprofil (Kartverket, 2017). Høyre: Høydekart (Skjermdump).

3.4.1 Subcatchment 1 – SC1

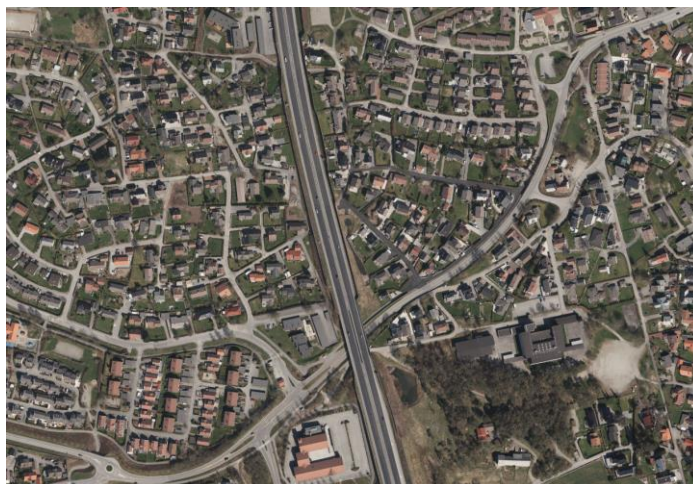
Som Figur 27 illustrerer er vassdraget delt inn i flere delområder, basert på området karakterisering. Delområdet SC1 som ligger mest oppstrøm i nedbørfeltet, kan karakteristres som flatt og landlig. Øverste og laveste punkt i delfeltet ligger på henholdsvis 97,5 og 35 moh. Arealbruket til SC1 domineres av dyrket mark og jordbruksarealer. Samtlige flater er av permeable karakter, med unntak av en lav andel veg og hustak. Bebyggelsen er spredt og består i hovedsak av gårder og bygg tilknyttet gårdsbruk. I tillegg er det enkelte forekomster av mindre boligfelt. Figur 29 viser et ortofoto samt landskapsbilde for å synliggjøre karakteristikken for området. Delområdet kommer til å forbli landbruksområde i årene framover, da befolknings- og byvekst vil bli rettet mot Sandnes Øst. Området er det største av alle delområdene i nedbørfeltet.



Figur 29: Venstre: Ortofoto av SC1 (Kartverket, 2017). Høyre: Landskapsbildet av SC1 (Google, 2017).

3.4.2 Subcatchment 2 – SC2

Feltet nedstrøms SC1 er kalt SC2 og grenser til SC1 i vest ved Rv. 44, og til SC4 i øst der området kan sies å gå over til bykjerne. Øvre del av delfeltet er flatt, med en svak helning mot sentrum. Nedre del av området er helningen større mot sentrumsområdet. Helningen er relativt moderat opp mot de nordlige og sørlige «dalsidene» av delfeltet. SC2 er delfeltet med størst høydeforskjell, med høyeste og laveste punkt på henholdsvis 80 og 5 moh. Majoriteten av bebyggelsen i SC2 er rekkehus og eneboliger med tilhørende hageareal med enkelte store kultur- og næringsbygg. I tillegg befinner det seg fotballbaner og et par åkrer i delområdet. Av nevneverdige kommunikasjonsårer ligger Rv. 44 helt vest i delfeltet, i tillegg til E39 som skjærer midt gjennom SC2 fra sør til nord. Delfeltet kan med andre ord karakteriseres som relativt grønt, med en moderat grad av impermeable flater. Figur 30 viser et ortofoto av området som er karakteristisk for SC2.



Figur 30: Ortofoto av SC2 (Kartverket, 2017).

3.4.3 Subcatchment 3 – SC3

I nedre del av vassdraget finnes SC3. Delfeltet er preget av urbant miljø med høy andel impermeable flater, spesielt delområdets sørlige part og arealer i nærheten av Gjestehavna. De impermeable flatene består i hovedsak av asfalterte veg og parkeringsplasser, og store bygninger. Nord i delfeltet er bebyggelsen mer lik den i SC2, altså preget av eneboliger og rekkehus med egen hage. Nordover i SC3 stiger også helningen vesentlig, til forskjell fra det flate sentrumsområdet. Høyeste og laveste punkt er henholdsvis 60 og 0 moh. På Figur 31 viser ortofoto av de to ulike landskapsformene som preger SC3. Til venstre vises et utklipp av SC3 sin nordlige del, hvorimot høyre som viser sentrumsområdet i sør.



Figur 31: Venstre: nordlig del av SC3. Høyre: sørlig del av SC3 (Kartverket, 2017).

3.4.4 Subcatchment 4 – SC4

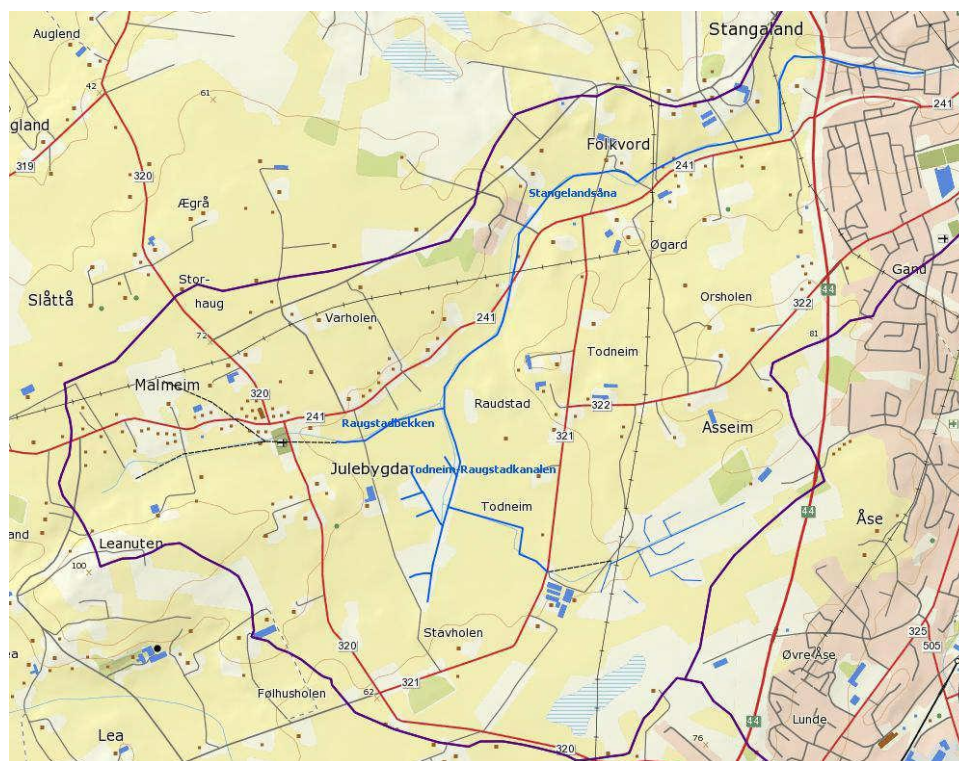
SC4 er det minste delfeltet, og grenser til SC3 i sørvest. Delfeltet har nokså like karakteristikk som nordlige del av SC3, både når det kommer til bebyggelse og helning på terrenget. Høyeste og laveste punkt ligger på respektive 60 og 11 moh. I tillegg til eneboliger er det barnehage, skole, idrettsanlegg og fotballbaner i området. Vannet Gisketjern ligger nord i området. Delfeltet er relativt grønt, med moderat grad av impermeable flater. På Figur 32 viser ortofoto av landskapsformen som preger SC4.



Figur 32: Ortofoto av SC4 (Kartverket, 2017).

3.5 Avløpsnett

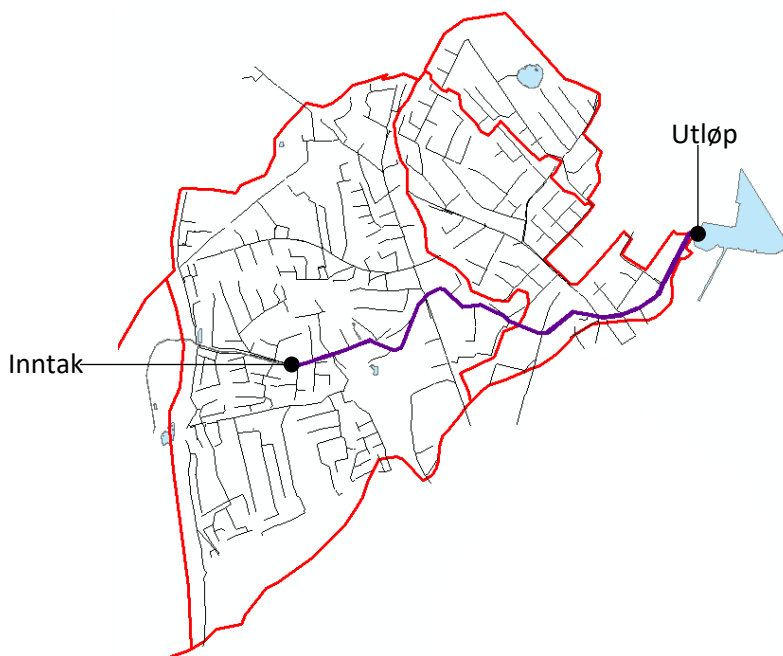
Stangelsåna består av åpne kanaler og rørlegte strekninger. I SC1 drenerer kanalen nærliggende områder, herunder Julebygda, Asseim, Folkvord, Todneim og Raudstad. Det lengste avløpsstrekket er plassert øverst i vassdraget, sørøst i SC1. Kanalen heter Todneim Raudstad-kanalen, og består i hovedsak av et forgreiningssystem med åpne kanaler, med unntak av en enkelt delstrekning som er lagt i ledninger. Forgreiningssystemet samles nedstrøms og går videre der Todneim Raudstad-kanalen møter Raudstad-kanalen. Sistnevnte er en kanal som strekker seg vestover i SC1, som vekselvis er lagt i åpen og lukket ledningstrase. Ved samlepunktet for kanalene ved Raudstad, går bekken videre mot sentrumsområdet, under Rv. 44 og ned i innløpet til kulverten ved Foren. Strekingen går i et kanalløp, med steinsatte elvekanter (Torvik og Oddane, 2015). Kart av vassdragets trasé er vist på Figur 33. Blå heltrukken linje indikerer åpen kanal og svart stiplet linje indikerer bekkeløp som er rørlagt.



Figur 33: Kart over Stangelsånas trasé (Torvik og Oddane, 2015).

Kulverten går fra Foren og under den bebygde delen av Sandnes helt frem til utløpet i Gjestehavna. Kulverten har vekslende antall parallelle løp. Antall løp varierer mellom en og tre stykk. Ledningstversnittet er rektangulært i traseen og dimensjonen varierer mellom 1,5m x 1,5m og 2,25m x 2,25m. Hensikten med kulverten er å transportere avrenning fra områder oppstrøms, i tillegg til å avlaste

avløpsnett. Kulvertens trasé er vist på Figur 34 med lilla heltrukken linje, der både inntaket og utløpet til kulverten er markert. Avløpsnettet er markert med grå linjer.

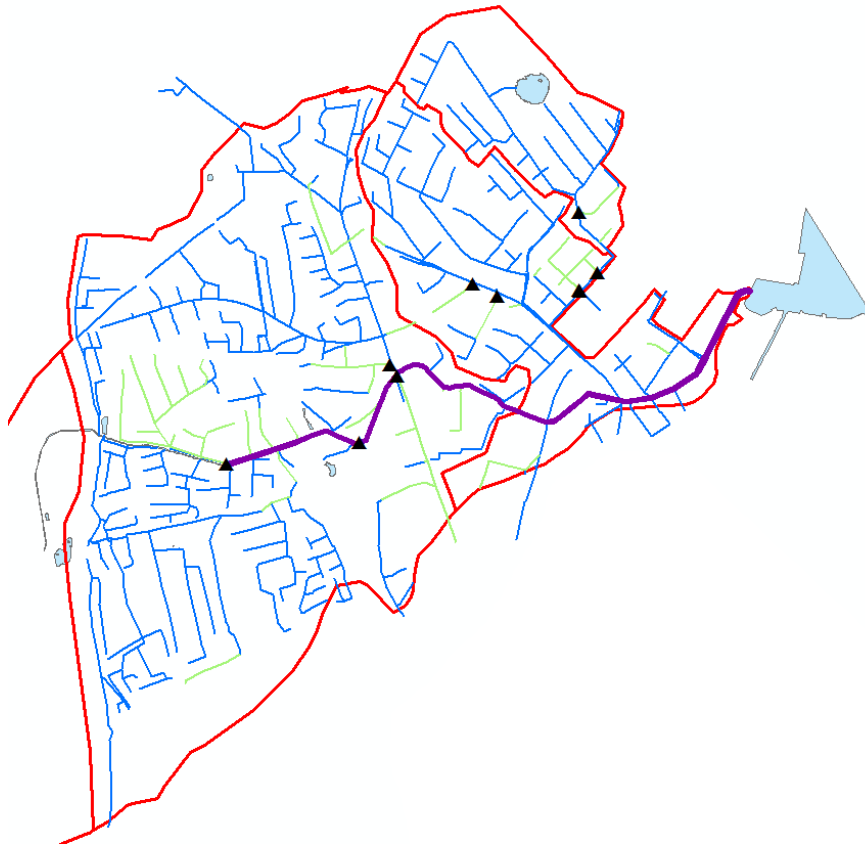


Figur 34: Kulverttrasé i vassdraget (skjermdump).

Majoriteten av avløpsnettet er separatsystem, men i enkelte områder foreligger det fellessystem. Figur 35 viser hvor separatsystem og fellessystemet befinner seg. Grønne linjer indikerer fellessystem, og blå ledninger indikerer separatsystem. Merk at prosjektet bare tar for seg avløpsnettet i delen av vassdraget med moderat til høy bebyggelse.

Det vil si i delfeltene SC2, SC3 og SC4. Overvannsnettet består av ledninger, kummer, utløp og overløp. De fleste av ledningene er av betong. I vassdraget er det totalt 16 overløp fordelt på tre ulike typer. Første type overløp er i overgangen mellom to forskjellige overvannssystem, der videreført vannmengde går til prosjektets overvannsnett, hvorimot overløpsledningen går til et annet overvannsnett. Første type overløp resulterer i at prosjektets ledningsnett avlastes ved overskridelse av kapasiteten. Den andre typen overløp er i overgangen mellom separatsystem og fellessystem, der videreført vannmengde fra fellesledningen går til spillvannsledningen og overløpet går til overvannsnett. Overløpene sin lokasjon er vist med trekantsymbol på Figur 35. De to typene overløp som er interessante for prosjektet kan man se på Figur 36. Til venstre er en overløpskum der 1 er spillvannsledning, 2 er overvannsledning or 3 er overløpet til et annet overvannssystem. Til høyre er overløpskum med strupet fellesledning, der overløpet går til overvannsnett. Bildene er hentet fra masteroppgaven til Lende (2013). Den tredje typen er de

overløpene som enten ikke er i bruk, som ikke direkte er koblet på avløpssystemet eller som ikke gir vesentlige vannmengder.



Figur 35: Overvannsnettet i vassdraget (skjermdump).



Figur 36: Venstre: overløpskum i ledningsnett. Høyre: Overløpskum med en strupet fellesledning Lende (2013).

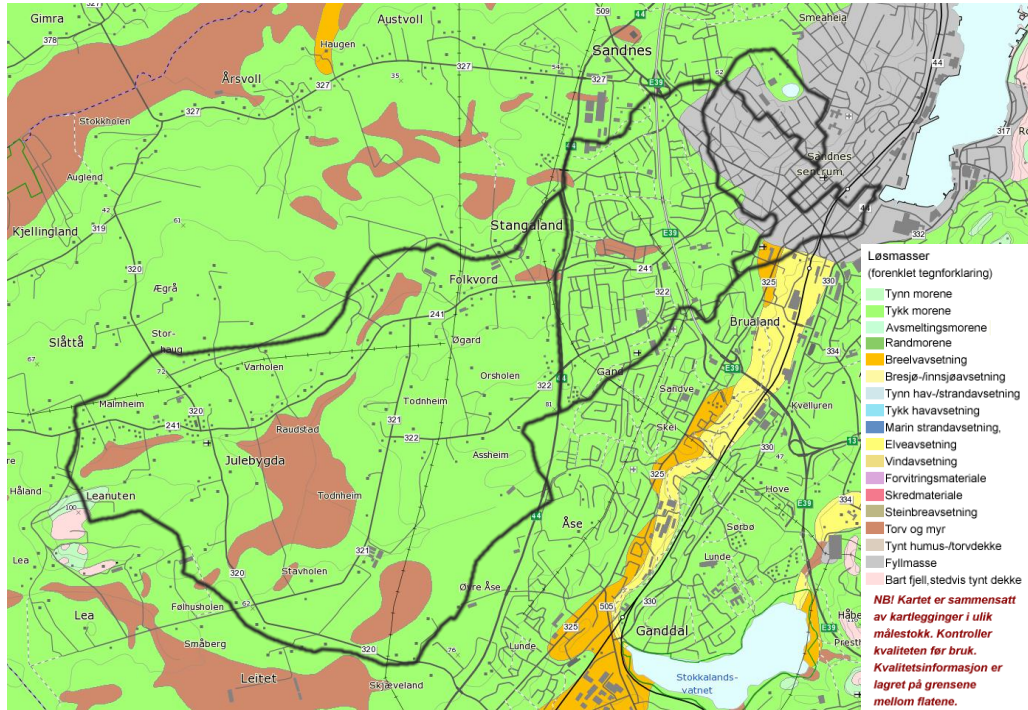
Innenfor nedbørfeltet er det lokalisert flere åpne dammer med ulik funksjon, herunder to dammer tilhørende Statens Vegvesen og Gisketjern. Sistnevnte er lokalisert i øvre del av området av SC4. Gisketjern mangler naturlig innløp og den naturlige vanntilførselen er lav (Sandnes Kommune, 2014b). Overvannsbassengene som driftes av Statens Vegvesen er lokalisert nær Rv. 44, og blir benyttet til å ta imot overvann fra vegarealene langs Rv. 44. Bassenget som er plassert ved rundkjøringen i krysset mellom Heigrevegen og Rv. 44 tar også imot avløp fra et mindre felt i SC2.

3.6 Overvannshåndtering i Sandnes

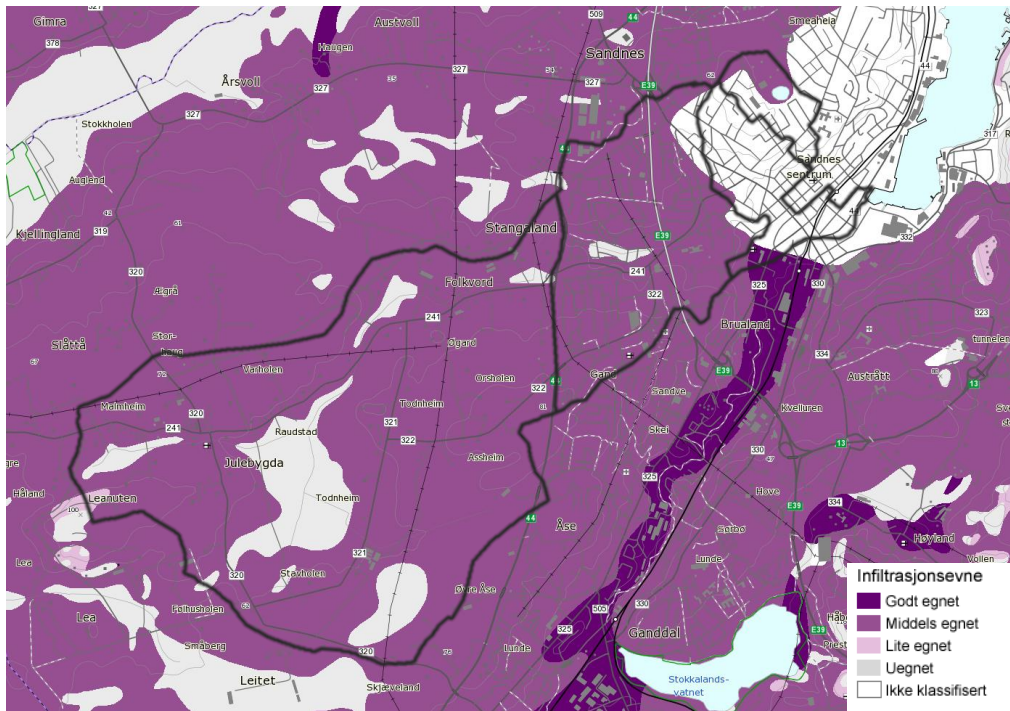
Ifølge Sandnes Kommune (2017) er det få tiltak for overvannshåndtering i nedslagsfeltet. Nye utbyggingsprosjekter får krav om å unngå økt avrenning til ledningsnett ved bruk av åpne løsninger. Sandnes Kommune oppfordrer å redusere avrenning gjennom fordrøynings- og infiltrasjonsanlegg, som blant annet har blitt installert i Langgata og på Havneparken i Sandnes sentrum. Grønne tak, lukkede rørmagasin og steinmagasin er også aktuelle løsninger. Sikre flomveger som benyttes er i hovedsak veg og sammenhengende grønne områder. Som nevnt tidligere i Kapitlet «Veiledere for Sandnes Kommune», foreligger det nasjonale og lokale VA-tekniske krav som er gjeldende for Sandnes.

3.7 Grunnforhold og løsmasser (infiltrasjonsevne)

Løsmassene i nedbørfeltet varierer lite. I de mest oppstrøms områdene av vassdraget, det vil si SC1 og SC2, er det morenemasser som dominerer. Det er også forekomster av myr- og torvområder i SC1. Ifølge NGU løsmassekart er grunnen i de nedre delene av feltet, det vil si SC3 og SC4, stort sett bare fyllmasser med unntak av noen områder med morene(NGU, 2017). Løsmassekart over vassdraget er illustrert på Figur 37. Ifølge Sandnes Kommune samsvarer ikke løsmassekartet til NGU overens med kommunens erfaringer i delfelt SC4. Delfeltet består i hovedsak bare av morenemasser, slik det kommer frem av masteroppgaven til Lende (2013).



Figur 37: Løsmassekart over Stanglandsåna vassdrag NGU (2017).



Figur 38: Kart over infiltrasjonsevne i Stanglandsåna vassdrag NGU (2017).

På Figur 38 vises NGUs kart over vassdragets infiltrasjonsevne, der infiltrasjonsevnen til store deler av SC1 og SC2 er klassifisert som middels egnet. I resterende områder innenfor SC1 og SC2, samt hovedparten av sentrumsområdene er ikke infiltrasjonsevnen kartlagt (NGU, 2017).

3.8 Måleutstyr i vassdraget

For å kalibrere SWMM-modellen er det nødvendig å ha måledata fra vassdraget. Registrerte data kan benyttes til å produsere et hydrogram som gjenspeiler observert verdi i vassdraget. Hydrogrammet er grunnlaget for kalibreringen av SWMM, der man ønsker størst mulig samsvar mellom observert hydrogram og hydrogrammet som kommer frem av simulering. Storm Aqua har satt opp to måleenheter for Stangelandsåna, en nedbørmåler og en vannmåler. Nedbørmåleren er plassert på taket av en pumpestasjon ved Rv. 44, i overgangen mellom SC1 og SC2. Avløpsmåleren er installert nedstrøms SC2, mer spesifikt i en kum nedfor Barkemølla. Plasseringen av måleutstyret er vist på Figur 39. Ettersom avløpsmåleren er installert nedstrøms SC2, vil målinger fra målepunktet bare inneholde avrenningsdata fra SC1 og SC2, men ikke fra SC3 og SC4. Målestasjon deler med andre ord vassdraget i to, der oppstrøms områder blir målt hvorimot nedstrøms området ikke inneholder målinger. Målinger fra måleutstyret blir bearbeidet og lagret i en database på Storm Aqua sin server.



Figur 39: Målestasjonenes lokasjon i nedslagsfeltet (skjermdump).

3.8.1 Nedbørmåler

Nedbørmåleren er en *Lambrecht Heated Precipitation Sensor (1518H3)*. Nedbørmåleren er plassert like ved Rv. 44, på taket av en pumpestasjon. Plassering og produktbilde er vist på Figur 40. Nedbørmåleren sender signaler til en logger automatisk. Nedbørmåleren er også oppvarmet ved hjelp av tre varmeelement som gir presis måling for temperatur ned mot -35°C . Oppvarmingen resulterer i at snø blir tatt hensyn til i målingene, og nedbørmåleren er lik utstyret som metrologisk institutt benytter. Nedbørmåleren registrerer vannmengden ved hjelp av et vippekar på 2 cm^3 . Når vippekaret er fylt opp tippes den, samtidig som det sendes en elektronisk strømpuls til en *Signalix logger*. Signalix loggeren registrerer antall pulser per minutt og sender data videre til en database gjennom mobilnettet. Lambrecht nedbørmåler med vippekar på 2 cm^3 har et måleområde mellom 0 og 10 mm/min og kan måle med en oppløsning på 0,1 mm. Vippekarene måler med en nøyaktighet på $\pm 2\%$ (Lambrecht, u.a.).



Figur 40: Venstre: nedbørmåler (Foto: Håkon Eskeland Børtveit) Høyre: produktbilde (Lambrecht, u.a.).

3.8.2 Avløpsmåler

Det er installert en ultrasonisk avløpsmåler oppstrøms Sandnes Sentrum for å måle vannføring i kulverten. Avløpsmåleren måler hastigheten og dybdenivået på oppstrøms avrenning, som sammen med måleprofilens kjente fysiske utforming gir vannføringen. Den ultrasoniske måleren er en del av et system som heter *Discharge Measuring System Q.Modul SHWP*. Systemet består videre av en *V-sensor* tilknyttet en *V-sensor converter* som overfører data til en *UnilogCom* datalogger. Den ultrasoniske måleren er forankret i toppen og bunnen av kulverten ved hjelp av en gjennomgående jernstang, og måler vannføring opp til en dybde på 1,3 meter. Dybdesensoren har et måleområde på mellom 0,04 og 1,30 m, med en

nøyaktighet på $\pm 1,2\%$ av målt verdi. Hastighetssensorens måleområde har en nedre og øvre grense på henholdsvis $-5,20$ m/s og $+5,2$ m/s. Sensoren registrerer tilbakestrømning og har en målenøyaktighet på $\pm 2\%$ av målt verdi. (SEBA HYDROMETRIE, 2016a).

Det er også installert en trykksensor for å fange opp vannføring over $1,3$ meter. Trykksensoren er en *Hydrological Sensor DS-22* fra SEMA Hydrometrie. Den måler hydrostatisk trykk med høy presisjon over den keramiske trykcellen. DS-22 trykksensor har et måleområde på $0 - 10$ m, med målenøyaktighet på $\pm 0,1\%$ ved 25°C (SEBA HYDROMETRIE, 2016b). Figur 41 viser oppsettet for vannmåleren ved kirkegården i Sandnes sentrum. Måleren er plassert nede i kulverten, og sender data til server via mobilnettet.



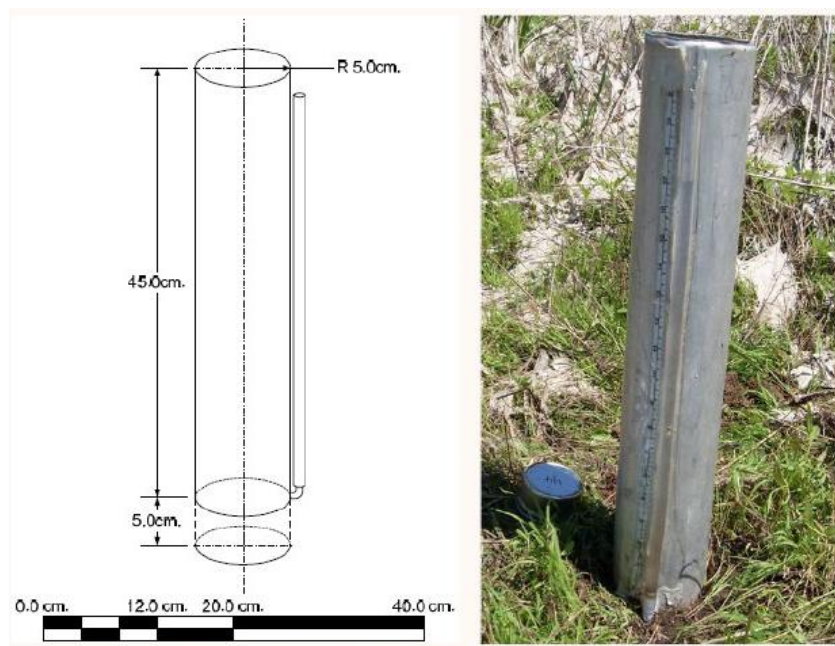
Figur 41: Venstre: innsiden av kulvert. Høyre: dataoverføring (Foto: Sigmund Wiig Petersen).

4 Infiltrasjonsmålinger og jordprøver

4.1 Modified Philip-Dunne infiltrometer

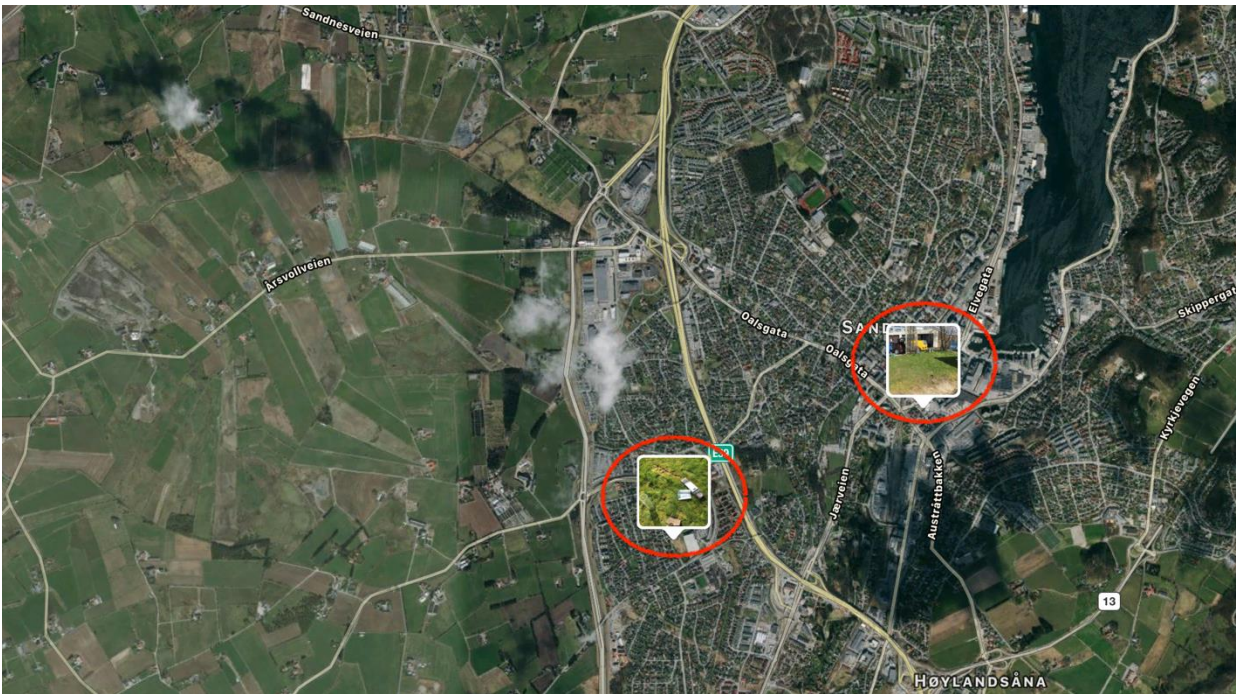
Det ble utført infiltrasjonsmålinger for å måle overflateinfiltrasjonen i analyseområdet. Modified Phillip-Dunne infiltrometer (MPD) ble benyttet. Metoden ble utviklet for å måle den hydrauliske konduktiviteten av vannmettet overflater. En av fordelene var metodens brukervennlighet med tanke på utstyr og gjennomføring. Flere målinger kunne utføres samtidig som videre ga mer representative måledata av infiltrasjonsevnen. Merk at MPD begrenser seg til å måle hydraulisk konduktivitet av de øverste 30-50 cm av jordlaget. For å måle videre nedover er det anbefalt å fjerne 30 cm av jordlaget og utføre testen på nytt (Nesting, 2007).

MPD infiltrometer består av en sylinder med lengde på rundt 50 cm og diameter lik 10 cm. Bunnen som skal ned i jordlaget er ofte spisset inn fra utsiden for at røret lettere skal grave seg ned i jordlaget. På utsiden av sylindern er det festet et måleband for å lese av vanddybden etter en gitt tid. MPD-Infiltrometer er illustrert på Figur 42 (Gulliver, Erickson og Weiss, 2010).



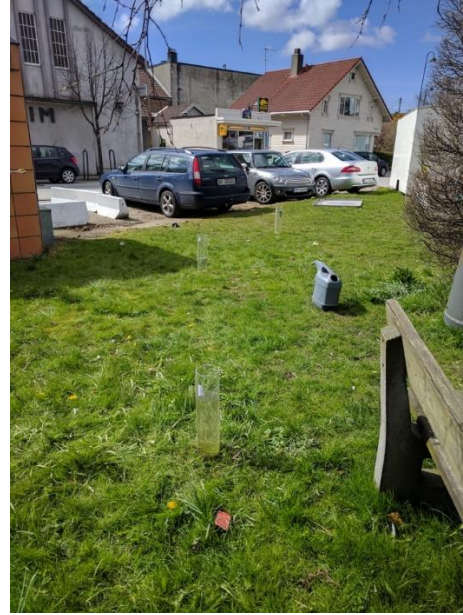
Figur 42: MDP-infiltrometer (Gulliver, Erickson og Weiss, 2010).

Det ble benyttet seks sylindere, slik at flere infiltrasjonsmålinger kunne utføres på samtidig. To lokasjoner ble peket ut til utførelsen av målingene. Lokasjonene ble valgt med hensyn på at målingene skulle være mest mulig representative for resten av vassdraget. Områdene er markert på Figur 43.



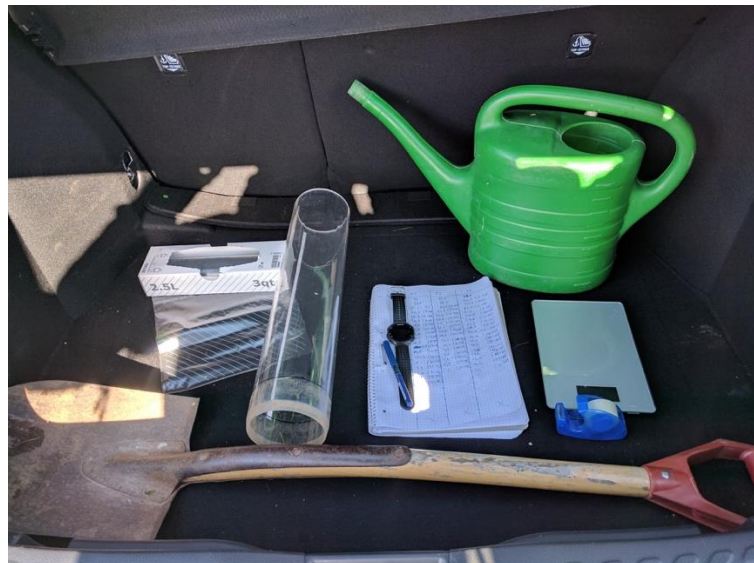
Figur 43: Lokasjoner for infiltrasjonsmåling i Sandnes (skjermdump).

En måling ble utført i området SC2, karakterisert av eneboliger med hager. Her ble det utført seks målinger på et gresstrukket dekke i et nabolag. Området vil videre omtales som område 1. Infiltrometerene ble plassert i to grupper, hver med tre sylindere. Innbyrdes avstand innad i gruppen var mellom tre og fem meter. Den andre målingen ble utført i Sandnes Sentrum, videre omtalt som område 2. Da sentrumsområdet har størst andel impermeable flater, ble infiltrasjonsmålingene gjort: 1) i en midtrabatt som skilte gang- og sykkelveg og en parkeringsplass for bensinstasjon, 2) et lite grønt areal mellom en adkomstveg og samme parkeringsplass. Figur 44 illustrerer henholdsvis oversiktsbilde over infiltrasjonsmålingene i område 1 og 2.



Figur 44: Oversiktsbilder over infiltrasjonsmålingsplasser. (Foto: Sigmund Wiig Petersen)

Ved utførelsen av selve målingen ble fremgangsmåten til Nestingen (2007) benyttet. Dette er en enkel og effektiv metode for å utføre infiltrasjonsmålinger. Metoden gir forholdsvis nøyaktig resultat. Utstyret som ble benyttet, samt MPD infiltrasjonssylindere fra en av målingene i Sandnes (27.04.17) er vist på Figur 45.



Figur 45: Venstre: MPD infiltrasjonskylindere for infiltrasjonsmålinger. Høyre: Utstyr (Foto: Håkon Eskeland Børtveit).

I det følgende er stegene i fremgangsmåten gjengitt (Nesting, 2007):

1. Plassering av sylindere ble valgt ut med tanke på å få representative verdier, unngå ledninger, store planter med rotsystem, større stener og andre objekter som kunne forstyrre den naturlige infiltrasjonen.
2. Før selve infiltrasjonsmålingen startet ble en umettet jordprøve tatt, 20 cm fra sylindere. Ved bruk av en spade ble rundt 150 g spadd opp og lagt i en plastikkpose med dobbel zip-lukking.
3. Infiltrometeret ble presset 5 cm ned i jordsmonnet, etter at steiner, løse røtter og andre mindre objekter var fjernet.
4. Sylindere ble fylt med vann til vannstanden var 40 cm. I samme øyeblikk ble stoppeklokken startet. Vannstanden ble notert hvert femte minutt.
5. Etter en time, eller når vannet var infiltrert ned i grunnen, ble sylindere fjernet. Deretter blir en mett jordprøve tatt der sylindere var plassert, med samme fremgangsmåte som i punkt 2.
6. Jordprøvene ble deretter analysert i laboratorium. Først ble deler av prøven (rundt 30 g) veid, og tørket med en temperatur lik 105°C i 96 timer. Etter tørkingen ble prøvene igjen veid, for å finne gravimetrisk vanninnhold, og senere volumetrisk vanninnhold.
7. Til slutt ble etterbehandling av dataen fra infiltrasjonsmålingene benyttet til å bestemme mett hydraulisk konduktivitet (K_{sat}). Dette ble gjort ved hjelp av et MATLAB-skript utviklet av Kim Paus etter prinsipper fra Nestingen (2007). Skriptet benytter blant annet Green-Ampt metoden og Darcy's lov for å fremstille resultatet. Resultatet gir et estimat for jordoverflatens vannmettede hydrauliske kapasitet og tensjonen i jordsmonnet.

4.1.1 Inngangsdata til MATLAB-skriptet

Volumetrisk vanninnhold var nødvendig som inngangsdata til MATLAB-skriptet, både før og etter at infiltrasjonsprøven ble foretatt. Ved å veie jordprøven før og etter tørking, som tidligere nemnt i fremgangsmåten, kunne gravimetrisk vanninnhold bestemmes med formel 12. Merk at vanninnholdet beskrives som andel vann av tørrstoff.

$$\theta_g = \frac{M_w}{M_s} * 100 \quad (12)$$

θ_g	Gravimetrisk vanninnhold [%]
M_w	Vekt av vann [g]
M_s	Vekt av tørket jordprøve [g]

Videre ble det benyttet en romdensitet for å konvertere gravimetrisk vanninnhold til volumetrisk vanninnhold, som vist i formel 13. Utregningene la til grunn en romdensitet på 1,3 g/cm³, som ligger i det nedre sjiktet for sand. Romdensiteten ble valgt på grunnlag av prøvenes innhold av silt (Brown og Wherrett, 2017).

$$\theta_v = \theta_g * \rho_b \quad (13)$$

θ_v	Volumetrisk vanninnhold [%]
ρ_b	Romdensitet [1,3 g/cm ³]

En lineær trendlinje ble benyttet for de infiltrasjonsprøvene som ble stoppet før vannstanden hadde nådd bunnen. Matlab-skriptet fungerer optimalt om det foreligger dybde- og tidsverdier for hele vannsøylen (Muthanna, 2017). Ved å opprette nye punkter langs trendlinjen som gikk til dybde null for å kompensere for manglende verdier. Trendlinjen tok utgangspunkt i siste halvdel av avlesningsdataen for å unngå urealistisk bratt infiltrasjonskurve.

4.2 Kornfordelingsanalyse

For å kartlegge vektfordelingen mellom mineralkornene i jordartstypen, ble det utført en kornfordeling ved sikting. Utføring av kornfordelingsanalyse og anslag av jordart for jordprøven, styrker sammenligningsgrunnlaget for infiltrasjonsprøvene. Sammenligningen tar utgangspunkt i standardverdier for mettet hydraulisk konduktivitet for jordarten, og sammenligne denne med målt verdi for mettet hydraulisk konduktivitet. Figur 46 viser siktemaskinen Retsch AS 200 som ble benyttet under sikteprøvene. Statens vegvesen (2014a) sin fremgangsmåte for kornfordeling ved sikting ble benyttet, og fremgangsmåten er listet opp under:

1. Både mettede og umettete prøver tatt fra samme lokasjon ble lagt sammen i en stor aluminiumskål og merket. Prøvene som ble brukt til å finne volumetrisk vanninnhold (fra infiltrasjonsmålingen) ble også benyttet.
2. Materialet som ble siktet måtte være tørt, og ble derfor tørket i et varmeskap som målte 105°C i 72 timer.
3. Deretter ble prøvene siktet ved hjelp av en siktemaskin. Det ble benyttet en siktesats på 10 minutter, og sikte størrelsene var 4,00 – 2,00 – 1,00 mm, 500 – 250 – 125 – 63 µm samt bunnskål.
4. Videre ble hver sikterest veid, og notert. Dersom det var nødvendig å foreta nye forsøk for samme jordprøve, måtte hver sikterest samles og deretter repetere forsøket.

5. Etter veiing av hver sikterest ble sikten ristet over et hvitt papir, for å kontrollere at alt av sikteresten ble med i innveilingen.
6. Dersom tapet av tørrmasse før og etter sikting var større 1% måtte siktingen utføres på nytt. Dette ble kontrollert for.
7. Kornfordelingen i prosent ble regnet ut fra separat veiing og kumulert summering av vektene for siktenerestene. Deretter ble resultatene ført inn i en kornfordelingskurve, som identifiserte prosentandelen av leire, silt og sand.
8. For jordartklassifisering ble det brukt en jordartstrekant til å bestemme jordklassetype for prøvene.



Figur 46: Siktemaskin for utførelse av sikteprøve (Foto: Sigmund Wiig Petersen).

4.3 Resultater og diskusjon av infiltrasjons- og sikteprøver

Resultatet fra sikte- og infiltrasjonsprøvene vises i henholdsvis Tabell 5 og Tabell 6. Hvert infiltrasjonsrør ble markert med en bokstav, og tallet 1 eller 2 for område. Tabell 5 og Tabell 6 viser hvilke infiltrasjonstester som ble benyttet til utregningen, med tilhørende område.

I område 1 og 2 ble gruppene plassert så tett at det var rimelig å beregne en gjennomsnittsverdi for prosentandelen av de ulike jordartene, for prøver i samme området. Resultatet viste at det ikke var mye som skilte kornfordelingen i områdene. Merk at tabellen bare viser prosentvis andel av jordartene leire, silt og sand. Med tabellen som utgangspunkt kunne jordklassetrekant benyttes for å fastslå jordprøvens jordklasse. Dette er vist i Vedlegg C.

Tabell 5: Oversikt over prosentvis andel leire, silt og sand, og resulterende jordart.

Jordart	ABCDEF1	ABCDEF2	Enhet/kilde
Leire	0	0	%
Silt	11,0	11,9	%
Sand	89,0	88,1	%
Jordart	Sand	Sand	Jordklassetrekant

Resultatene fra infiltrasjonsmålingene viser en mettet hydraulisk konduktivitet for område 1 og 2 på henholdsvis 4,93 og 7,90 cm/time. På samme måte som for jordartsklassifiseringen, ble det tatt en gjennomsnittsverdi av målingene i hvert område. Merk at i område 1 er det blitt fjernet en prøve fra gjennomsnittet på grunn av urimelig høyt vanninnhold.

Tabell 6: Oversikt over mettet hydraulisk konduktivitet for område 1 og 2.

	ABCDEF1	ABCDEF2	Enhet/kilde
$K_{sat.max} - K_{sat.arit.mid}$	9,85	9,55	cm/time
$K_{sat.arit.mid}$	4,93	7,90	cm/time
$K_{sat.arit.mid} - K_{sat.min}$	4,92	7,89	cm/time
$K_{sat.geo.mid}$	2,99	1,40	cm/time
Jordart	Sand	Sand	Jordklassetrekant

4.3.1 Identifisering av usikkerheter

Tabell 6 viser at beregningene for område 1 og 2 inneholdt henholdsvis fem og seks målinger. Det er med andre ord blitt foretatt et begrenset antall målinger, og som det fremkommer av tabellen er det stor variasjon mellom disse.

Gjennom metoden er det blitt introdusert flere usikkerheter for estimeringen av K_{sat} -verdiene. Det ble ikke gjort noen prøver for å måle densiteten til jordprøvene, og volum av jordprøven forble ukjent. Som et resultat av dette legger beregningene for volumetrisk vanninnhold til grunn en antatt romdensitet på 1,3 g/cm³ for å konvertere gravimetrisk vanninnhold til volumetrisk vanninnhold. For en av målingene ga antatt romdensitet et volumetrisk vanninnhold over 100%, eller over 1 cm³ vann/cm³ korn. Legg merke til at vanninnholdet er oppgitt som andel volum vann av andel volum tørr jord. Dette kan tyde på at 1,3 g/cm³ er større enn virkelig romdensitet, og fremgår som en systematisk feil i utregningene. Det er likevel

lagt til grunn at antatt romdensitet ikke utgjør en stor nok usikkerhet til å ikke bruke den. Dette kan begrunnes med at det i Matlab-skriptet er differansen i vanninnhold som brukes i utregningen (Paus, 2010). Videre vil veldig lave K_{sat} -verdier ikke være like sensitive for vanninnhold som høye K_{sat} -verdier (Muthanna, 2017). I tillegg viser Solheim (2017) sin sensitivitetsanalyse av jordfuktighet i Matlab-skriptet, at økende differanse i jordfuktighet gir utslag i endringer for K_{sat} -verdier for alle testede jordarter. Endringene er generelt i negativ retning. Bruk av K_{sat} videre i et dimensjoneringsgrunnlag vil være konservativt.

Det ble generelt målt høye verdier for vanninnhold i jordprøvene. En mulig grunn vil være at det fortsatt var frost i bakken ved jordprøvetaking. Sola målestasjon, målte minusgrader senest kl. 08:00 samme morgen som testene ble tatt kl. 10:30 og 14:00 (Yr, 2017b).

Det kan tenkes at jorden var delvis mettete prøvene ble tatt, da det viste seg at vanninnhold før var høyere enn vanninnhold etter, for en av MPD-sylindrene. Etter-verdien ble da erstattet med før-verdien og økt med en halv prosent for at Matlab-skriptet skulle fungere (Paus, 2010).

Det ble brukt trendlinje og ekstrapolering for få resterende tids- og dybdedata ned til dybde lik null, på grunnlag av antagelsen om at infiltrasjonen flater ut etter en gitt tid. Enkelte av målingene avsluttet etter en time. Et mer nøyaktig resultat ville bli fremstilt dersom fremgangsmåten baserte seg på å innhente tids- og dybdedata i løpet av den tiden det tar for vannsøylen å infiltrere i bakken, uten tidsbegrensinger. For at trendlinjen skulle være mer virkelighetsnær infiltrasjonsraten, ble trendlinjen laget ut fra siste halvdel av de målte verdiene. Om den ekstrapolerte linjen gir en høyere eller lavere infiltrasjonsrate vites ikke, og inngår som en usikkerhet i verdiene.

Under sikteprøven ble det liggende små jordkumper som ikke hadde løst seg opp igjen i sikten. Som et resultat av dette endte de små jordkornene på en sikt med høyere maskestørrelse enn korndiameteren. Videre førte dette til en underestimert andelen små korn.

Det er tidligere blitt gjort infiltrasjonsforsøk i Sandnes som også benyttet samme metode, MPD infiltrasjonstest. Gjennomsnittlig K_{sat} -verdi var 6,02 cm/time (Lende, 2013). Til sammenligning ligger gjennomsnittlig K_{sat} -verdi for område 1 og 2, på henholdsvis 4,93 og 7,90 cm/time. Med bakgrunn i målte K_{sat} -verdier og de store variasjonene som er observert, sett av Tabell 6, kan differansen bli sett på som liten. På grunnlag av dette anslås det at infiltrasjonsverdiene er virkelighetsnære for de områdene som målingene ble utført.

4.3.2 Vurdering av potensial for lokal infiltrasjon av overvann

Aritmetisk middel fra infiltrasjonsmålingene ble sammenlignet med litteraturverdier fra Fetter (2001) og Dagestad, Hansen og Braathen (2003). Verdiene er vist i Vedlegg C. Med utgangspunkt i USDA (2014) sin klassifisering av hydraulisk konduktivitet, ligger målte K_{sat} -verdier innenfor klassen høy. USDA sin klassifisering er også vist i Vedlegg C.

Fetter (2001) argumenter imidlertid for at aritmetisk middel kan overestimere den mettede hydrauliske konduktiviteten, og at geometrisk middel bør benyttes. MPD-forsøk som tidligere er foretatt på et regnbed har sammenlignet aritmetisk og geometrisk middel med K_{sat} -verdi fra RECARGA⁴, og resultatet samsvarte med det som tidligere er argumentert (Dalen, 2012). Sammenligning av geometrisk midlet hydraulisk konduktivitet og standardverdiene for sand, viser at målte verdier ligger under litteraturverdiene (Dagestad, Hansen og Braathen, 2003, Fetter, 2001). Det kan tenkes at andelen finere fraksjoner ble underestimert under sikteprøven. Videre klassifiseres den mettede hydrauliske konduktiviteten som moderat høy (USDA, 2014).

Til sammenligning klassifiserer NGU (2017) infiltrasjonsevnen i SC2 (område 1) og i store deler av sentrumsområdet (område 2) som henholdsvis *middels egnet*, og *ikke klassifisert*. Se Figur 38 for oversiktskart over infiltrasjonsevne. Da klassene ikke er relatert til noen verdi for K_{sat} er det vanskeliggjøres en direkte sammenligning.

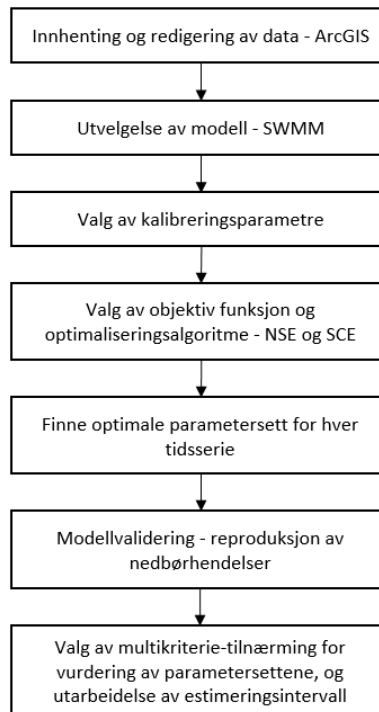
Det henvises videre til Lende (2013) som simulerte frakobling av takflater til avrenning i SC4. Resultatene viste at ved 20 % frakobling av taknedløp og et regnskyll med 20 års returperiode, varighet på 60 minutter, og en klimafaktor på 1,2, ble vannmengdene fra SC4 redusert med 12,1%. Videre var trenden at økende klimafaktor og prosentvis frakobling av takflater ga synkende avrenningsvolum og flomtopp.

Det vil imidlertid være hensiktsmessig å gjøre individuelle vurderinger for hvert område da målingene viste at den hydrauliske konduktivitet varierte i stor grad. Et alternativ vil være å klassifisere jordarten, og gå ut ifra typiske litteraturverdier. Som vist i Vedlegg C, er det stor variasjon i K_{sat} for hver jordart. For å få oversikt over områdets infiltrasjonsevne og K_{sat} -verdi på en tilfredsstillende måte, anses det som en bedre metode å gjøre målinger i felt. Basert på feltmålinger utført i prosjektet antas det som gunstig å tilrettelegge for infiltrasjonsbaserte LOD-tiltak i vassdraget.

⁴ RECARGA er et dataprogram som brukes i forbindelse med evaluering og dimensjonering av blant annet regnbed (Atchison og Severson, 2004)

5 Metode

Innholdet i metoden masterprosjektet baserte seg på varierte i stor grad, med bruk av flere ulike programvarer, bestående av både automatiske og manuelle arbeidsprosesser. I dette kapitelet er disse blitt beskrevet, og et overordnet flytskjema over metodologien kan ses av Figur 47.



Figur 47: Overordnet flytskjema over metodologien.

5.1 Programvare

All programvare var gratis og var tilgjengelig gjennom NTNU sine programvarer for studenter, eller gjennom internettsidene til utviklerne. I det følgende er programvarene listet opp, sammen med en kort beskrivelse av hva de ble brukt til.

ArcGIS desktop 10.5 med utvidelsene *Spatial Analysis*, *3d Analyst* og verktøytillegget Arc Hydro 10.3.4 ble brukt til å bearbeide terrengmodellen og annen inngangsdata i SWMM, samt å dele inn SC2, SC3 og SC4 i delnedslagsfelt.

AutoCAD 2017 ble brukt til å gjennomgå høydene langs kulverten langs Stangelandsåna, da det allerede var utarbeidet en situasjonsplan i DWG-format.

EPA SWMM 5.1 ble brukt til å utføre overvannssimuleringer for analyseområdet. Den hydrologiske-hydrauliske modellen bygde på data hentet fra ArcGIS, antagelser og beregninger.

Microsoft Excel 2016 ble benyttet til å organisere data fra nedbør- og avløpsmåleren slik at de senere kunne moduleres inn i SWMM-modellen.

Notepad ++ / TextPAD ble brukt til å bearbeide tekstdokumenter relatert til SWMM-modellen.

R og Rstudio ble brukt til å kjøre simuleringene basert på skript.

5.2 Innhenting og bearbeiding av nedbør- og avløpsdata

5.2.1 Webportal

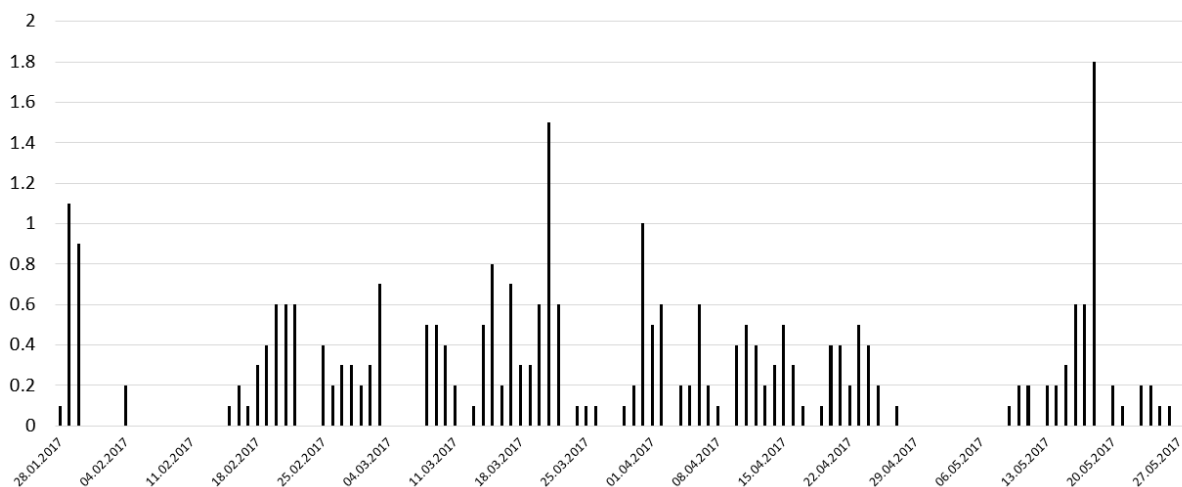
Data fra nedbør- og vannmåleren ble samlet inn, og grafisk presentert i en webportal og vist i UTC+1 (norsk vintertid), uavhengig av årstid. Webportalen ga mulighet for å hente ut data knyttet til regn, vannhastighet, vanndybde og vannføring i ulike tidsoppløsninger og tidsrom. Dataene ble presentert i nesten i sanntid, med en liten forsinkelse. Videre var dataene for ønsket periode og oppløsning tilgjengelig ved å hente de ut i et Excel-ark. Figur 48 viser et utklipp av webportalen med diagram for henholdsvis regn, vanndybde, hastighet og vannføring fra øverst til nederst. Hydrogrammet tok kun utgangspunkt i dybde og hastighetsdata fra den ultrasoniske måleren, og ikke trykkmåleren som også var installert (Storm Aqua, 2017a).



Figur 48: Oppsett av målerverdiene på serveren til Storm Aqua (skjermdump).

5.2.2 Nedbørdata

Nedbørdataen med 5 minutters oppløsning ble hentet ut fra webportalen i en tidsserie fra 28. januar til 28. mai 2017, og trengte lite bearbeiding. Dato- og tidsformat ble forandret og lagt inn i en tekstfil i henhold til SWMM sine formater og krav. Referanse til tekstfilen med regndata ble lagt inn i input-filen. Nedbørsdataen er vist på Figur 49.



Figur 49: Tidsserie for nedbør.

5.2.3 Avløpsdata

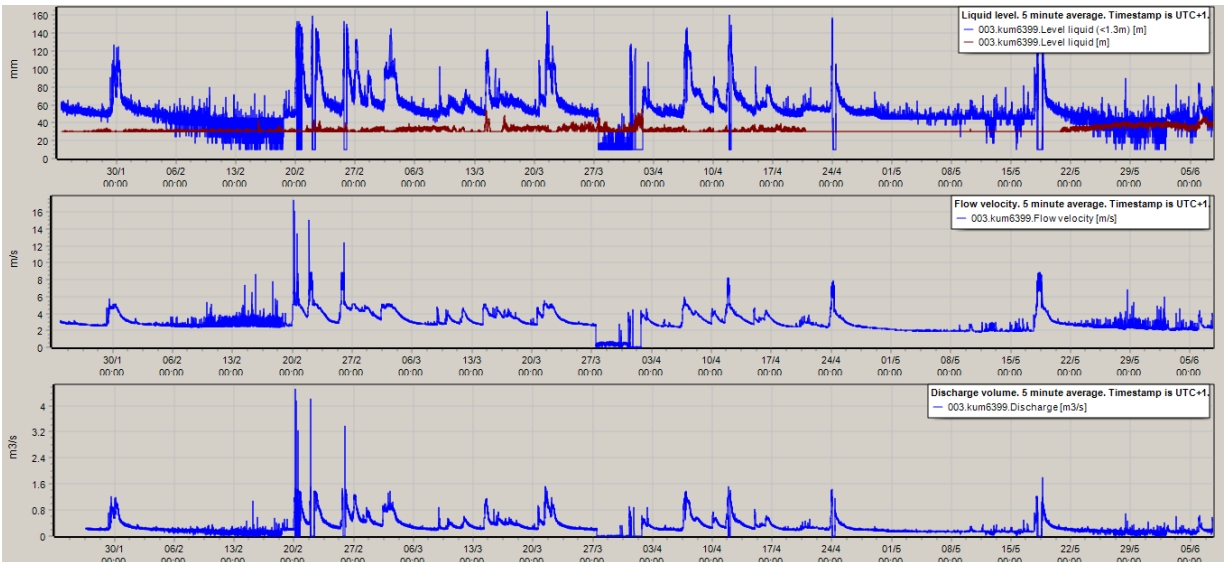
Avløpsdataen ble lastet ned, datoen ble formatert på samme vis som nedbørdataen, og deretter lagt i et eget tekstdokument. Avløpsdataene trengte imidlertid mer bearbeiding før man kunne bruke de i modellen.

Det ble lagt til en offset ved nivå- og hastighetsmålingene for trykksensoren og den ultrasoniske måleren, på henholdsvis 30 og 10 mm. Offset ble lagt inn i databasen for å kompensere for plasseringen til sensorene, da trykk- og ultrasonisk sensor ikke var montert helt i bunnen av kulverten, som i praksis er vanskeleg å la seg gjøre (Storm Aqua, 2017a). Offset kan ses på Figur 50, ved å sammenligne de periodene uten vannføringsdata med samme periode for dybde dataen. Null vannføring burde tilsa null vanndybde, men dybden opptrer som 10 mm ved disse periodene av manglende data. Med andre ord tok observert hydrogram kun utgangspunkt i dybde data uten offset.

Hydrogrammet ble hentet direkte ut fra webportalen, og som en direkte konsekvens måtte hydrogrammet korrigeres for en vannføring med 10 mm vanndybde. For dette formålet ble formel 14 benyttet, og vannføring Q ble lagt til den observerte hydrogrammet. Tverrsnittsbredden som ble brukt var 2 m, og ble hentet fra tilgjengelig data.

$$Q = V * (B * d) \quad (14)$$

Q	Vannføring [m ³ /s]
V	Vannhastighet [m/s]
B	Tverrsnittsbredde [2 m]
d	Vanddybde [0,01 m]



Figur 50: Tidsserie, fra øverst til nederst, for vanddybde, hastighet og vannføring (skjermdump).

5.3 ArcGIS Metodikk

For å kunne utføre overvannssimuleringer i SWMM-modellen, var det nødvendig å først definere 1) ledningsnett i Sandnes med tilhørende elementer, og 2) nedslagsfeltene til inntakspunktene til overvannssystemet. ArcGIS ble benyttet til begge formålene. Ved bruk av kommunens Gemini VA-filer kunne ledningsnett bli importert i ArcGIS for å sortere ut uinteressante objekter og korrigere uriktig data. For inndelingen av nedslagsfeltene ble det satt sammen en terrengmodell i ArcGIS som ble brukt til å beregne polygoner for å gjøre modellen distribuert. Polygonene inneholdt informasjon om størrelse og plassering av nedslagsfeltene til inntakspunktene. Det var i hovedsak ArcMap 10.5 og Arc Hydro 10.3.4 som ble brukt til dette formålet.

5.3.1 Terrengmodell og shape-filer

Sandnes kommune leverte en digital terrengmodell (DTM eller DEM) sammen med shape-filer som kunne leses direkte i ArcGIS. DTM-filen ble i ArcGIS lest som en rasterfil som viste høydedata i et rutenettformat, der hver rute hadde en høydeverdi. Nøyaktigheten på en DTM-fil avhenger av oppløsningen på rutenettet,

som i prosjektet hadde en celledimensjon på 10x10 meter. På denne måten ble høydedata gjort tilgjengelig for hele Sandnes og omegn. Det ble benyttet koordinatsystemet ETRS 1989 UTM Zone 32N, og høydekoordinatsystemet NN2000.

I tillegg til import av DTM-filen, ble også tilgjengelige shape-filer importert, og lagt som lag i modellen. Shape-filene var i form av punkter, linjer og polygoner som representerte ulike elementer og objekter i ArcGIS. Hva shape-filene representerte er presentert i listen under.

- Baner
- Bygninger
- Tomte- og andre grenser
- Naturlommer
- Terrenkoter
- Sjø- og vannflater
- Veger
- Eksisterende VA-system (Gemini VA)
- Nedbørfeltet for vassdraget

Ved etablering av nedslagsfeltene var det shape-filene som inneholdt informasjon om bygninger, sjø- og vannoverflater, veger og eksisterende VA-system som var av størst interesse, da de påvirket vannets strømningslinjer.

5.3.2 Informasjon om Gemini VA shape-filer

Det var Gemini VA shape-filene som beskrev ledningsnett, og som videre ble importert i SWMM. Derfor var det viktig å forstå dataene som var å finne i shape-filene, og hva de ville si. Gemini VA shape-filene hadde geometritypen punkter og linjer, som stort sett representerte henholdsvis kummer og ledninger. Ordene punkt/kum/node og rør/linje vil derfor bli brukt om hverandre videre i rapporten. I Tabell 7 og Tabell 8 er de viktigste kategoriene beskrevet for punkter og linjer.

Tabell 7: Oversikt over viktige informasjonskategorier for punkt i Gemini VA shape-filene.

Informasjonskategori	Forklaring
SID	Unikt identifikasjonsnummer for gjenkjenning
HBUNN	Meter over havet for kummens topp bunn
TOPPLOKKH	Meter over havet for kummens topp lokk
Xkoord	Kummens x-koordinat
Ykoord	Kummens y-koordinat
OBJTYPE	Beskriver hvilken type node. Eksempel: kum eller overløp
FUNKSJON	Beskriver hvilken funksjon noden har. Eksempel: overvannskum (OK), AF-kum (AK)

Tabell 8: Oversikt over viktige informasjonskategorier for linjer i Gemini VA shape-filene.

Informasjonskategori	Forklaring
SID	Unikt identifikasjonsnummer for gjenkjenning
F_Z	Høyden over havet røret er koblet inn i kummen med FSID
T_Z	Høyden over havet røret er koblet inn i kummen med TSID
DIM	Rørets dimensjon
MATERIAL	Rørets byggemateriale
LENGDE	Rørets lengde
OBJTYPE	Beskriver hvilken type rør. For eksempel: overvannsledning eller avløpfelles
DIMVERTIKA	Om tverrsnittet er rektangulært vil den ha en verdi for vertikal høyde

5.3.3 Kontroll av tilsendt data

Det ble gjort visuelle kontroller for å se at dataene samsvarte med virkeligheten. Kontrollene ble gjort opp mot blant annet karttjenestene Norgeskart.no, og Google Maps samt visuelle befaringer ved to anledninger i Stangelandsåna vassdrag. I tillegg ble det benyttet tilsendte kumskisser for kvalitetskontroll.

Ettersom en del av informasjonen i shape-filene hadde enten mangler, var uriktig eller ikke var av interesse, ble det utarbeidet ulike tilnærminger for å forbedre kvaliteten og klargjøre dataene for

overvannssimuleringer i EPA SWMM. De neste kapitlene beskriver både tiltak som er utført med tanke på sortering av objekter og elementer i shape-filene, og endringer gjort med DTM-filen.

Et generelt inntrykk var at deler av dataen hadde troverdige verdier, men det ble også oppdaget objekter som ikke samsvarte med forventninger. Dette var for eksempel høyde på kummer og rør som ikke samsvarte, eller manglende kumpunkt der to rør møttes. Ettersom det ble funnet varierende kvalitet på inngangsdataen ble det gjort enkelte tiltak for å prøve å forbedre kvaliteten og klargjøre for overvannssimuleringer i EPA SWMM.

5.3.4 Sortering og korrigerings av Gemini VA-data

Som tidligere nevnt ble datagrunnlaget for ledningsnettets levert av Sandnes Kommune. Shape-filene for det eksisterende VA-systemet stammer fra Gemini VA, og inneholdt informasjon om ulike objekter som overløp, kraner, ulike ventiler, overvannskummer, spillvannskummer, avløp fellesledninger (AF-ledninger) og overvannsledninger (OV-ledninger), med mer. Mye av denne informasjon var ikke av interesse, og mange av objektene måtte derfor sorteres ut. Objekter av interesse var AF-ledninger, OV-ledninger og kummene som fulgte nevnte ledningers trasé, innenfor vassdraget. Ved bruk av verktøylinjen *Editor* og verktøyene *Edit Tool*, *Attributes*, *Sketch Properties* og *Create Features* kunne data bli korrigert, og objekter bli lagt til eller fjernet fra laget. I det følgende er tiltakene som ble gjort med tanke på sortering av objekter beskrevet.

- Da prosjektet fokuserte på de sentrumsnære områdene av vassdraget, ble det bestemt at alle objekter i SC1 ikke skulle inkluderes. At objekter i SC1 skulle fjernes kan begrunnes med at landbruksfeltet SC1 utgjorde ca. 60% av vassdragets totale areal, men inneholdt likevel bare en brøkdel av totalt antall ledninger, som i tillegg var spredt og lite sammenhengende i delfeltet.
- En ledningsforgreining i SC2, som går inn i Statens Vegvesen sitt overvannsbasseng i SC1, og videre ut til Stangelandsåna, ble fjernet.
- Forgreininger som gikk ut av gitt nedbørområde ble fjernet, og forgreininger som gikk inn i området ble lagt til.
- Alle stikkledninger, ledninger til sandfang og endekummer tilknyttet disse ledningene ble fjernet. Objektene var ofte veldig korte eller med manglende data, og en inkludering av objektene i modellen ville vært lite hensiktsmessig med tanke på beregningstid i SWMM.
- Alle private ledninger ble besluttet å fjerne, ettersom dataen på ledningene var svært begrenset.
- Alle endeledninger der det ikke var registrert en kum ble besluttet å fjerne.

- Den delen av kulverten som lå nærmest fjorden, lå uten fall. Simuleringen viste selv at under regnhendelser som kunne kategoriseres som normale forhold, var kulvertens kapasitet en begrensning. Prosjektets hensikt tatt i betraktning, som var å finne dimensjonerende vannføring, ble fallet derfor redigert til 10 promille for denne delen.

Mye av informasjon knyttet til objektene som ble sortert ut, manglet eller var uriktig. Stort sett var det de samme feil og manglene i datagrunnlaget som gikk igjen. Det ble derfor opprettet enkelte regler for hvordan konkrete feil og mangler skulle håndteres. Nedenfor er de hyppigste feilene og manglene listet opp.

- Manglende eller feil informasjon for en eller kombinasjoner av LOPPLOKKH, HBUNN, T_Z, F_Z.
- Manglende kum i punktet hvor et rør går inn i et annet rør, eller hvor to rør møtes.

Som tidligere nevnt ble det laget enkelte regler for å håndtere feil og mangler i listen over, slik at man håndterte avvikene likt. Tabell 9 viser en oversikt over håndteringen av frekvente feil og mangler. Reglene er beskrevet i tabellen nedenfor. Merk at for de avvikene som ikke er beskrevet i detalj, ble de korrigert basert på data fra DTM-filen, høydekoter og nærliggende kjente punkt og linjer, antakelser og forenklinger. Hvordan håndteringen av feil og mangler i Gemini-VA-filene er beskrevet nedenfor.

Tabell 9: Oversikt over hvordan frekvente feil og mangler i datagrunnlaget ble håndtert.

Feil og mangler	Tiltak
Manglende TOPPLOKKH	Verdi ble tatt fra DTM
Manglende/feil HBUNN på rørstykke mellom kjente punkter	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verdi blir tatt fra oppstrøms/nedstrøms F_Z/T_Z-verdi 2. Verdi blir funnet ved interpolasjon mellom kjente punkter på samme rørstykke
Manglende/feil HBUNN på ende av rørstykke	<ol style="list-style-type: none"> 1. Verdi blir tatt fra oppstrøms/nedstrøms F_Z/T_Z-verdi 2. Verdi blir funnet ved å bruke samme fall som det foregående røret 3. Om 2. gir en urimelig HBUNN-verdi settes fall lik 10 ‰. En urimelig HBUNN-verdi kan være HBUNN høyere enn TOPPLOKKH
Manglende F_Z eller T_Z	Verdi blir tatt fra tilkoblet kums HBUNN-verdi

Opprettelse av nye punkt	Får tildelt et femsifret SID-nummer som starter på 95, for lettere gjenkjenning
Opprettelse av nye linjer	Får tildelt et femsifret SID-nummer som starter på 9, for lettere gjenkjenning

Da det finnes fellessystem i Sandnes, finnes det overløp tilknyttet fellessystemene som går til overvannsnett. Overløpene må tas hensyn til i SWMM-modellen, og dette arbeidet startet i ArcGIS. På grunn av at alt vann som går til spillvannsnett ikke er av interesse, måtte det bli opprettet et punkt nedstrøms overløpene som mottok videreført vannmengde. I SWMM blir dette punktet definert som et *outfall*, og er et punkt der vannet forsvinner fra SWMM-modellen. For de tilfellene der informasjon om spillvannskummen som mottok videreført vannmengde var tilgjengelig i shape-filene, kopierte man spillvannskummens egenskaper. Om det imidlertid ikke fantes tilgjengelig informasjon om spillvannskummen i shape-filene ble det opprettet et nytt punkt, og prosedyrene for feil og mangler som tidligere beskrevet ble benyttet. I SWMM kan man modellere et overløp på flere måter, og måten overløpene ble representert på var å sette F_Z/T_Z til overløpsrøret lik terskelhøyde for overløpet. Dette ble foretatt på bakgrunn av tilsendte kumskisser av overløpene, og tilgjengelig informasjon i shape-filene.

5.3.5 Identifisering av forgreninger til kulvert

For store urbane områder kan det være utfordrende å dele inn i nedslagsfelt. For å gjøre identifisering av inntakspunkt i overvannssystemet, beskrevet i kapittel 5.3.6 til en enklere prosess ble overvannssystemet delt opp i grener ut i fra kulverten. Totalt ble 29 grener identifisert, og er vist på Figur 51. Fargene representerer de individuelle grenene med utløpspunkt i kulverten. Selve kulverten er vist med fargekombinasjonen gul og svart. Da kummer i overvannssystemet ofte var tett gruppert ble identifisering av forgreninger benyttet til å definere kriteriene 6 og 7 i kapittel 5.3.6.



Figur 51: Forgreninger ut fra kulverten (skjermdump).

5.3.6 Identifisering av inntakspunkt til overvannssystemet

Shape-filen som inneholdt informasjon om kummene i analyseområdet inneholdt ikke informasjon som sa noe om kummene var åpne eller lukket. Det var derfor ønskelig å lokalisere innløp til overvannssystemet. Det ble vurdert to måter å lokalisere mulige inntakspunkt, 1) visuell kontroll med google street og 2) produsere et sett med kriterier for å velge ut nodene som skulle være inntakspunkt i overvannssystemet, og automatisere prosessen for lokaliseringen av punktene. Ettersom visuell kontroll er svært tidkrevende ble det tatt utgangspunkt i å identifisere alle inntakspunkt på bakgrunn av et sett med kriterier.

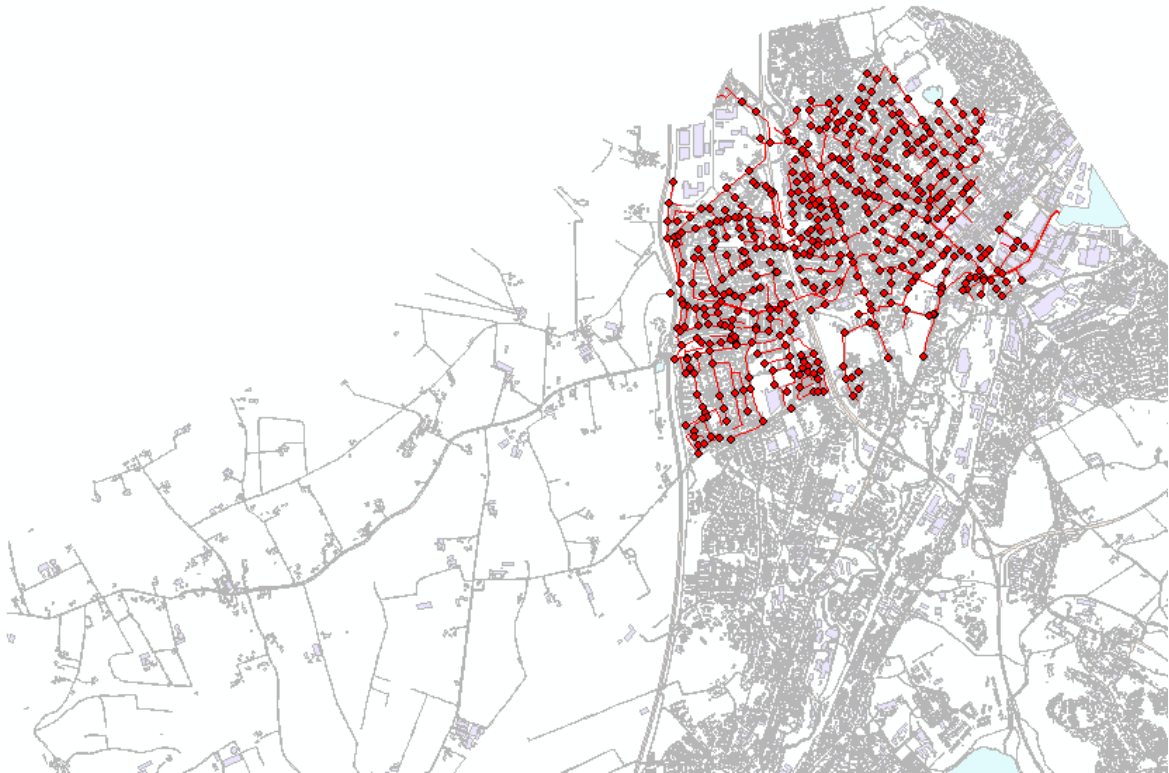
Kriteriene er gjengitt i Tabell 10 og høyere rang impliserte høyere prioritet for utvelgelsen av inntakspunkt. For eksempel, dersom en endenode hadde lavere areal enn 150 m² ville ikke punktet være et inntakspunkt.

Tabell 10: Kriterier for definering av inntakspunkt.

Rang	Regel
1	Overløp er ikke inntaksnoder
2	Ingen noder tilknyttet kulverten er inntaksnoder
3	Inntakspunkt skal ha større tilhørende nedslagsfeltareal større enn 150 m ²

- 4 Alle endenoder er inntakspunkt
 - 5 Noder med flere utløpsledninger er inntakspunkt
 - 6 Minimum avstand mellom inntaksnoder på samme ledningstrase ned mot hovedkanal/kulvert > 10 m
 - 7 Maksimum avstand mellom inntaksnoder på samme ledningstrase ned mot hovedkanal/kulvert < 300 m
 - 8 Noder med én utløpsledning er ikke inntakspunkt
-

Det ble utført en utvelgingsprosess, som resulterte i 462 inntakspunkt i modellen. Dette utgjorde om lag 40% av alle overvannskummene i systemet. Figur 52 illustrerer lokasjonen til inntakspunktene, som er vist som røde punkter i kartet.



Figur 52: Inntakspunkt i overvannssystemet (skjermdump).

5.3.7 Arc Hydro watershed delineation

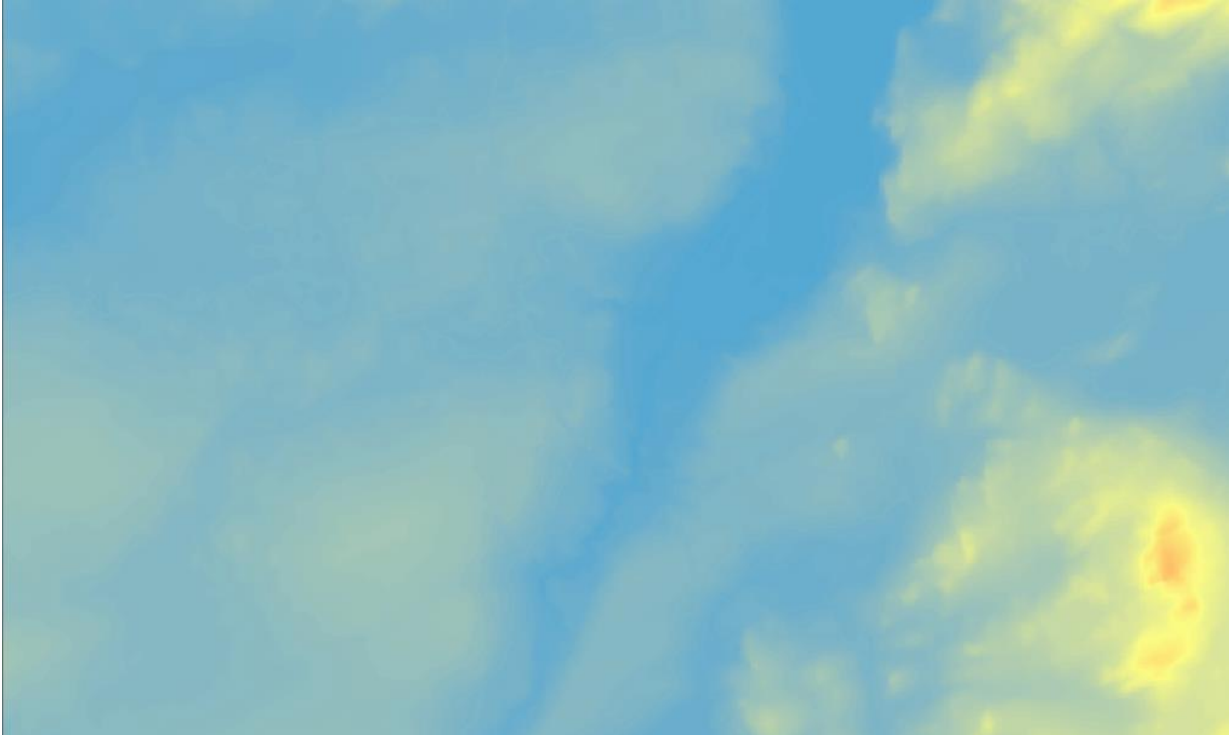
Ved inndelingen av nedbørfelt i de urbane miljøene ble det gjennomgått en del ulike løsningsstrategier for å kunne framstille nedslagsfeltene til slukene i overvannssystemet på god måte. Med tanke på høyt

antall definerte nedslagsfelt, ble det valgt å benytte Arc Hydro sine verktøy og funksjoner for å dele inn i nedslagsfelt. Ved forhåndsdefinerte inntakspunkt var inndelingen av nedslagsfelt en automatisert prosess.

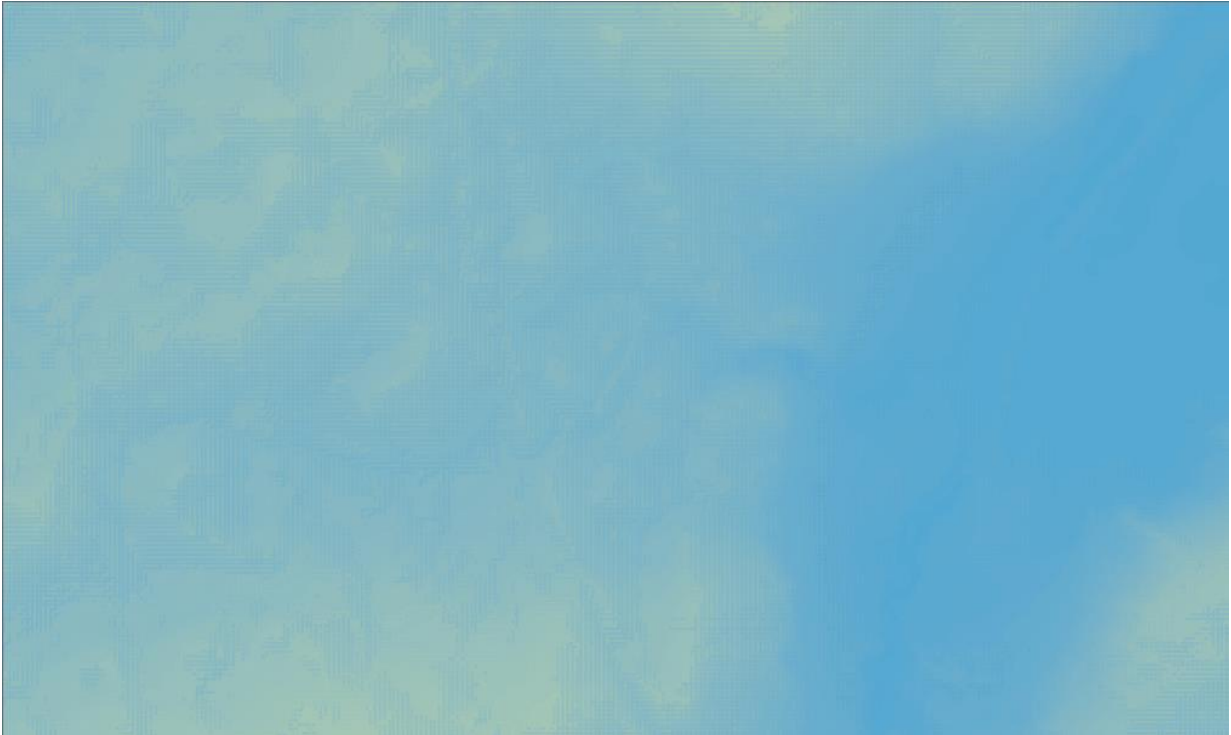
Shape-filene som omhandlet bygninger, vannoverflater, veger og eksisterende VA-system ble gjennomgått, og det ble gjort flere tiltak for å tilnærme seg vannets virkelige strømningslinjer i modellen. Arbeidsprosessen inneholdt følgende fremgangsmetode for inndeling av nedslagsfelt:

1. Importering og opprydding i data

- DTM-filen samt shape-filene med vannflater, veger, bygninger og andre relevante linjer ble importert inn i ArcMap ved bruk av *add data*, og organisert i *Table of Contents*. Figur 53 og Figur 54 illustrerer henholdsvis oversiktsbilde av original terrengmodell, samt et forstørret bilde til videre sammenligning av tiltak som ble gjort med modellen. Utsnittet er de samme på de ulike oversiktsbildene, og de ulike forstørrede bildene videre i rapporten. Høydedataen er representert ved fargekoder, som går fra blå til rød, der henholdsvis blå og rød er laveste og høyeste høydedata.
- Det ble utarbeidet et sett med regler for å sortere ut objekter og korrigere data i modellen. Dette er beskrevet under kapittel 5.3.4.
- Det ble foretatt en vurdering av hvilke data som ikke ville påvirke strømningslinjene og inndeling av nedslagsfeltene. Det var ønskelig å fjerne de dataene for å ikke gjøre arbeidet i ArcGIS mer komplisert enn nødvendig. Ved bruk av *Select by attributes* ble *Object ID* for hver enkel shape-file gjennomgått. Data som ikke påvirket strømningslinjene ble fjernet.



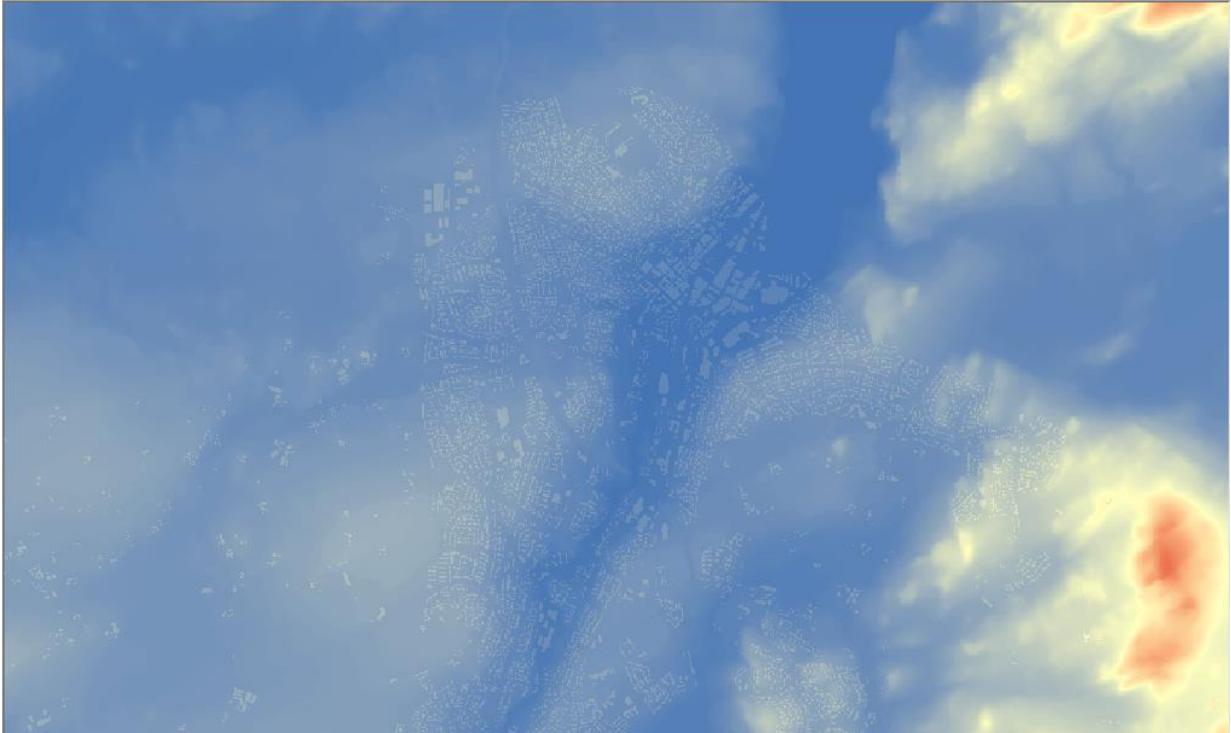
Figur 53: Oversiktsbilde av original DEM (skjermdump).



Figur 54: Forstørret bilde av original DEM (skjermdump).

2. Fusjon av bygningsraster og DTM

- Det er tatt utgangspunkt i fremgangsmåten til Johansen og Moldekleiv (2016) for å fusjonere bygningsraster med den digitale terrenngmodellen. Bygningsshape-filene ble lagt til som et lag i modellen. For å tvinge vannet rundt og ikke gjennom bygninger ble polygonene hevet 25 meter over terrenget. Først ble en ny kolonne laget i *attribute table* for bygningspolygonene. Kolonnen ble kalt *Hoyde*, og satt til typen *double*. Videre ble *field calculator* brukt til å sette *Hoyde = 25 m*. Verktøyet *Polygon to raster tool* ble så benyttet til å lage polygonlaget om til et eget rasterlag. For å unngå korrupte verdier ved summasjon av bygningsrasteren og original terrenngmodell, ble *Reclassify tool* brukt til å konvertere alle polygoner som ikke innhold bygninger fra *NoValue* til 0.
- En utfordring var at bruer og brygger i modellen var lagt inn som bygninger i modellen. Siden det skulle utføres en høydeoppbygging av alle bygninger 25 meter i vertikal retning fra terrenghøyden i modellen, var det derfor nødvendig å fjerne alle bruer. Prosessen brukte samme fremgangsmåte som ved opprydding av data beskrevet tidligere i punkt 1, «Importer og opprydding i data». Dette gjaldt objekttypene: *Bru, Flytebrygge, Trapp, FrittstyendeTrapp, KaiBrygge, Molo, Pipe, Svømmebasseng, tank*.
- Ved bruk av verktøyet *Plus* ble *reclassified bygningsraster* slått sammen med original terrenngmodell. Gjennom denne prosessen blir summen av verdier til de to rasterene addert sammen celle for celle. Som utdata fikk man en modifisert DTM der terrenget var hevet 25 meter vertikalt hvor bygningsceller var plassert. Terrennghevingen for bygningsceller er illustrert på Figur 55 og Figur 56, og viser henholdsvis et oversiktsbilde over hele analyseområdet og et forstørret bilde av sentrumsområdet.



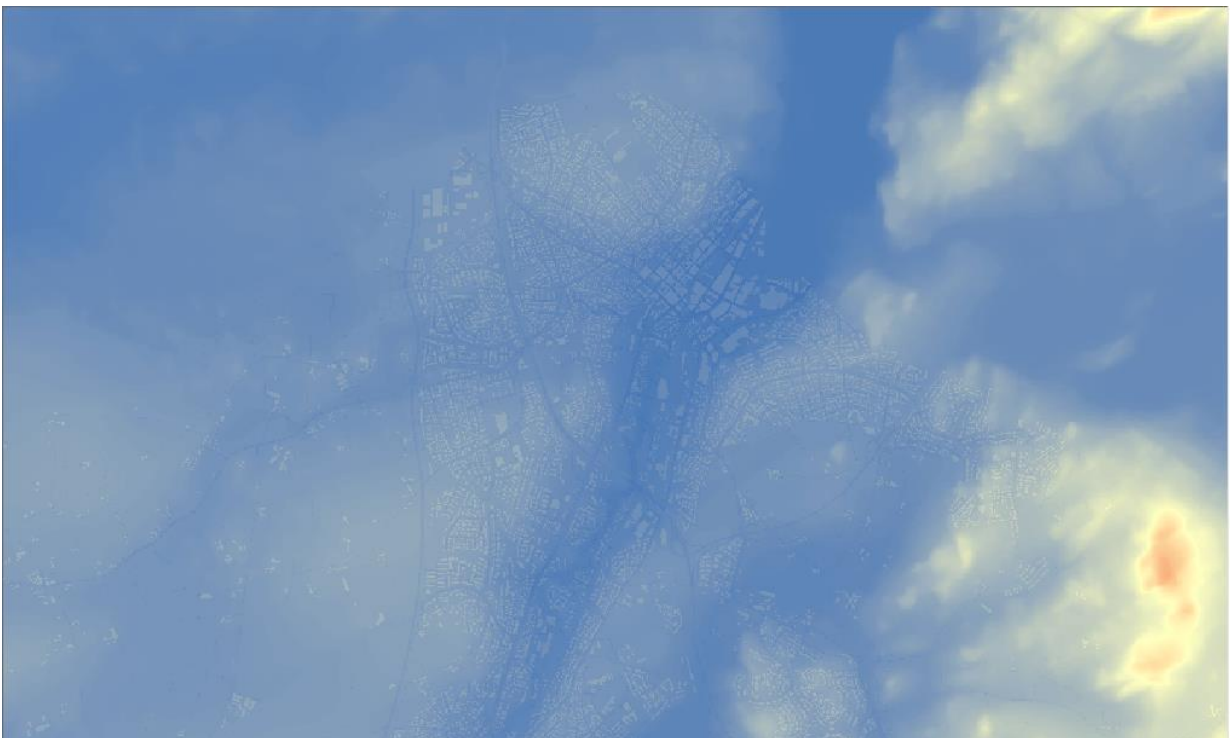
Figur 55: Effekt av fusjon mellom bygningsraster og DTM (skjermdump).



Figur 56: Forstørret bilde av oversiktsbilde (skjermdump).

3. Senke høyde på veger

- Det var ønskelig at overvann hadde dreneringslinjer som krysset veger skulle følge veglinjene videre. Derfor ble shape-filene som omhandlet veg lagt 2 meter ned i terrenngmodellen, med samme prosedyre som beskrevet i punkt 2, «Fusjon av bygningsraster og DTM». Vegpolygonene ble satt ned -2 meter under opprinnelig terrengflate. *Polygon to raster* og *Reclassify* ble benyttet slik som tidligere beskrevet, og *Plus* ble brukt til å fremstille en modifisert terrenngmodell som inneholdt både bygninger og nedfelte veger. Modifiserte terrenngmodell er vist på Figur 57 og Figur 58, og viser hvordan vegnettverket er blitt innfelt i terrenngmodellen.
- Det ble også prøvd å brenne vegene ned i terrenget med *Agree DEM Reconditioning* slik som de åpne kanalene i punkt 4, «Brenning av åpen kanal». Etter visuell kontroll av resultatet ble det konkludert med at fremgangsmetoden i punkt 2 ga en mer virkelighetsbasert avrenning i terrenget, med tanke på områder der strømningslinjene samhandler med veg.



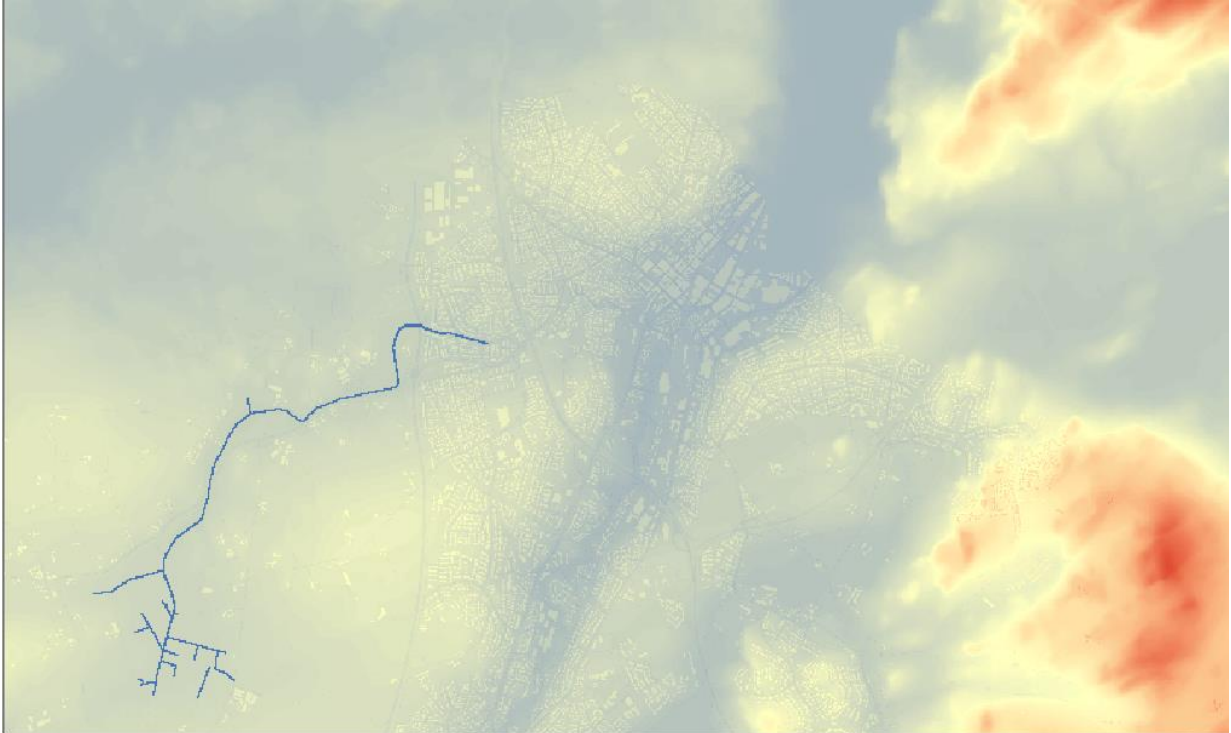
Figur 57: Terrenngmodell summert med vegraster (skjermdump).



Figur 58: Forstørret bilde av sentrumsområdet (skjermdump).

4. Brenning av åpen kanal

- De åpne kanalene strakk seg fra SC1 ned til kulvertinntaket i SC2, og verktøyet *Agree DEM Reconditioning* ble brukt til å brenne inn de åpne kanalene inn i terrengmodellen.
- Ettersom den åpne kanalen både besto av polygoner og linjer ble *Polygon to line* samt *editor toolbar* brukt til å lage en sammenhengende linje som skulle representere kanalen. Den modifiserte terrengmodellen som inneholdt bygninger ble brukt som inndata. *Stream buffer* ble antatt til å være 5 celleverdier, *smooth drop* ble antatt til å være 100 samt *sharp drop* ble antatt til å være 1000 som gir en gradvis oppbygging av elvas sideveger. Utdata ble en ny modifisert terrengmodell der overvannet strømmet til den åpne. Dette er illustrert på Figur 59 og Figur 60.



Figur 59: Oversiktsbilde av brent strømningslinjer for den åpne kanalen (skjermdump).



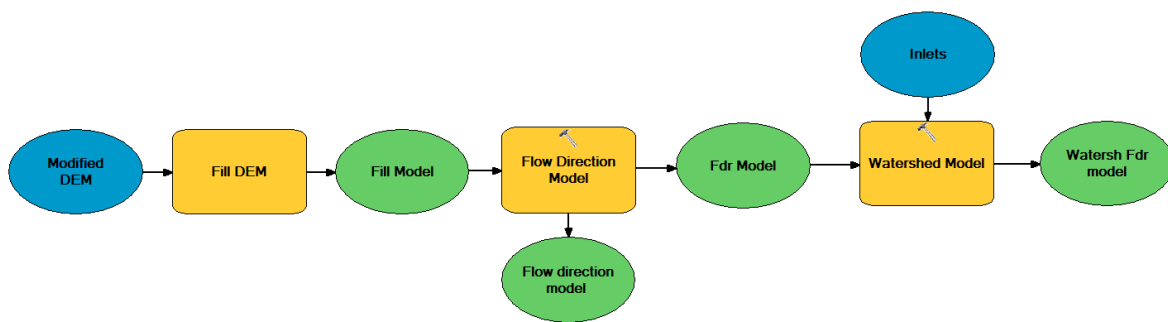
Figur 60: Forstørret bilde av brent strømningslinjer for den åpne kanalen (skjermdump).

5. Bruk av Model Builder for iterative prosesser

- For å gjøre arbeidsprosessen lettere ble en arbeidsflyt produsert i *Model Builder* for de iterative prosessene som skulle utføres i ArcMap. Ettersom små endringer i terrengmodellen ville føre til at alle verktøy måtte utføres på nytt, ville en slik arbeidsflyt kunne kjøre forhåndsoppsatte prosesser automatisk når endringer ble gjort. Dette gjorde arbeidet mindre tidkrevende og man fikk en mer oversiktlig fremgangsmetode. De iterative prosessene bestod i hovedsak av *Fill tool*, *flow direction*, *Flow Accumulation*, og *Watershed* for å kunne dele inn nedslagsfelt i områdene. Figur 61 og Figur 62 illustrerer de to arbeidsflytmodellene som ble produsert i prosjektet.
- Figur 61 er den største arbeidsflyten som ble produsert. Den inneholdt mange komponenter, flere enn det som var behov for ved inndeling av nedslagsfeltene. Denne ble bygd opp for å utforske hvilke prosesser og fremgangsmåter som var mulig å utføre i ArcMap, og får å studere hvilke av disse fremgangsmåtene som ga mest tilfredsstillende resultat. Senere ble modellen bygget om slik som vist på figur 62. Denne modellen tok sikte på å utføre inndeling av nedslagsfelt uten unødvendige elementer i arbeidsflytskjemaet.



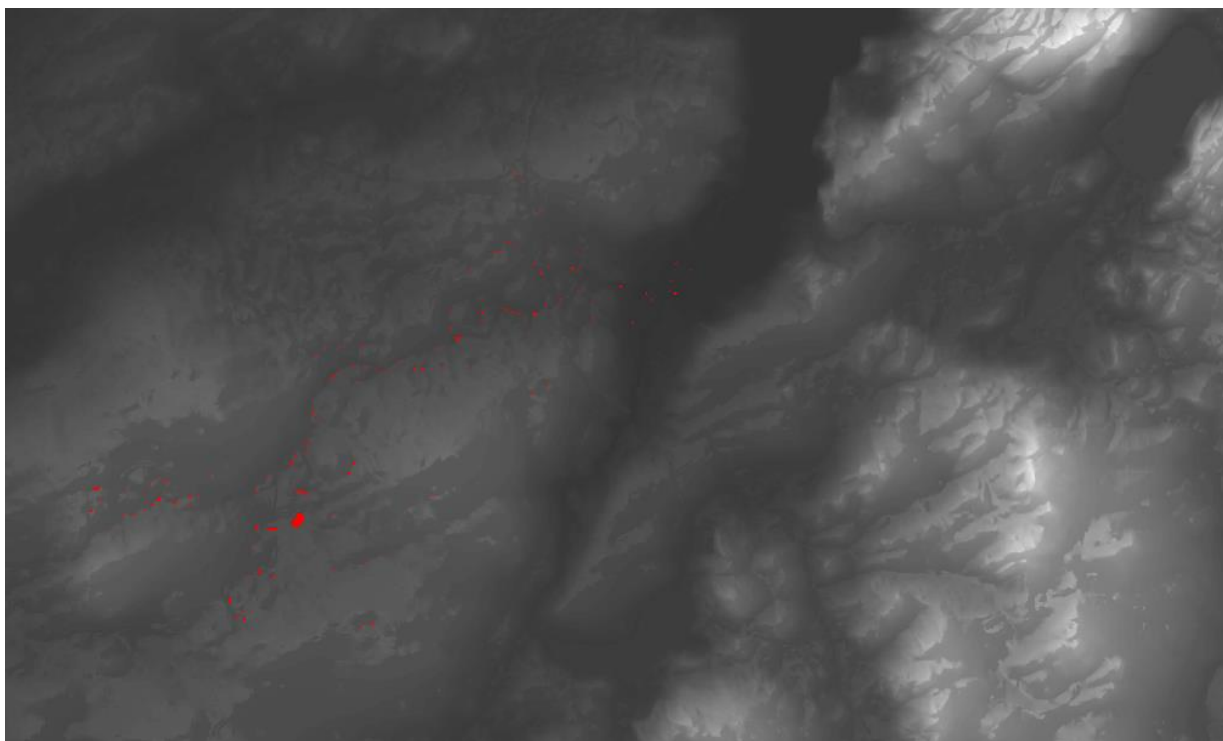
Figur 61: Arbeidsflytskjema til studie av ulike fremgangsmetoder (skjermdump).



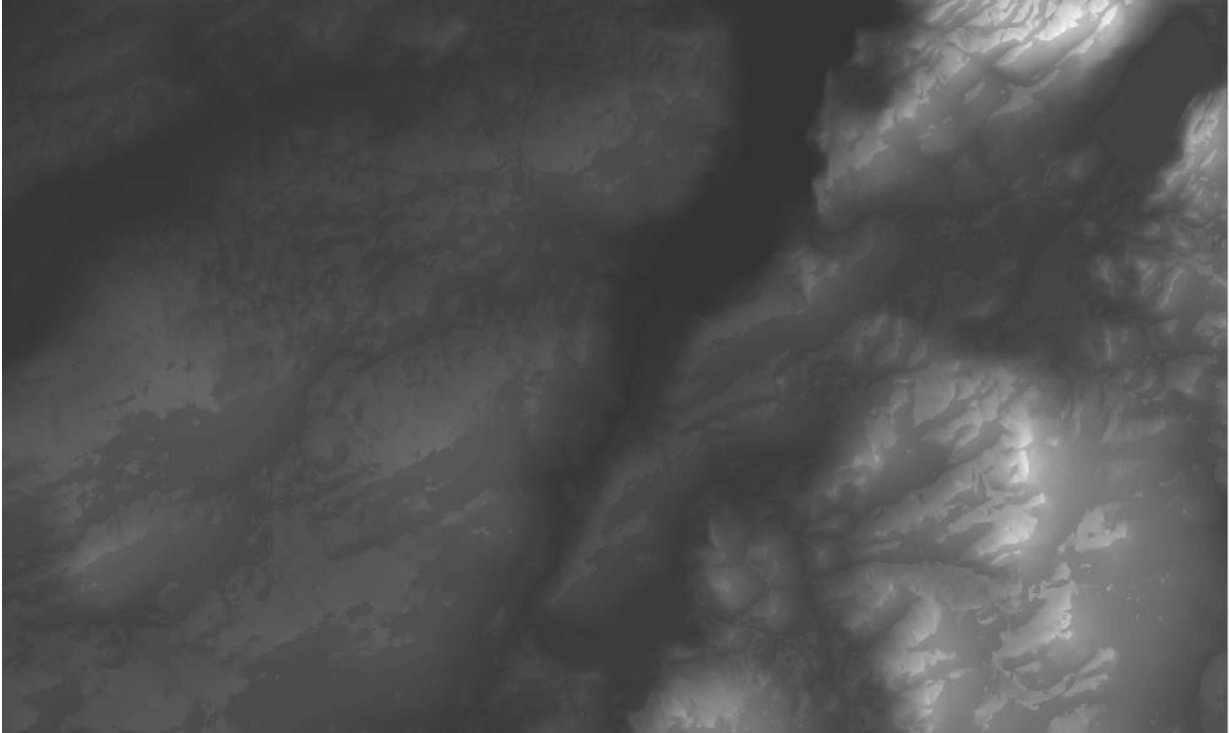
Figur 62: Ombygd arbeidsflytskjema for inndeling av nedslagsfelt (skjermdump).

Fill

- *Fill* ble brukt for å lage en terrengmodell fri for fordypninger (Depressionless DEM), slik at terrengmodellen ikke inneholdt kontinuitetsbrudd for drenslinjene. Det ble foretatt en fordypningsanalyse med verktøyet *Sink* for å sjekke om *Fill* var nødvendig å benytte, og programmet greide å lage en sammenhengende DTM. Videre ble laget strømningslinjer ved hjelp av *Flow direction*.
- Figur 63 og Figur 64 illustrerer hvordan *Fill* virket på analyseområdet. De røde polygonene på Figur 63 indikerer kontinuitetsbrudd, enten i form av fordypninger eller forhøyninger i terrenget, før *Fill* er blitt benyttet. Til sammenligning viser Figur 64 et utsnitt av det samme området som Figur 63, etter *Fill* ble brukt. De røde polygonene er fjernet fra figuren, og viser DTM uten noen kontinuitetsbrudd for strømningslinjene. Med andre ord er DTM-laget blitt fullstendig sammenhengende.



Figur 63: Fordypningsanalyse med verktøyet *Sink* før *Fill*-verktøyet er benyttet (skjermdump).



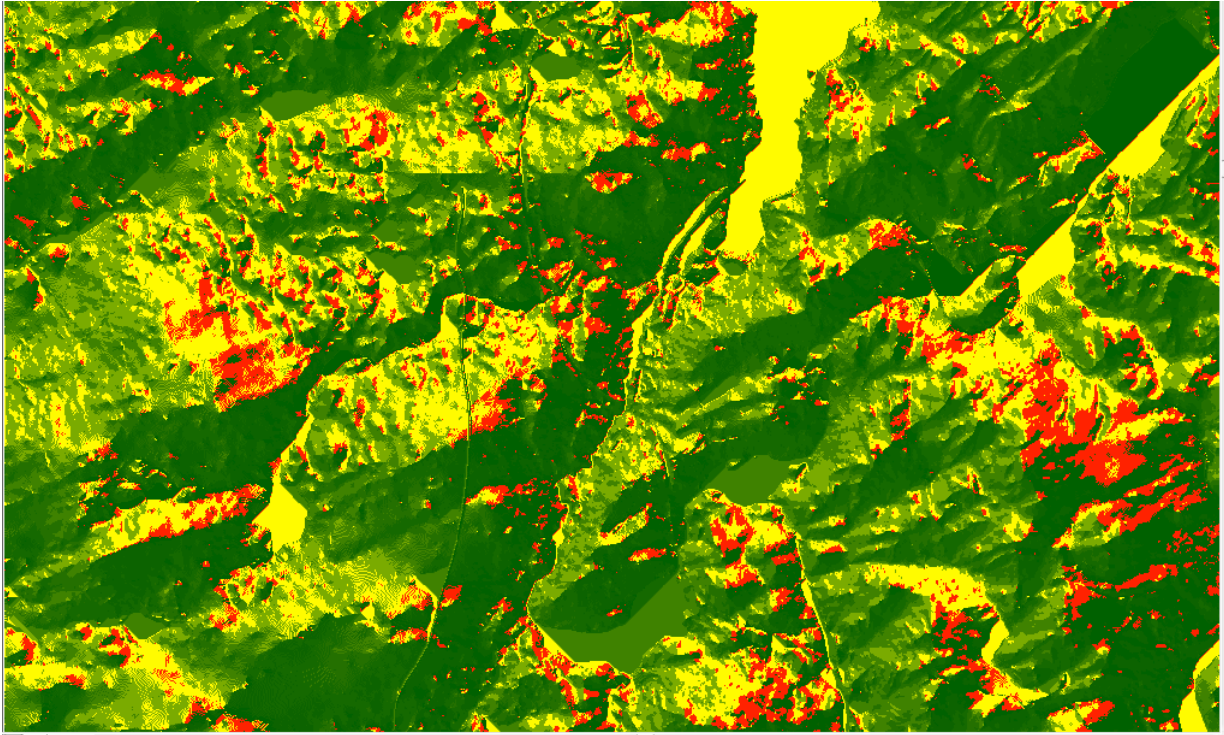
Figur 64: Fordypningsanalyse med verktøyet Sink etter Fill-verktøyet er benyttet (skjermdump).

Slope

- For å identifisere helningsgradient for hver celle i området, ble *Slope* anvendt. *Output measurement* ble satt som *percent_rise* for å få ut prosentvis helning. Dette samsvarer med nødvendig format i SWMM. Skalaen går fra grønn til rød, der grønn og rød er henholdsvis laveste og høyeste helningsgradient i området.
- Ettersom helningsgradient skulle knyttes opp mot hvert nedslagsfelt i SWMM, ble *Zonal Statistics* og *Zonal Statistics to tables* benyttet etter at nedslagsfeltene var inndelt med *watershed* verktøyet. Dette ga gjennomsnittlig helningsgradient for hvert nedslagsfelt.

Flow Direction

- Strømningslinjene til området ble bestemt ved å bruke verktøyet *Flow Direction*, som produserte en ny rasterfil med strømningslinjer, ut i fra overflaten til terrenget i DTM-rasteren. Figur 65 illustrerer bruk av *Flow Direction* og produsert rasterfil. Verktøyet beregnet alle omkringliggende celledøyer til en rastercelle og bestemte retningen på strømningslinjen til hver rastercelle. Dette gjorde den ved at den valgte retningen med bakgrunn i hvilke av de omkringliggende cellene som hadde lavest høydeverdi.



Figur 65: Strømningsretninger ved bruk av verktøyet *Flow direction* (skjermdump).

Flow Accumulation

- Strømningsakkumulering ble så produsert til en ny rasterfil ved bruk av verktøyet *Flow Accumulation*. Dette verktøyet baserte seg på strømningsretningen, og beregnet hvor mange celler som strømmet til hver enkel rastercelle. Man definerer en størrelsesorden på denne akkumulasjonen for å kunne representere akkumulasjonen på en oversiktlig måte. Rasterfilen med strømningsakkumulasjon er illustrert på Figur 66. Med bakgrunn i nedbørfeltenes størrelse kunne man med verktøyet *Reclassify* klassifisere strømningslinjene.

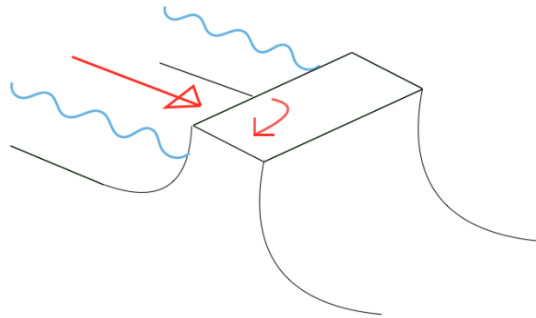


Figur 66: Strømningsakkumulasjon med verktøyet Flow Accumulation (skjermdump).

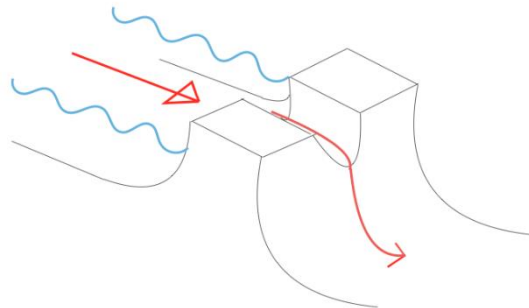
Build walls

- Etersom Rv. 44 markerte overgangen mellom det landlige området SC1 og de urbaniserte områdene SC2, SC3 og SC4 var det ønskelig at denne vegen skulle fungere som en vegg. Med andre ord et hinder som bare lot strømningslinjene krysse under broen der den åpne kanalen ligger. Arc Hydro sitt verktøy *Build Walls* ble derfor benyttet på den modifiserte terrengmodellen for å skape et skille mellom områdene. Rv. 44 ble lagret som et eget lag ut i fra resten av vegflatene ved hjelp av *Select by location*. Deretter ble en ny shape-fil som fikk navnet «Open Channel Breach» laget i *ArcCatalog*. Gjennom *Editor toolbar* ble det laget en *polyline* i «Open Channel Breach» som representerte den åpne kanalen som krysser under Rv. 44. Polylinjen skulle fungere som en åpning i veggen, slik at strømningslinjene kunne passere. Figur 67 og Figur 68 viser prinsippet for hvordan verktøyet fungerer.
- Den modifiserte terrengmodellen ble brukt som inngangsdata, Rv. 44 som *Inner wall feature* og *Breach line* ble satt til å være den nylig opprettede polylinjen. *Inner wall height* ble satt til 500, for å sikre at ingen strømninger skulle passere vegen. Resultatet ble en modifisert terrengmodell med Rv. 44 fungerende som en vegg for strømningslinjene, med åpning kun der den eksisterende åpne

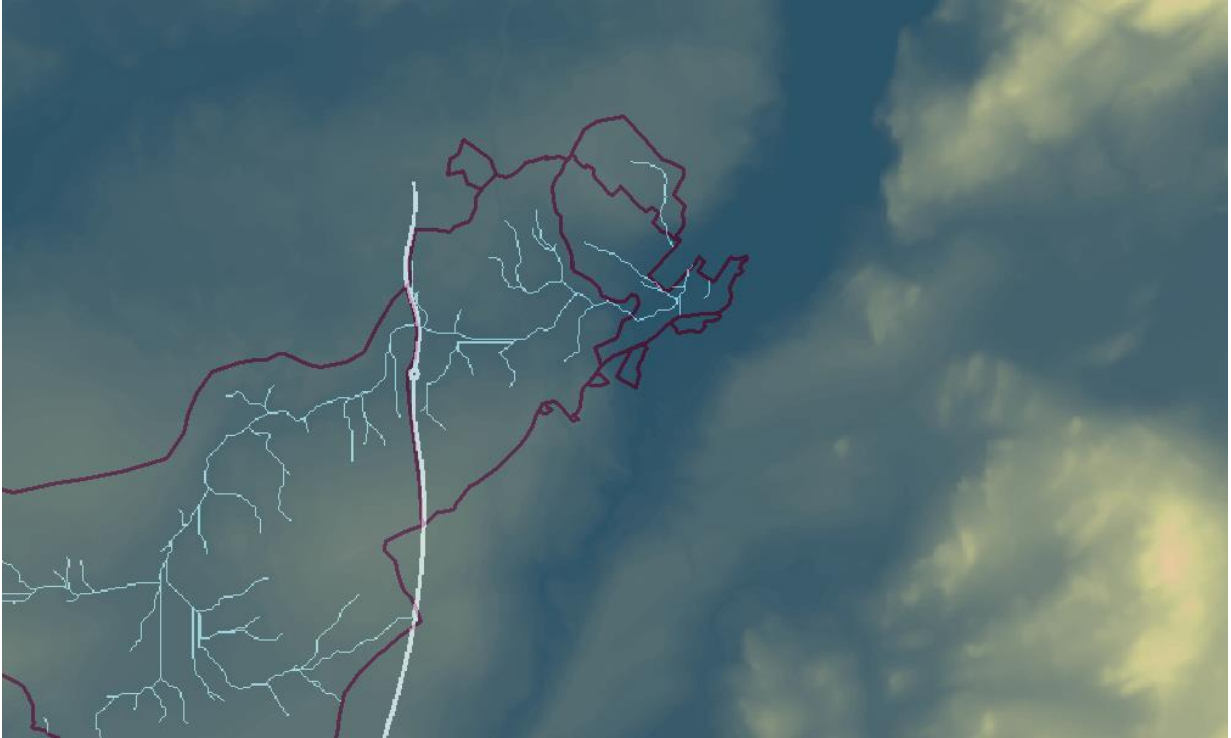
kanalen går under vegen. Den nye terrengmodellen, samt strømningslinjene og områdeinndelingen er vist på Figur 69. Vegen er godt synlig da den er løftet vertikalt 500 meter, og man ser strømningslinjene passere vegen der den åpne kanalen ligger.



Figur 67: Prinsippskisse av vegg som endrer retning på strømningslinjer i Build walls verktøyet (skisse).



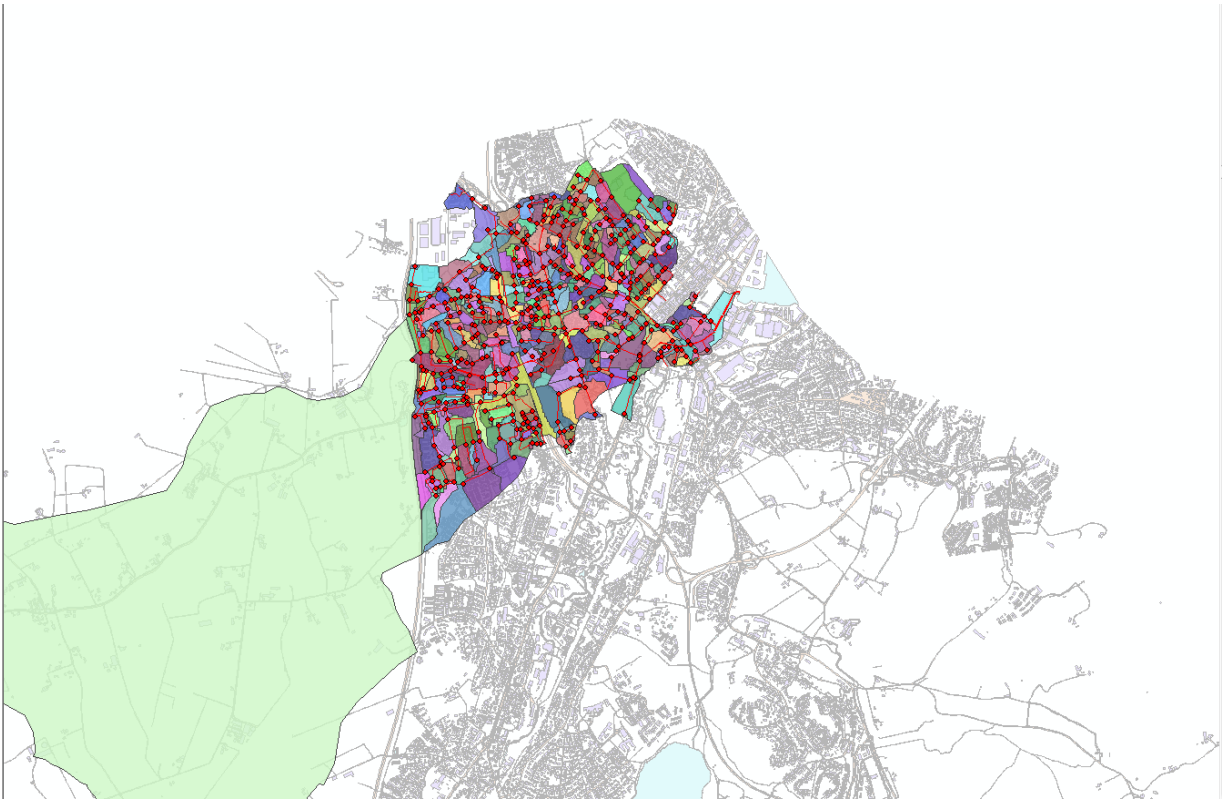
Figur 68: Prinsippskisse av vegg som inneholder breach line i Build walls verktøyet (skisse).



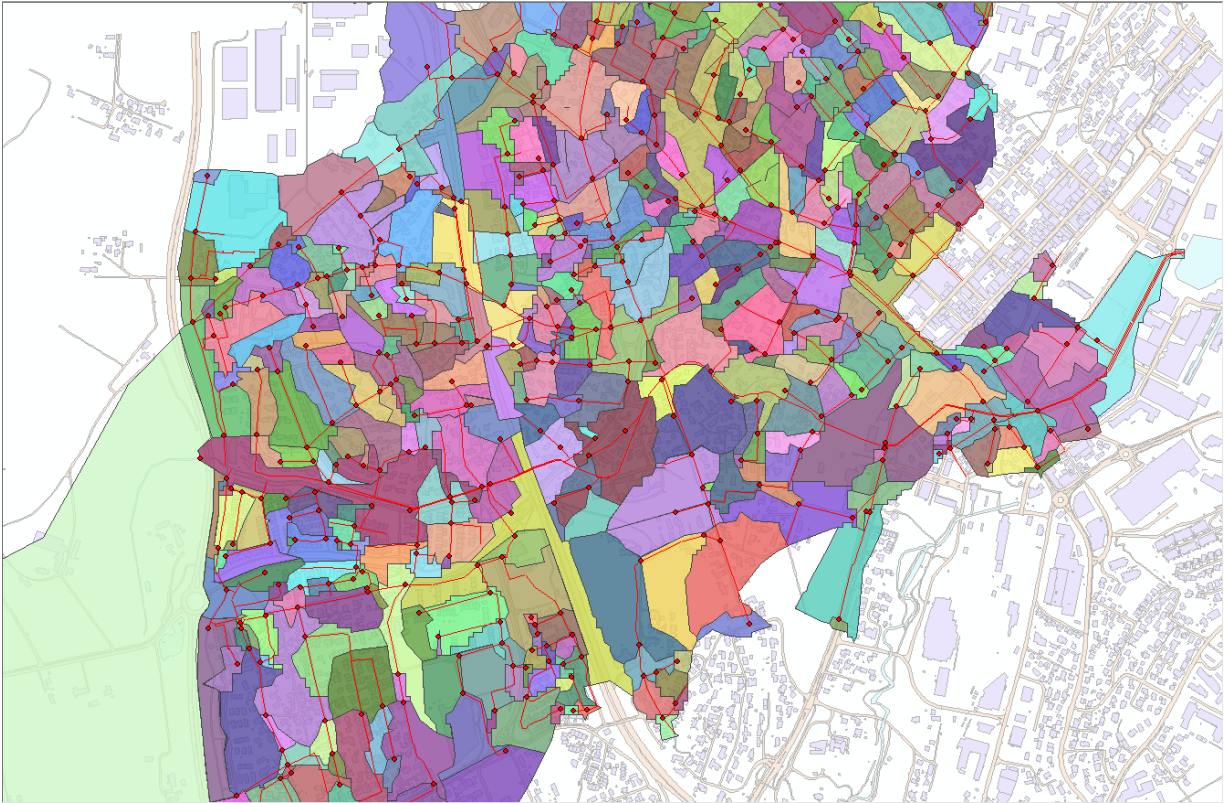
Figur 69: Modifisert terrengmodell der Rv. 44 fungerer som vegg.

Watershed

- *Flow Direction* ble brukt som inndata i *Watershed* verktøyet, sammen med *pour points* (utløpspunkt for nedslagsfeltet). *Pour points* tilsvarte inntakspunktene til overvannssystemet og ble plassert på noder i overvannssystemet som oppfylte listen med kriterier, tidligere omtalt i kapittel 5.3.6. *Value* ble brukt som *pour point field*. *Watershed*-verktøyet produserte en rasterfil som inneholdt nedslagsfelt til hver *pour point* i overvannssystemet.
- *Raster to polygon* ble benyttet for å gjøre rasterfilen om til polygoner som skulle mates inn i SWMM. I tillegg ble *Feature vertices to Points* brukt til å bestemme hjørnepunktene til alle nedslagspolygonene. Videre ble *Add XY Coordinates* benyttet til å gi alle hjørnepunkter koordinater, som også skulle mates inn i SWMM.
- I alt ble 462 innløpspunkt med tilhørende nedslagsfelt identifisert, som vist på Figur 70 og Figur 71. De ulike fargepolygonene representerer nedslagsfeltene til de definerte inntaksnodene. Inntaksnodene er markert som røde punkt.



Figur 70: Nedslagsfelt for alle inntakskummer i Sandnes sentrum (skjermdump).



Figur 71: Forstørret figur av inndelingen av nedslagsfelt for alle inntakskummer i Sandnes sentrum (skjermdump).

5.4 SWMM

I oppbyggingen av SWMM-modellen ble det valgt å benytte en input-fil, som inneholdt alle nødvendige komponenter og inngangsdata. Dette ble hovedsakelig gjort med tanke på det store antall objekter som modellen besto av. Mye av inngangsdataen ble hentet fra ArcGIS, som er beskrevet under kapittel 5.3. I det følgende kapitlet 5.4.1 er det derfor lagt fokus på beskrivelsen av inngangsdata som i hovedsak ikke stammer fra ArcGIS.

5.4.1 Valg av komponenter

Komponenter som ble brukt i SWMM besto både av områdeavhengige og hydrologiske komponenter. Komponenter som var områdeavhengig ble regnet ut ved hjelp av tilgjengelig informasjon, mens hydrologiske komponenter som anses som vanskeligere å estimere ble bestemt ut fra litteraturen. Verdi eller formel for de ulike komponentene kan man se i Tabell 11.

Tabell 11: Oversikt over komponenter i SWMM.

Komponenter	Verdi / formel
Areal [m ²]	Tilgjengelig fra rasterfil

Prosent impermeable flater [%]	$\frac{A_{bygning} + A_{veg}}{A_{delfelt}} \cdot 100$	(15)
Delfeltets bredde [m]	$\frac{A}{L}$	(16)
Prosent helning [%]	Gjennomsnittsverdi tatt fra rasterfil	
Gropmagasinering for impermeable flater [mm]	$d = \frac{k_{1,impermeable}}{\sqrt{s}}$	(17)
Gropmagasinering for permeable flater [mm]	$d = \frac{k_{1,permeable}}{\sqrt{s}}$	(18)
Prosent av impermeable flater uten gropmagasinering [%]	Konstant: 25	
Mannings n for impermeable flater	Konstant: 0,011	
Mannings n for permeable flater	Konstant: 0,13	
Mannings n for betongrør	Konstant: 0,012	
Mannings n for plastrør	Konstant: 0,010	
Mannings n for åpne steinsatte kanaler	Konstant: 0,033	

Arealet av delfeltene var tilgjengelig etter inndelingen beskrevet under kapitelet 5.3.7, og ble hentet direkte ut av polygon-filen.

Prosent impermeable flater ble regnet ut ved hjelp av formel 15. Modellen tok utgangspunkt i bygninger og veger som modellens impermeable flater. Delfeltenes areal ble hentet ut som beskrevet tidligere. Prosentvis impermeable flater ble kalkulert som en førstegangsverdi, og ble senere brukt til kalibrering.

Delfeltenes bredde baserte seg på delfeltets areal og den gjennomsnittlige maksimale lengden for overflateavrenning, og ble regnet ut med formel 16 (Rossman, 2015). Utregningen av lengden tok

utgangspunkt i gjennomsnittet av lengden fra delfeltets utløp til polygonets hjørner. På samme måte som impermeable flater var delfeltenes bredde en førstegangsverdi, som senere ble brukt til kalibrering.

Prosent helning ble funnet ved å ta gjennomsnittet av helningen for hver celle i rasterfilen innenfor hvert delfelt (Rossman, 2015).

Gropmagasinering for impermeable og permeable flater varierte for hvert enkelt delfelt, og ble representert ved formel 17 og 18. Variabelen s representerte helningen til delfeltet, som beskrevet tidligere. Konstant K_1 var avhengig av type dekke, og ble satt til 0,07 og 0,28 for henholdsvis impermeable og permeable dekker (Butler og Davies, 2011).

Prosent av impermeable flater uten gropmagasinering ble antatt til å være 25%.

Mannings n for impermeable og permeable flater ble satt til henholdsvis 0,011 og 0,13, og skilte ikke mellom ulike typer impermeable, eller permeable flater. **Mannings n for betongrør, plastrør og åpne steinsatte kanaler** ble satt til henholdsvis 0,012, 0,010 og 0,033. For fastsettelse av Mannings n ble Rossman (2015), Norsk Vann (2014) og Statens Vegvesen (2014b) sine anbefalte verdier⁵ benyttet.

5.4.2 Importering fra ArcGIS

På grunn av at ledningsnettets og delfeltenes romlige geometri var definert i ArcGIS, kunne disse dataene importeres direkte inn i input-filen. Total størrelse på nettverket kan man se i Tabell 12.

Tabell 12: Antall importerte objekter i input-filen.

Objekt	Antall
Kummer	1105
Overløp	8
Modellutløp	10
Rør og åpne kanaler	1138

5.4.3 Fordampningsdata

Fordampningen fra vassdraget ble funnet ved hjelp av Thornthwaites formel, som beregnet potensiell fordampning, og er gitt av følgende formler (Ponce, 2014):

⁵ Norsk Vann (2014) og Statens Vegvesen (2014b) presenterte verdier for Mannings tall, M . Følgende formel ble brukt for å finne Mannings n : $n = \frac{1}{M}$

$$PET(0) = 1,6 \left(\frac{10T}{J} \right)^C \quad (19)$$

PET(0)	Potensiell fordampning ved breddegrad 0°
T	Gjennomsnittlig månedlig temperatur [C°]
C	Eksponent:

$$C = 0,0000000 J^3 - 0,0000771 J^2 + 0,01792 J + 0,49239 \quad (20)$$

J	Årlig temperatureffektivitetsindeks:
---	--------------------------------------

$$J = I_{Jan} + I_{Febr} + \dots + I_{Des} \quad (21)$$

$I_{Måned}$	Månedlig varmeindeks:
-------------	-----------------------

$$I = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514} \quad (22)$$

Videre måtte formelen korrigeres for breddegrader.

$$PET = K \cdot PET(0) \quad (23)$$

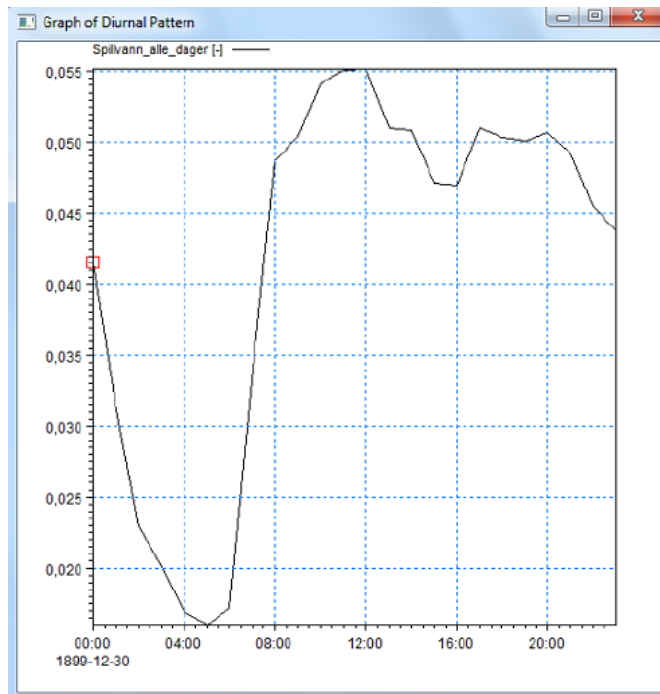
PET	Potensiell fordampning ved aktuell breddegrad [cm/måned]
K	Konstant for hver måned, som korrigerer for andre breddegrader enn 0°.

Ved å bruke Thornthwaite tok man utgangspunkt i gjennomsnittlig månedstemperaturer for 2016, som er hentet fra Yr (2017a). Dette medførte at modellen baserte seg på antagelsen om at fordampningen var lik for hver dag innad i samme måned.

5.4.4 Spillvannsvariasjon over døgnet

Som tidligere beskrevet under kapittel 3.5, finnes det ledningsnett i Sandnes som er fellessystem og som er koblet på overvannsnett. Derfor var det nødvendig å lage et *Time Pattern* i SWMM, basert på spillvannsvariasjon til Sandnes. Lende (2013) presenterte spillvannsvariasjon over døgnet for Tronesfeltet, henholdsvis område SC4, og er basert på målinger i Sandnes Kommune. Videre klassifiserte Lende

(2013) spillvannsvariasjonen som representativt for SC4. Det ble derfor benyttet samme spillvannsvariasjon for samtlige av fellessystemene, på grunnlag av antagelsen om liten endring i spillvannsvariasjon mellom fellessystemene. Dette er vist på Figur 72. Merk at figuren er dimensjonsløs.



Figur 72: Spillvannsvariasjon benyttet for fellessystemene. Figuren er hentet fra Lende (2013).

Ved å bruke shape-filene over bebyggelse, fellesledninger og høydekoter ble bebyggelsen i områdene som brukte fellessystem tildelt innløpsnoder for spillvannet. Inndelingen tok utgangspunkt antagelsen om at stikkledning fra hus gikk til nærmeste nedstrøms innløpspunkt på fellessystemet. Om flere fellesledninger var i nærheten, ble innløpsnoden på fellesledningen på fremsiden av huset valgt. På grunn av variasjonen av boligtype i nedslagsfeltet, tok man utgangspunkt i 2,3 PE⁶ per bolig Statistisk sentralbyrå (2013). I tillegg til vanlig bebyggelse var også to barnehager og Sandnes rådhus antatt påkoblet fellessystemet, med antagelsen et spillvannsforbruk på henholdsvis 40 l/d*elev og 80 l/d*ansatt (Lindholm, *et al.*, 2012). Samlet bidro barnehagene med 156 elever, og 53 ansatte⁷ (Hans og Grete Barnehage SA, (u.å.), Sandnes

⁶ PE er en forkortelse for personekvivalent

⁷ Basert på antagelsen om at det er like mange ansatte pr. elev på Rådhusmarka barnehage som på Hans og Grete Barnehage. Henholdsvis 22 og 31 ansatte.

Kommune, (u.å.)), og rådhuset med en antatt ansattbase på 300. Videre vil også spillvannsvariasjon bli omtalt som dry weather flow (DWF).

5.4.5 Nedbør for dimensjonering

Det ble valgt å konstruere et symmetrisk hyetogram for nedbørhendelsen med 200 års returperiode. En nedbørhendelse har sjeldent en konstant regnintensitet, slik at man ved bruk av symmetrisk hyetogram får en mer realistisk avrenning sammenlignet med et kasseregn. I tillegg vil man få dimensjonerende vannføring i hele ledningsnett i en og samme beregning, og dersom systemet befinner seg innenfor samme meteorologiske forhold kan hyetogrammet benyttes på alle ledningsnett uavhengig av konsentrasjonstid. Det ble tatt utgangspunkt i prinsipper fra Lindholm (1978), for å bygge opp det symmetriske hyetogrammet (NIVA, 2003):

- Hyetogrammet konstrueres på bakgrunn av en vanlig IVF-kurve. Her er målestasjonen 44730 Sandnes Rovik sin IVF-kurve benyttet.
- Det antas at hyetogrammet er symmetrisk om sin akse.
- Regnvolumet som de X minuttene med høyest regnintensitet har likt volum som et kasseregn med lik regnvarighet.
- Beregningssteg på 5 minutter er benyttet, da dette gir god detaljgrad, uten at man får meget høye spissintensiteter (som kan være tilfelle dersom man benytter beregningssteg på 1 minutt).

Ettersom oppgaven spesifiserte bruk av en nedbørhendelse med 200 års gjentakintervall ble intensitetene hentet ut fra IVF-kurven. Det ble valgt å ta utgangspunkt i en regnvarighet på 60 minutter. IVF-kurven er i sin helhet gjengitt i Vedlegg B. Nedbørintensiteten ble direkte hentet ut i fra ulike konsentrasjonstider fra tabellverdier eller ved avlesning av IVF-kurven. Grunnlagsdataen for å konstruere hyetogrammet er vist i Tabell 13.

Tabell 13: Verdier fra målestasjon 447030 Sandnes -Rovik (Meteorologisk institutt, 2017).

Varighet [min]	Intensitet [l/s*ha]
10	254,7
20	148,1
30	110,5
40	88,0
50	82,0
60	76,2

Deretter ble følgende formler benyttet for å ta hensyn til beregningssteg på 5 minutter:

$$I_X = \frac{V_x}{\Delta t} \quad (24)$$

$$I_X - I_{X-1} = \frac{V_x - V_{X-1}}{\Delta t} \quad (25)$$

$$I_{10} = \frac{V_{10}}{\Delta t} = \frac{254,7 * 10}{10} = 254,7 \frac{l}{s * ha}$$

$$I_{20} = \frac{V_{20} - V_{10}}{\Delta t} = \frac{(148,1 * 20) - (254,7 * 10)}{10} = 41,5 \frac{l}{s * ha}$$

$$I_{30} = \frac{V_{30} - V_{20}}{\Delta t} = \frac{(110,5 * 30) - (148,1 * 20)}{10} = 35,3 \frac{l}{s * ha}$$

$$I_{40} = \frac{V_{40} - V_{30}}{\Delta t} = \frac{(88,0 * 40) - (110,5 * 30)}{10} = 20,5 \frac{l}{s * ha}$$

$$I_{50} = \frac{V_{50} - V_{40}}{\Delta t} = \frac{(82,0 * 50) - (88,0 * 40)}{10} = 58,0 \frac{l}{s * ha}$$

$$I_{60} = \frac{V_{60} - V_{50}}{\Delta t} = \frac{(76,2 * 60) - (82,0 * 50)}{10} = 47,2 \frac{l}{s * ha}$$

Intervallene beskrev halve nedbørhendelsen, der den største intensiteten viste til sentrum av nedbørhendelsen. Verdiene ble fordelt på 5 minutters intervaller etter speiling om sin egen akse. Tabell 14 viser dataen som ga grunnlaget for oppbyggingen av det symmetriske hyetogrammet.

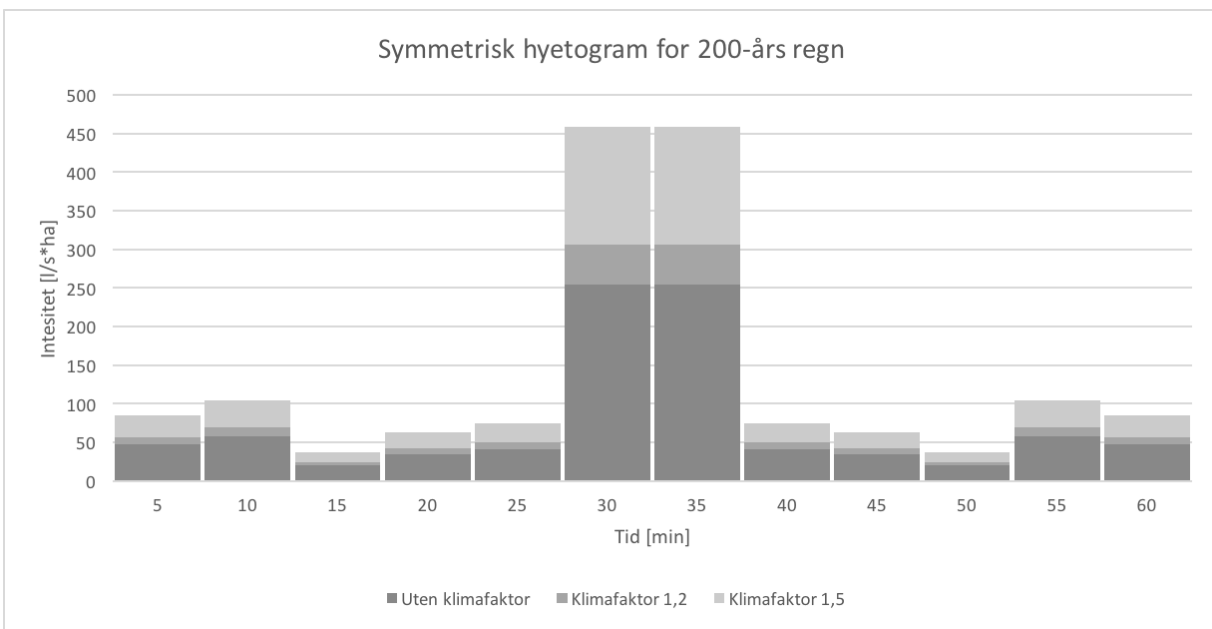
Tabell 14: Data for symmetrisk hyetogram.

Tid [min]	Intensitet [l/s*ha]
5	47,2
10	58
15	20,5
20	35,3
25	41,5
30	254,7
35	254,7
40	41,5
45	35,3
50	20,5
55	58
60	47,2

I følge Sandnes kommune sin VA-norm skal klimafaktor på 1,2 benyttes dersom IVF-verdier blir brukt som dimensjoneringsgrunnlag. Det ble imidlertid valgt å lage to symmetriske hyetogram som henholdsvis baserte seg på klimafaktorene 1,2 og 1,5. Sistnevnte klimafaktor ble inkludert på grunn av forventet økende klimaendring med mer enn 20%. Verdiene for nedbørhendelsene uten klimafaktor, med klimafaktor 1,2 og med klimafaktor 1,5 er vist i Tabell 15. Tilhørende symmetrisk hyetogram er vist på Figur 73.

Tabell 15: Intensiteter med og uten klimafaktor.

Tid [min]	Uten klimafaktor	Klimafaktor 1,2	Klimafaktor 1,5
5	47,2	56,64	84,96
10	58	69,6	104,4
15	20,5	24,6	36,9
20	35,3	42,36	63,54
25	41,5	49,8	74,7
30	254,7	305,64	458,46
35	254,7	305,64	458,46
40	41,5	49,8	74,7
45	35,3	42,36	63,54
50	20,5	24,6	36,9
55	58	69,6	104,4
60	47,2	56,64	84,96



Figur 73: Symmetrisk hyetogram med og uten klimafaktor.

5.4.6 Kalibrering av modell

I komplekse og store urbane vassdrag vil manuell kalibrering kunne være svært tidkrevende, og utsatt for partiskhet av utførende part. Gjennom rapporten til Mittet, *et al.* (2017) ble rammeverket til Madsen (2003) testet på fire delfelt i Bergen, for å se på ytelsen til den kalibrerte modellen. Rapporten konkluderte med at den kalibrerte modellen gjenga observert avrenning med tilstrekkelig nøyaktighet. På grunnlag av dette ble rammeverket til Madsen (2003) benyttet for å kalibrere prosjektets SWMM-modell. Rammeverket tar for seg tre hovedelementer for å utføre en automatisk kalibrering av en modell:

Modellparameterisering og bestemmelse av kalibreringsparametere

- Spesifisering av kalibreringskriterier
- Valg av optimaliseringsalgoritme

Bestemmelse av kalibreringsparametere

Opp mot 12 kalibreringsparametere ble benyttet til kalibreringen, sett av Tabell 16. Parameterne ble bestemt ut ifra antatt virkning på simulert hydrogram. Her ble en prøv-og-feil metodikk benyttet for å finne tilfredsstillende antall parametere. Som nevnt i Mittet, *et al.* (2017) vil benyttelse av parametere istedenfor å kalibrere fysiske komponenter direkte i modellen, gjøre at de fysiske komponentene kunne variere for hvert delfelt da bare parameterne ville bli tilegnet konstant verdi.

Tabell 16: Kalibreringsparametere benyttet i KF1 og KF2 (* markerer parametere ekskludert i KF2).

Parameter	Beskrivelse	Formel/faktor
a, b	Bredde	$W = a * \left(\frac{A}{L}\right)^b$
c, d, e	Impermeable flater	$c + d * \left(\frac{A_{bygning} + A_{veg}}{A_{delfelt}} \cdot 100\right)^e$
f	Effektiv nedbør. Faktor som tok høyde for nedbør som ikke nådde ned til overflaten	$f * nedbør$
g	Korreksjonsfaktor for DWF	$g * DWF$

h	Routing av vannet. Beregnet beste tilpasning ved routing av vannet for hele vassdraget	$h \in [\textit{impervious}, \textit{pervious}, \textit{outlet}]$
i	Multiplikativ eller additiv faktor for korleksjon av vannføring	$i * \textit{vannføring}$ eller $i + \textit{vannføring}$
j^*	Maksimal sats på infiltrasjon	Optimaliserer for j
k^*	Minkende infiltrasjonskapasitet	Optimaliserer for k
l^*	Tørketid fra våt til tørr jord	Optimaliserer for l

Spesifisering av kalibreringskriterier

Da hensikten med prosjektet var å bestemme dimensjonerende vannmengde for kulverten i Sandnes sentrum, var det nødvendig at den objektive funksjonen til den automatiske kalibreringen gjenspeilte hensikten. Nash-Sutcliffe effektivitetskoeffisient (NSE) (Nash og Sutcliffe, 1970) ble valgt på bakgrunn av sin brukbarhet på flomtopper, og vises av formel 26. Som nevnt i McCuen, Knight og Cutter (2006) har NSE tidligere blitt benyttet som suksessfull metode i kalibreringen av parametere, også i Mittet, *et al.* (2017). Videre ble konvergens av objektivfunksjonen satt som et kalibreringskriterium.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_s^t - Q_o^t)^2}{\sum(Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (26)$$

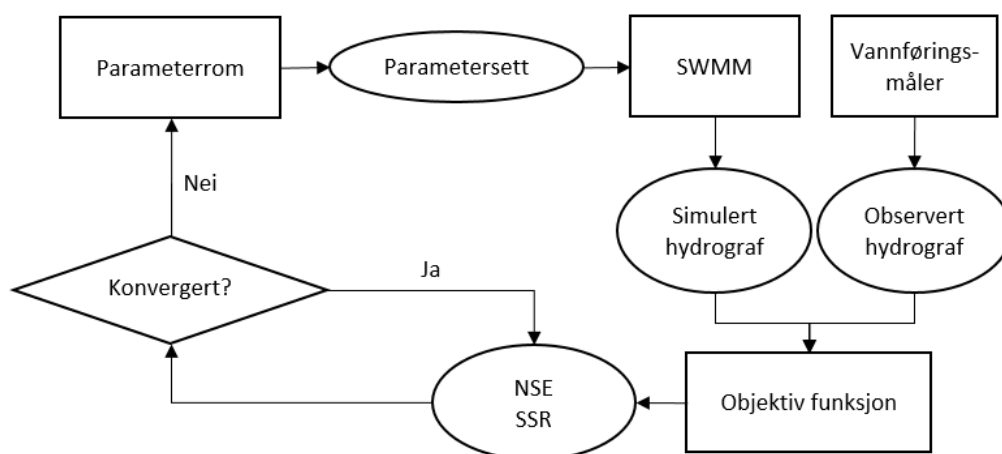
NSE	Nash-Sutcliffe effektivitetskoeffisient
Q_s^t	Simulert vannføring ved et gitt tidssteg
Q_o^t	Observert vannføring ved et gitt tidssteg
$\overline{Q_o}$	Gjennomsnittet av observert vannføring for tidsserien

NSE-verdien kan variere mellom 1 og $-\infty$, og en verdi på over 0 betyr at simulerte verdier har en bedre nøyaktighet enn gjennomsnittet av observerte data, mens det motsatte er tilfellet for en NSE-verdi under 0. NSE lik 1 tilsvarer en perfekt tilpasning med mellom simulerte og observerte data.

Valg av optimaliseringsalgoritme

På bakgrunn av suksessfull implementering av Shuffle Complex Evolution (SCE) (Duan, Sorooshian og Gupta, 1992) i rapportene til både Barco, Wong og Stenstrom (2008) og Mittet, *et al.* (2017), som henholdsvis kalibrerte fire og 14 parametere automatisk i SWMM, ble det innført SCE som optimaliseringsalgoritme i prosjektet.

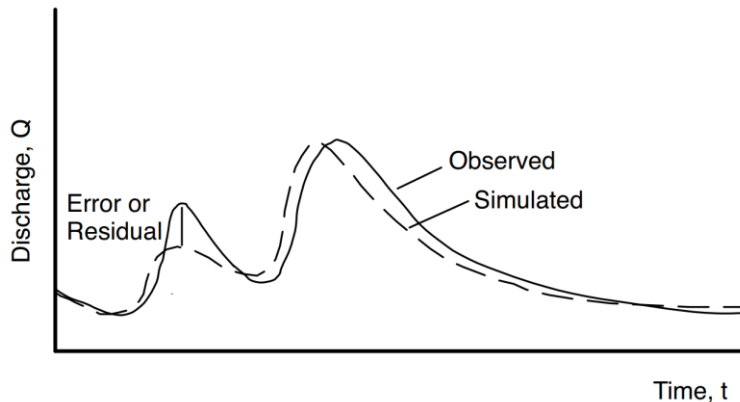
For å automatisere kalibreringen og optimaliseringen av parametersett ble det benyttet et skript med utgangspunkt i SCE og NSE, som inneholdt de alle nødvendige komponentene. Figur 74 viser skjematisk oppbygging av det automatiske kalibreringsscriptet.



Figur 74: Skjematisk oppbygging av automatisk kalibreringsscriptet.

Øvre og nedre grense for parameterne, parameterrommet, måtte først defineres før skriptet kunne kjøres. Når konvergensi av NSE-verdi fant sted, ble beste NSE-verdi og tilhørende parametersett skrevet ut til en tekstfil. Parametersettet som ga høyest NSE-verdi ble ansett som det optimale parametersettet for den spesifikke simuleringen. Det optimale parametersettet ga videre grunnlaget for å produsere ett simulert hydrogram for en 200-års nedbørhendelsen.

Ved hjelp av den objektive funksjonen kunne simulert og observert hydrogram sammenlignes, og på denne måten stenge ute subjektiv bedømming av kalibreringsresultatet. I tillegg til en NSE-verdi ble det hentet ut *Sum of Squared Residuals* (SSR) fra samme parametersett, som beskrev avviket mellom observert data og estimert resultat. SSR-verdien gir en indikasjon på godheten til kalibreringen, der lavere verdier er ekvivalent med øket godhet (Burke, 2001). På Figur 75 er residual illustrert.



Figur 75: Illustrasjon av residual mellom observert og simulert hydrogram (Beven, 2012).

I det følgende er det beskrevet flere kalibreringsforsøk, og de ulike forsøkene var fortsatt basert på samme skript.

Prosjektområdet bestod av et område oppstrøms for avløpsmåleren med måledata og et område nedstrøms for avløpsmåleren som ikke hadde måledata som tidligere nevnt i 3.8. Før kalibreringsforsøkene fant sted ble området som ikke hadde måledata fjernet fra skriptet for å redusere beregningstiden, ettersom området uten måledata ikke ville påvirke kalibreringsresultatet. Deretter ble kalibreringsparameterne overført til området uten målinger når modellen var tilstrekkelig kalibrert gjennom en internoverførbarhet.

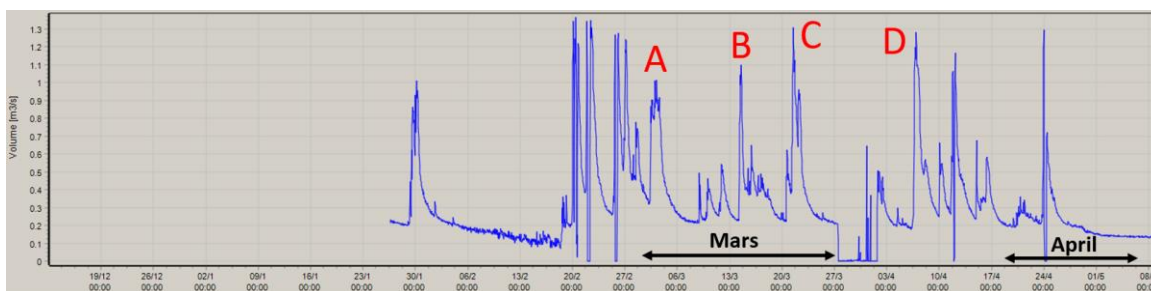
Kalibreringsforsøk 1 (KF1)

I første kalibreringsforsøk (KF1) tok man utgangspunkt i to ulike tidsserier, og kalibreringsparameterne a til l . En tidsserie på 22 dager i april og en på 25 dager i mars, illustrert av Figur 76. Eksakt tidspunkt for start og slutt kan ses av resultatet. KF1 simulerte samme tidsserie med ulike simuleringsintervaller, først 60 minutter, og senere beregningsintervall med finere oppløsning. Dette ble foretatt på grunnlag av at simuleringsintervall på 60 minutter krevde mindre beregningskraft, tok mindre tid. På denne måten kunne potensialet til kalibreringssettet og tidsserien evalueres, før andre simuleringer med lengre beregningstid ble satt i gang. Et annet formål med å bruke beregningsintervall med finere oppløsning var å holde beregningstegene mindre enn responstiden for nedslagsfeltet. I tillegg ble det lagt vekt på å bruke perioder uten kontinuitetsbrudd, så langt det lot seg gjøre. KF1 optimaliserte for NSE-verdien.

Kalibreringsforsøk 2 (KF2)

Det ble senere valgt å gjøre et nytt kalibreringsforsøk, omtalt som kalibreringsforsøk 2 (KF2). Fire flomtopper ble valgt ut, og hensikten var å synliggjøre eventuell effekt av usikkerheten knyttet til

parametersettene. Avrenningsstoppene A, B, C var i mars, mens D var i april, og er vist på Figur 76. I utvelgelsen av flomtopper ble det bestemt å 1) benytte flomtopper som inneholdt kontinuerlig data, 2) benytte beregningssteg på 10 minutter, 3) utelate flomtopper som ble brukt til kalibrering av måleren (flomtopper før 28.01.2017 var konstruerte topper som Storm Aqua benyttet for å kalibrere avløpsmålerne), og 4) bruke flomtopper som kom tidlig i tidsserien for å minimere beregningstiden. Skriptet estimerte et optimalt parametersett for hver av hendelsene A til D, der parametersettene besto av parameterne a til i . Til forskjell fra KF1, optimaliserte KF2 for SSR-verdien.



Figur 76: Avrenningstopper og tidsserier for kalibrering. Tidsseriene markert med svart skrift ble brukt i KF1, og flomtoppene markert med rød bokstav ble brukt i KF2 (skjermdump).

5.4.7 Validering av modell og simulering med dimensjonerende regn

For å evaluere kalibreringssettene i KF2 sin prestasjon og evne til å beskrive responsen til en fremtidig regnhendelse, ble det sett på reproduksjonen av andre kjente nedbørhendelser. Det ble tatt utgangspunkt i de fire kjente nedbørhendelsene A, B, C og D, og hvert optimalt parametersett ble overført til de andre nedbørhendelsene. Nash-Sutcliffe ble igjen benyttet som objektiv funksjon ved reproduksjon av andre nedbørhendelser

SSR-verdiene ble videre brukt i en multikriterie tilnærming. Målet med tilnærmingen var å produsere et hydrogram som illustrerte forventet vannføring ved den ekstreme nedbørhendelsen, basert på de fire hydrogrammene til de optimale parametersettene. Tilnærmingen benyttet seg av gjennomsnittlige SSR-verdier, videre kalt mean squared error (MSE), og kan ses av formel 27. Da små MSE-verdier impliserte mindre residual, ble de vektet tyngre enn større verdier for MSE. Dette ble gjort ved å benytte den inverse av hver MSE-verdi. Videre ble fraksjonen ($f_{\text{tidsserie}}$) av hver enkelt inverse MSE-verdi beregnet med utgangspunkt i summen av de inverse MSE-verdiene i hver tidsserie. På denne måten ble de ulike parametersettene vektet innenfor hver tidsserie. Vektingstallet for hvert parametersett ble videre beregnet som fraksjonen mellom summen av $f_{\text{tidsserie}}$ innenfor hvert parametersett, og summen av samtlige $f_{\text{tidsserie}}$.

$$\frac{SSR}{(\text{Antall tidssteg i tidsserie})} \quad (27)$$

Eksempel på utregning for en hendelse:

En virtuell simulering brukte beregningssteg på 10 minutter, hadde en tidsserie på to dager og ga en SSR verdi på 11. Formel 27 for MSE gir

$$\frac{11}{(2 * 24 * 6)} = 0,012$$

Ved å vite vektallet og hydrogrammet til hvert parametersett, kunne et vektet gjennomsnitt med tilhørende hydrogram bli produsert for enhver fremtidig nedbørhendelse. Videre vil vektet gjennomsnitt bli omtalt som forventet vannføring.

Eksempelutregning av forventet vannføring kan ses i Vedlegg F. For nedbørhendelsen med 200-års gjentaksintervall ble det symmetriske hyetogrammet beskrevet i kapitel 5.4.5 benyttet, med klimafaktorer på henholdsvis 1, 1,2 og 1,5. I tillegg ble alle fire kalibreringssettene fra KF2 og totalt tre punkt av interesse inkludert i simuleringen. Punktene av interesse var de følgende:

- Utløpspunkt for SC1, også kjent som kryssingen under brua ved Rv. 44.
- Utløpet for SC2, også kjent som kulvertseksjonen med avløpsmåleren.
- Utløpet for hele vassdraget, også kjent som utløpet ved Gandsfjorden.

På samme måte som det ble benyttet et skript for å automatisere prosessen i kalibreringen, ble det også ved reproduseringen av nedbørhendelser og simulering av 200-års nedbørhendelsen benyttet et skript for å automatisere prosessen, beskrevet tidligere i dette kapitlet. Figurer og diagrammer presentert i resultatet ble produsert samtidig som simuleringene foregikk.

6 Resultat

Videre er resultatene fra kalibreringen og simuleringen av 200-årsregnet presentert. Resultatene fra kalibreringen ble basert på to ulike kalibreringsforsøk, henholdsvis KF1 og KF2. KF1 tok utgangspunktet i lengre tidsserier med ulike beregningssteg, mens KF2 baserte seg på flere og korte tidsserier, med én regnhendelse i hver tidsserie. Resultatet av simuleringen av 200-årsregnet ble basert på KF2 med sine fire respektive kalibreringssett. Resultatet viste at

- Prestasjonen til kalibreringen i KF1 i tidsserien i mars, var tilfredsstillende. Til tross for dette ble det valgt å gjøre et nytt kalibreringsforsøk.
- Prestasjonen til kalibreringen i KF2 og internoverførbarheten til de optimale parametersettene var generelt svært god
- Største forventet vannføring på grunn av en 200-årsregnet med klimafaktor lik 1,2, var 19 m³/s

Merk at usikkerhet knyttet til resultatene vil bli omhandlet i diskusjonen.

6.1 Kalibrering av modell

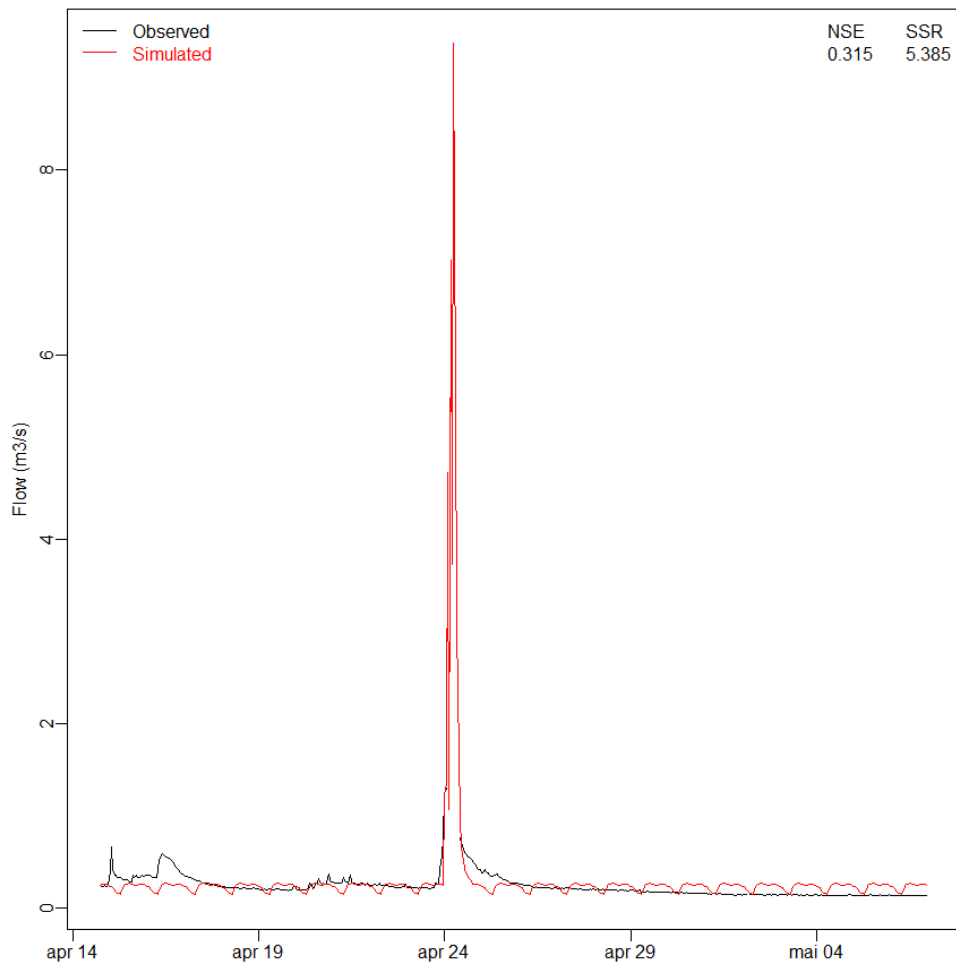
6.1.1 Kalibreringsforsøk 1 (KF1)

Det ble utført kalibrering for to ulike beregningssteg, 60 og 30 minutter. I tillegg ble det sett på to ulike kalibreringsperioder, en i mars og en i april, henholdsvis *m* og *a*. Videre vil kalibreringssettene bli omtalt som en forkortelse for kalibreringsforsøket, kalibreringsperioden *m* eller *a* og deretter beregningssteget. For eksempel vil kalibreringsforsøk 1 i mars med 60 minutters beregningssteg bli omtalt som KF1-m60. Kalibreringsperiodenes lengde er vist i Tabell 17.

Tabell 17: Oversikt over kalibreringsperiodenes varighet i KF1

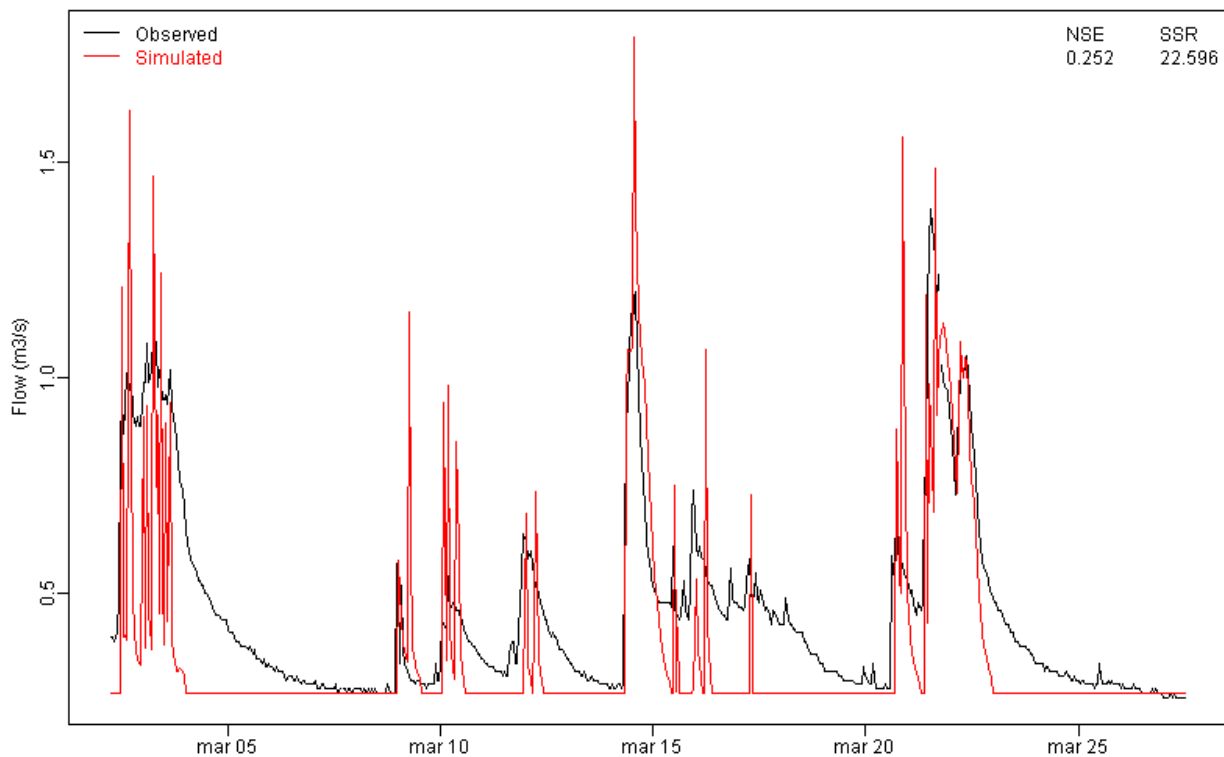
Kalibreringsperiode	Kalibreringsstart	Kalibreringslutt
Mars	14.04.17 kl.18:00	06.05.17 kl. 23:00
April	02.03.17 kl. 18:00	27.03.17 kl. 12:30

På Figur 77, Figur 78 og Figur 79 illustreres henholdsvis resultatene fra KF1 a60, m60 og m30. Simulert hydrogram er målt opp mot observert hydrogram. I tillegg er tilhørende NSE- og SSR-verdier vist på figurene.



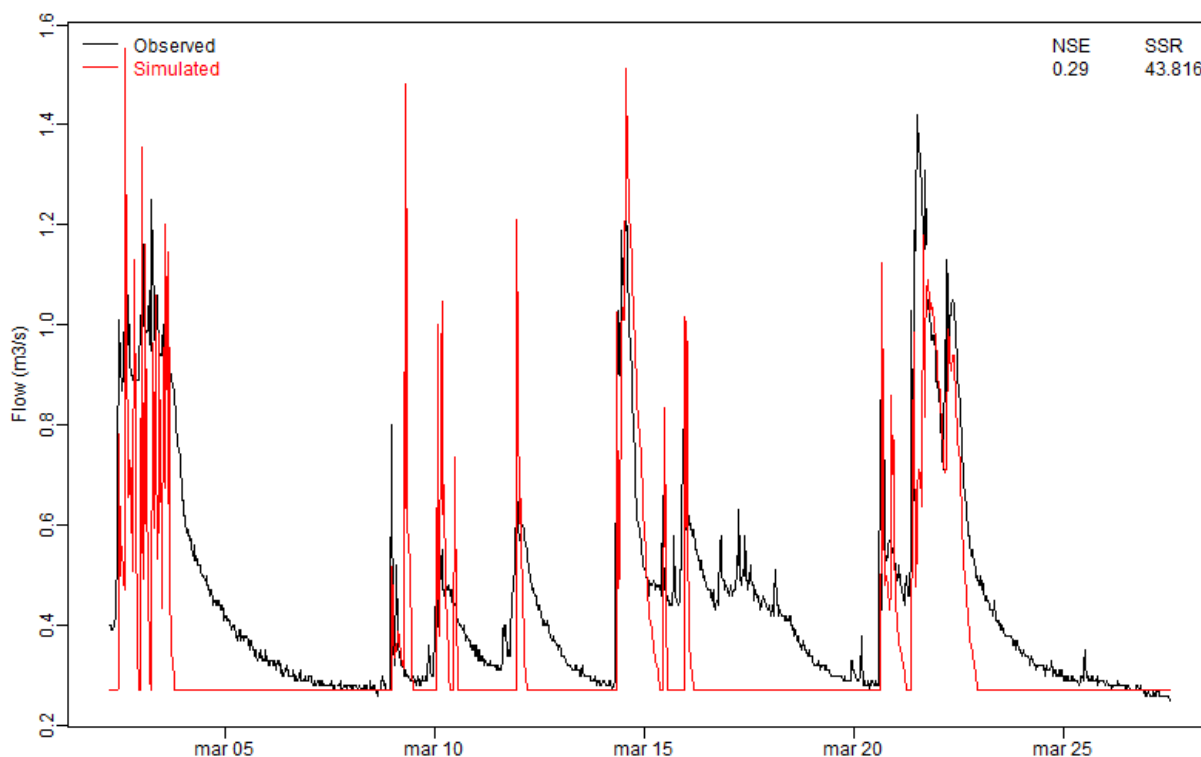
Figur 77: Hydrogram for KF1-a60 (Plot fra script).

KF1-a60 ga NSE-verdien lik 0,315 og SSR-verdi lik 5,385 ved konvergenspunktet, og brukte en multiplikativ faktor for minimum vannføring. Parametersettet ga simulert hydrogram med relativt god tilpasning til observert hydrogram, med tanke på responstiden på avrenningstoppen. Helning på avrenningstoppen samsvarer godt med observert data, men siste del av resesjonen avtar raskere enn observert data. Tilpasning til lokale flomtopper ved lav vannføring er imidlertid nesten fraværende, og en helhetlig tilpasning til lave vannstander er dårlig. I tillegg overestimerte settet i høy grad vannføring ved flomtopp, der simulert verdi ble om lag fem ganger så stor som observert. Dette førte til at det ble generert 24% mer avrenning i simuleringen enn ved observert vannføring.



Figur 78: Hydrogram for KF1-m60 (Plot fra script).

KF1-m60 fikk NSE- og SSR-verdiene henholdsvis lik 0,252 og 22,596, og benyttet en additiv korreksjonsfaktor for minimum vannføring. Resultatet viste at tilpasningen var god med tanke på responstid, men tendensen til en for bratt resesjonen av flomtopp var tilstede. Dette kan best bli sett ved første og siste flomtopp, på Figur 78. I tillegg klarte ikke kalibreringssettet å fange opp lokale flomtopper ved lave vannføringer, enten ved å overestimere eller underestimere vannføringen. Ved samtlige av de tre høye vannføringene overestimerte modellen. Resultatet viste også at simulert hydrogram genererte et avrenningsvolum tilsvarende 80% av volumet observert hydrogram genererte.



Figur 79: Hydrogram for KF1-m30 (Plot fra script).

NSE- og SSR-verdiene for KF1-m30 ble henholdsvis lik 0,29 og 43,816. Kalibreringssettet hadde en tendens til å overestimere lokale flomtopper, med unntak av vannføringen rundt 9. og 17. mars. Lave vannføringer fikk også en generell dårlig tilpasning. Også ved høye vannføringer overestimerte kalibreringssettet, og hadde henholdsvis god og dårlig tilpasning til flomtopenes stigning og resesjon. Størst forskjell mellom observert og simulert hydrogram for de største flomtoppene fant sted ved første flomtopp, og ved flomtopp rundt 9. mars for lokale flomtopper. I tillegg til at sistnevnte flomtopp overestimerte i høy grad, var den også lite sammenfallende med observert hydrogram. Videre genererte simulert hydrogram ca. 80% av avrenningsvolumet som observert hydrogram genererte.

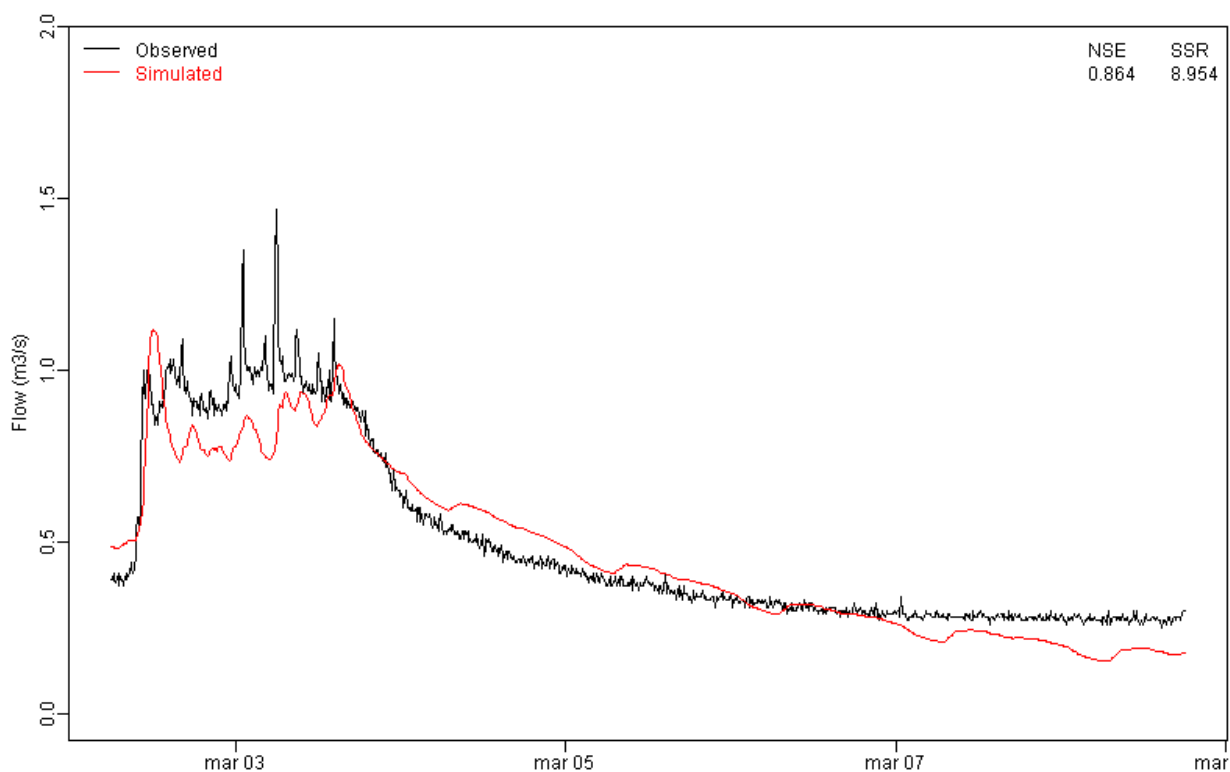
6.1.2 Kalibreringsforsøk 2 (KF2)

I kalibreringsforsøk 2 (KF2) ble det tatt utgangspunkt i fire flomtopper fra flomdataen. Flomtoppene med tilhørende kalibreringsperiode og navn på optimalt kalibreringssett er gitt i Tabell 18. Skriptet ble benyttet til å produsere et optimalt parametersett for hver flomtopp gjennom kalibreringen. Tidssteg som ble

benyttet i KF2 var 10 minutter. Figur 80, Figur 81, Figur 82 og Figur 83 viser henholdsvis hydrogram ved kalibrering av KF2-A, KF2-B, KF2-C og KF2-D.

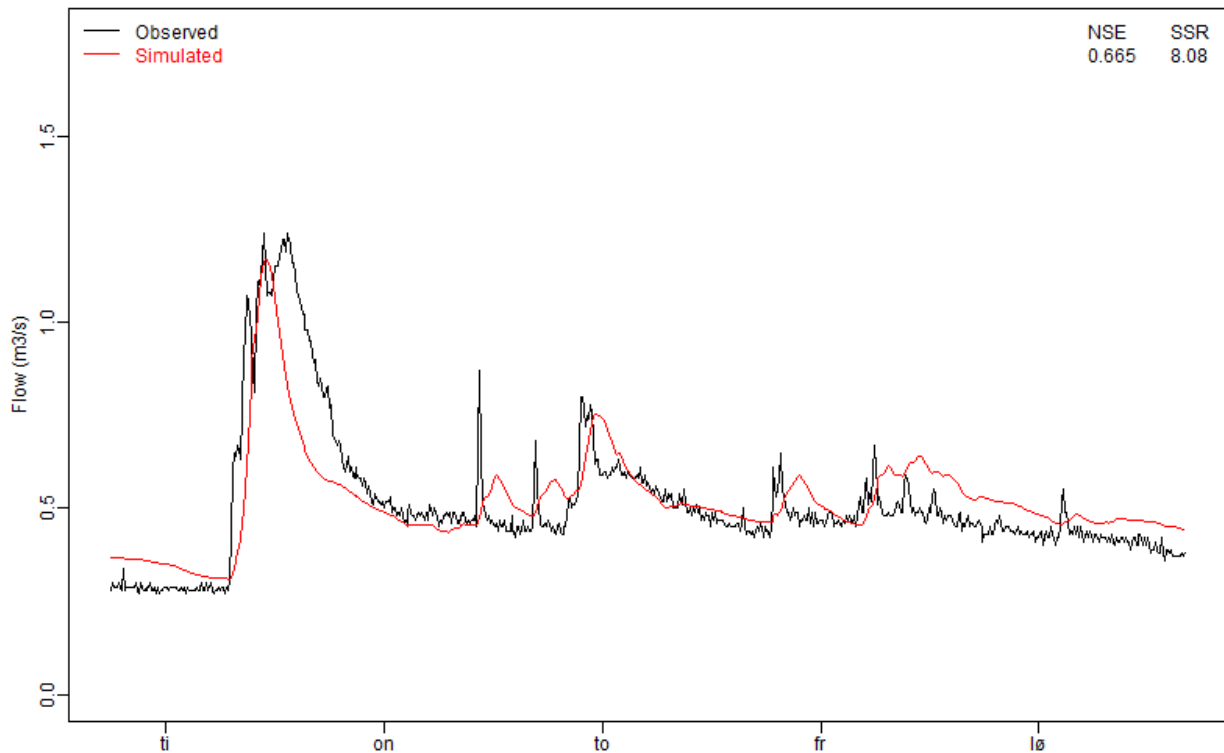
Tabell 18: Oversikt over kalibreringsperiode og navn på optimalt parametersett for ulike flomtopper.

Flomtopp	Navn på parametersett	Kalibreringsstart	Kalibreringslutt
A	KF2-A	02.03.17 kl. 06:00	08.03.17 kl. 18:00
B	KF2-B	13.03.17 kl. 18.00	18.03.17 kl.16:00
C	KF2-C	20.03.17 kl. 14:00	27.03.17 kl. 12:30
D	KF2-D	06.04.17 kl. 02:00	09.04.17 kl. 17:00



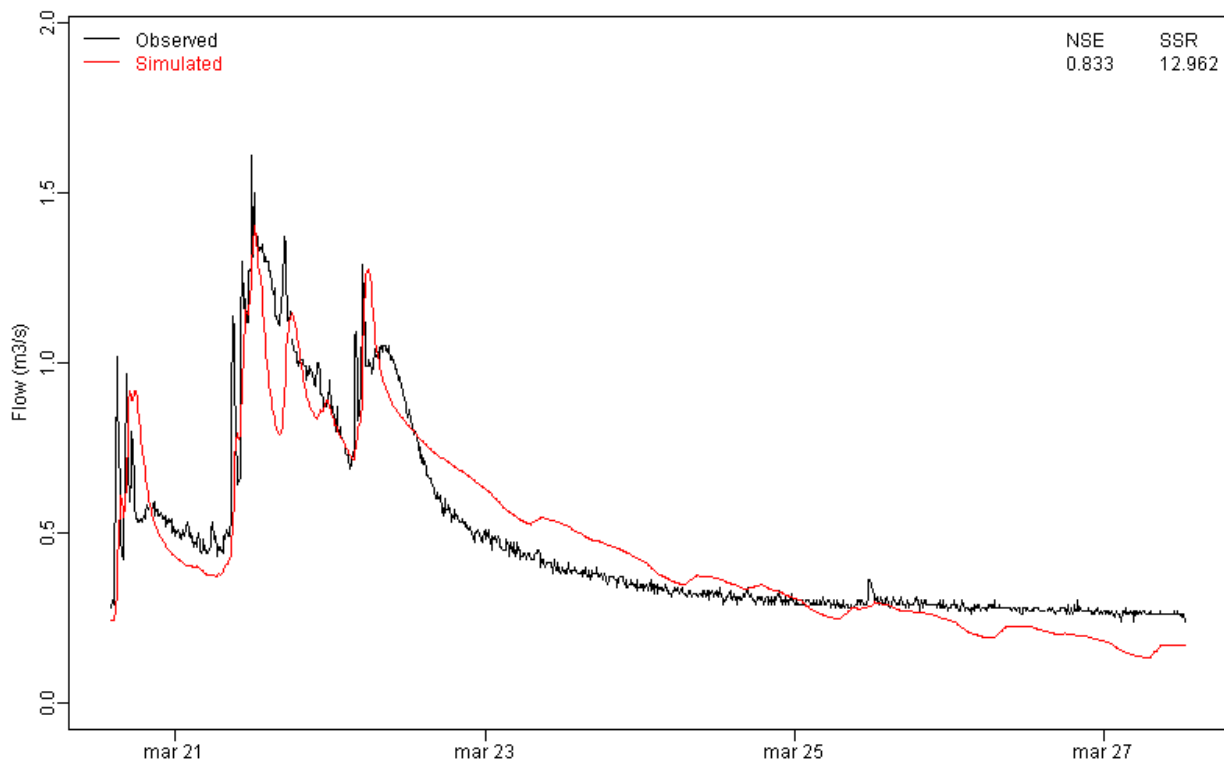
Figur 80: Hydrogram for KF2-A (Plot fra script).

Resultatet fra simuleringen av kalibreringssett KF2-A viste en NSE- og SSR-verdi på henholdsvis 0,864 og 8,954. Generelt sett flatet simulert hydrogram mer ut enn observert hydrogram, med en høyere vannføring tidlig i tidsserien og en generell underestimering av flomtoppen med unntak av første del. Varigheten på flomtoppen var imidlertid sammenfallende. Videre overestimerte kalibreringssettet første del av resesjonen med påfølgende underestimering av siste del av tidsserien. Resultatet viste også at kalibreringssettet klarte å generere 95% av totalt observert avrenningsvolum.



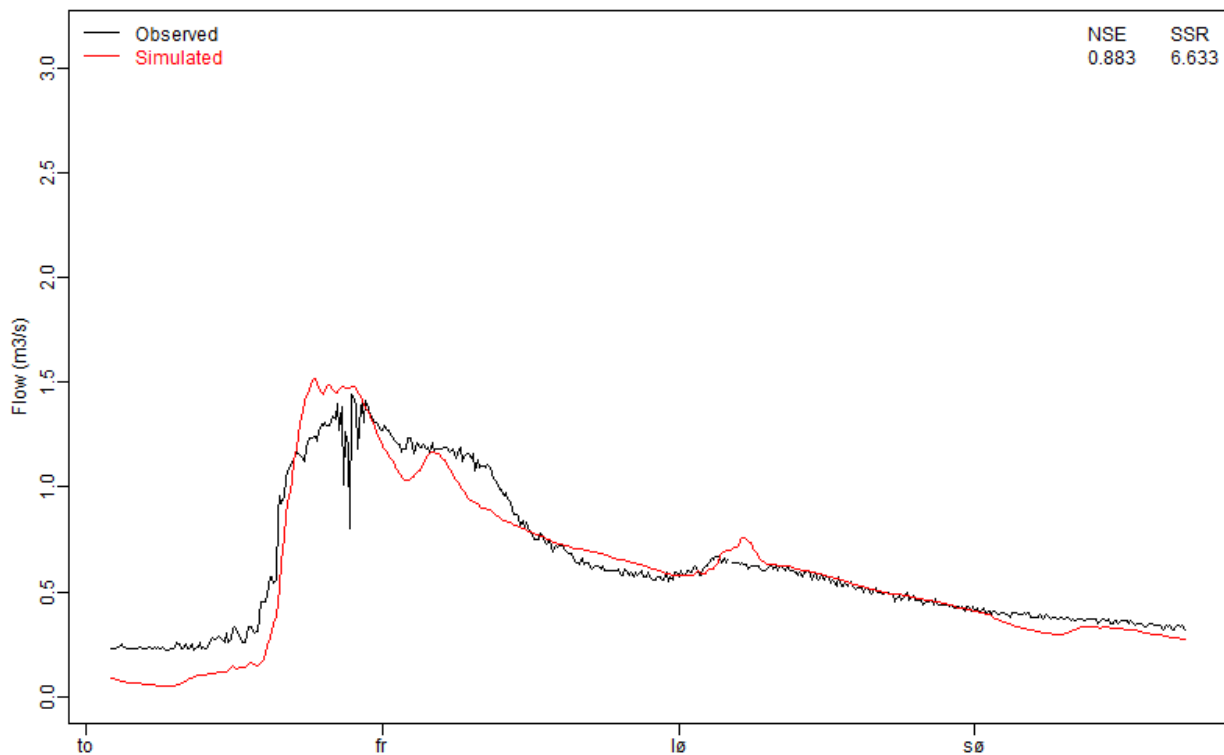
Figur 81: Hydrogram for KF2-B (Plot fra script).

NSE- og SSR-verdien for KF2-B ble henholdsvis 0,665 og 8,08. Simuleringen av KF2-B viste at simulert hydrogram generelt klarte å gjengi observert hydrogram med en liten underestimering av de største flomtoppene, henholdsvis den mellom tirsdag og onsdag, og den ved torsdag. Med utgangspunkt i den største flomtoppen var helning på stigning og resesjon godt gjengitt, men resesjonen begynte for tidlig. I tillegg hadde simuleringen en tendens til å underestimere, ha for sen responstid samt for lang varighet på de lokale flomtoppene. Lavvannsføringen på starten og mot slutten av tidsserien overestimerte imidlertid vannføringen sammenlignet med observert vannføring. Generelt sett klarte kalibreringssettet å reprodusere totalt avrenningsvolum.



Figur 82: Hydrogram for KF2-C (Plot fra script).

Simuleringen av KF2-C viste en NSE- og SSR-verdi på henholdsvis 0,833 og 12,962. Det kan ses fra Figur 82 at simulert hydrogram ikke klarte å fange opp de raske endringene i resesjon som ble observert. Som et resultat overestimerte og underestimerte simuleringen vannføringen henholdsvis tidlig og sent i resesjonen. Lavvannsføringen tidlig i tidsserien ble også underestimert. På den andre siden ble tilpasningen god med tanke på stigningen i forkant av flomtoppene. Til tross for underestimering av flomtoppene, i all hovedsak midterste topp, var det generell god tilpasning til styrken på flomtoppene. Responstiden på første og siste flomtopp var imidlertid forsinket, sammenlignet med observert data. Resultatet viste også at simulert generert volum utgjorde 98% av totalt observert volum.



Figur 83: Hydrogram for KF2-D (Plot fra script).

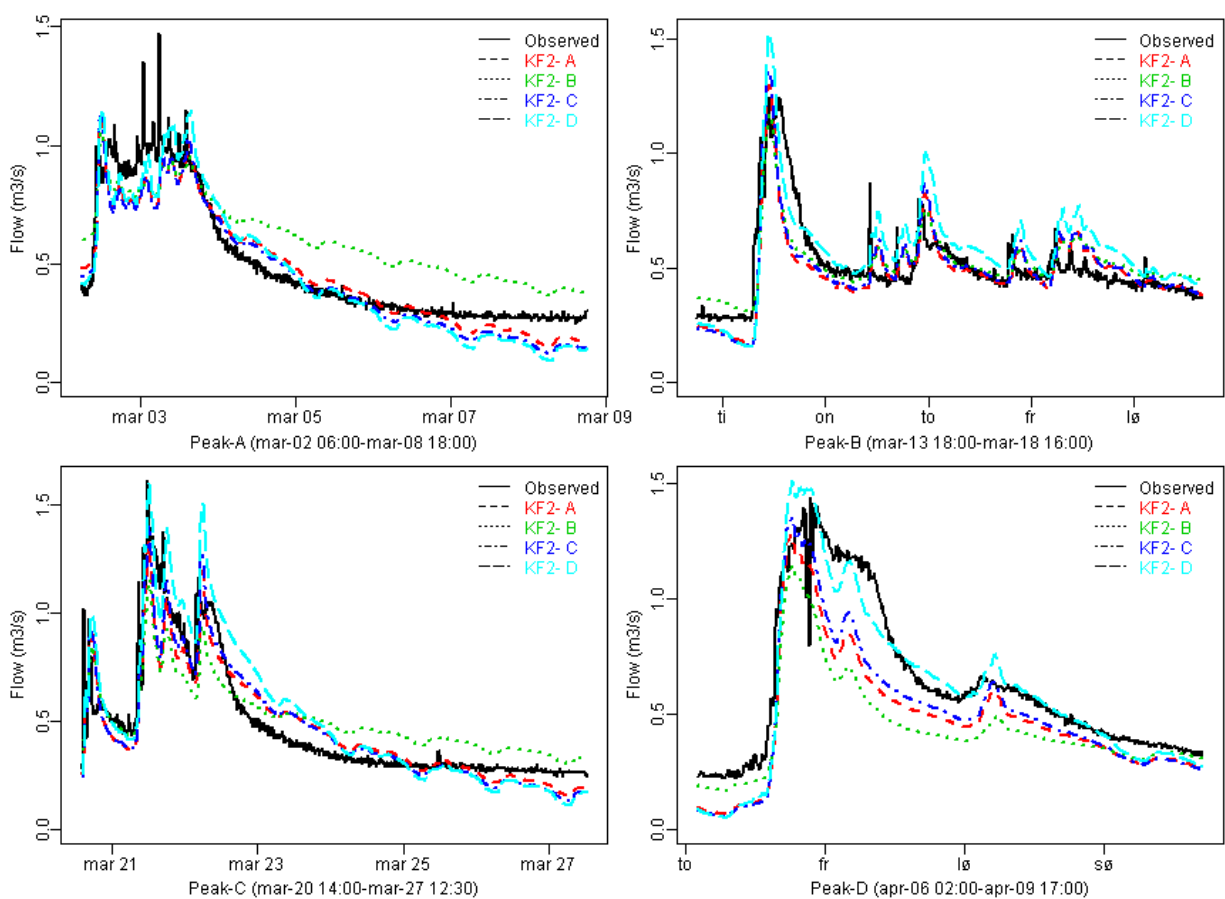
Resultatet fra simuleringen av kalibreringssett KF2-D viste en NSE- og SSR-verdi på henholdsvis 0,883 og 6.633. Tendensen var at flomtoppene ble overestimert, med unntak av simulert flomtopp like etter fredag på Figur 83. Videre begynte stigning og resesjon henholdsvis litt for sent og litt for tidlig. Til tross for dette var helningen på simulert stigning og resesjon godt tilpasset helningen på observert hydrogram. Lavvannsføringen i starten av tidsserien var dårlig tilpasset observert, men dette bedret seg mot slutten av tidsserien der tilfelle var mindre avvik. Unntaket var en lokal flomtopp som ble overestimert i simuleringen. Resultatet viste også at kalibreringssettet klarte å generere 95% av totalt observert avrenningsvolum.

6.2 Validering av kalibrert SWMM-modell

Resultatet fra reproduksjonen viste at de optimale parametersettene var de som presterte best i sin respektive tidsserie med tanke på lavest SSR-verdi. Minste og største NSE-verdi av de som ble reproduisert var 0,430 og 0,844, som henholdsvis var knyttet til reproduksjon av flomtopp B med KF2-D og flomtopp A med KF2-C. I det følgende vil hydrogrammene, sett av figur Figur 84, bli kommentert.

Tabell 19: Oversikt over NSE-verdier for reproduksjon av observert hydrogram. Kan ses i sammenheng med Figur 84.

Parametersett	Flomtopp A	Flomtopp B	Flomtopp C	Flomtopp D
KF2-A	0,864	0,583	0,826	0,640
KF2-B	0,600	0,665	0,712	0,432
KF2-C	0,844	0,585	0,833	0,736
KF2-D	0,829	0,430	0,742	0,883



Figur 84: Hydrogram for reproduksjon av nedbørhendelser. Øverst til venstre: flomtopp A. Øverst til høyre: flomtopp B. Nederst til venstre: flomtopp C. Nederst til høyre: flomtopp D (Plot fra script).

I flomtopp A fulgte samtlige av parametersettene kurve hverandre, med unntak av KF2-B som overestimerte resesjonen. Mer interessant, kan det ses at KF2-D hadde høyest estimert vannføring gjennom tidsserien, og hadde god tilpasning til styrken ved start og slutt på flomtoppen. Det var imidlertid ingen av parametersettene som klarte å fange opp de høyeste vannføringene.

På lignende vis estimerte KF2-D høyest vannføring i flomtoppen så vel som over hele tidsserien i flomtopp B, med en generell overestimering sammenlignet med observert hydrogram. De resterende simulerte kurvene fulgte hverandre tett på et lavere vannføringsnivå, nærmere observert data, og med en høyere og lavere verdi på henholdsvis NSE og SSR enn KF2-D.

Ved reproduksjon av flomtopp C hadde de simulerte kurvene generelt lik form, men lå på forskjellige vannføringsnivåer, med KF2-D som øverste simulerte kurve. Sistnevnte parametersett klarte å tilpasse seg toppen av vannføringen for alle deltoppene, med unntak av siste deltopp i tidsserien, der den overestimerte med god margin. Videre klarte ikke noen av parametersettene å tilpasse seg den bratte resesjonen, men simulerte en flatere reduksjon av vannføring.

Simuleringene av flomtopp D viste at det var KF2-D som simulerte de høyeste vannføringene, med unntak av lavvannsføringen i starten av tidsserien. Spesielt ved den globale og lokale flomtoppen overestimerte KF2-D, med enkelte partier med underestimering. Til sammenligning ble de resterende parametersettene generelt underestimert over hele tidsserien, om man ser bort ifra KF2-C tidlig i tidsseriens globale flomtopp.

Tabell 20 viser en oversikt over MSE-verdier for hvert parametersett, som er en gjennomsnittlig verdi for residual. KF2-D kom best ut, med minste verdi på 0,064. Dette var marginalt bedre enn KF2-C som fikk MSE-verdien 0,067. MSE-verdiene er imidlertid kun et gjennomsnitt, og premierte ikke lave verdier i høyere grad enn større verdier. Det ble derfor beregnet vektall for de ulike parametersettene, som kan ses av Tabell 21. Utrekningen av vektallene kan ses av vedlegg Vedlegg F. KF2-D som ble tildelt laveste og beste MSE-verdi, fikk også det høyeste vektallet. Med hensyn på synkende vektall kom de resterende parametersettene i følgende rekkefølge KF2-C, KF2-A og KF2-B. Det kan videre ses at lavere MSE ble premiert med høyere vektall.

Tabell 20: Oversikt over MSE-verdier for reproduksjon av observert hydrogram. Kan ses i sammenheng med Figur 84.

Parametersett	Flomtopp A	Flomtopp B	Flomtopp C	Flomtopp D	Sum
KF2-A	0,010	0,014	0,014	0,039	0,076
KF2-B	0,028	0,011	0,022	0,062	0,124
KF2-C	0,011	0,014	0,013	0,029	0,067
KF2-D	0,012	0,019	0,020	0,013	0,064

Tabell 21: Vekttall for hvert parametersett.

Parametersett	Vekttall
KF2-A	0,262
KF2-B	0,178
KF2-C	0,270
KF2-D	0,289
Sum	1,000

6.3 Simulering med dimensjonerende regn

Simuleringen av 200-års nedbørhendelsen ble kjørt med fire optimale parametersett. På denne måten ble vannføring estimert til å ligge innenfor et intervall. Videre ble det beregnet en forventet vannføring innenfor intervallet, på bakgrunn av vektingstallene og hydrogrammene til parametersettene. Ved dimensjonering av ny kulvert vil forventet vannføring kunne inngå i dimensjoneringsgrunnlaget. I tillegg ble det benyttet tre ulike klimafaktorer og vannføringer for tre forskjellige lokasjoner ble hentet ut, som sett på Figur 86, Figur 87 og Figur 88. Resultatet viste, ikke overraskende, at forventet vannføring økte med økt tilkoblet nedslagsfelt.

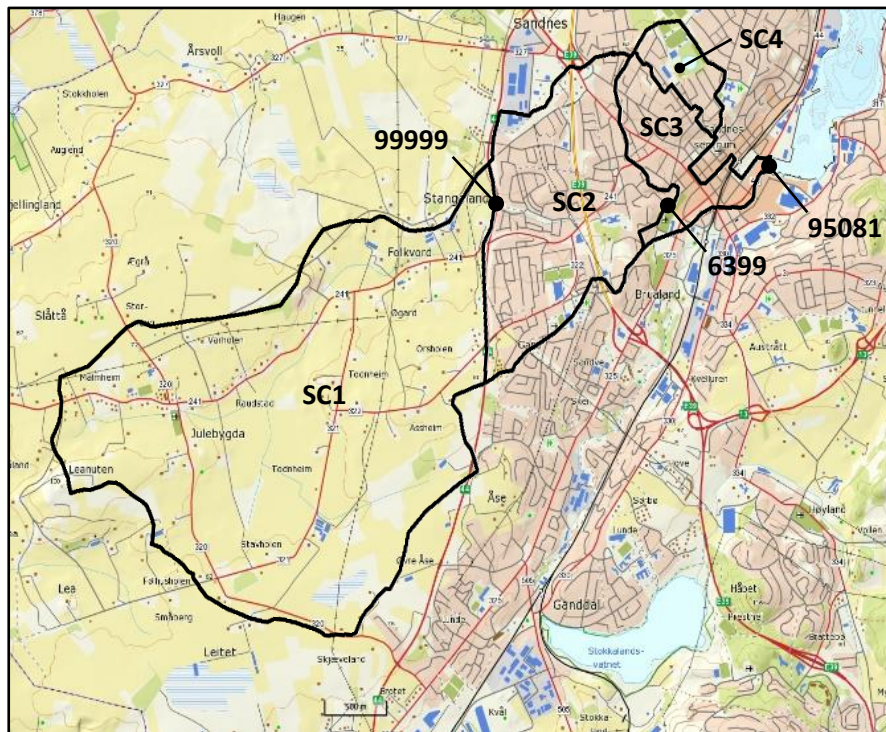
Simuleringen av 200-års nedbørhendelsen og uten klimafaktor, viste at estimert vannføring ut fra Stangelandsåna vassdrag til Gandsfjorden (node 95081) lå innenfor estimeringsintervallet 6,7 til 20,2 m³/s. En forventet vannføring innenfor intervallet ble imidlertid beregnet til 14,6 m³/s. Forventet vannføring for lokasjonen med installert vannmåler (node 6399) og kryssingen under brua ved Rv. 44. (node 99999), ble beregnet til 6,7 m³/s.

Til sammenligning lå estimert vannføring i node 95081 inkludert 20% økning i nedbør, innenfor estimeringsintervallet 8,7 til 26,9 m³/s, med en forventet vannføring på 19 m³/s. Forventet vannføring i node 6399 og 99999 ble henholdsvis beregnet til 9,4 og 1,2 m³/s.

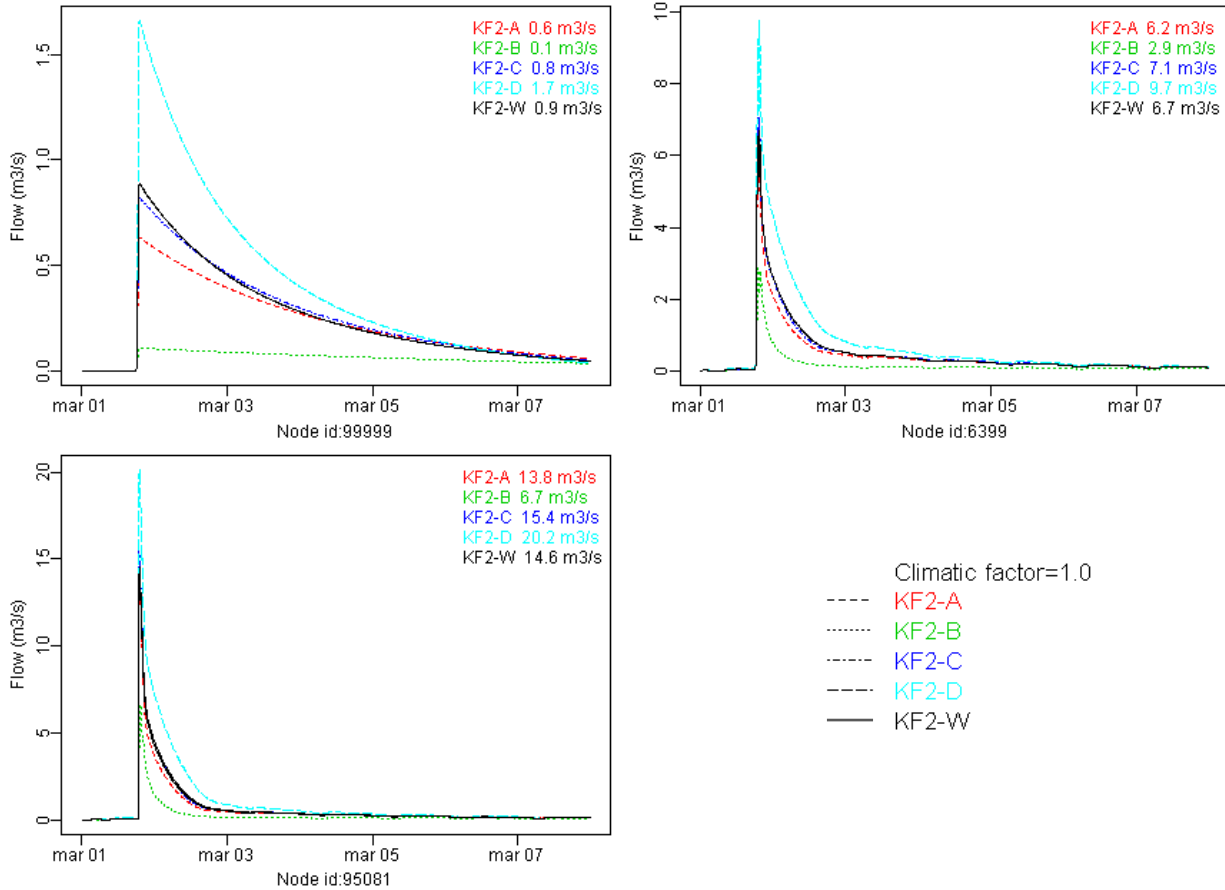
Med bakgrunn i fremtidige klimaendringer og 50% økning i nedbør, estimerte modellen en vannføring for node 95081 til å ligge mellom estimeringsintervallet 15,7 til 46,7 m³/s. Forventet vannføring innenfor intervallet ble imidlertid beregnet til 34 m³/s.

Tabell 22: Forventet vannføring ved nedbør med 200-års gjentakintervall for klimafaktorene 1, 1,2 og 1,5.

Beskrivelse	Node ID	Klimafaktor 1 [m ³ /s]	Klimafaktor 1,2 [m ³ /s]	Klimafaktor 1,5 [m ³ /s]
Utløpspunkt for SC1, kryssing under brua ved Rv. 44	99999	0,9	1,2	2,4
Kulverten med vannmåler, overgangen mellom Lunden og kirkegården	6399	6,7	9,4	18,6
Utløpet ved Gandsfjorden	95081	14,6	19	34



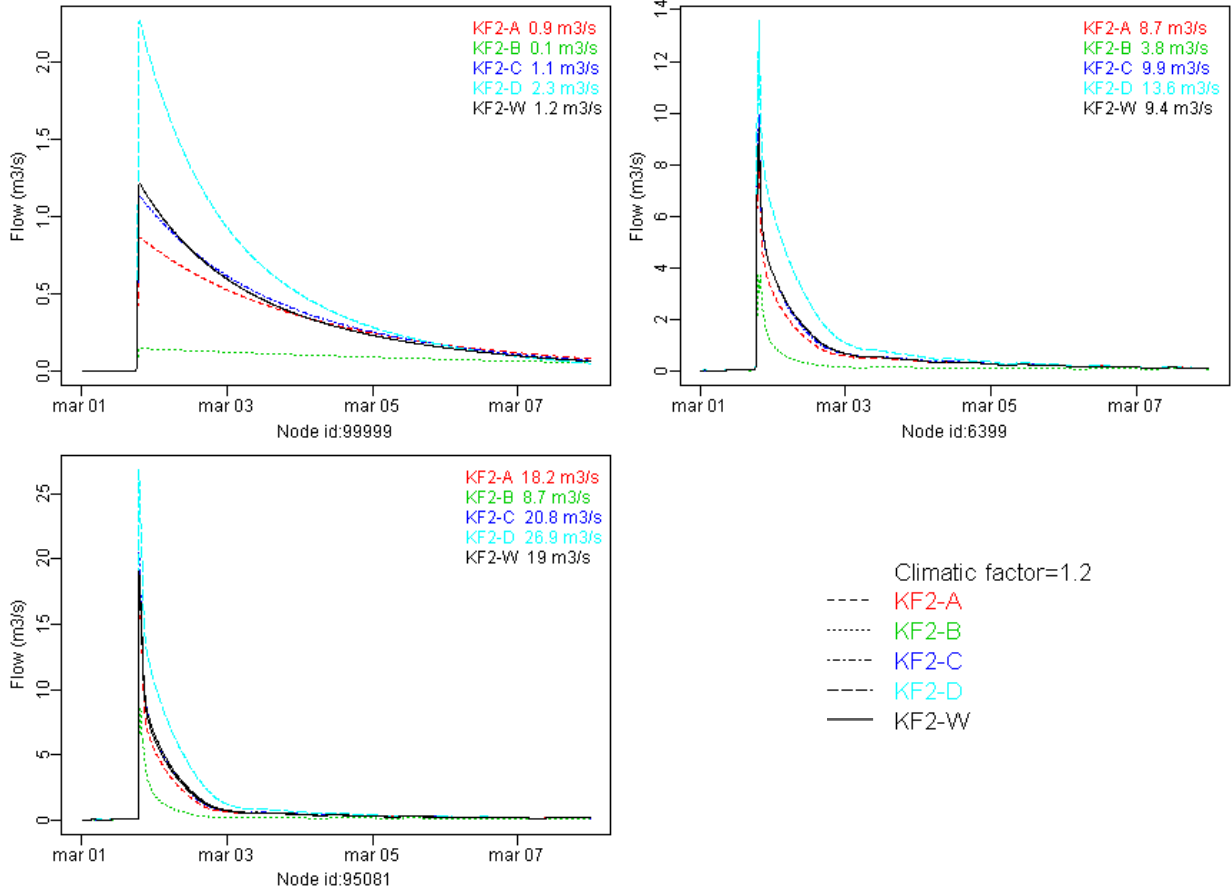
Figur 85: Punktlokasjon for hydrogrammene fra simulering med 200-års nedbørhendelse.



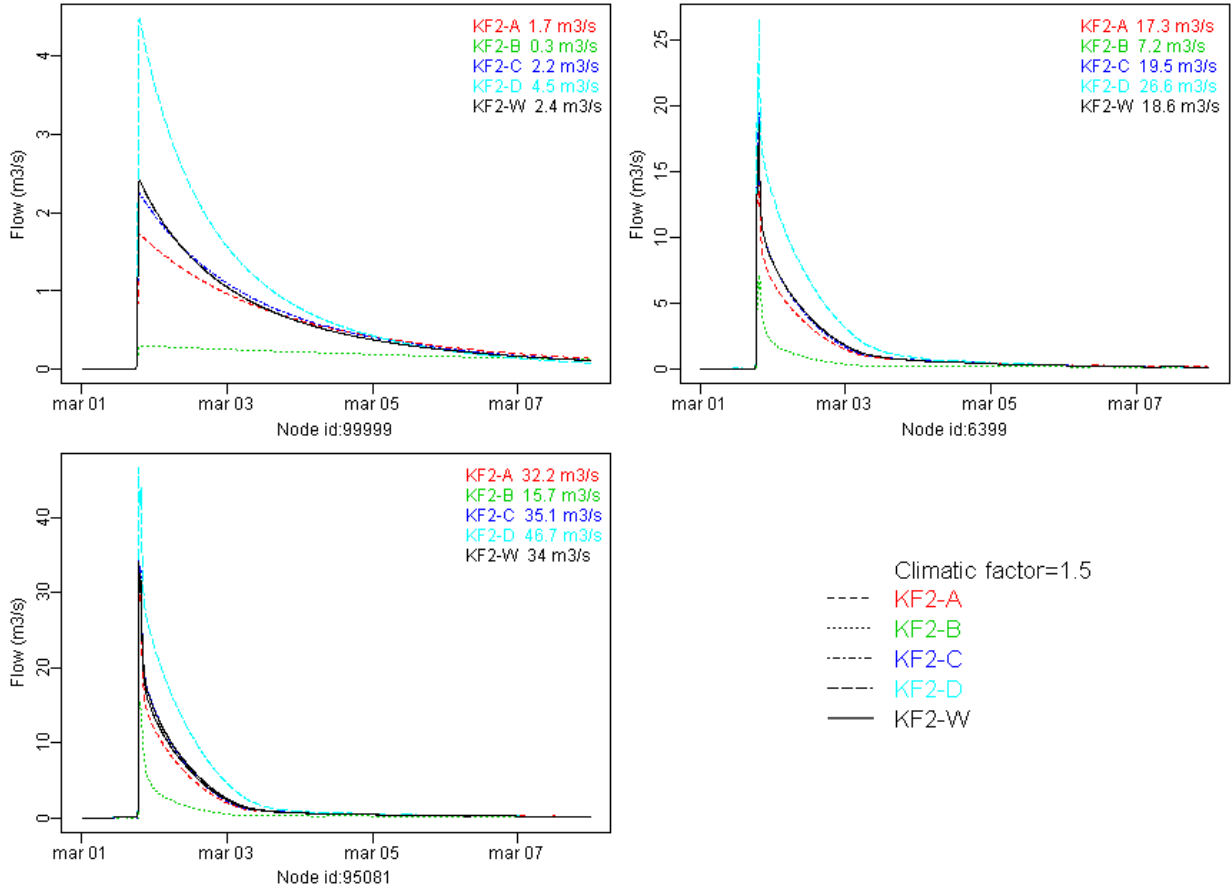
Figur 86: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1 (Plot fra skript).

Figur 86 viser hydrogrammene for parametersettene ved simulering med 200-års nedbørshendelser og uten klimafaktor. Hydrogrammet for kryssing av den åpne kanelen under brua ved Rv. 44 (node 99999), kulverten med vannmåleren (node 6399) og utløpet ved Gandsfjorden (node 95081) kan henholdsvis ses oppe til venstre, oppe til høyre og nede til venstre på samme på figur. Øverst til høyre i hver rute kan maksvannføringen for hvert hydrogram ses, og minste og største verdi utgjør estimert intervall for vannføring.

KF2-B definerte nedre del av vannføringsintervallet i samtlige av punktene. På samme måte definerte KF2-D øvre grense i samme intervall. Vektet gjennomsnitt av hydrogrammene, også kalt forventet vannføring, ses ved den svarte heltrukne linjen. Kommentarene relatert til figur Figur 86 vil også være gjeldene for de resterende hydrogrammene med klimafaktor 1,2 og 1,5.



Figur 87: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1,2 (Plot fra skriptet).



Figur 88: Hydrogram for simulering av optimale parametersett, klimafaktor 1,5 (Plot fra skriptet).

7 Diskusjon

7.1 Vurdering av metode

En hydrologisk modell vil alltid ha feil og usikkerhet knyttet til seg, da det bare er en gjenspeiling av virkeligheten, beskrevet med matematiske ligninger. De som kan anses som de viktigste modelleringsusikkerhetene er (Beven, 2012):

- Inngangsdata i modellen og grensebetingelser
- Modellens struktur
- Estimeringen av parametere
- Forhold som er oversett og ukjent

I det følgende er det derfor tatt utgangspunkt i punktene ovenfor, for å beskrive usikkerhetene i metoden.

7.1.1 Nedbør- og avløpsmåler

Nedbørmåler

Nedbørmåleren var plassert på taket av en pumpestasjon like ved Rv. 44. Ifølge *Krav ved etablering av automatiske værstasjoner* utgitt av Meteorologisk Institutt har vind den største påvirkningen på måling av nedbør. Nedbørmåleren skal beskyttes fra vind enten med naturlig vegetasjon eller med kunstig vindskjerm (Meteorologisk Institutt, 2013). Det ble ikke registrert noen form for vindbeskyttelse for nedbørmåleren ved befaring i vassdraget, noe som kan fremgå som en usikkerhet til de observerte nedbørdataene.

Nedbørmåler registrerte ved enkelte tilfeller nedbørmengder uten at det ga utslag på avløpsmåleren. Vassdraget har et areal på rundt 9,51 km² og inneholder én nedbørmåler. Det kan tenkes at nedbørmåleren ikke greier å fange opp lokale variasjoner innenfor vassdraget, og at nedbørintensiteten vil kunne variere betydelig innenfor ulike deler av vassdraget. Dette kan skyldes ulike topografiske forhold som høydeforskjeller og nærhet til kysten. Med flere nedbørmålere i vassdraget ville det ha vært mulig å fange opp lokale variasjoner i større grad, som kunne representert nedbøren i vassdraget på en mer korrekt måte.

Avløpsmåler

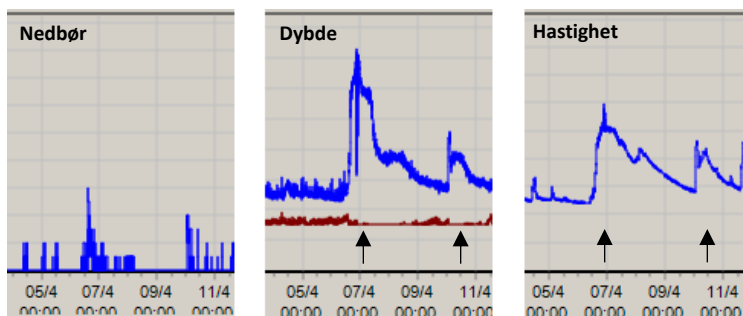
Avløpsmåleren, bestående av en trykkmåler og en ultrasonisk avløpsmåler, ble montert opp januar 2017. Ved installering av ny avløpsmåler vil det ofte kunne oppstå uforutsette utfordringer som blir rettet opp i

en innkjøringsfase, og gjeldende avløpsmåleren har introdusert flere usikkerheter. Det viste seg at trykkmåleren målte lavere verdi enn den ultrasoniske måleren. Gjennom mailkorrespondanse med Storm Aqua (2017a) ble det drøftet rundt tre mulige årsaker som kan ha innvirkning på differanseforholdet:

- 1) Vannets spredning rundt forankringspunktet til trykkmåleren senker vannivået da trykkmåleren er montert på baksiden av stolpen som holder utstyret.
- 2) Den ultrasoniske måleren gir en høyere spredning på nivåmålingene, noe som vil gjøre at øyeblikksverdiene mellom ultrasonisk og trykkmåler kan være store.
- 3) Den ultrasoniske måleren er montert foran på forankringsjernet, noe som kan føre til oppstuvning og høyere vannstand akkurat ved måleren.

Som tidligere beskrevet har observert hydrogram blitt tatt direkte ut fra webportalen, og senere korrigert for en vannføringsdybde på 10 mm. Med andre ord ble det bare brukt måledata fra den ultrasoniske måleren som er montert foran forankringsjernet. Tar man utgangspunkt i punkt 1 til 3 ovenfor, viderefører dette måleusikkerhet inn i modellen. Uten at det i prosjektet er sett på praktisk gjennomførbare metoder for å installere vannmålere, kunne en løsning ha vært å montere vannmåleren på bunnen av kulverten, og strekke kabalen langs kulverten nedstrøms til et forankringsjern.

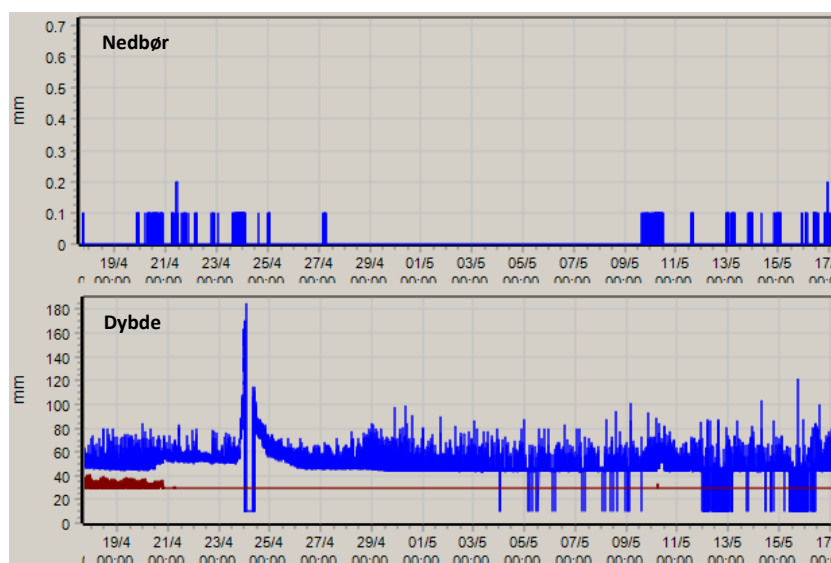
Som nevnt i punkt 1 i dette kapittelet, er det rimelig å tro at vannspredningen forårsaket av forankringsjernet senker vannstanden målt av trykkmåleren. Ved høyere vannhastigheter kan det tenkes at vannstanden ytterligere senkes. På denne måten synker den målte vannstanden når den i realiteten øker på grunn av økt avrenning og vannføring. Man kan se av Figur 89 at nivåmålingene synker til 30 mm, som er nedre grense for hva trykkmåleren klarer å måle slik den er montert. På figuren viser den blå og røde linjen henholdsvis verdier fra den ultrasoniske måleren og trykkmåleren. Dette representerer kun offset som er blitt lagt inn, og sier lite om hva nivået i realiteten var løpet av slike perioder, som kan være et argument for ikke å bruke nivådata fra trykkmåleren.



Figur 89: Diagram med samme tidsserie, over nedbør, dybde og hastighet (skjermdump).

Vannstand under 5cm viste seg å gi mye støy på målingene. Det kan skyldes feil i prosjekteringsgrunnlaget for vannmåleren, da Storm Aqua (2017b) opplyser om at det ble benyttet en lavere hastighetsverdi ved prosjektering enn virkelig vannhastighet som ble målt til i ettertid. Støyen gir en systematisk usikkerhet knyttet til avløpsmåleren. Det ble antatt at det ikke hadde noe stort utslag ettersom prosjektet fokuserte på avrenningstopper for å simulere en nedbørhendelse med 200 år som gjentakintervall.

På Figur 90 kan man se en periode i månedsskiftet april/mai uten nedbør. Det er videre antatt at det ikke var snømagasinerings i samme periode. I slike perioder kan det være nærliggende å anta at fellessystemet bidrar med relativt lite avrenning til overvannsnett, og det kan forventes liten endring i vanddybde og vannføring. Den blå dybde-dataens nedre grense holdt seg konstant, men øyeblikksverdiene og de lokale toppene kom godt til syne. På bakgrunn av dette er det rimelig å stille seg spørrende til de lokale toppene, og om de enten skyldes tilfeldige bølger og oppstuvning på grunn av forankringsjern, eller om avløpsmåleren har stor spredning i målingene.



Figur 90: Spredning på nivåmålingene ved fravær av nedbør, og måleperioder uten vannføringsverdi (skjermdump).

Det var også flere måleperioder som ikke hadde vannføringsverdi, noe som illustreres på Figur 90. På samme figur viser blå og rød linje til data fra henholdsvis den ultrasoniske avløpsmåleren og trykkmåleren. Måleperiodene uten vannføringsverdi varierte fra en til seks dager, og kunne skyldes at noe hadde satt seg fast i målerne eller at dataen som ble sendt over nettverket ble korrumpert. I tillegg var det en tendens til at vanddybden ved avrenningstopp etter et regnskyll ikke ble registrert. Dette var en medvirkende faktor til at tilgangen på gode dataserier med flomtopper var begrenset.

Ved utregningene for korrigeringen av vannføringen ble det benyttet en bredde på 2 meter. Ifølge Storm Aqua (2017c) kan bredden av bunnen på kulverten variere mellom 1990 og 2010 mm, da kulverten skrår noe innover mot bunn. Dette antas å ikke være utslagsgivende på beregningene, og at 2000mm vil være en representativ verdi å benytte i utregningene.

Nevnte usikkerheter relatert til vannføringsmålingene vil videreføres til kalibreringen og kalibrerte parametersett, som igjen påvirker modellens opptreden ved andre eller fremtidige nedbørshendelser.

Nevnte usikkerheter relatert til vannføringsmålingene vil videreføres til kalibreringen og kalibrerte parametersett, som igjen påvirker modellens opptreden ved andre eller fremtidige nedbørshendelser.

7.1.2 ArcGIS

Databehandling og sortering

Det ble benyttet data fra kommunens ledningsdatabase, GEMINI VA, for å hente informasjon om VA-komponenter som skulle brukes videre i den hydrologisk-hydrauliske modellen. Dataene som ble hentet ut i fra databasen inneholdt mange feil og mangler, noe som ofte er tilfelle for slike databaser. Det ble videre gjort forenklinger i ledningsnettet for å tilpasse modellen etter formålet med prosjektet, som var å legge grunnlaget for en fungerende distribuert modell.

Ettersom mye av overvannssystemet trengte nødvendig korrigerings av høydedata ble det stort sett benyttet interpolering og ekstrapolering. Dette kunne resultere i at ledninger fikk større eller lavere helningsgrad enn det de i virkeligheten har, som videre kunne føre til ledninger med dårligere eller bedre kapasitet. For å systematisere korrigeringsene som ble gjort i ArcGIS ble det benyttet flere sett med kriterier for inngangsdataen, slik at forholdene for etterprøving var tilstede. Kriteriene forenklet modellen og medførte usikkerhet, da generelle regler ikke tok hensyn til tilfeller som avviker fra normalen. Med bakgrunn i antagelsen om at alle endenoder⁸ øverst i et grenssystem var inntakspunkt, skulle samtlige endenoder i realiteten ha vært tilknyttet et del-nedslagsfelt. Dette ble hindret av kriteriet om ingen del-nedslagsfelt under 150 m², og utelot på denne måten en del av endenodene som inntakspunkt.

Ledningsforgreiningen i SC2, som gikk ut i fordrøyningsbassenget til Statens Vegvesen og videre til Stangelandsåna, ble fjernet ettersom batymetrien⁹ til bassenget ikke kunne oppdrives. I tillegg var det

⁸ Med endenode menes en kum som ligger på enden av ledningsnettet

⁹ Batymetri er dybde data av sjø eller hav (*Batymeter*, 2015)

vanskelig å fastslå hvor store overvannsmengder som ble sluppet ut fra bassenget. Nedslagsfeltet til nabolaget i SC2 ble i stedet tilegnet nærliggende nedslagsfelt basert på kotehøyder og infrastruktur. Det kan tenkes at dette ville medføre at responstiden på området var noe raskere enn den i realiteten var. Det vil også kunne gi en større flomtopp da overvannet ikke ble fordrøyd i bassenget, men ble ført til nærliggende sluk og direkte til kulverten.

Inndeling av nedslagsfelt

En stor del av prosjektet har gått ut på å finne en tilfredsstillende måte å dele inn nedslagsfelt for et relativt stort urbant vassdrag. Det ble oppdaget at små endringer i terrengmodellen kunne gi betydelige påvirkninger på resultatet av inndeling av nedslagsfelt. Det er viktig å være klar over denne potensielle usikkerheten når man går videre med arbeidet av modellene. Det ble valgt å benytte ArcGIS med støtteprogramvaren Arc Hydro for å dele inn nedslagsfelt til hvert inntakspunkt i overvannssystemet. Målet var å få en automatisk inndeling av nedslagsfelt, der veger, bygninger og topografi ble tatt hensyn til. Feil i inndelingen av nedslagsfelt vil kunne føre til en feilaktig oppfatning av overflateavrenningen til hvert nedslagsfelt. En feilaktig oppfatning kan videre føre til et endret avrenningsmønster, med tanke på volum, konsentrasjonstid og arealbruk.

Resultatet av inndelingsprosessen viste en inndeling av nedslagsfelt som i stor grad tok hensyn til de nevnte objektene (veger, bygninger). Det er derfor rimelig å konkludere med at valgt inndelingsprosess er på samme nøyaktighetsnivå eller bedre enn andre metoder for feltinndeling. Et eksempel er generering av del-nedbørfelt basert på Thiessen polygoner slik som i Mike Urban (DHI, 2017).

Behovet for manuell kontroll av automatisk inndeling vil alltid være til stede da det ikke er mulig å produsere en modell som gjengir virkelighet fullstendig, basert på et matematisk formelverk. Manuell kontroll kan utføres ved befaring og undersøkelser i analyseområdet, der resultat av GIS analyser blir verifisert eller forkastet. Da prosjektet omfattet et område på rundt 10 km² var det ikke mulighet til å kontrollere hele området ved befaring. Karttjenester, høydekoter og skjønn ble derfor benyttet.

Prosjektet tok utgangspunkt i å distribuere de urbane områdene av vassdraget Stangelandsåna. SC1, karakterisert ved landlige områder, ble ikke distribuert. Etersom måledata fra avløpsmåleren inneholdt data fra hele vassdraget oppstrøms for målepunktet, var det nødvendig å inkludere området i overvannssimuleringene og kalibreringen i den hydrologisk-hydrauliske modellen. SC1 ble derfor ansett som et stort nedslagsfelt, med utløp i den åpne kanalen på grensen mellom SC1 og SC2. Dette vil mest sannsynlig gi en lengre responstid fra område i modellen sammenlignet med virkeligheten. Da tenkes det

spesielt på den åpne kanalen som ikke blir tatt hensyn til, og som trolig ville gitt raskere responstid. Resultatet viste imidlertid at responstiden var generelt kjapp. Da modellen kalibrerte mot egne parametere og ikke mot fysiske komponenter, ble delfeltenes bredde liten, noe som kunne være bidragsytende til en kortere enn forventet responstid.

Naturlommer er ikke tatt hensyn til ved inndeling av nedslagsfelt. Dette vil muligens kunne endre inndelingsprosessen på enkelte områder i nærheten av de lommene, men dette antas å ville ha liten påvirkning på resultatet.

Rasterfilen for området hadde en oppløsning på 10x10 meter. Dette er grovt når man skal bruke rasterfilen til å dele inn nedslagsfelt for et urbant område. Dersom oppløsningen på rasterfilen hadde vært høyere, ville også mindre variasjoner i terrenget blitt tatt hensyn til. Dette kunne igjen ført til en mer nøyaktig inndelingsprosess og virkelighetsnære del-nedbørfelt, da strømningslinjene i større grad hadde hatt mulighet til å følge de små terrengvariasjonene som en høyoppløselig terrengmodell fanger opp. Bruk av høyoppløselige terrengmodeller i overvannshåndtering er noe NOU 2015:16 anbefaler, og et detaljnivå på terrengmodellen så høyt som 0,5x0,5 meter blir nevnt som en oppfordring. Høyoppløselige terrengmodeller ville imidlertid kreve maskinvare med bedre ytelse, som ville ha resultert i mer tidkrevende arbeidsoppgaver som for eksempel inndelingsprosessen av del-nedbørfelt.

ArcGIS sin D8-strømningsalgoritme påvirker også resultatet, ved at vannet som faller på en celle i terrengmodellen bare vil kunne strømme til en av de åtte nærliggende cellene. I virkeligheten vil vannet som lander i en av cellene kunne strømme til flere retninger samtidig. På denne måten forsterket D8-metoden usikkerheten den grove rasterfilen bar med seg.

Terreng-, bygnings-, veg- og vannoverflatedata som er anskaffet ved hjelp av laserskanning, såkalt LIDAR og FKB-data sammenlignet med DEM og shape-filene som ble benyttet i prosjektet, vil kunne framstå som en interessant studie. Ofte har laserskanningsdata høyere oppløsning, og en sammenligning mellom DEM med grov oppløsning og LIDAR-data med fin oppløsning ville kunne påpeke om det er nødvendighet med fin oppløsning for å tilegne seg tilstrekkelig kvalitet på en automatisert inndeling av nedslagsfelt i et urbant område.

Under prosessen med å utvikle ArcGIS metodikken ble det også prøvd ut andre metoder for å lage en god terrengmodell. Ved sammenligning av resultater av inndelingsprosessen ble enkelte metoder ikke benyttet da de samsvarte mindre med virkeligheten sammenlignet med valgt metodikk. Sammenligningen baserte seg på visuell kontroll, og vil være utsatt for usikkerhet da dette ikke var en objektiv prosess. Det

vil være vanskelig å fastslå en metode som er overlegen de andre, og det kan tenkes at mer virkelighetsnære resultat for inndeling av nedslagsfelt kan oppnås med andre metoder enn den benyttet i masterprosjektet.

Build walls-verktøyet ble først brukt til å lage 500 meter høye bygninger i terrengmodellen. Ettersom shape-filene som inneholdt bygningsdata var polygoner og *Build walls* bare kunne utføres på linjer eller punkt, måtte bygningspolygonene først gjøres om til linjer eller punkt. Dette virket tilsynelatende bra for eneboliger og mindre bygninger, men for større bygninger som lagerbygninger og boligblokker gikk strømningslinjene rett gjennom. Det ble også forsøkt å brenne inn vegger ved bruk av *Agree DEM Reconditioning* på samme måte som for den åpne kanalen. Vegflater ble gjort om til linjer, og brent med verktøyet 2 meter ned i terrenget. Dette virket tilsynelatende bra, og strømningslinjene fulgte veien som ønsket. På enkelte steder der vegger gikk i flere plan, for eksempel ved en bro, oppsto det tilfeller der strømningslinjene tok en uønsket retning. Ved å benytte verktøyet *inner walls* var det mulig å kontrollere strømningslinjenes retning manuelt der det var behov. Det oppsto imidlertid komplikasjoner på de stedene kanalen var brent inn på samme måte som vegen.

7.1.3 SWMM

Valg av inngangsdata og parametere

Thorntwaite formel ble brukt til å beregne fordampningsdata i prosjektet. Grunnet inngangsdata som var lett tilgjengelig, ble Thorntwaite benyttet for å beskrive estimert potensiell fordampning per måned. Fordampningsdataen ble sammenlignet med verdier fra Bioclimatic Classification System, som var tilnærmet like (96,8% sammenfallende). Det ble derfor antatt at bruk av Thorntwaites formel var en tilfredsstillende tilnærming. Dersom målinger hadde ligget til rette, ville Penman formel også kunne bli benyttet for å kalkulere fordampningen muligens enda mer nøyaktig. Da fordampningen i Norge er relativ lav og lite varierende sammenlignet med områder utsatt for større varmeinnstråling, vil usikkerheten knyttet til valgt metode være mindre i Norge enn for de øvrige områdene.

Spillvannvariasjonen som er anvendt tar utgangspunkt i at alle i vassdraget som er koblet mot et fellessystem følger samme spillvannsmønster. Antagelsen var en forenkling, da spillvannsvariasjonen vil variere med type bebyggelse og antall PE knyttet til hver husstand.

Beregning av impermeable flater ble gjort ved å måle bygningers- og vegareal opp mot delfeltets totale areal. I realiteten vil det foreligge flere impermeable flater enn bygninger og vegger, som for eksempel gang- og sykkelveger, innkjørsler, med mer. Det ble brukt tre parametere til å kalibrere de impermeable

flatene for hvert delfelt. Dette betydde at prosentvis impermeable flater for delfeltene i kalibreringen ikke representerte de virkelige situasjonene. Dette er på grunn av at målet med kalibreringen er å tilpasse simulert hydrograf med observert hydrograf, ved å forandre på kalibreringsparameterne. Med andre ord trengte ikke kalibreringsparameterne etter endt kalibrering å gi mening, sammenlignet med virkelig verdi.

Som infiltrasjonsmetode i SWMM-modellen ble Horton benyttet. Beven (2012) påpekte at det i estimeringen av kalibreringsparametere kan oppstå utfordringer når måleteknikken som blir benyttet bare er tilgjengelig på en mye mindre skala enn den modellen bruker. Dette er tilfellet for infiltrasjonstestene som ble foretatt. Infiltrasjonstestene tok for seg et lite område med en mye mindre skala enn skalaen Stangelandsåna vassdrag representerer. I tillegg viste infiltrasjonsmålingene store variasjoner, selv innenfor korte avstander. Det ble derfor valgt å inkludere infiltrasjonen i kalibreringen, i stedet for å bruke egne målinger i modellen. På denne måten unngikk man utfordringen Beven (2012) tok opp, og usikkerheten målingene ville medført i modellen. På den andre siden forble infiltrasjonen den samme over hele vassdraget etter kalibreringen. Valgene forklart ovenfor vil likevel ikke gjøre den hydrologiske modellen fri for feil og usikkerhet.

Den åpne kanalen som går gjennom området vil være utsatt for kontinuerlig tilsig av grunnvann, smeltevann og avrenning i form av interne strømninger i jordsmonnet fra de landlige områdene. Disse hydrologiske prosessene vil ikke bli tatt hensyn til i modellen da undergrunnsavrenning, infiltrasjon som senere går til avrenning, og nedbør i form av snø ble ikke inkludert i SWMM-modellen.

Videre ble også Rainfall-Dependent Infiltration and Inflow (RDII) utelatt fra modellen. RDII er overvann som infiltrerer inn i åpne kanaler og ledninger der ledningen ikke er tett. Dette øker vannføringen i ledningen, og øker sjansen for at vannføringen i ledningen overgår ledningens kapasitet. Det ble ikke gjort noen målinger for å måle RDII i prosjektområdet, og det ble derfor utelatt fra modellen. Det er vanskelig å fastslå RDII uten representative målinger for nettet over en lengre tidsperiode. Fordeler ved å inkludere RDII ville være at simuleringen sannsynligvis ville blitt mer nøyaktig, med forbehold om at riktige parametere hadde blitt brukt. Ulempen ved å inkludere RDII ville være at usikkerheten knyttet til parameterne som representerer infiltrasjonen til ledningsnettet inkluderes.

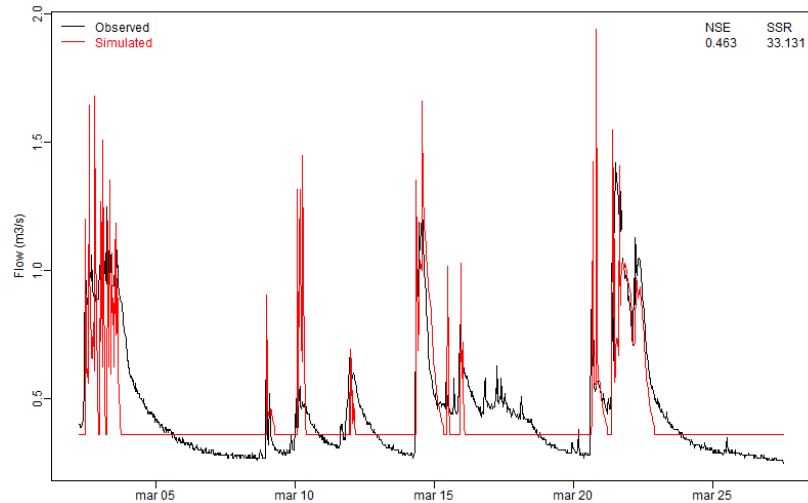
SC1 utgjør en vesentlig del (rundt 60%) av det totale arealet av vassdraget. Ved en eventuell kalibrering vil delfeltet vektet tungt da arealet på områder påvirker avrenningen i stor grad. Kalibreringsparameterne vil trolig kompensere for SC1 sitt høyt areal under kalibreringen ved å redusere verdier på parameterne.

Reduseringen vil videre påvirke mindre områder i de mer urbane områdene som vektet mindre, og redusere avrenningskoeffisienten fra alle områder.

Kalibrering

I utgangspunktet ville man ha færrest mulig parametere å kalibrere mot, på grunn av at kombinasjonen av parametere, og kompleksiteten av parameterrommet øker ved økning av parameterantallet. Det ble derfor først prøvd å kalibrere KF1 med kalibreringsparameterne a til og med g . Dette resulterte i negative NSE-verdier og dårlig tilpasning mellom simulert og observert hydrogram. Det ble derfor lagt til ytterligere fem parametere til i KF1, slik det fremgår av Tabell 16. Parameterne a til i ble imidlertid benyttet i KF2. Merk at de optimale parametersettene er de settene som ga minst feil og residual i den respektive modellen. Dette impliserte at det fortsatt var usikkerhet i de kalibrerte modellene, med tanke på prestasjonen til å beskrive responsen til en fremtidig regnhendelse. Videre var det usikkert om de optimale parametersettene var lokale optimale parametersett, og om de globale parametersettene forble ukjent i parameterrommet på grunn av et komplekst parameterrom.

Tidligere ble det beskrevet at den objektive funksjonen kunne stenge ute subjektiv bedømming av kalibreringsresultatet. Det er imidlertid en subjektiv beslutning å definere et parameterrom som parametere kan bevege seg inn i, og som kalibreringsresultatet baserer seg på. Om parameterrommet blir definert for stort, kan dette resultere i en urimelig liten eller stor parameter. I det følgende er det beskrevet et eksempel på nettopp dette. I en av de tidligste kalibreringene for mars viste det seg at parameterrommet ble definert for stort, og faktoren for minimum vannføring i ble tildelt urimelig stor verdi etter endt kalibrering. Ved komplekse parameterrom kan slike hendelser oppstå, men som ikke er like lett å oppdage som eksempelet refererer til. Legger man dette til grunn inngår det i modellen usikkerhet knyttet til forhold som forble ukjent.



Figur 91: Kalibreringsresultat som var basert på et for stort parameterrom (Plot fra script).

Når det skal opprettes en hydrologisk modell er det, ifølge Lindholm, *et al.* (2008), viktig å bruke nedbørdata med tilstrekkelig oppløsning fra representative nedbørsperioder, med et spenn på helst over flere år. Nedbørmåleren i Stangelandsåna vassdrag målte med en oppløsning som er innenfor akseptabel grense, men tidsserien anses som kort. Måleserien som ble brukt hadde en varighet på ca. 5 måneder, og startet fra januar og sluttet i månedsskiftet mai/juni. Ifølge samme rapport (Lindholm, *et al.*, 2008) bør også vannføringen måles ved alle årets årstider som grunnlag for kalibreringen. Tidsseriene som ble benyttet til KF1 var 22 og 25 dager. Med bakgrunn i de korte tidsseriene inkluderte ikke modellen sesongvariasjoner med tilhørende representative nedbørsperioder, og inngikk som en av de største usikkerhetene i modellens godhet. Sommerens styrtregn og høstens langvarige regnbyger ble med andre ord ikke inkludert.

I en simulering er det et poeng at beregningsstegene holdes lavere enn konsentrasjonstiden, og helst så lavt som mulig. Særlig i urbane strøk, der nedslagsfeltene bruker mindre tid på å respondere på en regnbyge enn på landlige områder, er lave tidssteg viktig. I KF2 ble det benyttet et beregningssteg på 10 minutter, og det kan tenkes at enkelte små delfelt hadde en mindre konsentrasjonstid enn benyttet beregningssteg. Det kunne derfor hevdes at dette påvirket det simulerte hydrogrammet, men i den grad potensialet for dette var til stede, ble det ansett for å være i liten grad.

Kalibreringssettene ble kalibrert opp mot observert data, og ikke opp mot en nedbørhendelse med 200 års gjentaksintervall. På denne måten blir det introdusert usikkerhet hvorvidt et simulert hydrogram med utgangspunkt i en 200-års nedbørhendelse har god tilpasning og overenstemmelse med et observert hydrogram forårsaket av samme regnhendelse. På den andre siden ble kalibreringssettene kalibrert og

validert opp mot andre enkelthendelser, for å evaluere parametersettene evne til reproduksjon av hendelser. Resultatet viste at evnen til reproduksjon var svært god. På samme måte kunne det hevdes at potensialet for reproduksjon av en enkelthendelse med 200-års gjentaksintervall var tilfredsstillende.

På grunn av at beregningstegene i kalibreringsforsøkene var lengre enn tidsstegene til observert vannføring, ble det benyttet en gjennomsnittsverdi av observert vannføring innad i de respektive beregningsstegene. Simulert vannføring regnet ut vannføring for hvert tidssteg, og kunne derfor bli sett på som en øyeblikksverdi. Man kan videre stille spørsmålsteget om sammenligningsgrunnlaget mellom observert og simulert hadde vært bedre om det hadde blitt tatt grunnlag i øyeblikksverdier av observert vannføring.

KF2 tok utgangspunkt i fire separate regnhendelser, og sammenlignet de fire forskjellige hydrogrammene fra 200-årsregnet. Isolert sett kan metoden anses som god, men det kan hevdes at antall regnhendelser det ble tatt utgangspunkt i kan bli ansett som lite. På den andre siden hadde avløpsmåleren som prosjektet tok utgangspunkt i bare vært operativ i kort tid. I tillegg var det flere faktorer som var med på å redusere datagrunnlaget ytterligere, i all hovedsak manglende dybde data i flomtopper, som beskrevet i mer detalj i kapittel 7.1.1.

Plasseringen av avløpsmåleren nedstrøms SC2 gjorde at brorparten av de mest urbane områdene i vassdraget ikke hadde avrenningsmålinger. Under kalibreringen ble området uten målinger fjernet, for å senere få tildelt gjeldende parametersett etter kalibreringen av området oppstrøms for måleren var gjennomført. Tildelingen ble gjort ved internoverførbarhetsprinsipper. Parametersettet benyttet i kalibreringen gjorde internoverførbarhet enkelt å benytte fra området med målt data til området uten ettersom fysiske komponenter i SWMM ikke direkte ble kalibrert.

Antatt representativ nedbør

Konstruering av symmetrisk hyetogram ble gjort med data fra målestasjon på Rovik, og er den nærmeste målestasjonen til vassdraget med lange måleserier. Prosjektet tok med andre ord utgangspunkt i antagelsen om at nedbørverdiene for Rovik var representativ for Stangelandsåna vassdrag.

Det var imidlertid nærliggende å tro at måleren på Rovik ikke var like representativ for Stangelandsåna vassdrag som prosjektet først antok. Måleren er installert i en lomme omringet av fjell på tre av sidene, og fjorden på den fjerde siden. Selve målestasjonen er plassert 1 km øst for Sandnes sentrum, like ved Vassfjellet, Lutsifjellet og Bjørndalsfjellet. Med sin posisjon like ved fjorden og topografien i området rundt målestasjonen, karakterisert ved større helning og høyere fjell enn Stangelandsåna, ville etter all

rimelighet være en bidragsytende faktor for forskjellen mellom Stangelandsåna og Rovik. På bakgrunn av denne forskjellen i topografi og lokasjon, kunne det hevdes at det forelå et større nedbørsvolum i Rovik enn i Stangelandsåna Vassdrag. Det kunne derfor tenkes at konstruert hyetogram hadde noe høyere verdier på intensitet enn det som virkelig var for Stangelandsåna vassdrag.

Routing-metode

For å kjøre simuleringene i SWMM ble routing basert på kinematisk bølgeteori benyttet. Routing med kinematisk bølgeteori er en effektiv, men samtidig forenklet tilnærming. Tilnærmingen sliter med konseptene oppstuvning, trykk i ledninger, reverserende vannstrømmer og ledningsnettverk som ikke er bygd opp som grensystem. Gjennom routing basert på dynamisk bølgeteori er det mulig å gjengi konseptene nevnt over, men dette på bekostning av forhøyet beregningstid ved simulering. Høyere beregningstid kommer av at SWMM trenger mindre tidssteg for å sikre numerisk stabilitet gjennom simuleringen. Da dette masterprosjektet inneholdt et relativt stort område med mange delfelt, ble det antatt at det var nødvendig å benytte seg av kinematisk bølgeteori for å holde beregningstiden nede på et akseptabelt nivå, det store arealet tatt i betraktning. Effekten av dette kan tenkes å være at ledninger som eventuell går fulle og gir oppstuvning i oppstrøms node ved bruk av kinematisk bølgeteori i realiteten vil være under trykk og gi inneha større vannføring dersom dynamisk bølgeteori ble benyttet.

Følsomhetsanalyse

En følsomhetsanalyse ville gitt oversikt over hvor følsom modellen var for endringer i input-parameterne. Etersom kompleksiteten på kalibreringen sammen med den lange simuleringstiden gjorde utførelsen av en følsomhetsanalyse krevende, ble det utført en enkel og subjektiv test av følsomheten til de enkelte parameterne. Hver parameter ble manuelt forandret i skriptet for å få en oversikt over hvilke parameterer som var sensitive. Oversikten var grunnlaget for å gå videre med parameterne til de forskjellige kalibreringsforsøkene. Ulempen var at det var ble vanskelig å tallfeste i hvor stor grad de forskjellige parameterne påvirket resultatet av simuleringene.

7.2 Vurdering av resultat

7.2.1 Kalibrering av modell

Ved kalibreringen ble det sett på NSE- og SSR-verdien, og med beskrivelse av hvordan simulert hydrogram presterte å simulere stignings- og resesjonskurvene, lavvannsføringene, volum, og flomtoppens styrke og varighet. Sett fra masterprosjektets ståsted er det sistnevnte, flomtoppen, som var av størst interesse. I det følgende blir prestasjonen til kalibreringskurvene vurdert.

Diskusjon KF1

Av kapittel 6.1.1 fremgår det at kalibreringssettet for april og mars henholdsvis fikk en NSE-verdi lik 0.315 og 0.252. Med utgangspunkt i kun NSE-verdien, var det nærliggende å tro at kalibreringssettet for april ga best tilnærming til observert hydrogram. Det kunne imidlertid hevdes at KF1-a60 ikke hadde god nok tilpasning til observert hydrogram, hovedsakelig med den begrunnelse at flomtoppen var fem ganger høyere enn observert. Sammenlignet man FK1-m60 og FK1-a60 med sine respektive observerte hydrogrammer, sammenfalte førstnevnte generelt bedre med observert minimumsvannføring. I tillegg var tilpasningen bedre og avviket mindre med hensyn på flomtoppene. Begge kalibreringssettene hadde derimot god tilpasning til responstid og stigning på flomtopp, men dårlig tilpasning til resesjonen. Det ble derfor sett på kalibreringssettet i mars, med en lengre tidsserie og en additiv korreksjonsfaktor for minimumsvannføring i motsetning til en multiplikativ faktor.

På grunn av introduksjonen av additiv minimumsvannføring ble parameterrommet til parameteren som korrigerer for DWF lagt nær null, og området definert som lite. Med andre ord spilte DWF-variasjonen liten rolle i KF1-m60, som kan ses ved den flate minimumsvannføringen. Valget kan begrunnes med at DWF uansett ville vært inkludert i den additive korreksjonsfaktoren.

KF1-m60 overestimerte samtlige av flomtoppene sammenlignet med observert data. I all hovedsak hevdes det at det var to mulige årsaker til dette; 1) observert inngangsdata overestimerte de virkelige inngangsdataene tilhørende nedslagsfeltet eller 2) som et resultat av usikkerheten avløpsdataen introduserte. Med bakgrunn i usikkerheten knyttet både til 1) og 2), som tidligere beskrevet, var det trolig en kombinasjon av disse som var årsaken.

Til tross for at det er KF1-m60 er blitt beskrevet, er den samme beskrivelsen i høy grad gjeldene også for KF1-m30. Til tross for kalibreringssettet i mars og dens tilfredsstillende tilpasning, ble det valgt å ta utgangspunkt i et nytt kalibreringsforsøk for å illustrere usikkerheten i resultatet på en bedre måte.

Diskusjon KF2

KF2-A viste en god tilpasning til observert vannføring, spesielt med tanke på stignings- og resesjonskurven. I tillegg var det sammenfallende varighet på flomtoppen. På den andre side underestimerte kalibreringssettet den største observerte flomtoppen, og utgjorde med et grovt overslag 50 til 55% av observert vannføring. Det kunne derfor hevdes at dette kalibreringssettet hadde potensial til å undervurdere andre flomtopper, som viste seg å stemme om man tok reproduksjonen til betraktning. Til tross for dette var NSE-verdien på 0,864, som kan anses som veldig godt.

KF2-B hadde en mindre god tilpasning til lavvannsføringer, men da prosjektet fokuserte på flomtopper var dette av mindre interesse. De største flomtoppene ble så vidt underestimert, og varigheten på den største flomtoppen var for kort, selv om helningen på stigningen og resesjonen ble godt tilpasset. Dette gjorde at volumet generert i den største flomtoppen var en god del mindre enn observert volum. Med en NSE-verdi på 0,665 var dette det kalibreringssettet med lavest NSE-verdi.

Med en NSE-verdi på 0,833 hadde KF2-C en veldig god tilpasning til observert hydrogram. Som tidligere erfart med de andre optimale kalibreringssettene, sliter også KF2-C med å tilpasse seg en brå resesjon. Mer interessant er at prestasjonen med å tilpasse seg høye vannføringer er god, til tross for underestimering flomtoppene, hovedsakelig den midtre flomtoppen.

KF2-D fikk en NSE-verdi på 0,883 og var den høyeste i KF2. Stigning og resesjon fikk en god og tilfredsstillende tilpasning til observert data, men lavvannsføringen på starten av tidsserien fikk imidlertid en mindre god tilpasning. Tendensen var at kalibreringssettet overestimerte flomtoppen, men underestimerte varigheten.

Den teoretiske spillvannsvariasjonen kom godt til syne, spesielt i KF2-A og KF2-C. Trolig var en bidragsytende faktor at KF2-A og KF2-C hadde en større verdi på den multiplikative kalibreringsparameteren g som var knyttet til DWF. Sammenlignes KF1-m30 og m60 med KF2, var det en stor forskjell mellom hvordan resesjonen ble simulert. På KF1-m60 og m30 var resesjonen ikke-eksisterende, men i KF2 var resesjonen tilstede. Inkludering av DWF er trolig en medvirkende årsak, i tillegg til inkludering av den multiplikative kalibreringsparameteren i som påvirket hele hydrogrammet. KF1-m60 og m30 brukte til forskjell en additiv kalibreringsparameter i , som i realiteten bare hevet minste vannføring og hadde ingen direkte påvirkning på helningen til resesjonen.

Det kan ses fra resultatet at KF2-A, KF2-B og KF2-C underestimerte flomtoppen i sine respektive tidsserier, mens KF2-D overestimerte flomtoppen. En medvirkende faktor var trolig parameteren i som for KF2-D var over 50% større enn for de resterende kalibreringssettene. Merk at kalibreringssettene var fra ulike tidsserier, slik at det kan stilles spørsmålstegn med sammenligningsgrunnlaget.

KF2 optimaliserte for SSR-verdien, til forskjell fra KF1 som optimaliserte for NSE-verdien. Dette ble gjort med bakgrunn i å redusere usikkerheten og residual i simuleringene. Ved hydrologisk modellering er det flomtoppene som er forbundet med høyest residual og avvik (Beven, 2012), og på grunn av at det i masterprosjektet var flomtoppene som var av mest interesse ble det prøvd å redusere residualene mest mulig ved å optimalisere for SSR.

7.2.2 Validering av modell

På grunn av at parametersettene i KF2 ble optimalisert for SSR var det naturlig å benytte SSR-verdien i utarbeidelsen av sammenligningsgrunnlaget mellom parametersettene. Grunnen til at selve SSR-verdien ikke ble benyttet som sammenligningsgrunnlag er at SSR-verdien isolert sett bare er et relativt tall, spesifikt for sitt respektive kalibreringssett og lite sammenlignbart mellom to forskjellige kalibreringer. Derfor ble det som sammenligningsgrunnlag valgt å benytte gjennomsnittlig SSR-verdi (MSE).

Resultatet av reproduksjonen av kjente enkelthendelser viste at laveste og høyeste NSE-verdi på reproduserte hydrografer henholdsvis var 0,430 og 0,844. NSE-verdi lik 1 tilsvarer perfekt tilpasning mellom hydrogrammene. Med bakgrunn NSE-verdiene og definisjonen om NSE, kunne det hevdes at overførbareheten av de fire parametersettene til de fire forskjellige enkelthendelsene generelt var svært god. Som beskrevet i et tidligere eksempel kunne NSE-verdien være basert på gale forutsetninger som for eksempel bruk av for stort parameterrom. Derfor kunne det med bakgrunn i tidligere beskrivelse av resultatet og visuell kontroll av hydrogrammene støtte påstanden om svært god tilpasning med bakgrunn kun i NSE-verdi. Prestasjonen til å følge endringene i lavvannskurven og reprodusere lavvannsføring og var imidlertid mindre god. På samme tid er dette momentet ikke like interessant for prosjektet. Det kan videre tenkes at parameterens gode evne til reproduksjon av enkelthendelser, støtter prosjektets hensikt om å bruke de samme parameterne i en simulering av en 200-års enkelt nedbørshendelse.

Det samme hydrogrammet som ble referert til i sist avsnitt presenterte KF2-D som det parametersettet med høyest vannføring ved samtlige høye observerte vannføringer. I tillegg hadde parametersettet en tendens til å overestimere vannføringen i de samme flomtoppene. De to tendensene ble gjenspeilet i resultatet av simuleringen med 200-års nedbørshendelsen, utdypet mer i diskusjonen i neste kapittel. Til tross for dette kan det bli sett av resultatet at KF2-D fikk både lavest MSE (0,064) og høyest vektall (0,289). Til sammenligning fikk KF2-C en marginalt høyere MSE (0,067) og et litt mindre vektall (0,270). Til kontrast var KF2-B ansett for å være knyttet til størst residual med bakgrunn i overførbareheten, og fikk størst MSE (0,124) og minst vektall (0,178).

Vektallene kunne i realiteten brukes i utregningen av enhver fremtidig nedbørshendelse, med forbehold om at hydrogrammene til parametersettene var kjent for den samme nedbørshendelsen. Prosjektets oppgave spesifiserte derimot at det skulle benyttes et regnskyll med 200 års gjentakintervall.

7.2.3 Simulering med dimensjonerende regn

I det følgende blir formen på hydrografene diskutert, og videre vannføringsverdiene. Ifølge Beven (2012) er det mulig å benytte et estimeringsintervall for å beskrive usikkerheten til simuleringen av en fremtidig regnhendelse. Ved å benytte de fire optimale parametersettene ble det laget et estimeringsintervall, samt en forventet vannføring som lå innenfor intervallet. Resultatet viste de følgende estimeringsintervallene for utløpet ved Gandsfjorden med de ulike klimafaktorene. Forventet vannføring er oppført i parentes.

- Klimafaktor 1: 6,7 - 20,2 (14,6) [m³/s]
- Klimafaktor 1,2: 8,7 - 26,9 (19,0) [m³/s]
- Klimafaktor 1,5: 15,7 - 46,7 (34,0) [m³/s]

Ved reproduksjonen var det KF2-D som hadde høyest vannføring ved flomtoppene, og som hadde en tendens til å overestimere observert vannføring. Dette kom til syne ved at KF2-D definerte øvre grense i estimeringsintervallet, i motsetning til KF2-B som definerte nedre grense av intervallet. Ved visuell kontroll av reproduksjonshydrogrammet, var trolig samme prinsipp overførbart til KF2-B. Resultatet viste at KF2-B sin prestasjon til å reprodusere kjente nedbørhendelser generelt ga laveste vannføring av parametersettene, og ofte underestimerte observert vannføring. Til gjengjeld kan det hevdes at dette var en bidragsytende faktor for at KF2-B endte opp med laveste vannføring i estimeringsintervallet for den ekstreme nedbørhendelsen.

En annen bidragsytende faktor for KF2-D og KF2-B sine verdier for vannføring var parameterne f og i , henholdsvis korreksjon for effektiv nedbør og vannføring. Det viste seg at med økt verdi på parameter f , økte den simulerte vannføringen. I tillegg var det korrelasjon mellom økt verdi på parameter i og økt simulert vannføring. KF2-D og KF2-B hadde henholdsvis de høyeste og laveste verdiene på parameterne f og i , og er trolig en medvirkende grunn til at KF2-D genererte høyest vannføring, og KF2-B lavest. De samme prinsippene var også gjeldene for KF2-A og KF2-C.

Vassdraget besto som kjent av et stort landbruksareal (SC1), med en bebygde del nederst i vassdraget. Det var derfor nærliggende å tro at simulert hydrogram skulle få en karakteristisk form med høy flomtopp og rask responstid, etterfulgt av en lang hale. Høy flomtopp og rask responstid var tilstede, men den lange halen var fraværende. Dette kunne tyde på at magasinering ikke var en dominerende komponent i den hydrologiske modellen. Ifølge rapportfilen produsert etter simuleringene hadde SC1 en veldig lav avrenningskoeffisient, som kan ha vært en medvirkende faktor siden det mest sannsynlig hadde vært SC1 som i all hovedsak hadde bidratt med langtidsavrenning. Det faktum at snø og RDII ikke ble tatt hensyn til

støttet påstanden om liten dominerende magasineringskomponent ytterligere. Ved snømagasinerings ville trolig flomtoppen ha blitt mindre, og ved RDII ville vann ha infiltrert i rørsystemet og de åpne kanalene i en lengre periode i etterkant. I tillegg kan det hevdes at kalibreringsparameterenes kompensering for SC1 sitt høye areal som tidligere diskutert være en bidragsytende faktor.

Det kan tenkes at en av grunnene til at modellen hadde en mindre god tilpasning til lave vannføringer var kombinasjonen av fraværet av magasineringskomponenten og andelen av vassdraget som var landbruksareal. Den observerte vannføringen inneholdt grovt sett tre forskjellige vannføringer, derav helårsavrenning, avrenning fra nedbør, og spillvann. Inngangsdataen i modellen tok imidlertid bare hensyn til de to sistnevnte. En kalibrering med kun nedbør og spillvann som inngangsdata vil da trolig slite med å simulere observert våravrenning og snøsmelting, som karakteriserer våren og trolig prosjektets observerte dataserie. Om RDII eller snøsmelting hadde vært tilstede i modellen, kunne det tenkes at disse ville ha bidratt med å jevne ut og hjelpe til med lavvannsføringen i etterkant av en regnhendelse. Enda en faktor som det kan hevdes vanskeliggjorde en god tilpasning til lavvannsføring og bidro med høyere observert lavvannsføring var dybdemålerens plassering og lokalt høyere vannstand rundt måleren, som tidligere beskrevet. Dette kunne for så vidt også bidra med lokal høyere vannstand ved høye vannføringer.

Parameterne f og i i parametersettene lå henholdsvis mellom 0,39 og 0,56, og 0,18 og 0,31. Det faktum at de nevnte parameterne var under verdien 1 impliserte trolig at modellen i utgangspunktet genererte for høy avrenning, og måtte kompensere ved å redusere nedbør og vannføring for å tilpasse seg observert data. Videre kan det tenkes at vannbalansen støttet denne påstanden. Tar man vekk magasinerings fra ligningen, og holder nedbør konstant, må nødvendigvis overflateavrenning øke. Det burde bemerkes at et parametersett besto av ni parametere, og at f og i ikke alene var bestemmende for vannføringsmengden. På den andre siden så det ut til at økte verdier av f og i korrelerte med økt simulert vannføring, og hadde trolig stor innflytelse over vannføringsmengden. I tillegg var avrenningskoeffisientene generelt veldig lave som viser at modellen i utgangspunktet genererte for høy avrenning.

Det er nærliggende å tro at usikkerhetene som har blitt omtalt og som var knyttet til modellen i sin helhet kom fram gjennom estimeringsintervallene. Maksimal forventet vannføring for Stangelandsåna vassdrag med klimafaktor 1,2 var $19 \text{ m}^3/\text{s}$, med et estimert intervall på $8,7 - 26,9 \text{ m}^3/\text{s}$. For kulverten med vannmåleren ble forventet maksimale vannføring beregnet til $9,4 \text{ m}^3/\text{s}$, med et estimert vannføringsintervall på $3,8 - 13,6 \text{ m}^3/\text{s}$. For kryssingen under brua ved Rv. 44 ble forventet beregnet til $2,3 \text{ m}^3/\text{s}$, med et estimeringsintervall på $0,1 - 2,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Til sammenligning var vannføringene Gragne og

Sægrov (2016) fant ved regionalisering av nabovassdraget innenfor estimeringsintervallene for utløpet ved fjorden (9,9 m³/s) og kulverten med avløpsmåleren (8,9 m³/s). For kryssingen under brua ved Rv. 44 lå verdien over prosjektets estimeringsintervall (6,9 m³/s), som kunne skyldes veldig lav avrenningskoeffisient for område i prosjektets modell.

Den hydrologiske modellen vil være gjenstand for usikkerhet på grunn av inngangsdata og modellering. Vannføringen er estimert til å ligge innenfor intervallet der forventet vannføring er den best estimerte verdien, sett ut i fra et deterministisk ståsted. Derfor må vannføringsverdiene anses som en forventet verdi eller et anslag, fremfor en endelig vannføring. Til tross for usikkerheten, anses modellen som tilfredsstillende. Med bakgrunn i prosjektets simuleringer anses forventet vannføring som det beste utgangspunktet for dimensjoneringsgrunnlaget til ny kulvert.

7.2.4 Sammenligning med rasjonell metode

Ifølge Sandnes Kommune (2015a) er det krav om manuelle kontrollberegninger ved bruk av EDB-modeller til dimensjoneringsgrunnlag. Det ble valgt ut tre vilkårlige nedslagsfelt fra modellen, med ulik størrelse. Ved utvelgelse av kontrollareal ble det fokusert på nedslagsfelt med arealoverflate opp til 4 ha, som er innenfor anbefalt gyldighetsområdet til den rasjonelles formel.

Det ble hentet ut total maksimum estimert vannføring for de spesifikke utløpspunktene som hørte til de valgte nedslagsfeltene fra rapportfilen i SWMM. Ettersom modellen bygger på fire ulike parametersett ble vannføringsintervallet benyttet som sammenligningsgrunnlag videre mot de manuelle kontrollberegningene.

Videre ble rasjonell metode benyttet til manuell utregning og kontroll av vannføringen. Arealet ble hentet ut fra ArcGIS. Veg- og takflater ble betraktet som impermeable flater, hvorimot øvrig areal ble ansett som permeable flater. Regnvarigheten ble satt til 60 minutter med 200 års gjentaksintervall i den rasjonelle metode, slik at det samsvarte med varigheten og gjentaksintervall for det symmetriske hyetogrammet. I tråd med overvannsnormen til Sandnes Kommune (2015a) ble klimafaktoren satt til 1,2. Fullstendig oversikt over verdier som ble benyttet i utregningene av den rasjonelle metode finnes i Vedlegg G.

Tabell 23: Sammenligning av vannføring mellom rasjonell metode og EDB-modell.

Node	Tilknyttet areal [ha]	EDB-modell [l/s]	Rasjonell metode [l/s]
13021	0,58	[78,07 – 248,63]	29,97
9517	1,53	[106,44– 434,29]	58,75

Kontrollberegningen viste et betydelig avvik mellom vannføringen estimert fra SWMM-modellen og den rasjonelle metode. Samtlige av parametersettene estimerer høyere verdier en den rasjonelle formelen. Norsk Vann (2014) påpeker at den rasjonelle metode i utgangspunktet skal fungere som grov overslagsestimering. Metoden baserer seg på et statisk kasseregn, hvorimot det EDB-modellen opererer med dynamisk nedbørhendelse. Videre antar den rasjonelle metode også at konsentrasjonstiden er lik varigheten på nedbørshendelsen. Det symmetriske hyetogrammet på sin side bygges opp mot en flomtopp i midten av nedbørshendelsen. Det kan tenkes at forskjellen i betraktninger av nedbørshendelsen fører videre til påfallende differanse mellom intensitettoppen til det symmetriske hyetogrammet og rasjonell metode. Vannføringssestimatet i EDB-modellen vil også være basert på det hydrologiske minne til modellen. Minnet vil blant annet kunne inneholde forregn som vil gi en høyere estimering sammenlignet med den rasjonelle metode som ikke tar hensyn til dette. Det siktes også til at formen på nedslagsfeltene ikke var rektangulære, slik som den rasjonelle metode antar.

8 Konklusjon

ArcGIS med støtteprogramvaren Arc Hydro viste seg egnet til inndeling av nedslagsfelt i et urbant vassdrag. Allikevel, det vil alltid være knyttet usikkerhet til modeller som etterligner virkeligheten med matematiske formler. Inndelingsprosessen avhenger også i stor grad av hvilke inngangsdata som er tilgjengelig, og små endringer i terrengmodellen kan utgjøre store forskjeller i inndelingen av nedslagsfelt.

Feltforsøk viste at K_{sat} -verdier kunne klassifiseres som moderat høy. Det anses derfor gunstig å tilrettelegge for infiltrasjonsbaserte LOD-tiltak i vassdraget. Det bør imidlertid gjøres feltforsøk for det aktuelle området dersom det vurderes infiltrasjonsbaserte LOD-tiltak, ettersom K_{sat} varierer mye i tid og rom.

Kalibreringen av SWMM-modellen ga fire optimale parametersett som ble benyttet videre til å estimere dimensjonerende vannføring ved en 200-års nedbørshendelse. Kalibreringen ble bygd opp på en automatisert optimaliseringsmetode med objektiv funksjon for å finne optimale kalibreringsparametere. Prestasjonen til de optimale parametersettene funnet i kalibreringsforsøk KF2 ble konkludert med å være svært god. Også internoverførbarheten simulert for de samme parametersettene ble konkludert med å være tilfredsstillende.

Resultatet viser at hydrologisk-hydrauliske modellen estimerer at dimensjonerende vannføring i ny kulvert med bakgrunn i et 200-års nedbørshendelse ligger innenfor intervallet 8,7 - 26,9 m³/s ved utløpet til gjestehavna i Sandnes. Klimafaktor 1,2 er lagt til grunn for denne estimeringen. Videre var forventet vannføring 19 m³/s.

Estimeringen av dimensjonerende vannføring i Stangelandsåna vassdrag er utsatt for usikkerheter gjennom inngangsdata, modellering, kalibrering og simulering. Ved å benytte lengre tidsserier i kalibreringsperioden vil det være mulig å redusere noe av usikkerheten. Om modellen ønskes å bli benyttet til videre arbeid er det viktig at begrensninger og usikkerheter knyttet til modellen tas hensyn til. Likevel anses modellen som tilfredsstillende for prosjektets formål.

9 Videre arbeid

Det vil være flere momenter å jobbe ut i fra i prosjektet. Prosjektet omfatter et stort prosjektområde, og ved enkelte punkt vil det kunne være lurt å ta for seg deler av området for å kunne detaljere arbeidet i en større grad. I det følgende er det foreslått en liste med mulige aspekt for videre arbeid:

- Utføre en følsomhetsanalyse for kalibreringssettene. På denne kartlegges et nøyaktig bilde på parameterens følsomhet ovenfor modellen.
- Fortsette målingen av vannføringen og nedbør i Stangelandsåna, slik at lengre måleserier kan brukes til en mer representativ kalibrering på et senere tidspunkt. På denne måten kan sesongvariasjoner også bli tatt hensyn til.
- En distribuering av delfelt SC1 ville gitt prosjektet forbedret kvalitet. Delområdet SC1 behandles som et areal, og en distribuering av dette området vil kunne gi nøyaktigere overflateavrenning fra området
- Innhenting og bearbeiding av hvilke noder i avløpssystemet som er åpne og lukket vil kunne eliminere usikkerheten knyttet til innføring av teoretiske kriterier for å identifisere sluk i systemet.
- Utføre studier av prestasjonen til delelementer av overvannsnett og fellessystemet. Eksempelvis studier av overløpsmengder eller hvor oversvømmelser kan finne sted ved ulike gjentaksintervall, og skadeomfanget av disse. Videre kan produksjon av aktsomhetskart og kostnytteanalyse gjennomføres for enkelte tiltak.
- Ved bruk av EDB-basert verktøy vil en studie av vannkvaliteten i Stangelandsåna vassdrag kunne være av interesse. Ettersom avløpssystemet består til dels av AF-ledninger, vil det trolig inneholde større konsentrasjoner av enkelte partikler sammenlignet med et avløpssystem bestående av kun separatsystem.
- Tidligere er LOD-tiltak blitt simulert i masterarbeidet til Lende (2013) i en ikke-kalibrert modell for delområdet SC4. Videre arbeid kunne gått på å simulere effekten av LOD-tiltak i hele Stangeland vassdrag, og spesielt i den bebygde delen av vassdraget.

10 Referanser

- Alfredsen, K., et al. (2013) *Kompendium TVM4101 BM2 Vann- og miljøteknikk*. Trondheim: NTNU.
- Atchison, D. og Severson, L. (2004) *RECARGA User's Manual*. University of Wisconsin – Madison, Civil & Environmental Engineering Department, Water Resources Group.
- Barco, J., Wong, K. M. og Stenstrom, M. K. (2008) Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(4): 466-474. doi: 10.1061/ASCE 0733-9429 2008 134:4 466.
- Batymeter (2015). Tilgjengelig fra: <https://snl.no/batymeter> (Hentet: 24. mai 2017).
- Beven, K. (2012) *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. 2. utg. John Wiley & Sons, Ltd.
- Brown, K. og Wherrett, A. (2017) *Fact Sheets Bulk Density - Measurement*. Tilgjengelig fra: <http://soilquality.org.au/factsheets/bulk-density-measurement> (Hentet: 1. juni 2017).
- Burke, S. (2001) *Regression and Calibration*. (Statistics and data analysis). Tilgjengelig fra: <https://www.webdepot.umontreal.ca/Usagers/sauves/MonDepotPublic/CHM%203103/LCGC%20Eur%20Burke%202001%20-%20%20de%204.pdf>.
- Butler, D. og Davies, J. W. (2011) *Urban Drainage*. 3. utg. Spon Press.
- Byggforsk, S. (2012) Vann i by – håndtering av overvann i bebygde områder, 311.015.
- Christensen, S. (2015) *Jordanalyse*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/jordanalyse> (Hentet: 16. mai 2017).
- COWI (2013) *På lag med regnet - veileder for lokal overvannshåndtering*.
- COWI (2014) *Metoder for beregning av klimafaktorer for fremtidig nedbørintensitet*.
- COWI (2015) *Gjennomgang av avrenningsfaktorer*.
- Dagestad, A., Hansen, L. og Braathen, A. (2003) *Hydrauliske egenskaper i løsmasser og fjell sett i sammenheng med EU-direktivet for deponering av avfall*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (Hentet: 6. juni).
- Dalen, T. (2012) *Hydrologisk dimensjonering av regnbed i kaldt klima*, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. (Hentet: 6. juni).
- Dannevig, P. (2009) *Rogaland: klima I Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Rogaland%2Fklima> (Hentet: 17. februar 2017).
- DHI (2017) *MIKE URBAN Model Manager User Guide*. DHI.
- Dingman, S. L. (2015) *Physical Hydrology*. 3. utg. Waveland Press, Inc.
- Duan, Q., Sorooshian, S. og Gupta, V. (1992) Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resources Research*, 28(4)(1015-1031). doi: 10.1029/91WR02985.
- ESRI (2004) *ArcGIS 9*.
- ESRI (2011) *ArcToolbox*. Tilgjengelig fra: <http://wiki.gis.com/wiki/index.php/ArcToolbox> (Hentet: 03. April 2017).
- ESRI (2017a) *How Fill works?* Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm> (Hentet: 19.04 2017).
- ESRI (2017b) *How Watershed works?* Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-watershed-works.htm> (Hentet: 21.04 2017).
- ESRI (2017c) *What is ArcMap?* Tilgjengelig fra: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm> (Hentet: 30.mars 2017).
- ESRI (2017d) *A quick tour of finding tools*. Tilgjengelig fra: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/analyze/finding-tools/a-quick-tour-of-finding-tools.htm> (Hentet: 19.04 2017).
- ESRI (2017e) *What is ModelBuilder?* Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm> (Hentet: 30.mars 2017).

- ESRI (2017f) *Arc Hydro Overview*. Tilgjengelig fra: <http://resources.arcgis.com/en/communities/hydro/01vn000000s000000.htm> (Hentet: 03. April 2017).
- ESRI (2017g) *How Flow Accumulation works?* Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm> (Hentet: 19.04 2017).
- ESRI (2017h) *How Flow Direction works?* Tilgjengelig fra: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-direction-works.htm> (Hentet: 19.04 2017).
- Fetter, C. W. (2001) *Applied hydrogeology*. 4. utg. New Jersey: Prentice-Hall.
- Geodata (u.å.) *Kartlegging av flomveier i urbane områder*. Tilgjengelig fra: <http://geodata.no/gis-i-din-bransje/kundehistorier/kartlegging-av-flomveier-i-urbane-omrader/> (Hentet: 8. februar 2017).
- Google (2017) *372 Heigreveien*. Tilgjengelig fra: <https://www.google.com/maps/@58.8310922,5.6570296,3a,75y,133.24h,88t/data=!3m6!1e1!3m4!1sj4R6kwx1RGIPyJ6GrS98g!2e0!7i13312!8i6656> (Hentet: 28. april 2017).
- Gragne, A. S. og Sægrov, S. (2016) *Beregning av nedbørsavrenning i Stangelandsåna, Sandnes*. Trondheim:: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Gulliver, J. S., Erickson, A. J. og Weiss, P. T. (2010) *Stormwater Treatment: Assessment and Maintenance*. University of Minnesota, St. Anthony Falls Laboratory.
- Hans og Grete Barnehage SA ((u.å.)) *Om oss*. Tilgjengelig fra: <http://www.minbarnehage.no/hogg/Underside/1353> (Hentet: 29. mai 2017).
- I. Hanssen-Bauer, E. J. F., I. Hadde-land, H. Hisdal, S. Mayer, A. Nesje, J.E.Ø. Nilsen, S. Sandven, A.B. Sandø, A. Sorteberg og B. Ådlandsvik (2015) *Klima i Norge 2100*.
- IPCC (2014) *FNs klimapanels femte hovedrapport Del 1: Det naturvitenskapelige grunnlaget*.
- Johansen, J. A. og Moldekleiv, H. J. s. (2016) *Utrpøving av metodikker for modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS, MIKE21 og MIKE FLOOD*, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Kartverket (2017) *Norgeskart: Kartverket*. Tilgjengelig fra: www.norgeskart.no (Hentet: 21. april).
- Lambrecht (u.a.) *Operating Instructions Heated Precipitation Sensor (1518 H3)*.
- Lem, G. H. og Syslak, I. A. (2017) *Målefeil*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/m%C3%A5lefeil> (Hentet: 20. April 2017).
- Lende, T. A. (2013) *Modellering av avrenningsreducerende tiltak i Trones-feltet, Sandnes*, NTNU. (Hentet: 1. mai).
- Li, Z. (2014) *Watershed modeling using arc hydro based on DEMs: a case study in Jackpine watershed*.
- Lindholm, O., et al. (2008) *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*.
- Lindholm, O., et al. (2012) *Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportssystem*. Norsk Vann(Hentet: 28. mai).
- Lindholm, O. (2013) *Gode løsninger for klimatilpasset overvannshåndtering*. Tilgjengelig fra: <http://docplayer.me/5032613-Gode-losninger-for-klima8lpasset-overvannshandtering.html>.
- Madsen, H. (2003) *Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives*, *Advances in Water Resources* 26 (2), 205- 216. doi: 10.1016/S0309-1708(02)00092-1.
- McCuen, R. H., Knight, Z. og Cutter, A. G. (2006) *Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index*, *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(6). doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).
- Meteorologisk institutt (2009) *Automatiske nedbørmålere*. Tilgjengelig fra: https://metlex.met.no/wiki/Automatiske_nedb%C3%B8rm%C3%A5lere (Hentet: 10. februar 2017).
- Meteorologisk institutt (2010a) *Pluviometre*. Tilgjengelig fra: <https://metlex.met.no/wiki/Pluviometre> (Hentet: 10. februar 2017).

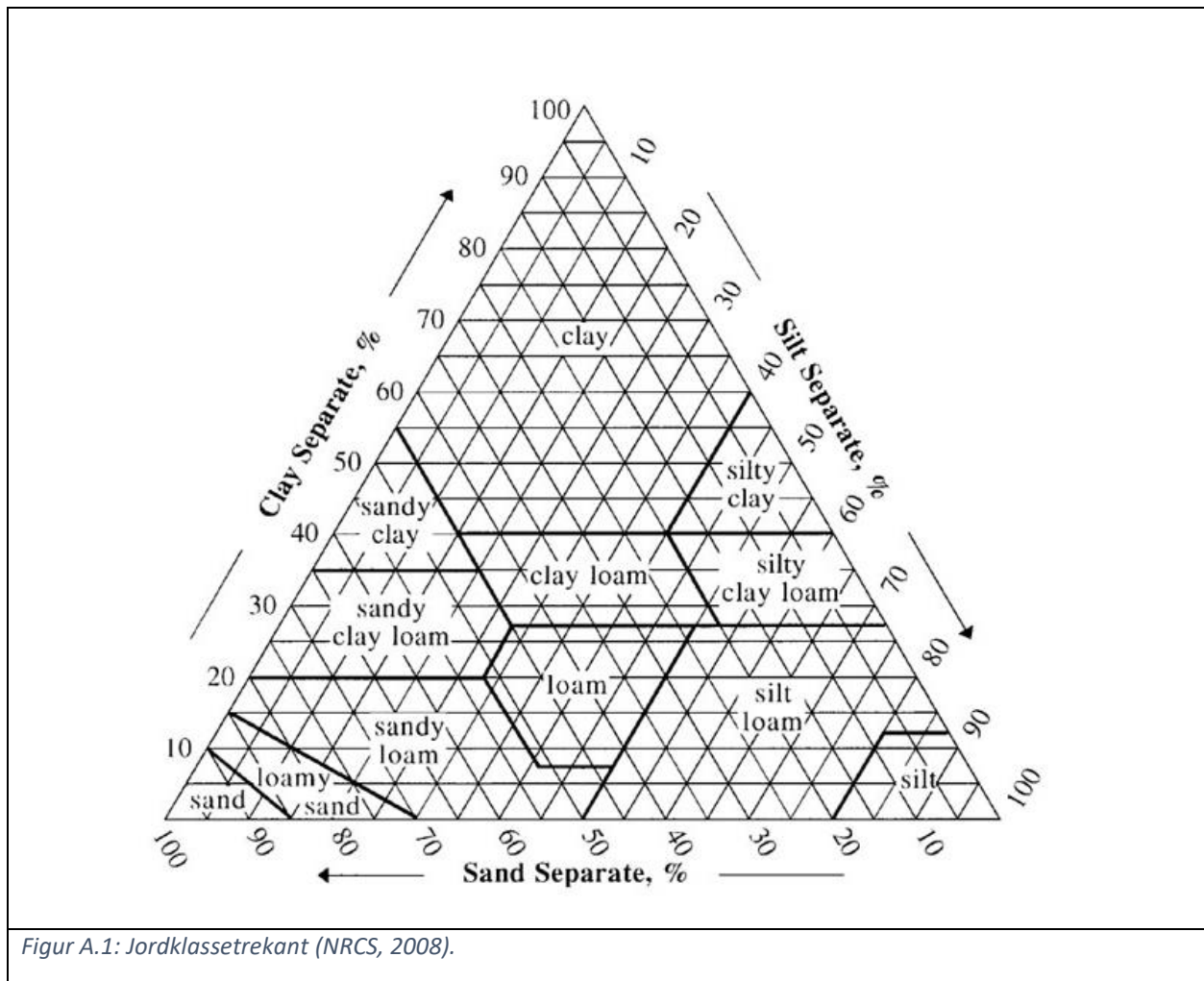
- Meteorologisk institutt (2010b) *Manuelle nedbørmålere*. Tilgjengelig fra: [https://metlex.met.no/wiki/Manuelle nedb%C3%B8rm%C3%A5lere](https://metlex.met.no/wiki/Manuelle_nedb%C3%B8rm%C3%A5lere) (Hentet: 10. februar 2017).
- Meteorologisk Institutt (2013) Krav ved etablering av automatiske værstasjoner i Norge (b. 2017). Tilgjengelig fra: <https://ulsteinvikweather.com/blog/wp-content/uploads/2016/05/KRAVVEDETABLERINGAVAUTOMATISKEVERSTASJON.pdf>.
- Meteorologisk Institutt (2016) *Klima*. Tilgjengelig fra: <https://met.no/Klima/> (Hentet: 19. januar 2016).
- Meteorologisk institutt (2017) IVF-kurve for 44730 SANDNES - ROVIK: Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: www.eklima.met.no (innlogging kreves) (Hentet: 7. februar 2017).
- Meteorologisk Institutt (u.a.) *Vestlandet*. Tilgjengelig fra: https://met.no/Vestlandet.b7C_wljM1i.ips (Hentet: 17. februar 2017).
- Mittet, J. S., et al. (2017) *A regionalisation technique for urban ungauged catchments – a case study from Norway*, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- Mosevoll, G., Wedum, K. og Sægrov, S. (1991) *Håndbok for vannføringsmålinger i vann- og avløpsanlegg*. Trondheim: Norsk hydroteknisk laboratorium.
- Muthanna, T. M. (2016a) Stream morphology and hydrology (kurs TVM4141). ikke publisert materiale. forelesning 14. september 2016. Trondheim: Norges teknisk-vitenskaplige universitet.
- Muthanna, T. M. (2016b) Low impact development (kurs TVM4141). ikke publisert materiale. forelesning 21. september 2016. Trondheim: Norges teknisk-vitenskaplige universitet.
- Muthanna, T. M. (2017) Personlig kommunikasjon: samtale, 22. mai 2017. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Nash, J. E. og Sutcliffe, J. V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10(3)(282-290). doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nesting, R. S. (2007) *The Comparison of Infiltration Devices and Modification of the Philip-Dunne Permeameter for the Assessment of Rain Gardens - Master's thesis*, University of Minnesota.
- NGU (2017) Løsmassekart. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (Hentet: 10. mai).
- NIVA (2003) Revurdering av beregningskriterier for avløpssystemer, flom i kommunale avløpssystem.
- Norsk Vann (2014) *Vann- og avløpsteknikk*. 2. utg. Norsk Vann.
- NOU 2015:16. *Overvann i byer og tettsteder*. Oslo: Klima- og miljødepartementet.
- NRCS (2008) *Soil Texture Calculator* (Hentet: 15. mai 2017).
- NVE (2015) *Urbanhydrologi*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-og-vannfoering/urbanhydrologi/> (Hentet: 1. februar 2017).
- Paus, K. H. (2010) Matlab-script for estimering av tensjon og hydraulisk konduktivitet. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- Ponce, V. M. (2014) *Engineering Hydrology, Principles and Practices*, 2. utg. Tilgjengelig fra: http://ponce.sdsu.edu/enghydro/engineering_hydrology_02.php (Hentet: 27. mai 2017).
- Rossmann, L. A. (2015) *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. United States Environmental Protection Agency.
- Sandnes Kommune (2010) Helhetlig vannforvaltning - vannforskriften og forvaltningsplan for Figgjo. Tilgjengelig fra: <https://www.sandnes.kommune.no/Fillager/Internett/politikk/utvalg/2010/Kommuneplankomiteen/151110/sak55.pdf>.
- Sandnes Kommune (2014a) Hovedplan avløp og vannmiljø 2015- 2025.
- Sandnes Kommune (2014b) *Gisketjern*. Tilgjengelig fra: <https://www.sandnes.kommune.no/Globalmeny/om-kommunen/Administrasjonen/Teknisk/Bymiljo/Parker-og-friluftsliv/Friluftsliv/Gronne-naromrader/Parker-og-friomrader/Gisketjern/> (Hentet: 1. mai 2017).
- Sandnes Kommune (2015a) *VA-Norm. Vedlegg 9 Overvannshåndtering*.
- Sandnes Kommune (2015b) *Kommuneplan for Sandnes Kommune 2015-2030 Samfunnsdel*.

- Sandnes Kommune (2016) *Sandnes i tall*. Tilgjengelig fra: <https://www.sandnes.kommune.no/Globalmeny/om-kommunen/Om-Sandnes/Sandnes-i-tall/> (Hentet: 20. februar 2017).
- Sandnes Kommune (2017) Personlig kommunikasjon med Kirsten Vike: e-post, 11. mai 2017.
- Sandnes Kommune ((u.å.)) *Rådhusmarka barnehage*. Tilgjengelig fra: <https://www.sandnes.kommune.no/barnehage-og-skole/barnehager-i-sandnes/kommunale-barnehager/radhusmarka-barnehage/> (Hentet: 29. mai 2017).
- SEBA HYDROMETRIE (2016a) *Discharge Measuring System Q-Modul SHWP User manual*.
- SEBA HYDROMETRIE (2016b) *Hydrological Sensors DS(T)-22 / TS-22 Water level and water temperature user manual*.
- Solheim, E. B. (2017) *Infiltrasjon for lokal overvannsdiskonering (LOD) - vurdering av metoder for å måle infiltrasjon på lokal tomt*, Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. (Hentet: 15. mai).
- Standard Norge (2008) NS-EN 752:2008 Utvendige stikklednings- og hovedledningssystemer. Oslo: Standard Norge. (Hentet: 6. juni).
- Statens vegvesen (2014a) *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser*. Vegdirektoratet, Oslo.
- Statens Vegvesen (2014b) *Håndbok N200 Vegbygging*. Vegdirektoratet, Oslo.
- Statistisk sentralbyrå (2013) *Folke- og boligtellingsen, boliger, 19. november 2011*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/befolkning/statistikker/fobbolig/hvert-10-aar/2013-02-26#content> (Hentet: 27. mai 2017).
- Store norske leksikon (2009) *Sikting*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/sikting> (Hentet: 16. mai 2017).
- Storm Aqua (2017a) Personlig kommunikasjon med Lars Møller-Pedersen: e-post, 29. mars 2017.
- Storm Aqua (2017b) Personlig kommunikasjon med Lars Møller-Pedersen: e-post, 6. mars 2017.
- Storm Aqua (2017c) Personlig kommunikasjon med Per Møller-Pedersen: e-post, 8. juni 2017.
- Strømsholm, B. (2017) *Hva er ArcGIS Desktop?* Tilgjengelig fra: <http://ndla.no/nb/node/61867?fag=2600> (Hentet: 30. mars 2017).
- Tarboton, D. (2012) *Watershed and Stream Network Delineation*. Tilgjengelig fra: <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/giswr2012/Ex4/Ex42012.htm>.
- Thorolfsson, S. og Matheussen, B. V. (2005) *Avløpsmodellering med bruk av gratis programvare. - eksempler med SWMM 5.0 og fGIS*.
- Thorolfsson, S. T. (2013) *Overvannsteknologi*.
- Tollan, A. (2015) *Flom*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/flom> (Hentet: 1. februar 2017).
- Torvik, S. E. og Oddane, B. (2015) *Plan for mulige miljøtiltak i landbruket i nedbørsfeltet til Stangelandsåna*. Ecofact (Hentet: 10. mai).
- U. S. Geological Survey (2016) *Vannets kretsløp*. Tilgjengelig fra: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclenorwegian.html> (Hentet: 30. januar 2017).
- United States Environmental Protection Agency (2016) *SWMM 5.1 Update History*. Tilgjengelig fra: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-09/epaswmm5_updates.txt (Hentet: 27. januar 2017).
- USDA (2014) *SSR1- Technical Note Number 26 (3rd Revision)*. (Hentet: 6. juni).
- Vannportalen (2014) *Vanndirektivet*. Tilgjengelig fra: <http://www.vannportalen.no/regelverk/vanndirektivet/> (Hentet: 19.04 2017).
- Yr (2017a) *Weather statistics for Sandnes (Rogaland)*. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/place/Norway/Rogaland/Sandnes/Sandnes/statistics.html> (Hentet: 17. februar 2017).
- Yr (2017b) *Sandnes (Rogaland)*. Tilgjengelig fra: <https://www.yr.no/place/Norway/Rogaland/Sandnes/Sandnes/almanakk.html?dato=2017-04-26> (Hentet: 1. juni 2017).

Yr (2017c) *Været som var (klima) - Sandnes (Rogaland)*. Tilgjengelig fra:
<https://www.yr.no/sted/Norge/Rogaland/Sandnes/Sandnes/klima.html> (Hentet: 17. februar
2017).

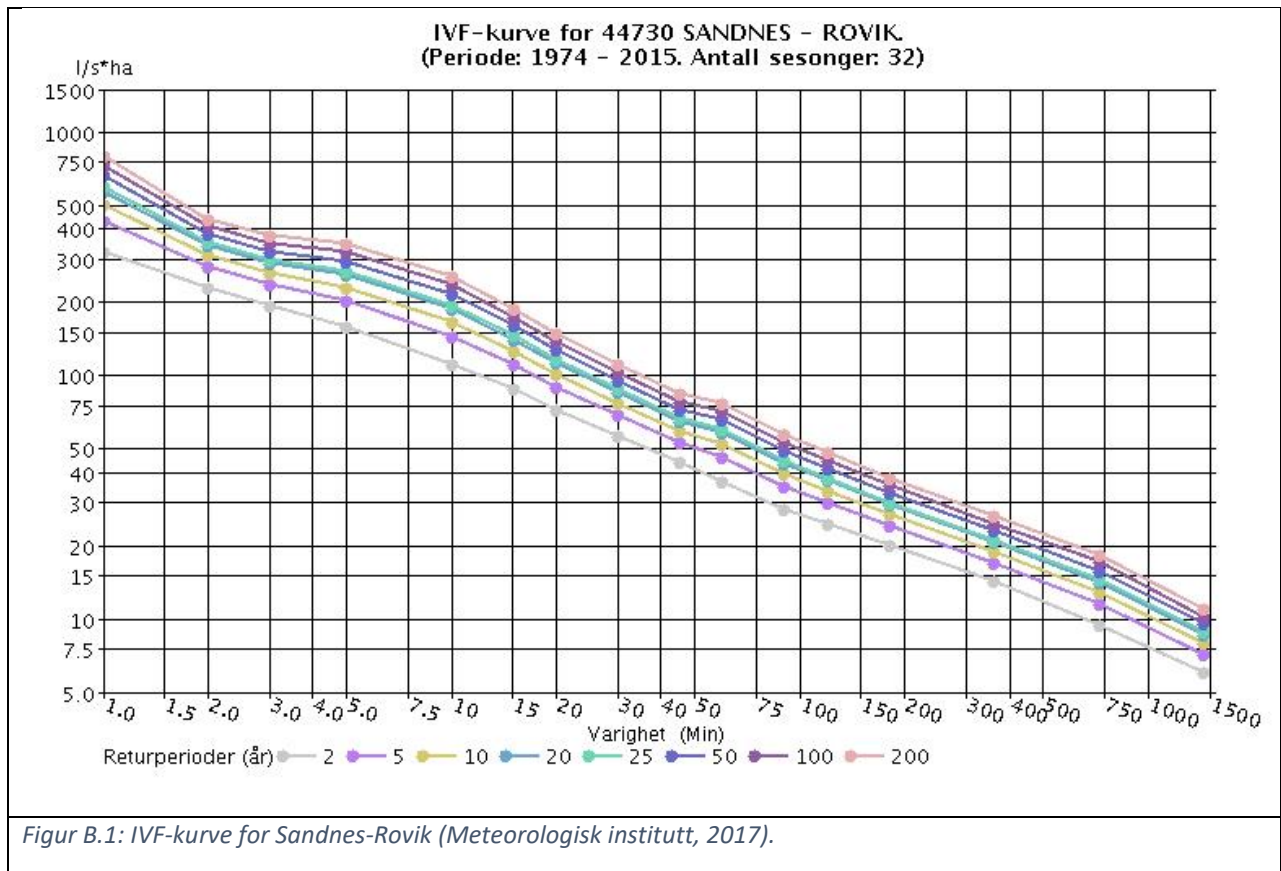
Vedlegg A Jordklassetrekant

Basert på resultatene fra sikteprøven kunne jordarten klassifiseres ved hjelp av jordklassetrekanten.



Vedlegg B IVF-kurve

IVF-kurve for Sandnes-Rovik.



Vedlegg C Standardverdier og klassifisering for mettet hydraulisk konduktivitet

Tabell C.1: Standardverdier for mettet hydraulisk konduktivitet for ulike jordarter. Oversatt fra Fetter (2001).

Material	Hydraulisk konduktivitet [cm/time]
Leire	$3,6 * 10^{-6} - 3,6 * 10^{-3}$
Silt, sandig silt, leirholdig sand	$3,6 * 10^{-3} - 3,6 * 10^{-1}$
Siltig sand, fin sand	$3,6 * 10^{-2} - 3,6 * 10^0$
Sand	$3,6 * 10^0 - 3,6 * 10^2$
Grus	$3,6 * 10^1 - 3,6 * 10^3$

Tabell C.2: Standardverdier for mettet hydraulisk konduktivitet for ulike jordarter (Dagestad, Hansen og Braathen, 2003).

Material	Hydraulisk konduktivitet [cm/time]
Leire	$3,6 * 10^{-7} - 3,6 * 10^{-4}$
Silt	$3,6 * 10^{-4} - 3,6 * 10^{-1}$
Sand	$3,6 * 10^{-1} - 3,6 * 10^2$
Grus	$3,6 * 10^2 - 3,6 * 10^4$

Tabell C.3: Klassifisering av mettet hydraulisk konduktivitet (USDA, 2014).

Klasse	Hydraulisk konduktivitet [cm/time]
Veldig høy	$3,6 * 10^1 - 2,54 * 10^2$
Høy	$3,6 * 10^0 - 3,6 * 10^1$
Moderat høy	$3,6 * 10^{-1} - 3,6 * 10^0$
Moderat lav	$3,6 * 10^{-2} - 3,6 * 10^{-1}$
Lav	$3,6 * 10^{-3} - 3,6 * 10^{-2}$
Veldig lav	$0 - 3,6 * 10^{-3}$

Vedlegg D Matlab-skript for beregning av mettet hydraulisk konduktivitet (Paus, 2016)

```

data = xlsread('mpddata.xlsx', 'inputfane');           % Reads input matrix
n = size(data);                                       % Finds the size of the
input matrix
n = n(1);                                             % Finds the number of
rows (n)
t = data(1:n,3)*60*60*24;                             % Finds time time matrix
and convert values from days to seconds
h = data(1:n,2);                                       % Finds head matrix

dteta=data(2,1)-data(1,1);                             % Finds differences in
volumetric water content (dteta)
Lmax = data(3,1);                                       % Finds length of
device below surface
rd = data(4,1);                                       % Finds radius of
device
H = data(5,1);                                       % Finds phase one
initial height
K = 0.001;
C = -1000;

tt(1,1)=0;                                             % Sets first
intermediate time value to zero
i=2:n;                                                 % Prepare integers for
the remaining intermediate time values
tt(i,1)= (t(i,1)-t(i-1,1))*0.5+t(i-1,1);             % Finds intermediate
time values (tt)
hh = spline(t,h,tt);                                   % Cubic spline
interpolation to find intermediate h values (hh)

q(1,1)=0;                                             % Sets first difference
value to zero
qt(1,1)=0;                                             % Sets first time
difference value to zero
qh(1,1)=0;                                             % Sets first head
difference value to zero

i = 2:n;                                             % Prepare integers for
the remaining intermediate time values
qt(i,1) = tt(i,1)-tt(i-1,1);                          % Fills in remaining
time difference values (qt)
qh(i,1) = hh(i,1)-hh(i-1,1);                          % Fills in remaining
head difference values (qh)

```

```

for i=2:n,                                     % Calculate difference
values (q)

    q(i,1)=qh(i,1)/qt(i,1);
end

i=1;

while(i<n+1)                                   % Using Newton-Rhapson
to find R values

    x = 1;
    ii = 1;

    while(ii<100000)

        f1=2*x^3+Lmax*3*x^2-Lmax^3-2*(rd/2)^3-3*rd^2*(H-hh(i,1))/(dteta);
        ff = 6*x^2+Lmax*6*x;
        x = x-f1/ff;
        ii =ii +1;
        R(i,1)=x;

    end

i=i+1;
end

for i=2:n,                                     % Calculate difference
values (q)

    q(i,1)=qh(i,1)/qt(i,1);

end

i = 1;
while(i<n+1)

```

```

    if R(i,1)<(Lmax^2+rd^2)^0.5, R(i,1)=0;           % Calculate R values (R)
    end
    i=i+1;
end

i = 2:n;                                           % Prepare integers for
the remaining intermediate time values
dt1(i,1)=tt(i,1)-tt(i-1,1);                       % Fills in remaining
time difference values (qt)

for i=1:n,
    if R(i,1)<10^-10, ss=i;                         % Calculate R values (R)
    end
end

KC0 = [0.01,-100];
f = @(KC) optt(KC,n,Lmax,dteta,R,rd,hh,dt1,ss);
[KC,f] = fminsearch(f,KC0);

Results(1,1)=KC(1);
Results(1,2)=KC(1)*60^2;
Results(1,3)=KC(2);
Results(1,4)=f;
Results(1,5)=n-ss-1;
Results(1,6)=sqrt(f/(n-ss-1));

i = 2:n;                                           % Prepare integers for
the remaining intermediate time values
dh1(i,1)=-hh(i,1)+hh(i-1,1);                       % Fills in remaining
time difference values (qt)

KC0 = [0.01,-100];
f = @(KC) opth(KC,n,Lmax,dteta,R,rd,hh,tt,dh1,ss);
[KC,f] = fminsearch(f,KC0);

Results(2,1)=KC(1);
Results(2,2)=KC(1)*60^2;
Results(2,3)=KC(2);
Results(2,4)=f;

```

```
Results(2,5)=n-ss-1;
Results(2,6)=sqrt(f/(n-ss-1));
```

```
'Estimated parameters:'
```

```
format shortG
```

```
ForExcelSheet(1,1)=Results(1,1);
ForExcelSheet(2,1)=Results(1,2);
ForExcelSheet(3,1)=Results(1,3);
ForExcelSheet(4,1)=Results(1,4);
ForExcelSheet(5,1)=Results(1,5);
ForExcelSheet(6,1)=Results(1,6);
ForExcelSheet(7,1)=Results(2,1);
ForExcelSheet(8,1)=Results(2,2);
ForExcelSheet(9,1)=Results(2,3);
ForExcelSheet(10,1)=Results(2,4);
ForExcelSheet(11,1)=Results(2,5);
ForExcelSheet(12,1)=Results(2,6);
```

```
ForExcelSheet
```

```
disp('    Ksat[cm/s]    Ksat[cm/h]  Cap.Suc.[cm]  Sum of error  Obs.
RMS error')
```

```
disp(Results)
```

```
if Results(1,4)<Results(2,4), 'Delta T optimization gives smallest error:'
else 'Delta H optimization gives smallest error: '
end
```

```
if Results(1,4)<Results(2,4), Ksat=Results(1,2)
else Ksat=Results(2,2)
end
```

```
if Results(1,4)<Results(2,4), C=Results(1,3)
else C=Results(2,3)
end
```

Vedlegg E Utstysrliste

Komplett utstysrliste for MPD infiltrasjonstest og jordprøvetaking, med påfølgende laboratoriearbeid.

MPD infiltrasjonstest og jordprøvetaking

- Spade
- 6 stk. MPD-infiltrrometer
- Vann
- Skrivebok
- Enkel vekt
- 6 stk. målebånd
- Plastikkposer med dobbel zip-lukking
- Vannkanne
- Penn
- Stoppeklokker
- Sprittusj

Laboratoriearbeid

- Varmeskap
- Vekt med stor nøyaktighetsgrad
- Skål
- Penn
- Metallklype
- Aluminiumsskåler
- Retsch AS 200 siktemaskin
- Skrivebok
- Børste

Vedlegg F Utregning av vekttall for forventet hydrogram

På følgende vis ble vekttallene som ble benyttet for å lage forventet hydrogram for 200-års nedbørhendelsen beregnet.

Tabell F.1: SSR-verdier for hvert parametersett i hver tidsserie.

SSR					
	KF2-A	KF2-B	KF2-C	KF2-D	Sum
Flomtopp A	8.954	26.306	10.289	11.287	56.836
Flomtopp B	10.062	8.084	10.007	13.752	41.905
Flomtopp C	13.475	22.325	12.962	19.955	68.717
Flomtopp D	20.408	32.184	14.936	6.633	74.161

Tabell F.2: MSE-verdier for hvert parametersett i hver tidsserie.

MSE					
	KF2-A	KF2-B	KF2-C	KF2-D	Sum
Flomtopp A	0.010	0.028	0.011	0.012	0.061
Flomtopp B	0.014	0.011	0.014	0.019	0.059
Flomtopp C	0.014	0.022	0.013	0.020	0.069
Flomtopp D	0.039	0.062	0.029	0.013	0.142

$$MSE = \frac{SSR}{(\text{antall tidssteg i tidsserie})}$$

Tabell F.3: Inverse MSE-verdier for hvert parametersett i hver tidsserie.

MSE⁻¹					
	KF2-A	KF2-B	KF2-C	KF2-D	Sum
Flomtopp A	104.539	35.581	90.972	82.928	314.020
Flomtopp B	70.463	87.704	70.849	51.558	280.573
Flomtopp C	74.063	44.703	76.991	50.013	245.771
Flomtopp D	25.578	16.219	34.949	78.697	155.443

Tabell F.4: Fraksjon av inverse MSE-verdier for hvert parametersett i hver tidsserie, og vektall for hvert parametersett.

Fraksjon av MSE⁻¹

	KF2-A	KF2-B	KF2-C	KF2-D	Sum
Flomtopp A	0.333	0.113	0.290	0.264	1.000
Flomtopp B	0.251	0.313	0.253	0.184	1.000
Flomtopp C	0.301	0.182	0.313	0.203	1.000
Flomtopp D	0.165	0.104	0.225	0.506	1.000
Sum	1.050	0.712	1.080	1.158	4.000
Vekttall for hvert parametersett	0.262	0.178	0.270	0.289	1.000

I det følgende er et eksempel på utregning av fraksjon beregnet for rad en, kolonne en:

$$f_{1,1} = \frac{MSE_{1,1}^{-1}}{\sum_{j=1}^4 MSE_{1,j}^{-1}} = \frac{104.539}{314.020} = 0.333$$

I det følgende er et eksempel på utregning av vektallet for parametersett KF2-A:

$$w_{KF2-A} = \frac{\sum_{i=1}^4 f_{i,1}}{\sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 f_{i,j}} = \frac{1.050}{4.000} = 0.262$$

I det følgende er et eksempel på utregning av forventet vannføring med bruk av vektall. Utregningen tar utgangspunkt i 200-års nedbørhendelse med klimafaktor 1,2. Svaret på 19 m3/s er sammenlignbart med hydrogrammet som tar utgangspunkt i samme scenario.

Tabell F.5: Eksempelutregning av forventet vannføring med 200-års nedbørhendelse og klimafaktor 1,2.

Parametersett	Fraksjon	Vannføring, utløp ved fjord. Klimafaktor 1,2 [m3/s]	Vektet vannføring [m3]
KF2-A	0.262	17,5	4,6
KF2-B	0.178	8	1,4
KF2-C	0.270	19	5,1
KF2-D	0.289	27	7,8
Sum	1.000		19,0

Vedlegg G Utregning med rasjonell formel

Tabellene G.1 og G.2 viser utregningen for henholdsvis konsentrasjonstid, intensitet, og beregnet vannføring med den rasjonelle formel.

Tabell G.1: Utregning av konsentrasjonstid og intensitet

Node	Lengde på ledning [m]	Tilrenningstid [min]	Tid i ledning [min]	konsentrasjonstid [min]	Intesitet [l/sha]
9517	62	5	0,52	5,52	335
13021	52	5	0,43	5,43	335
17180	275	5	2,29	7,29	300

Tabell G.2: Utregning av vannføring med rasjonell formel.

Node	Totalt areal [ha]	Permeabelt areal [ha]	Avren.koeff. perm. [-]	Impermeabel, veg [ha]	Avren.koeff. Veg [-]	Impermeabel, hustak [ha]	Avren.koeff. hustak [-]	φ snitt [-]	intrasjons intensitet [l/sha]	Kf [-]	Rasjonell formel [l/s]
9517	1,5343	1,0115	0,35	0,14	0,9	0,3782	0,95	0,42	335	1,2	258,28
13021	0,5780	0,3628	0,35	0,07	0,9	0,1412	0,95	0,57	335	1,2	131,76
17180	2,6698	1,7802	0,35	0,36	0,9	0,5296	0,95	0,54	300	1,2	522,06

Gjennomsnittlig avrenningskoeffisient

$$\varphi_{snitt} = \frac{\varphi_1 A_1 + \varphi_2 A_2 + \dots + \varphi_n A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

Rasjonell formel

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