

Kombinert hydrologisk - hydraulisk modell for urbane nedbørsfelt

Vendel Marie Pedersen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juli 2018

Hovedveileder: Knut Alfredsen, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Masteroppgåve i VA-teknikk

Kandidat: **Vendel Marie Pedersen**

Tema: **Kombinert hydrologisk – hydraulisk modell for urbane nedbørfelt.**

1. Bakgrunn

Nedbørepisoder med høg intensitet kan skape store problem i små nedbørfelt, og kanskje spesielt i urbane felt med mykje tette flater der ein større del av nedbøren går direkte til avrenning. For planlegging av løysingar i slike felt er det både viktig å vite kor stor del av nedbøren som går direkte til avrenning, og kor stor del som infiltrerer ned i grunnen. Nye data frå fjernmåling og meir detaljerte modellverktøy kan gjere det mogleg å studere slike prosessar i meir detalj. I denne oppgåva skal dette gjerast for områder i Risvollan forskningsfelt (nedbørfelt til regnbed og eit område med meir tette flater) gjennom å kombinere ein hydrologisk modell for å rekne på infiltrert vatn med ein hydraulisk modell for avrenning.

2. Arbeidsoppgåver

Oppgåva vil ha følgjande hovuddelar:

1. Det må gjerast eit litteratursøk på kva som er gjort rundt simulering av avrenning i urbanfelt med hovudfokus på modellar som tar omsyn til avrenning på overflata og hydraulisk modellering av denne.
2. Det må gjerast ei utrekning av effektiv nedbør for områda som skal simulerast slik at nedbør kan korrigerast for infiltrasjon for å lage inngangsdata til modellen.

3. HECRAS 2D skal settast opp for regnbedet på Risvolla basert på høgdedata. Det må gjerast ei vurdering av modellopløysing og kva som trengs for å få med viktige terrengformasjonar som påverkar modelleringa, slik som kantsteinar og fortauskantar. Det skal velgast ut eit par kraftige nedbørepisoder i for å køyre modellen på observerte data. Resultata skal brukast til å vurdere overflateavrenning med tanke på verifisering av modellen.
4. Med utgangspunkt i 2) og 3) skal modellen settast opp for feltet Hornebergbekken og ei 200-års nedbørepisode skal simulerast for dette feltet.
5. Det skal gjerast ei vurdering av kor god HECRAS er til å simulere avrenning med ei oppløysing som gjer det mogleg t.d. å vurdere sikre flomvegar og detaljar rundt fordeling av vatn i eit urbanfelt.

3. Rettleiing, data og informasjon

Faglærer vert professor Knut Alfredsen ved institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU. Kandidaten er elles ansvarleg for innsamling, kontroll og bruk av data. Hjelp frå ovannemnde eller andre må refererast i rapporten.

4. Rapport

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

Denne oppgåveteksta skal vere inkludert i rapporten.

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

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

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

Frist for innlevering er 6. juli 2018.

Institutt for bygg og miljøteknikk, NTNU

Knut Alfredsen

Professor

Sammendrag

Overvannsflom er et økende problem og økt urbanisering og klimaendringer pekes på som hovedårsaker. Foreløpige analyser antyder at nedbøren vil øke både i mengde og intensitet fremover. Ekstreme nedbørshendelser vil kunne overstige ledningsnettets kapasitet og resultere i overvannsflom. Dette gjør det nødvendig å finne løsninger for håndtering av overvann på overflaten. Detaljerte høydedata og nyere modelleringsverktøy gjør det mulig å studere overvann i områder med kompleks urban topografi. I denne rapporten skal avrenning fra kraftige nedbørshendelser i Trondheim studeres ved hjelp av en hydrologisk og en hydraulisk modell. Modellene kobles sammen i den forstand at resultater fra hydrologisk modell brukes som inndata i hydraulisk modell. En enkel hydrologisk modell er brukt for å beregne effektiv nedbør. Modellen skiller mellom permeable og impermeable flater og beregner infiltrasjon for permeable flater ved hjelp av Green-Ampt. Hydraulisk modell er HEC-RAS 2D. Hovedmålet med rapporten er å undersøke brukbarheten av HEC-RAS 2D for å studere fordeling av vann i et urbant område. Vurderinger i forhold til etablering av modellen i HEC-RAS står sentralt.

En digital høydemodell (DHM) som representerer terrenget med bygninger og tilhørende takflater er konstruert i ArcGIS ved hjelp av LiDAR-data med 0,25 m oppløsning og FKB-data. Konstruert DHM utgjør basisen for oppsett 2D modell i HEC-RAS. Beregningsnett (grid) i HEC-RAS-modellen settes til 1 m oppløsning med bruddlinjer langs veg- og fortauskanter. Nedbør modelleres ved metoden for regn-på-grid.

To studieområder i Trondheim er valgt: Risvollan regnbed (RIS) og Hornebergbekken. HEC-RAS-modell er satt opp for begge områder og simuleringer kjøres med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv og dynamisk bølge. Tilgjengelige vannføringsmålinger for RIS gjør at modellen kan kalibreres og verifiseres. To registrerte nedbørsserier er simulert og vannføring for regnbedets innløp er sammenlignet med observerte verdier. Erfaringer fra RIS utgjør grunnlaget for oppsett av den større Hornebergbekken-modellen. For Hornebergbekken er en nedbørshendelse med 200 år returperiode modellert og kartlagt i forhold til romlig fordelte dybder og hastigheter i feltet.

Ved simulering av nedbørsserie 1 for RIS oppnås en forklart varians på 0,77 og 0,78 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge. Ved nedbørsserie 2 oppnås verdier på 0,77 og 0,79 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge. Det var nødvendig å kalibrere både Mannings n og effektiv nedbør. Mannings n var i utgangspunktet satt for høyt. En nedjustering av Mannings n for gressflater fra 0,1 til 0,03 gav hurtigere respons i modellen og bedre timing av

hydrogrammet for begge nedbørsserier. Valgt metode for beregning av effektiv nedbør gir ikke tilfredsstillende resultater for de to nedbørsseriene. Gode resultater oppnås ved bruk av en enklere metode hvor en anslår effektiv nedbør som en andel av observert nedbør. En andel på 8% og 15% gir gode resultater for henholdsvis nedbørsserie 1 og 2. Spriket i andel effektiv nedbør tyder på at det er stor usikkerhet knyttet til beregning av denne.

Simulert og observert vannføring for RIS sammenfaller i stor grad, i tillegg bekreftes modellert vannstrøm i stor grad av feltobservasjoner. Resultatene indikerer at HEC-RAS 2D er et egnet verktøy for å studere fordeling av vann i et urbant felt. Det må imidlertid tas hensyn til modellens åpenbare svakheter. Modellen kan ikke kobles opp mot ledningsnett, noe som vil resultere i for store vannmengder flere steder og må tas hensyn til. Videre er det ikke mulig å påføre romlig variabel nedbør. Nedbør påføres likt for alle celler, noe som trolig bidrar til at det oppstår en forsinkelse i simulert respons for RIS, på grunn av at effekten av hurtig avrenning fra nærliggende tette flater ikke fanges opp i modellen.

Det er funnet at beregning av effektiv nedbør, valg av Mannings n og utforming av grid er viktige faktorer ved etablering av HEC-RAS-modellen. Resultatene indikerer at Mannings n er enklere å kalibrere enn effektiv nedbør. Bedre metoder for å estimere effektiv nedbør er nødvendig for å unngå at denne må kalibreres for hver enkelt nedbørsserie som kjøres. Tre ulike grid er testet og det er funnet at gridets oppløsning og utforming påvirker modellert vannføring. Resultatene tyder på at grid med lavere oppløsning med fordel kan brukes så lenge oppløsningen holdes høy langs veg- og fortauskanter.

Resultater fra Hornebergbekken-modellen gir informasjon om romlig fordeling av dybder og hastigheter ved en nedbørshendelse med 200 år returperiode. Resultatene bekrefter i stor grad lokasjon av flomveger slik de er illustrert med avrenningslinjer i kommunens aktsomhetskart. Modellresultatene synliggjør i tillegg flere potensielle flomveger enn de som er illustrert i aktsomhetskartet. Ut ifra dette bør det vurderes å ta i bruk HEC-RAS-modellering for produksjon av fremtidige aktsomhetskart, da det vil gi kart med mer informasjon enn dagens kart produsert på bakgrunn av GIS-analyser.

Bruk av diffusiv og dynamisk bølge gir svært like resultater i forhold til modellert vannføring for både RIS og Hornebergbekken. Ønsker man imidlertid å studere hastigheter gir sannsynligvis dynamisk bølge mest nøyaktige resultater.

Abstract

Pluvial flooding is an increasing problem and urbanisation and climate change are pointed out as the main causes for this. Preliminary analyses suggest that precipitation will increase in terms of both quantity and intensity in the future. Extreme rainfall events may exceed the capacity of the pipe network and result in flooding. This makes it necessary to find solutions for handling stormwater on the surface. Detailed height data and new modelling tools make it possible to study overland flow in areas with complex urban topography. In this report, runoff from heavy rainfall events in Trondheim is studied using a hydrological and hydraulic model. The models are linked together in the sense that results from the hydrological model are used as input in the hydraulic model. A simple hydrological model is used to calculate excess rainfall. The model distinguishes between permeable and impermeable surfaces and calculates infiltration for permeable surfaces using the Green-Ampt model. The hydraulic model used is HEC-RAS 2D. The main objective of the report is to investigate the usability of HEC-RAS 2D to study the distribution of water in an urban area. Assessments done in relation to the establishment of the model in HEC-RAS are central.

A digital elevation model (DEM) representing the terrain including buildings is constructed in ArcGIS, using LiDAR data with 0.25 m resolution and FKB data. The DEM forms the basis of the 2D model in HEC-RAS. The computational mesh (grid) in the HEC-RAS model is set to 1 m resolution with breaklines along road and curb edges. Precipitation is modelled by the method of rain-on-grid.

Two study areas in Trondheim are chosen: Risvollan raingarden (RIS) and Hornebergbekken. The HEC-RAS model is set up for both areas, and simulations are run using two different sets of equations: diffusive and dynamic wave. Available flow measurements for RIS enable calibration and verification of the model. Two recorded rainfall series are simulated and modelled water flow is compared to observed values. Experiences from RIS forms the basis for setting up the larger Hornebergbekken model. For the Hornebergbekken basin, a rainfall event with a 200-year return period is modelled and mapped in terms of spatially distributed depth and velocity.

For the RIS model, simulation results of rainfall series 1 yields Nash-Sutcliffe coefficients of 0.77 and 0.78 for diffusive and dynamic wave, respectively. For series 2 values of 0.77 and 0.79 are obtained. Calibration of both Manning's n and excess rainfall was necessary. The Manning's n value was initially set too high. Adjusting it from 0.1 to 0.03 gave faster model

response and improved the timing of the hydrograph for both rainfall series. The chosen method for calculating excess rainfall does not provide satisfactory results. Good results are achieved using a simpler method where excess rainfall is estimated as a percentage of observed precipitation. Calibration of excess rainfall resulted in 8% and 15% for rainfall series 1 and 2, respectively.

Simulated and observed water flow for RIS greatly coincide, in addition, modelled water flow is largely confirmed by field observations. The results indicate that HEC-RAS 2D is a suitable tool for studying the distribution of water in an urban area. However, the model has obvious weaknesses that should be considered. The model is not connected to the pipe system. This will result in increased runoff and may cause too high flows for some parts of the model. Furthermore, it is not possible to apply spatially variable precipitation. When precipitation is applied equally to all cells, this probably contributes to a delay in model response in areas with impermeable surfaces.

It has been found that calculation of rainfall excess, selection of Manning's n and grid design are important factors in establishing the HEC-RAS model. The results indicate that Manning's n is easier to calibrate than excess rainfall. Better methods for estimating excess rainfall are necessary to avoid calibration of this parameter for each rainfall series. Three different grids are tested and it is found that the grid's resolution and design affect modelled water flow. The results indicate that lower resolution grids can be used, provided that the resolution is kept high along the edges of roads and curbs.

Results from the Hornebergbekken model provide information on the spatial distribution of depth and velocity for a rainfall event with a 200-year return period. The results largely confirm the location of flood streams as illustrated by drainage lines in the municipality's flood map. The model results also reveal additional flood streams that are not illustrated in the municipality's flood map. Based on this, it should be considered applying HEC-RAS modelling in the production of future flood maps, as it will provide maps with more information than current maps based on GIS analyses.

Use of diffusive and dynamic wave gives similar results in terms of modelled water flow for both RIS and Hornebergbekken. However, if you want to study velocity, use of the dynamic wave will probably give more accurate results.

Forord

TVM4905 Vannforsynings- og avløpsteknikk, masteroppgave er et fordypningsemne innen studieretningen Vann og miljø på studieprogram Bygg- og miljøteknikk ved NTNU. Emnet utgjør 30 studiepoeng. Studenten forventes å få inngående forståelse i et delområde innen vannforsynings- og avløpsteknikk, som resulterer i en masteroppgave i form av en avhandling. Denne avhandlingen omfatter bruk av hydrologisk og hydraulisk modell for beregning av avrenning i urbane nedbørsfelt i Trondheim.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder Knut Alfredsen, professor ved institutt for bygg- og miljøteknikk, for hjelp og veiledning gjennom arbeidet med avhandlingen. Ønsker å takke førsteamanuensis Tone Muthanna for å ha skaffet til veie vannføringsdata for regnbedet på Risvollan. Ønsker også å takke Ellen-Birgitte Strømø, Olav Nilssen, Håkon Pedersen og Tomas Eidsmo i Trondheim kommune for hjelp med valg av studieområde for oppgaven. Til slutt vil jeg også takke medstudent Thea Ingeborg Skrede for moralsk støtte og tips til aktuell litteratur for oppgaven.

Dato/Sted

Vendel Marie Pedersen

Innhold

Figurer	xiv
Tabeller.....	xv
1 INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål	2
1.3 Struktur.....	3
2 BEREGNING AV OVERVANNSFLOM I URBANE NEDBØRSFELT	4
2.1 LiDAR data og digitale høydemodeller	4
2.2 Kartlegging av problemområder (GIS analyser)	4
2.3 Hydraulisk 2D modellering	5
2.3.1 Urban topografi og nødvendig gridstørrelse	5
2.3.2 Regn-på-grid.....	7
2.3.3 Kalibrering av modellen.....	7
2.4 Effektiv nedbør i nedbør-avrenning-modellering.....	8
2.5 Dimensjonering av flomveger	9
2.6 Farekriterier ved flom i urbane områder	9
3 MODELLERING I HEC-RAS 2D.....	11
3.1 Geometri.....	11
3.1.1 «Sub-grid» terreng representasjon	12
3.1.2 Bruddlinjer	13
3.1.3 Arealtyper (Mannings n)	13
3.2 Eksterne randbetingelser	13
3.3 2D ikke-stasjonær strømning	14
3.3.1 Kontinuitetsligningen i 2D	14
3.3.2 Bevegelsesligningene i 2D	15
3.3.3 Diffusiv bølge.....	15
3.4 Valg av tidssteg i beregninger	16
3.5 Profillinjer og generering av avrenningshydrogram	17
4 STUDIEOMRÅDER.....	18
4.1 Risvollan regnbed (RIS).....	18

4.2	Hornebergbekken	19
5	DATAGRUNNLAG	21
5.1	Høydedata.....	21
5.2	Ortofoto og FKB-data	21
5.3	Vannføringsdata RIS	21
5.4	Nedbørsdata.....	23
5.4.1	Nedbørsserier	23
5.4.2	IVF	23
6	METODE OG MODELLOPPSETT	25
6.1	Konstruksjon av digital høydemodell i ArcGIS	25
6.2	Klargjøring av FKB-data i ArcGIS	28
6.3	Bearbeiding av nedbørsdata	30
6.3.1	Beregning av effektiv nedbør	31
6.4	Modelloppsett i HEC-RAS.....	33
6.4.1	Risvollan regnbed.....	33
6.4.2	Hornebergbekken	36
7	RESULTATER OG DISKUSJON.....	38
7.1	Risvollan regnbed.....	38
7.1.1	Nedbørsserie 1	38
7.1.2	Nedbørsserie 2.....	52
7.1.3	Bruk av ulike grid størrelser.....	60
7.1.4	Visuell verifikasjon av modellert vannstrøm	62
7.1.5	Sammenligning av nedbørsserie 1 og 2.....	65
7.2	Hornebergbekken	66
7.2.1	Modelloppsett i HEC-RAS.....	66
7.2.2	Beregning av effektiv nedbør.....	67
7.2.3	Flomsimulering	69
8	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON.....	77
9	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID.....	80
VEDLEGG A	VANNFØRINGSTABELL INNLØP RIS.....	84
VEDLEGG B	KONTROLLBEREGNING AV HASTIGHET.....	85

Figurer

Figur 1: Studieområder i Trondheim.....	3
Figur 2: Illustrasjon utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS.....	12
Figur 3: 2D beregningsnett i HEC-RAS	13
Figur 4: Området rundt Risvollan regnbed	19
Figur 5: Hornebergbekken nedbørsfelt, 93,5 ha.....	20
Figur 6: Innløp Risvollan regnbed	22
Figur 7: Vannføringskurve for 150° V-overløp, Risvollan regnbed (RIS)	22
Figur 8: IVF-kurve for Risvollan 1987 – 2016	24
Figur 9: Flytskjema som illustrerer prosessen fra datagrunnlag til inndata HEC-RAS	25
Figur 10: DOM (venstre) og DTM (høyre).	26
Figur 11: DTM med bygningsflatepolygoner (venstre) og endelig DHM (høyre)	26
Figur 12: Prosedyre i Model builder for konstruksjon av DHM for bruk i HEC-RAS.....	28
Figur 13: Hornebergbekken nedbørsfelt med tilhørende flatetyper	29
Figur 14: FKB-veg før (venstre) og etter (høyre) fjerning av overfløydige linjetyper.	30
Figur 15: Symmetrisk hyetogram for nedbør med returperiode 200 år og varighet 60 min	31
Figur 16: Registrert nedbør per 5 min Risvollan målestasjon 12.08.13 – 13.08.13.....	32
Figur 17: Oppsatt 2D område (skravert) for Risvollan regnbed i HEC-RAS.	34
Figur 18: Utsnitt fra 2D området til RIS i HEC-RAS	35
Figur 19: Oppsatt 2D område (skravert) for Hornebergbekken nedbørsfelt i HEC-RAS.....	37
Figur 20: Vannføring, Q, for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13.....	39
Figur 21: Green-Ampt infiltrasjonsrate, f(t), for nedbørshendelse nr 2 (Tabell 3)	40
Figur 22: Green-Ampt infiltrasjonsrate, f(t), for nedbørshendelse nr 3 (Tabell 3).....	41
Figur 23: Nedbør Risvollan målestasjon 12.08.13 – 13.08.13	41
Figur 24: Vannføring, Q, for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13.....	42
Figur 25: Vannføring, Q, ved ulike verdier av Mannings n for gressflater.....	44
Figur 26: Nedbør Risvollan målestasjon 12.08.13 – 13.08.13	45
Figur 27: Vannføring, Q, ved ulike andeler effektiv nedbør.....	46
Figur 28: Vannføring, Q, for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13.....	46
Figur 29: Resultat simulering (diffusiv bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13	48
Figur 30: Resultat simulering (diffusiv bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13	49
Figur 31: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13	50
Figur 32: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13	51

Figur 33: Vannføring, Q, for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 13.09.11 – 14.09.11.....	52
Figur 34: Nedbør Risvollan målestasjon 13.09.11 – 14.09.11	53
Figur 35: Vannføring, Q, for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 13.09.11 – 14.09.11.....	54
Figur 36: Nedbør Risvollan målestasjon 13.09.11 – 14.09.11	55
Figur 37: Vannføring, Q, for innløpet til RIS 13.09.11 – 14.09.11	55
Figur 38: Vannføring, Q, for innløpet til RIS 13.09.11 – 14.09.11	57
Figur 39: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 13.09.11 – 14.09.11	58
Figur 40: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 13.09.11 – 14.09.11	59
Figur 41: Modellert vannføring, Q, ved bruk av ulike grid.....	61
Figur 42: Modellert vannføring, Q, ved bruk av ulike grid.....	62
Figur 43: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13	63
Figur 44: Synlig bekk i grøften til venstre ved punkt B.....	64
Figur 45: Bekreftet vannstrøm i felt.....	64
Figur 46: Utsnitt fra 2D-området til Hornebergbekken i HEC-RAS	66
Figur 47: Beregnet Green-Ampt infiltrasjonsrate, f(t), for M200	68
Figur 48: Symmetrisk hyetogram for nedbør med returperiode 200 år og varighet 60 min	69
Figur 49: Maksimale dybder ved M200 i Hornebergbekken nedbørsfelt	71
Figur 50: Aktsomhetskart med flomveger (lilla).....	72
Figur 51: Vannstrøm langs hovedveg og inn i boligfelt ved punkt D.....	73
Figur 52: Maksimale hastigheter i områder med dybde ≥ 9 cm ved M200	74
Figur 53: Beregnede maksimale hastigheter ved M200.....	75
Figur 54: Effektiv nedbør (venstre akse) og modellert vannføring (høyre akse) for M200.....	76

Tabeller

Tabell 1: Farenivåer for fotgjengere i gater rammet av flom.....	10
Tabell 2: Oversikt simuleringer RIS	38
Tabell 3: Nedbørsserie 1 inndelt i fire separate nedbørshendelser.....	39
Tabell 4: Nedbørsserie 2 inndelt i to separate nedbørshendelser	52
Tabell 5: Simuleringer kjørt med tre ulike grid.....	60
Tabell 6: Beregnede verdier for M200	67
Tabell 7: Oversikt simulering av M200 for Hornebergbekken	69

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

De siste ti-årene har økt urbanisering og klimaendringer bidratt til at oversvømmelser har blitt et økende problem (Lindholm *et al.*, 2008). I følge klimaframskrivinger for Norge vil middelnedbøren og ekstremnedbøren øke i både mengde og intensitet i flere regioner (NCCS, 2015). I tettbygde strøk er de fleste flomskadene forårsaket av intens nedbør i løpet av noen få timer, såkalt korttidsnedbør (NOU 2015: 16). Foreløpige analyser, beskrevet i NCCS (2015), antyder en økning i intensiteten også av fremtidig korttidsnedbør. Eksempelvis er det anslått at et 3-timersnedbør med returperiode på 5 år vil øke med 30% ved slutten av dette århundre. Økningen kan bli enda større for høyere gjentakintervall. NOU 2015: 16 (2015) påpeker at kombinasjonen av befolkningsvekst, fortetting, økt totalnedbør og mer intens nedbør vil føre til at det eksisterende ledningsnettets kapasitet ikke alltid vil være tilstrekkelig for å håndtere alt overvannet. Dette gjør det nødvendig å finne løsninger for håndtering av overvann på overflaten. Ekstreme nedbørshendelser vil kunne resultere i overvannsflom og det er viktig med kunnskap om hvordan en eventuell flom vil kunne utarte seg og at det legges planer for å sikre flomveger oppå bakken (Nordeidet, Schow og Killerich, 2015).

Det finnes et vidt spekter av ulike modeller og analysemetoder for kartlegging og beregning av overvannsflom. Disse strekker seg fra enkle, lite ressurskrevende kartleggingsanalyser til mer nøyaktige hydrauliske modeller som 1D ledningsnettmodeller, 2D overflatemodeller og modeller som kobler sammen de to sistnevnte. Modeller som kobler sammen ledningsnett og 2D modeller er, ifølge Nordeidet, Schow og Killerich (2015), svært ressurs- og arbeidskrevende og var dermed ikke aktuelt for dette arbeidet. Derimot kan 2D overflatemodeller brukes ved modellering av ekstreme nedbørshendelser hvor ledningsnettets kapasitet overstiges. I denne rapporten er en hydraulisk 2D overflatemodell, heretter referert til som 2D modell, valgt for å studere avrenning fra kraftig nedbør i to urbane nedbørsfelt i Trondheim.

Bruk av 2D modeller på rurale flomsletter er velutprøvd og godt dokumentert, men når det gjelder bruk i urbane områder foreligger det vesentlig mindre dokumentasjon (Hunter *et al.*, 2008). Overflatestrømning i urbane områder krever representasjon av kompleks topografi, e.g. fortauskanter og bygninger. Tidligere har 2D modellering i urbane områder vært begrenset av tilgangen på detaljerte topografisk data og dataprosesseringskraft (Fewtrell *et al.*, 2008). Fremveksten av nye teknikker for innhenting av detaljerte høydedata, som for eksempel LiDAR (Light Detection and Ranging), har åpnet opp for hydraulisk modellering også i urbane

områder. I Norge er Statens Kartverk i gang med å etablere en detaljert nasjonal høydemodell, basert på laserskanningsdata (LiDAR) fra fly, som tar sikte på å kartlegge hele landet innen 2020 (Kartverket, 2016). LiDAR data for Trondheim kommune har vært tilgjengelig siden 2014 og det er disse dataene som ligger til grunn for arbeidet med denne rapporten.

I prosjektoppgaven ble avrenningslinjer kartlagt for et lite nedbørsfelt på Risvollan. Dette var en ren GIS analyse av LiDAR data som hovedsakelig gav informasjon om hvor overvann vil renne basert på terrengets helning. Analysen gav ingen informasjon om vannets hastighet, dybde eller utbredelse. For å si noe om disse parameterne må mer avanserte modelleringsverktøy tas i bruk. Denne oppgaven er en videreføring av prosjektoppgaven med fokus på å ta steget videre fra en enkel GIS analyse til en mer avansert hydraulisk modell.

Valget av hydraulisk modell falt på HEC-RAS 2D. HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center's River Analysis System) er et fritt tilgjengelig modellverktøy utviklet av US Army Corps of Engineers. Tidligere versjoner av programvaren var endimensjonal (1D), men i 2016 kom versjon 5.0 som introduserte todimensjonal (2D) modellering.

Det skal settes opp to separate modeller i HEC-RAS for to ulike nedbørsfelt: Risvollan regnbed (RIS) og Hornebergbekken, se Figur 1. Metode og modell etableres og kjøres først for RIS da dette er et mindre felt med tilgang på observerte data. Erfaringer fra RIS-modellen vil utgjøre grunnlaget for oppsett av Hornebergbekken-modellen.

1.2 Mål

I denne rapporten skal avrenning fra kraftige nedbørsepisoder studeres ved hjelp av to typer modeller: en hydrologisk og en hydraulisk modell. Modellene skal kobles sammen i den forstand at resultater fra hydrologisk modell brukes som inndata i hydraulisk modell. Detaljert laserskannet høydedata skal brukes for å lage terrengmodell til bruk i HEC-RAS.

Formålet med dette arbeidet er å undersøke brukbarheten av HEC-RAS 2D for å studere fordeling av vann i et urbant felt. Vurderinger i forhold til etablering av modell i HEC-RAS står sentralt. Arbeidet med denne rapporten skal føre til innsikt i bruk av moderne verktøy for modellering av overvann i urbane nedbørsfelt.

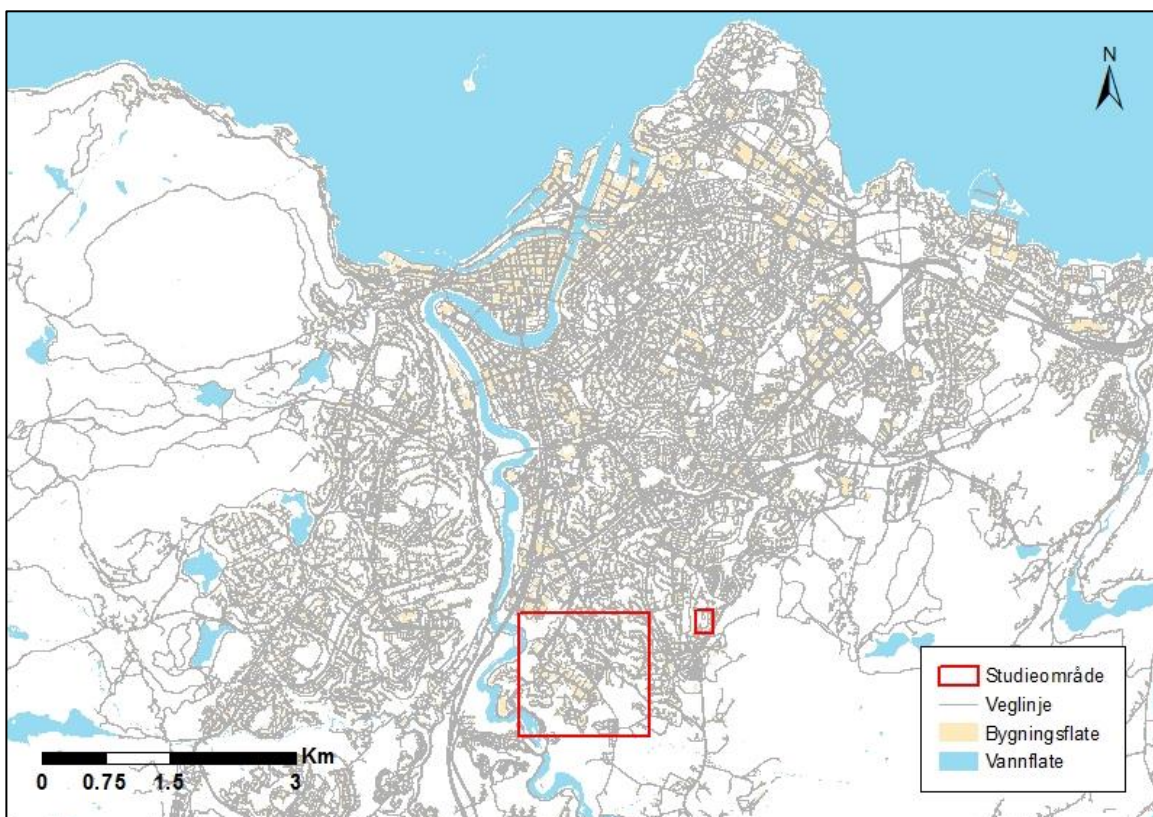
Følgende to hovedspørsmål vil bli adressert:

- Er HEC-RAS 2D et egnet verktøy for å studere fordeling av vann i et urbant felt?
- Hvilke faktorer er viktigst for etablering av HEC-RAS-modellen?

1.3 Struktur

Rapporten består av åtte hovedkapitler. Først følger en kort litteraturstudie med hovedfokus på hydraulisk 2D modellering av urban overvannsflom. For litteratursøket er hovedsakelig databasen Web of Science brukt. Hyppige brukte søkeord er: *urban flooding*, *hydraulic modelling*, *remote sensing* og *direct rainfall modelling*. Det blir så gitt en kort innføring i praktiske og teoretiske aspekter ved bruk av HEC-RAS 2D i eget kapittel. Studieområder og datagrunnlaget for oppgaven presenteres i henholdsvis kapittel fire og fem.

Rapportens hoveddel (kapittel seks og sju) legger vekt på modelloppsett, valg tatt underveis i dette arbeidet, samt gjennomføring av simuleringer og diskusjon rundt resultatene. I metoddelen (kapittel seks) beskrives oppsett av modellen i forhold til bearbeiding og etablering av nødvendig inndata til HEC-RAS-modellen, samt oppsett av selve modellen i HEC-RAS. Etablering av digital høydemodell til bruk i HEC-RAS og metode for beregning av effektiv nedbør står sentralt. Metode brukt for opprettelse av digital høydemodell er en egenutviklet metode. Resultater og diskusjon presenteres sammen i kapittel sju. En kort oppsummering av funn med konklusjoner presenteres i kapittel åtte og til slutt er det tatt med et eget kapittel med forslag til fremtidig arbeid.



Figur 1: Studieområder i Trondheim. Risvollan regnbed (RIS) til høyre og Hornebergbekken til venstre, begge markert med rødt.

2 Beregning av overvannsflom i urbane nedbørsfelt

Som nevnt tidligere finnes det et vidt spekter av ulike modeller og analysemetoder for kartlegging og beregning av overvannsflom. Både enkle GIS analyser og mer avanserte hydrauliske 2D modeller baserer seg på digitale høydemodeller. Økt tilgjengelighet av detaljerte høydedata, som for eksempel LiDAR, åpner opp for nye muligheter innen analyse og beregning av overvannsflom i komplekse urbane topografier.

I det følgende gis en kort innføring i bruk av LiDAR data, GIS og hydraulisk 2D modellering for å studere urban overvannsflom. I tillegg er det tatt med delkapitler som omhandler effektiv nedbør, retningslinjer for dimensjonering av flomveger i urbane områder og farekriterier for flom.

2.1 LiDAR data og digitale høydemodeller

LiDAR (Light Detection and Ranging) er en metode for fjernmåling som måler høyde direkte ved hjelp av laser sensorer (Heywood, Cornelius og Carver, 2011). Effektiviteten av slike laser skannere, både landbaserte (TLS) og luftbårne (ALS), har økt eksponentielt i de senere år, noe som betyr mer data og større nøyaktighet (Pirotti, Guarnieri og Vettore, 2013).

LiDAR data kan representeres og bearbeides i et geografisk informasjonssystem (GIS) i form av en digital høydemodell (DHM). En digital høydemodell (DHM) utgjør det underliggende grunnlaget for enhver analyse av overvannsflom (Butler og Davies, 2011) og defineres som ”en digital representasjon av høydeverdier som varierer over en flate” (Statens Kartverk, 2013a). Punktverdiene kan organiseres som et regelmessig rutenett, ofte kalt raster eller grid, eller de kan opptre i et mer uregelmessig mønster som beskriver flatens knekklinjer. I et raster inneholder hver celle i rutenettet en verdi som representerer arealet som dekkes av cellen. Cellestørrelsen avgjør detaljgraden av DHM-en. Hvis størrelsen på en celle er 1 m x 1 m, så er rasterets oppløsning 1 m. En DHM med høy oppløsning vil si at cellestørrelsen er liten og graden av detaljer dermed stor.

En DHM som beskriver terrengoverflaten kalles en digital terrengmodell (DTM). En DHM som også beskriver øvrige flater, for eksempel vegetasjon og takflater, kalles en digital overflatemodell (DOM).

2.2 Kartlegging av problemområder (GIS analyser)

Med kartlegging menes her metoder for å identifisere potensielle problemområder for overvannsflom, såkalte aktsomhetsområder. Nordeidet, Schow og Killerich (2015) peker på

bruk av GIS som et sentralt verktøy i denne kartleggingen. Ved hjelp av GIS-analyser kan såkalte sekundære flomveger, forsenkninger i terrenget og tilhørende avrenningsfelter beregnes og visualiseres i form av aktsomhetskart. Sekundære flomveger, ofte referert til som avrenningslinjer, indikerer hvilke veier flomvannet vil ta på bakken i en situasjon hvor eventuelle overvannsledninger og kulverter går fulle (Nordeidet, Schow og Killerich, 2015). Flomveger, forsenkninger og avrenningsfelt beregnes ut ifra terrengets form og helning, og må således betraktes som en grov forenkling av den urbane avrenningssituasjonen. Likevel viser erfaring, fra både Norge og internasjonalt, at resultatene stemmer godt med observerte flomveger under intense nedbørshendelser (Nordeidet, Schow og Killerich, 2015).

Metoden gir ingen informasjon om vannføring eller vannets utbredelse, men resultater fra GIS-analyser kan inngå i beregninger for dimensjonerende vannføring for små felt ved hjelp av formelen for den rasjonelle metode (Nordeidet, Schow og Killerich, 2015; Bratlie, 2015). En klar fordel med denne typen kartleggingsanalyser er at de kan gjennomføres med få ressurser og relativt beskjedent datagrunnlag, noe som gjør det til et naturlig første steg i en prosess for å få oversikt over overvannssituasjonen.

Aktsomhetskart for Trondheim er utarbeidet av Meiforth (2013), kartet er tilgjengelig for innsyn via Trondheim kommunes nettside (Trondheim Kommune, 2018).

2.3 Hydraulisk 2D modellering

I en hydraulisk 2D modell er strømming representert i to dimensjoner. Det antas at den tredje dimensjonen, vandybden, er grunn sammenlignet med de to andre dimensjonene (Teng *et al.*, 2017). Fremgangsmåten består typisk i å løse de to-dimensjonale gruntvannsligningene som beskriver bevaring av masse og bevegelsesmengde i planet. En mer inngående beskrivelse av disse ligningene følger i kapittel 3.

2.3.1 Urban topografi og nødvendig gridstørrelse

Modellering av overflatestrømming i urbane områder krever representasjon av kompleks topografi, e.g. fortauskanter og bygninger (Hunter *et al.*, 2008). Flere har gjort forsøk med 2D modeller og kommet med anbefalinger av grid størrelse for å inkludere slike urbane detaljer.

I en omfattende studie benytter Hunter *et al.* (2008) LiDAR data med en meters oppløsning for å teste seks ulike hydrauliske 2D modeller. Flommen som simuleres er basert på en ekte flomepisode med registreringer av flommens utbredelse. LiDAR dataene aggregeres til to meter oppløsning i modellen og modifiseres ved at høyden av fortauskanter og bygninger ”legges til”

ved hjelp av digitale kartdata. Alle seks modeller produserer rimelige resultater og det konkluderes med at LiDAR-data med en meters oppløsning har tilstrekkelig nøyaktighet for formålet så lenge modellen modifiseres noe ved hjelp av digitale kartdata.

Sampson *et al.* (2012) sammenligner bruk av tre høydemodeller for hydraulisk 2D modellering av urban flom. LiDAR data fra to ulike kilder brukes: ett datasett med 10 cm oppløsning fra TLS og et datasett med 1 m oppløsning fra ALS. Med utgangspunkt i datasettet fra TLS konstrueres to høydemodeller: en med 10 cm oppløsning og en hvor dataene aggregeres til 1 m. Disse sammenlignes så med en tredje modell med 1 m oppløsning konstruert ut ifra ALS data. Det argumenteres for bruk av LiDAR data fra TLS fremfor ALS, da sistnevnte ikke evner å fange opp detaljer som fortauskanter og veibanens krumning. Selv når LiDAR data fra TLS med 10 cm oppløsning aggregeres til 1 m er mye av detaljene bevart og det konkluderes med at bruk av TLS dataene er å foretrekke framfor ALS.

Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) inntar en mer skeptisk holdning til valg av oppløsning og poengterer at for mye detaljer ofte er unødvendig og i noen tilfeller villedende. Svært høyoppløselige modeller og datasett kan føre til overdreven tro på simuleringsresultater, noe som igjen kan føre til at viktige problemer rundt det å gjøre pålitelige flomanalyser blir oversett. Mens tilgangen på topografisk data øker, er tilgangen på observerte flomdata mye dårligere og gjerne av mye lavere oppløsning. Dette begrenser muligheten for å validere modellresultater, et problem som også poengteres av Hunter *et al.* (2008). Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) trekker i tillegg frem at representasjon av for eksempel bygninger ikke nødvendigvis er rett frem og at simuleringer også bør inkludere et scenario hvor bygninger oversvømmes på innsiden. Potensielle hindringer, e.g. biler, er som regel heller ikke tatt hensyn til. Dette er et potensielt problem når meget høy oppløsning (i.e. 2 m eller høyere) av høydemodellen benyttes, da dette vil påvirke lokale strømningsforhold og bør derfor tas hensyn til.

Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) konkluderer med at høyoppløselige data bør utgjøre basisen for hydraulisk modellering der slik data er tilgjengelig, men det er viktig å huske at høyere oppløsning ikke nødvendigvis øker nøyaktigheten av resultatene.

Til syvende og sist krever urbane områders topografiske kompleksitet og beregningsmessige begrensninger av høyoppløselige modeller et kompromiss mellom graden av detaljer og beregningstid (Fewtrell *et al.*, 2008).

2.3.2 Regn-på-grid

Vanlig praksis for urban flom modellering er å sette et avrenningshydrogram, som må beregnes på forhånd ved hjelp av en hydrologisk modell, som oppstrøms grensebetingelse (Cea, Garrido og Puertas, 2010). Dette er en akseptabel fremgangsmåte så lenge det meste av avrenningen genereres oppstrøms området som skal studeres. Det finnes imidlertid tilfeller hvor en betydelig andel av avrenningen kommer fra nedbør som faller på selve området som studeres, i slike tilfeller vil det ikke være tilstrekkelig å sette et avrenningshydrogram som oppstrøms grensebetingelse. Nedbørsdata bør, i slike tilfeller, settes som direkte grensebetingelse i form av et nedbørshyetogram fordelt over hele modellen. Denne metoden vil i det følgende refereres til som regn-på-grid.

Cea, Garrido og Puertas (2010) validerer metoden for regn-på-grid ved hjelp av flere modellforsøk av urban topografi hvor generert avrenning måles ved utløpet. Studien finner god overenstemmelse mellom målte og modellerte utløpshydrogram. I studien sammenlignes resultater ved bruk av 2D dynamisk og diffusiv bølge og det konkluderes med at dynamisk bølge gir mer nøyaktige resultater.

Et par ulike metoder for representasjon av bygninger benyttes: «bygningshull» (BH) og «bygningblokk» (BB). Ved førstnevnte metode representeres bygninger som hull med vegger rundt. I BB metoden inkluderes bygninger med tilhørende tak og takhøyder som del av terrenget ved bruk av LiDAR data. Begge metoder gir brukbare resultater. Det poengteres likevel at sistnevnte metode gir et mer realistisk bilde av faktiske forhold med tanke på avrenning fra takene. Det er imidlertid noen problemer ved den realistiske BB metoden for representasjon av bygninger. Modellering av vann som faller fra hustak kan by på problemer da modeller basert på gruntvannsligningene ikke gjelder for dette ekstreme tilfellet. Til tross for dette gir modellforsøkene gjennomført av Cea, Garrido og Puertas (2010) gode resultater, noe som åpner for å inkludere bygninger som del av terrenget i praktiske applikasjoner av metoden. Det bemerkes imidlertid at simulerte hastigheter rundt tak ikke kan antas å være nøyaktige. I tillegg vil praktiske bruksområder for regn-på-grid metoden inkludere infiltrasjon og interaksjon med ledningsnett, noe som ikke er en del av studien til Cea, Garrido og Puertas (2010).

2.3.3 Kalibrering av modellen

Ved modellering av urban flom i 2D er den vanligste fremgangsmåten å bruke en høyoppløselig modell og kalibrere friksjonsparameteren til observerte data (Fewtrell *et al.*, 2008). Dette resulterer ofte i friksjonsverdier som er høyere enn empirisk avledete verdier. Grunnen er at

friksjonsfaktoren forsøker å parameterisere friksjonen på siden av strømmingen i tillegg til bunnfriksjon samtidig som den inkorporer falltapet assosiert med strømming rundt strukturer.

Mangelen på data fra faktiske flomhendelser, i.e. feltobservasjoner og målinger av flommens utbredelse, utgjør et stort problem innen modellering av urban flom (Hunter *et al.*, 2008; Dottori, Di Baldassarre og Todini, 2013). Fravær av denne typen data gjør det vanskelig å kalibrere og verifisere modellen. Ved manglende valideringsdata er det derfor viktig å undersøke virkningen av et plausibelt omfang friksjonsparametere (Hunter *et al.*, 2008).

Anbefalte verdier av Mannings n

For sjiktstrømming på flomsletter inntil 50 – 100 m anbefaler Engman (1986) Mannings n verdier på 0,011 og 0,1 for henholdsvis betong/asfalt og klippet gress. Verdiene inkluderer effekten av regndråper på overflaten, noe som har en tendens til å øke effektiv ruhet, med regnintensiteter på 50 – 100 mm/t. Effektiv ruhet vil trolig være lavere enn disse verdiene ved fravær av nedbør.

For flomsletter anbefaler Chow (1959) en Mannings n verdi mellom 0,025 og 0,035 for kort gress. For åpne kanaler anbefales verdier mellom 0,013 og 0,016 for henholdsvis jevn og ru asfalt. Anbefalt verdi for takpapp er 0,014. Verdier hentet fra Chow (1959) inkluderer ikke effekten av regndråper på overflaten.

2.4 Effektiv nedbør i nedbør-avrenning-modellering

Effektiv nedbør brukes ofte som inndata i nedbør-avrenning-modeller som baserer seg på konseptuelle og empiriske relasjoner, men det kan også være nødvendig inndata i hydrauliske 2D-modeller ved bruk av metode for regn-på-grid. Et eksempel er HEC-RAS 2D som ikke tar hensyn til infiltrasjon og dermed gjør det nødvendig å påføre nedbøren som effektiv nedbør (Brunner, 2016b).

Dingman (2008) definerer effektiv nedbør som

$$W_{eff} = W - "tap" \quad (1)$$

hvor W er total nedbør og tap er

$$tap = ET + \Delta S_c + \Delta D + \Delta \theta \quad (2)$$

hvor ET er nedbøren som evapotranspirerer under hendelsen, ΔS_c er netto lagret nedbør i trekronene, ΔD er netto nedbør til gropmagasinering og $\Delta \theta$ er netto infiltrert vann. Under en

nedbørshendelse er det ofte lite solstråling og høy luftfuktighet, dette i kombinasjon med at nedbørshendelser ofte er kortvarige gjør at ET vanligvis er liten. Kapasitet for lagring av vann i trekronene er liten, noe som gjør at ΔS_c ofte kan neglisjeres for større nedbørshendelser. ΔD er en parameter som er romlig variabel og anses som vanskelig å estimere. På grunn av vanskeligheten med å beregne ΔD behandles den vanligvis konseptuelt sammen med $\Delta \theta$.

Effektiv nedbør, W_{eff} , kan estimeres ut i fra hyetogrammer med nedbør, W , ved hjelp av ulike konseptuelle modeller. Dingman (2008) trekker frem fire ulike modeller for å beregne effektiv nedbør:

1. Tap utgjør en konstant andel av total nedbør for hvert tidskritt
2. Tap utgjør en konstant rate gjennom hele hendelsen
3. Tap er gitt som et innledende fratrukk i form av en spesifisert mengde eller all nedbør over en gitt periode i starten av hendelsen. Dette følges så av tap med en konstant rate (raten kan være lik 0)
4. Tap er gitt ved en tilnærming til en infiltrasjonskurve, for eksempel beregnet ved hjelp av Green-Ampt metoden

For beskrivende figurer for disse fire modellene henvises det til figur 9-40 i Dingman (2008).

2.5 Dimensjonering av flomveger

I følge Lindholm *et al.* (2008) må det tas hensyn til naturlige flomveger og sikre at disse ikke blokkeres av utbygginger. I et tenkt scenario hvor ledningssystemet blir overbelastet, blokkert eller ødelagt, skal det finnes et avrenningssystem på overflaten som er i stand til å håndtere overvannet uten uakseptable skadevirkninger. Videre anbefales det at flomvegens kapasitet analyseres med et minimums gjentaksintervall tilsvarende en 100-års flom. Lindholm *et al.* (2012) foreslår imidlertid at flomveger dimensjoneres for et gjentaksintervall på 200 år tilsvarende NVEs retningslinjer for utbygging langs vassdrag. Flomvegen bør videre dimensjoneres for å kunne ta unna all avrenning fra hele nedbørsfeltet (Lindholm *et al.*, 2008). Veger, gater, parkområder o.l. kan inngå som en del av en planlagt flomveg.

2.6 Farekriterier ved flom i urbane områder

For å kunne si noe om risikoområder i forhold til flom må det etableres kriterier for ulike farenivåer. Når det gjelder fare for fotgjengere foreslår Russo, Gomez og Macchione (2013) tre ulike farenivåer, se Tabell 1. Ved høyt farenivå vil fotgjengeren ikke lenger klare å holde seg stabil stående. Ved moderat farenivå vil signifikant tap av stabilitet forekomme, men

fotgjengeren vil fortsatt være i stand til å bevege seg i oppreist posisjon. Ved lavt farenivå vil en kunne ha noen problemer med å opprettholde stabilitet.

Farenivå	Strømningsforhold (for dybder mellom 9 og 16 cm) (m/s)
Høy	$v \geq 1,88$
Moderat	$1,5 \leq v < 1,88$
Lav	$v < 1,5$

Tabell 1: Farenivåer for fotgjengere i gater rammet av flom.

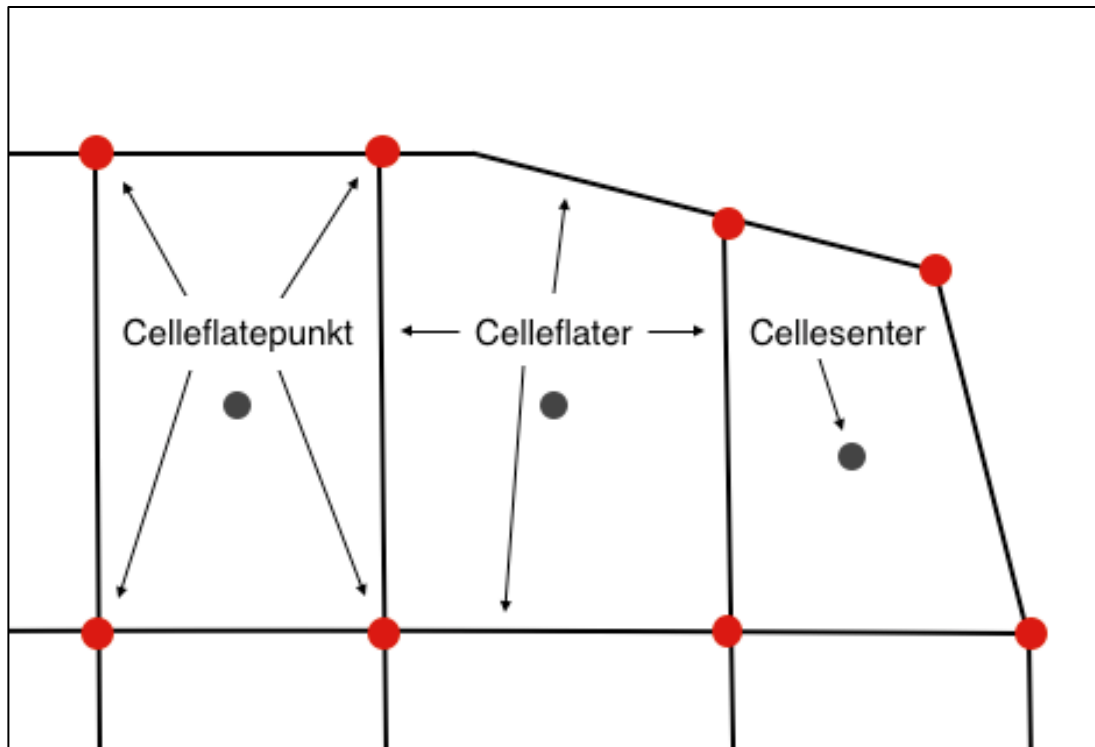
3 Modellering i HEC-RAS 2D

HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center's River Analysis System) er et modellverktøy utviklet av US Army Corps of Engineers for blant annet å administrere offentlige elver og havner. Programvaren kan utføre endimensjonale (1D), todimensjonale (2D), eller kombinert 1D og 2D hydrauliske beregninger for et nettverk av naturlige eller konstruerte kanaler (Brunner, 2016a). I det følgende introduseres grunnleggende prinsipper rundt 2D modellering i HEC-RAS. For mer detaljerte beskrivelser se *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual 5.0* (Brunner, 2016a) og *HEC-RAS 2D Modeling User's Manual 5.0* (Brunner, 2016b).

3.1 Geometri

For å utføre 2D beregninger av strømning i HEC-RAS må det først opprettes en terrengmodell. Terrengmodellens nøyaktighet og detaljeringsgrad vil i stor grad påvirke den hydrauliske modellen (Brunner, 2016b).

Området for 2D-beregninger avgrenses ved å definere et såkalt 2D strømningsområde, heretter referert til som 2D-område. Inne i 2D-området konstrueres et beregningsnett bestående av innbyrdes forbundne celler som kan variere i både størrelse og form, se Figur 2. Hver celle har et definert senterpunkt (grått punkt, Figur 2), referert til som cellesenter, hvor cellens vannoverflatehøyde beregnes. Cellesenteret korresponderer ikke nødvendigvis med massesentrum. En celle kan ha opptil 8 sideflater, videre referert til som celleflater, forbundet via celleflatepunkt (rødt punkt, Figur 2) på endene. Celleflatepunkt langs den ytre grensen av 2D-området brukes til å koble 2D-området til 1D elementer og randbetingelser.



Figur 2: Illustrasjon utsnitt av 2D beregningsnett i HEC-RAS. Celleflater, celleflatepunkt (rød) og cellesenter (grå).

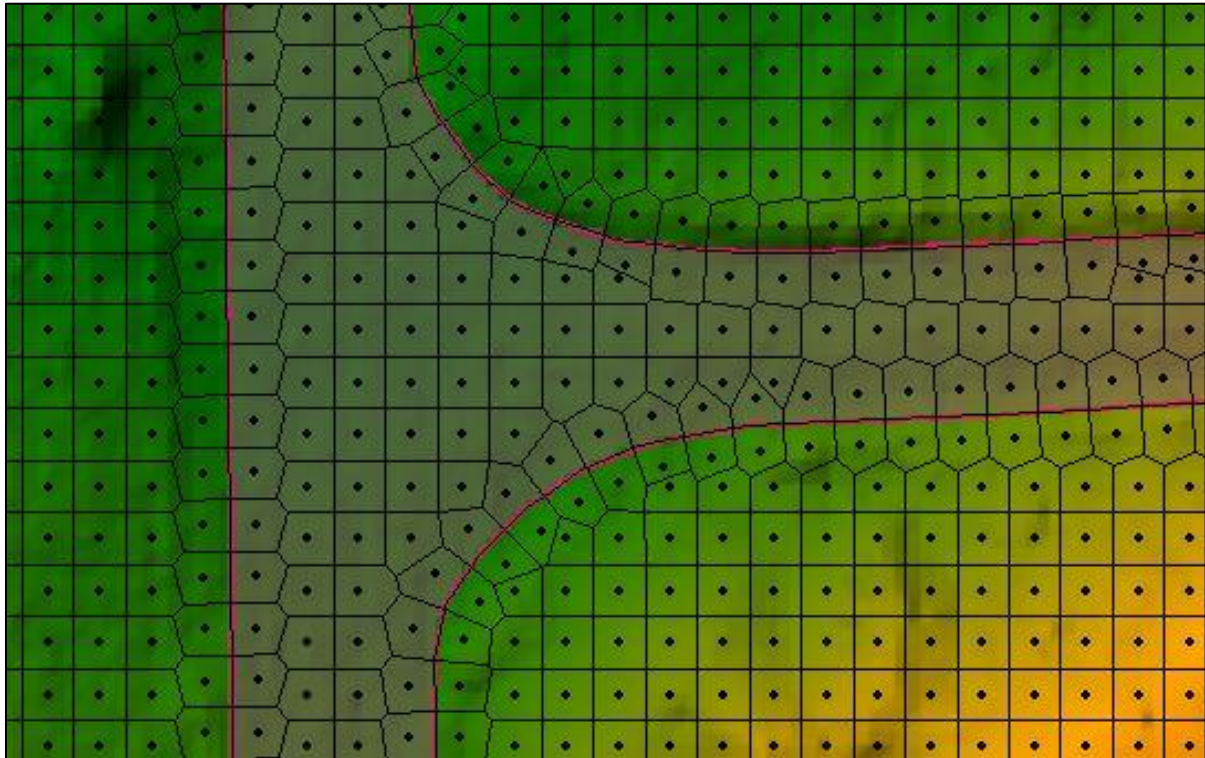
3.1.1 «Sub-grid» terreng representasjon

Geometrien innad i beregningscellene i HEC-RAS er ikke begrenset til én gjennomsnittlig høydeverdi, slik tilfellet er for flere andre 2D overflatemodeller. HEC-RAS benytter en metode for «sub-grid» terrengrepresentasjon, foreslått av Casulli (2009), for å dra nytte av høyoppløselige topografiske data uten å måtte bruke like høy oppløsning på beregningsnettet. Forbehandling av dataene gjør det mulig å inkludere informasjon om hydraulisk radius, volum og tverrsnitt basert på en underliggende terrengmodell. Forholdet mellom terrenghøyde og volum regnes ut for hver celle. Hver celleside fungerer som et detaljert tverrsnitt, og under forbehandling lages hydrauliske tabeller for forholdet mellom terrenghøyde og areal, hydraulisk radius og ruhet. I følge Brunner (2016b) muliggjør dette bruk av større beregningsceller samtidig som man bevarer detaljene av det underliggende terrenget.

Nøkkelen til å lage et godt beregningsnett er å sørge for at cellesidene får med seg potensielle barrierer for strømning (Brunner, 2016b). Videre bør det tas hensyn til vannoverflatens helning. Vannoverflatens høyde representeres av én verdi i cellesenter. Større celler gir store avstander mellom beregnede vannoverflatehøyder og dermed blir vannoverflatens helning interpolert over store avstander. I områder hvor helningen varierer mye må mindre cellestørrelser benyttes for å fange opp den varierende helningen på vannoverflaten.

3.1.2 Bruddlinjer

Beregningsnettet kan modifiseres ved å legge til såkalte bruddlinjer slik at celledisner innrettes langs disse, og dermed får med seg viktige terrengdetaljer som kan påvirke avrenningsmønsteret, se Figur 3. Størrelsen på cellene langs bruddlinjer kan justeres, for eksempel kan cellestørrelsen minkes om man ønsker å få med mer detaljer i disse områdene.



Figur 3: 2D beregningsnett i HEC-RAS. Bruddlinjer (rosa linje) langs vegkant og arealdekkelag for vegflate (grått).

3.1.3 Arealtyper (Mannings n)

Friksjonsforholdene regnes ut ved bruk av Mannings formel. Som standard settes én verdi for Mannings n for samtlige celler i 2D-området. Denne verdien kan overstyres ved å legge til såkalte arealdekkelag (*land cover layer* i HEC-RAS) med definerte flater og tilhørende Mannings n verdier, se Figur 3. Arealdekkelag importeres til HEC-RAS i form av *shape* filer. Hver celle gis én Mannings n verdi.

3.2 Eksterne randbetingelser

Ulike typer eksterne randbetingelser kan kobles direkte til 2D-områdene i HEC-RAS. For denne oppgaven var det aktuelt å bruke nedbør som ekstern randbetingelse. HEC-RAS tar ikke hensyn til infiltrasjon, men nedbør kan anvendes direkte på et hvilket som helst 2D-område i form av

en tidsserie med effektiv nedbør. Nedbøren påføres likt for alle celler innenfor 2D-området. Metoden henvises til som regn-på-grid.

3.3 2D ikke-stasjonær strømning

HEC-RAS kan utføre beregninger av ikke-stasjonær strømning i to dimensjoner. Ikke-stasjonær strømning i 2D varierer i forhold til tid og langs to romlige dimensjoner. Grunlaget for beregningene er de såkalte gruntvannsligningene, som er et forenklet sett med ligninger basert på Navier-Stokes ligningene for væskebevegelse i tre dimensjoner. De forenklete gruntvannsligningene baseres på en rekke antakelser:

- Strømningen kan beskrives som en kontinuerlig funksjon av hastighet og vannoverflatehøyde.
- Gjennomsnittlig helning er liten.
- Friksjon kan beregnes fra Mannings formel, som er utledet for stasjonære strømningsforhold.
- Væsken er inkompressibel.
- Vertikal lengdeskala er mye mindre enn horisontal lengdeskala (vertikale variasjoner i hastighet neglisjeres).
- Hydrostatisk trykk (vertikal akselerasjon neglisjeres).
- Tilnærming av turbulens ved hjelp av eddy viskositet.

De styrende prinsippene for ikke-stasjonær strømning i 2D er bevaring av masse og bevegelsesmengde.

3.3.1 Kontinuitetsligningen i 2D

For inkompressibel strømning kan bevaring av masse uttrykkes ved kontinuitetsligningen i to dimensjoner:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

Hvor H er vannoverflatehøyde, h er vanddybde, t er tid, u og v er gjennomsnittshastighet (i forhold til dybde) i henholdsvis x – og y -retning, og q representerer innstrømning fra eksterne kilder, som for eksempel nedbør.

3.3.2 Bevegelsesligningene i 2D

Bevegelsesligningene er Newtons 2. lov anvendt på væsker. I følge denne er summen av krefter som virker på et element lik forandring over tid av bevegelsesmengde. Vurderer man interne (eddy viskositet og coriolis effekt) og eksterne (tyngdekraft og friksjon) krefter som virker på væsken kan bevegelsesligningene i x- og y-retning uttrykkes som følger:

x-retning:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4)$$

y-retning:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (5)$$

hvor u og v er hastighet i henholdsvis x –og y-retning, g er tyngdeakselerasjonen, v_t er den horisontale eddyviskositetskoeffisienten, c_f er friksjonskoeffisienten og f er Coriolis parameteren. Friksjonskoeffisienten kan uttrykkes ved følgende formel:

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{4/3}} \quad (6)$$

hvor n er Mannings n , g er tyngdeakselerasjon, $|V|$ er størrelsen på hastighetsvektoren og R er hydraulisk radius.

Dette ligningssettet benevnes i HEC-RAS som ”full momentum”. Videre i teksten vil dette ligningssettet refereres til som dynamisk bølge.

3.3.3 Diffusiv bølge

Ved å forenkle gruntnivåsligningene kan man oppnå reduksjon av både beregningstid og numerisk ustabilitet. I et tilfelle hvor man antar at tyngdekraft og friksjon er de dominerende kreftene kan bevegelsesligningen forenkles ved å neglisjere akselerasjon, eddy viskositet og coriolis effekt. Forenkling av bevegelsesligningen gir:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \cdot \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}} \quad (7)$$

Hvor V er hastighetsvektor, R er hydraulisk radius, ∇H er overflathøyde gradient og n er Mannings n .

Substitusjon av ligning 7 inn i kontinuitetsligningen (3) og skrive denne på vektorform gir diffusiv bølge tilnærmingen av gruntvannsligningene:

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (8)$$

hvor

$$\beta = \frac{(R(H))^{5/3}}{n|\nabla H|^{1/2}} \quad (9)$$

Brunner (2016b) anbefaler bruk av diffusiv bølge ligningene under utvikling av modellen. Når modellen er operativ bør imidlertid ligningssett for dynamisk bølge kjøres. Hvis det viser seg å være signifikante forskjeller ved bruk av de ulike ligningssettene kan man anta at dynamisk bølge gir mest nøyaktige resultater.

3.4 Valg av tidssteg i beregninger

Den numeriske løsningen kan lide av numerisk ustabilitet, noe som betyr at små beregningsfeil vokser over tid og kan ødelegge sluttresultatet. En vanlig årsak til problemet er bruk av for lange tidskritt (Butler og Davies, 2011). Problemet kan ofte løses ved å justere tidskrittet, ΔT , i beregningene.

Valg av tidskritt, ΔT , for beregningene er hovedsakelig avhengig av to ting: vannets maksimale hastighet, V , og gjennomsnittlig cellestørrelse, ΔX , i området hvor maksimal hastighet forekommer. Brunner (2016b) oppgir disse retningslinjene for valg av tidskritt, avhengig av hvilke ligningssett som benyttes:

Ved bruk av ligningssett for dynamisk bølge:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (max } C = 3.0) \quad (10)$$

Eller

$$\Delta T \leq \frac{\Delta X}{V} \text{ (} C = 1.0) \quad (11)$$

Hvor C er Courant tall, V er maksimal hastighet (m/s), ΔT er tidskritt i beregninger (s) og ΔX er gjennomsnittlig cellestørrelse (m) i området med maksimal hastighet.

Ved bruk av diffusiv bølge ligningene:

$$C = \frac{V \cdot \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \quad (\max C = 5.0) \quad (12)$$

Eller

$$\Delta T \leq \frac{2 \cdot \Delta X}{V} \quad (C = 1.0) \quad (13)$$

Hvis den aktuelle hendelsen har gradvise forandringer i forhold til tid og rom kan høyere Courant tall brukes, i.e. opptil 3.0 for full bevegelsesmengde og 5.0 for diffusiv bølge. Ved hurtige forandringer må derimot et Courant tall nærmere 1.0 brukes i høyhastighetssoner. Hvis 2D området startes fra helt tørr tilstand må også et Courant tall lik 1.0 benyttes. For en mer inngående beskrivelsene av retningslinjene se *HEC-RAS 2D Modeling User's Manual 5.0* (Brunner, 2016b).

3.5 Profillinjer og generering av avrenningshydrogram

HEC-RAS gir mulighet for å plote avrenning som funksjon av tid over egendefinerte profillinjer innad i 2D-området (HEC, 2016a). Når en profil linje defineres finner HEC-RAS automatisk den samlingen av 2D celleflater som best mulig «matcher» profil linjen. Det resulterende hydrogrammet representerer da samlet avrenning for alle celleflater langs profillinjen.

4 Studieområder

Valg av studieområder er hovedsakelig basert på datatilgjengelighet og urbaniseringsgrad. To ulike områder er valgt ut: Et relativt lite nedbørsfelt på Risvollan med 13% impermeable flater og et større felt på Fossegrenda med høyere andel tette flater (44%). Begge områdene ligger nær Risvollan urbanhydrologiske stasjon.

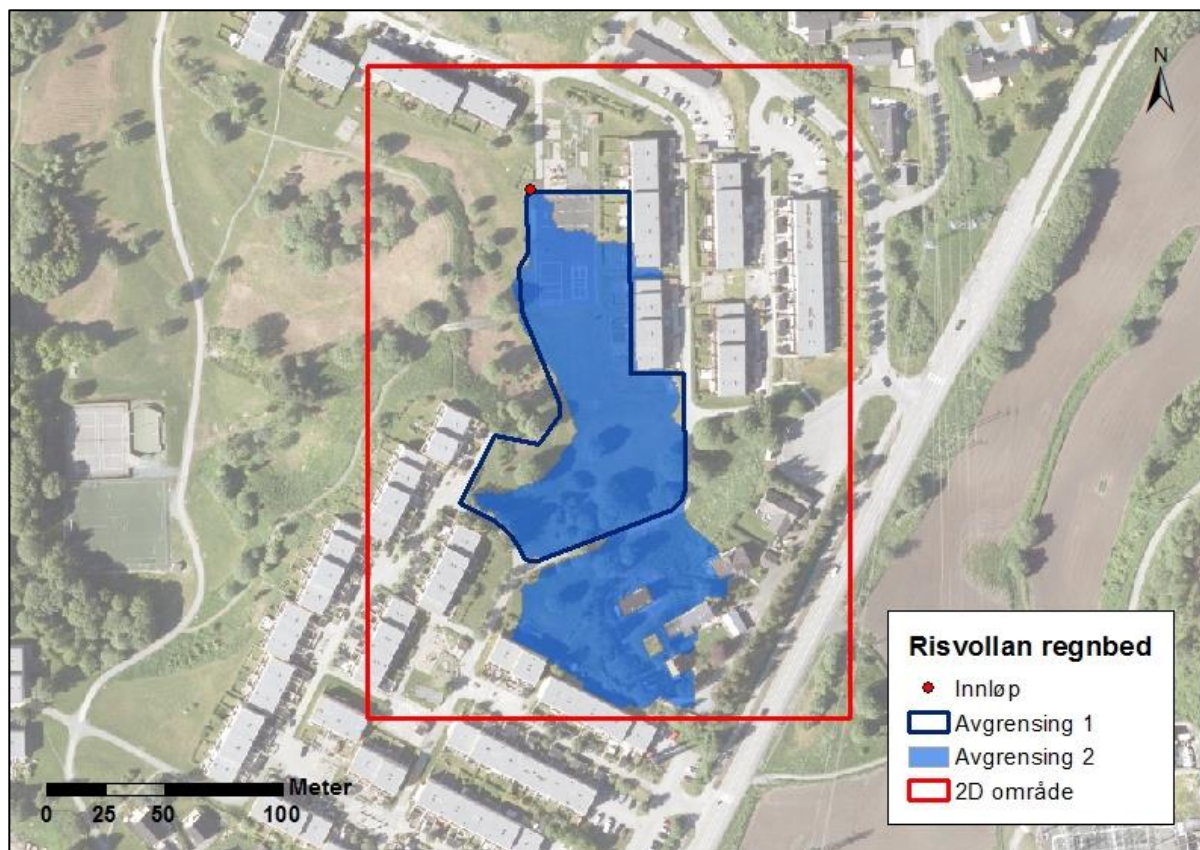
4.1 Risvollan regnbed (RIS)

Regnbed er et tiltak for lokal overvannsdisponering (LOD). Risvollan regnbed (RIS), lokalisert i et boligområde sør-øst i Trondheim, drenerer et lite nedbørsfelt på 8343 m², hvorav 7252 m² (87%) er gress på leirjord og 1091 m² (13%) er asfalt (Dalen, 2012). Som påpekt i prosjektoppgaven er den nøyaktige avgrensingen av feltet og dermed andel permeable og impermeable flater noe usikkert, se Figur 4. Videre i rapporten vil tall hentet fra Dalen (2012) brukes i beregninger.

I følge Nasjonal løsmassedatabase (Norges Geologiske Undersøkelse, 2018) er dominerende kornstørrelser i områdene rundt nedbørsfeltet silt og leir. Ingen detaljerte beskrivelser av kornstørrelse for spesifikt område er tilgjengelig, antar derfor at kornstørrelsen tilsvare leirjord som beskrevet av Dalen (2012).

RIS ble anlagt sommeren 2010 som en del av EU prosjektet SAWA for å teste regnbed teknologien (Braskerud, Paus og Ekle, 2013). Overvann renner på gressplenen, over en asfaltert ballplass og via en gresskledd vannveg inn i regnbedet, se Figur 6. En rekke parametere, som temperatur og vannføring inn og ut av regnbedet, måles kontinuerlig. Nærmere beskrivelse av vannføringsmålinger i kapittel 5.3.

Takflater i området vil ikke bidra til avrenning til regnbedet da alle tak er koblet til ledningsnettets via direkte taknedløp i bakken. Befaring 19.02.17 konstaterer dette.

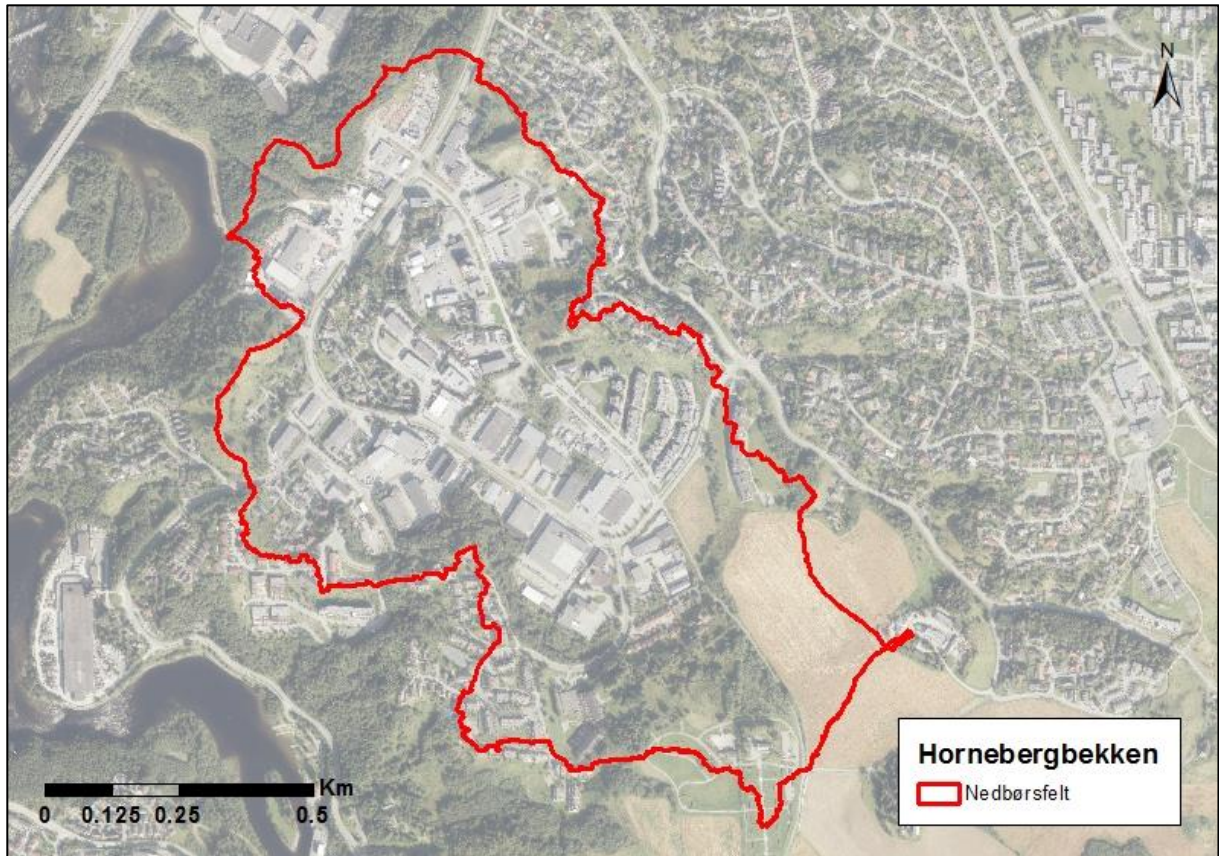


Figur 4: Området rundt Risvollan regnbed. 2D områdets avgrensing markert med rød strek. Innløpet til regnbedet markert med rød prikk. Avgrensing 1 og 2 illustrerer to ulike avgrensinger av nedbørsfeltet. Avgrensing 1 hentet fra Dalen (2012) og avgrensing 2 hentet fra Pedersen (2017).

Hornebergbekken

Hornebergbekken nedbørsfelt ble valgt etter samtale med Trondheim kommune. Feltet har utløp i Nidelva, er ca 93,5 ha og utgjør store deler av bydelen Fossegrenda sør i Trondheim. Asfalterte flater utgjør ca. 30%, takflater 14%, dyrka mark 8% og de resterende 48% antas å være gress.

I følge Nasjonal løsmassedatabase (Norges Geologiske Undersøkelse, 2018) er dominerende kornstørrelser i nedbørsfeltet silt og leir i likhet med nedbørsfeltet til regnbedet. Velger derfor å anta leirjord også for Hornebergbekken.



Figur 5: Hornebergbekken nedbørsfelt, 93,5 ha. Avgrensing av felt markert med rødt.

5 Datagrunnlag

I det følgende presenteres datagrunnlaget for modelleringen i HEC-RAS. Datagrunnlaget består av høydedata, ortofoto, FKB-data, vannføringsdata fra Risvollan regnbed og nedbørsdata i form av registrerte nedbørsserier og IVF kurver.

5.1 Høydedata

Grunnlaget for den digitale høydemodellen (DHM) er digital terrengmodell (DTM) og digital overflatemodell (DOM). DTM og DOM brukt i dette prosjektet er utviklet av Statens Kartverk på grunnlag av laserskanning av Trondheim i 2014 (Blom Geomatics AS, 2014), i henhold til FKB-Laser10 standard (Statens Kartverk, 2013a). Vertikal nøyaktighet for datasettene er oppgitt til ± 10 cm for harde veldefinerte flater (e.g. grus og asfalt). Horisontal nøyaktighet er ± 30 cm. Minste gjennomsnittlige tetthet for bakkepunkt er 4 pkt/ m². Detaljert beskrivelse av konstruksjon av DHM til bruk i HEC-RAS følger i kapittel 6.1.

5.2 Ortofoto og FKB-data

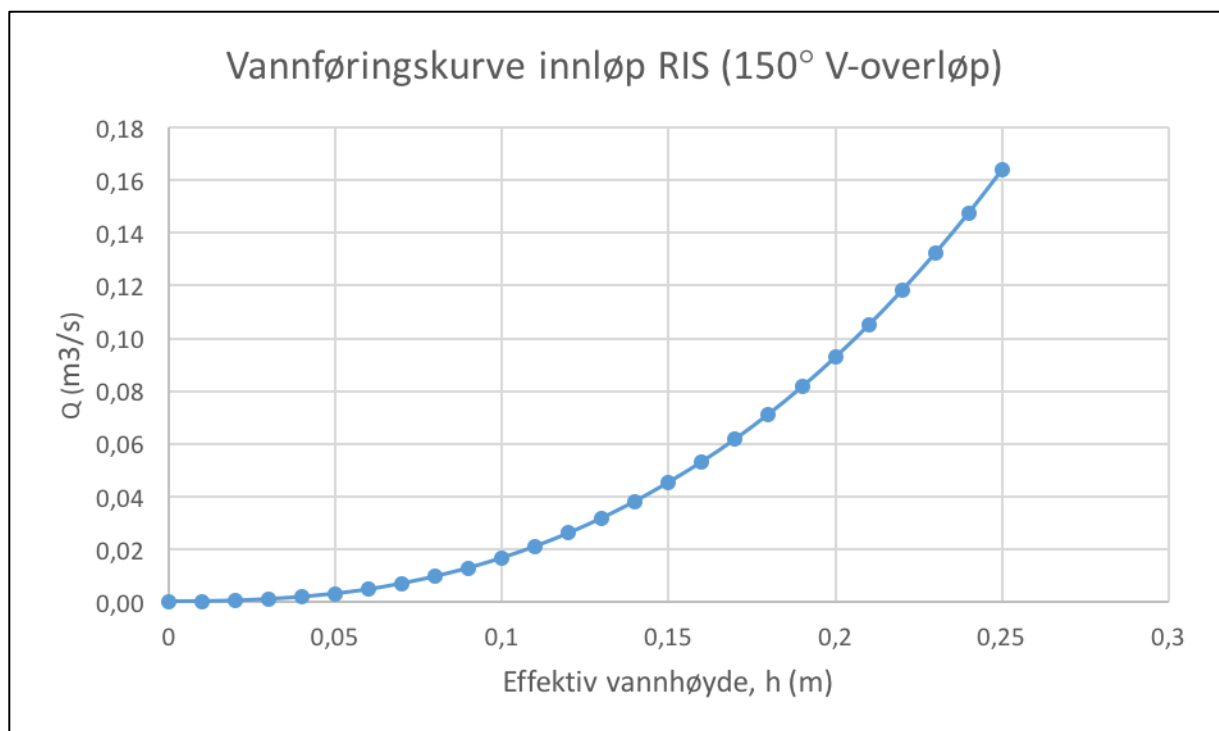
For å få oversikt over studieområdene og anslå rimelige Mannings n verdier ble ortofoto (målestokkriktige flybilder), tilgjengelig fra norgebilder.no, benyttet. For å illustrere og differensiere mellom ulike typer overflater er datasett fra Felles kartdatabase (FKB) brukt. Datasettene som er brukt er FKB-Vann, FKB-AR5, FKB-Bygning (Statens Kartverk, 2013b) og FKB-Veg (Statens Kartverk, 2014). Samtlige datasett er tilgjengelige gjennom Norge Digitalt.

5.3 Vannføringsdata RIS

Regnbedets innløp er utstyrt med et skarpkantet V-overløp med 150° vinkel og en trykksensor som måler vannstanden foran overløpet, se Figur 6. For at vann skal strømme inn i regnbedet må vannstanden foran overløpet overstige 26 cm. Trykksensoren har en oppløsning på 1 minutt. Vannføring beregnes normalt ved bruk av overløpsformel fra NS-ISO 1438-1 (Standard Norge, 2005), men formelverket gjelder ikke V-overløp med vinkelåpning større enn 100 grader. Utrechnet vannføring baseres derfor på teoretiske kurver, utviklet av NVE, for skarpkantede V-overløp med overløpsvinkel på 150°, se Figur 7. Se Vedlegg A for mer informasjon og formler.



Figur 6: Innløp Risvolla regnbed. Skarpkantet V-overløp med 150° vinkel. Gresskledd vannveg i bakgrunn. Befaring 19.02.17.



Figur 7: Vannføringskurve for 150° V-overløp, Risvolla regnbed (RIS). Effektiv vannhøyde, h , er vannhøyde oppstrøms V-overløpet.

Kurven er ikke gyldig ved oppstuvning, det vil si at den kun gjelder for effektiv vannhøyde, h , $\leq 0,250$ m. Kurven er tilgjengelig i NVEs database gjennom programmet VFTAB.

I følge Dalen (2011) ble bunnen på regnbedet senket juni 2011. Velger derfor å bruke nyere avrenningsdata enn dette, slik at geometrien stemmer med terrengmodellen som er basert på målinger fra 2014.

5.4 Nedbørsdata

Nedbørsdata benyttet i oppgaven er hentet fra Risvollan urbanhydrologiske stasjon. Målestasjonen ligger 85 m.o.h 4 km sør-øst for Trondheim sentrum. Stasjonen ligger 800 m fra regnbedet (RIS), noe som gir et godt grunnlag for å vurdere avrenningen i feltet for ulike nedbørshendelser. Nedbør måles året rundt ved hjelp av et pluviometer, nærmere bestemt en oppvarmet Lambrecht måler av type H1815. Måleren fungerer etter det såkalte vippe-bøtte prinsippet og har 200 cm² åpning og en oppløsning på 0.1 mm/vipp.

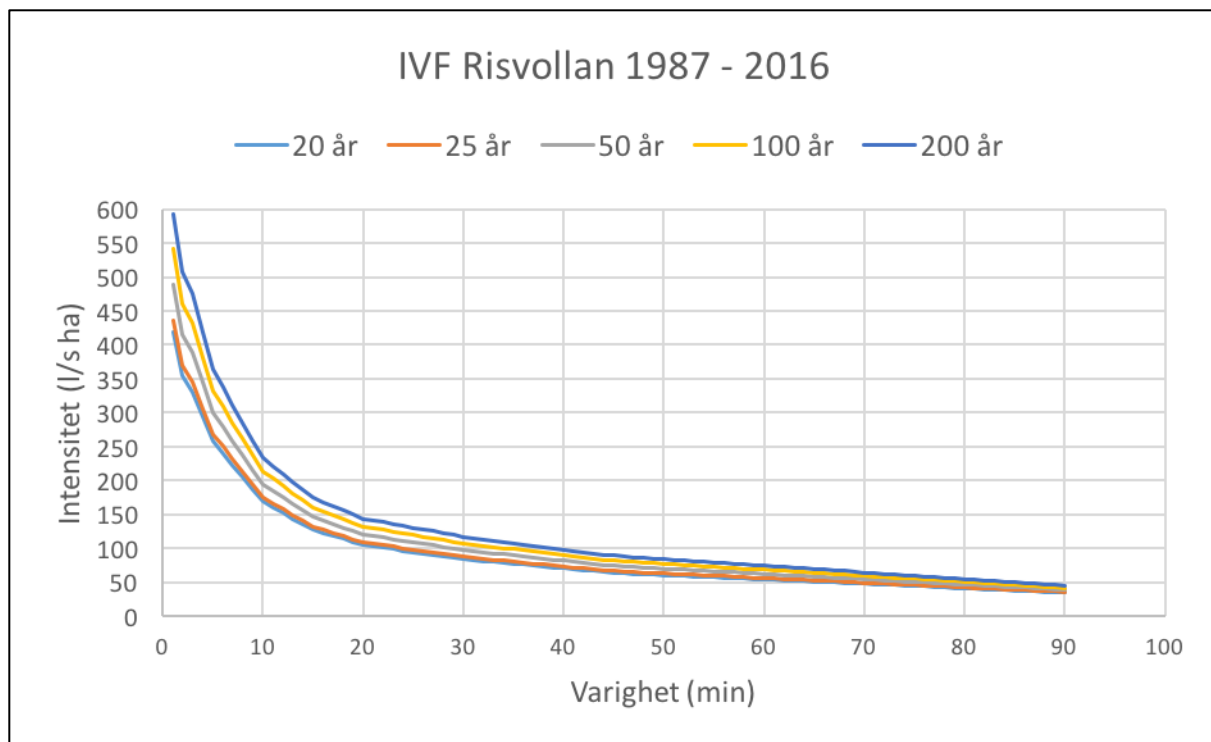
5.4.1 Nedbørsserier

To nedbørsserier med intens nedbør er valgt ut for å se hvor godt modellen klarer å simulere disse. Som nevnt tidligere ble det gjort fysiske endringer på regnbedet juni 2010, og det er derfor kun valgt nedbørsserier etter dette tidspunktet.

Det er benyttet nedbørsserier med 5 minutts oppløsning. Disse er tilgjengelige via NVEs database.

5.4.2 IVF

For simuleringer av nedbør med 200 års returperiode er IVF-verdier for Risvollan, for perioden 1987 – 2016 benyttet, se Figur 8. IVF-verdier er utarbeidet av Meteorologisk institutt og er fritt tilgjengelig på www.eklima.met.no.

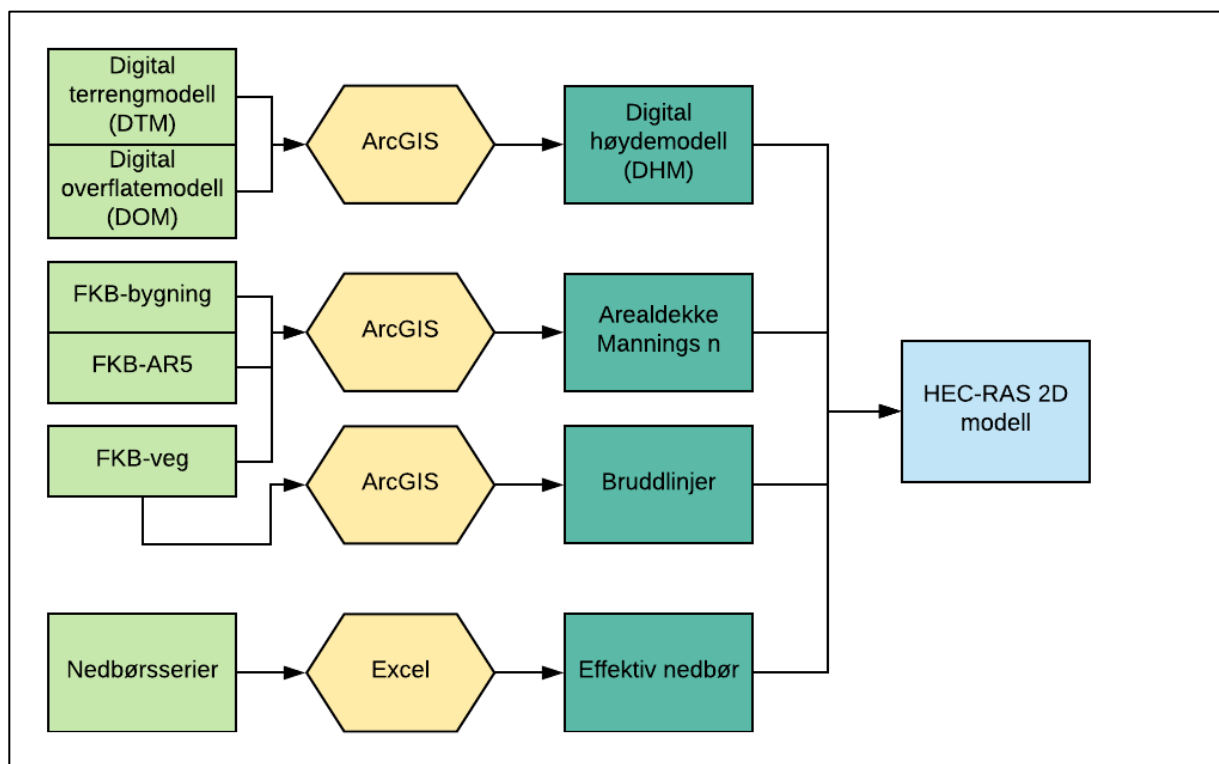


Figur 8: IVF-kurve for Risvollan 1987 – 2016. For returperiodene 20, 25, 50, 100 og 200 år.

6 Metode og modeloppsett

Modellering av overflatestrømning er gjort i HEC-RAS 5.0.4 (HEC, 2016b). I tillegg er ArcGIS Desktop 10.4 (ESRI, 2015) og Excel benyttet. Stasjonær PC med 3.6 GHz Intel Core i7-4790 prosessor og 16.0 GB minne er brukt.

Før modellen kan settes opp i HEC-RAS må nødvendig inndata genereres. Dette består hovedsakelig av konstruksjon av digital høydemodell i ArcGIS, klargjøring av FKB data i ArcGIS og omgjøring av nedbørsserier til effektiv nedbør i Excel, se Figur 9. Videre følger en beskrivelse av de overnevnte prosesser samt modeloppsett i HEC-RAS for de to feltene RIS og Hornebergbekken.



Figur 9: Flytskjema som illustrerer prosessen fra datagrunnlag til inndata HEC-RAS. Datagrunnlag i grønt, programvare brukt i gult og inndata til HEC-RAS i turkis.

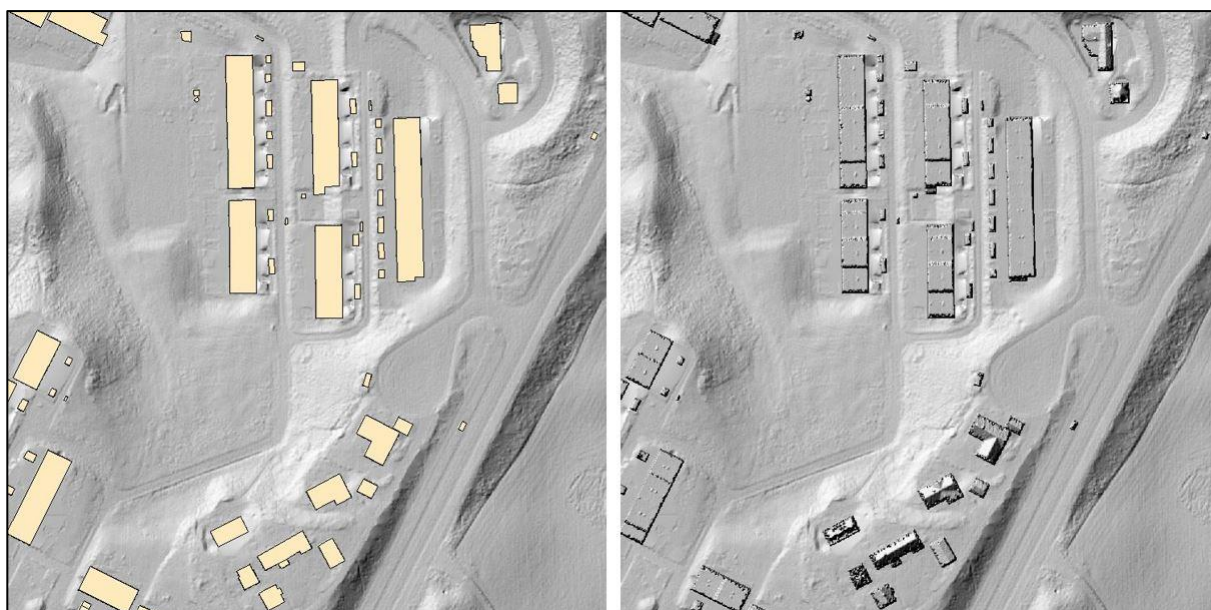
6.1 Konstruksjon av digital høydemodell i ArcGIS

Datagrunnlaget består av DTM og DOM (se Figur 10) på raster format med 0,25 m oppløsning levert av Kartverket, samt bygningsflater (se Figur 11) fra felles kartdatabase (FKB bygning).



Figur 10: DOM (venstre) og DTM (høyre).

På grunn av at bygninger ikke inngår i DTM må disse legges til. Dette kan gjøres på flere måter. En enkel måte å gjøre dette på er å heve terrenget med en standard høyde for alle bygningspolygoner. Dette er tilstrekkelig hvis målet er å skape barrierer for vannstrømmen på bakkenivå. Det vil imidlertid ikke gi riktig representasjon av takflatene. På grunn av planlagt metode med regn-på-grid var det ønskelig å få med faktisk form på takene da dette gir en realistisk fremstilling av avrenningssituasjonen og gode resultater med valgt metode i følge Cea, Garrido og Puertas (2010).



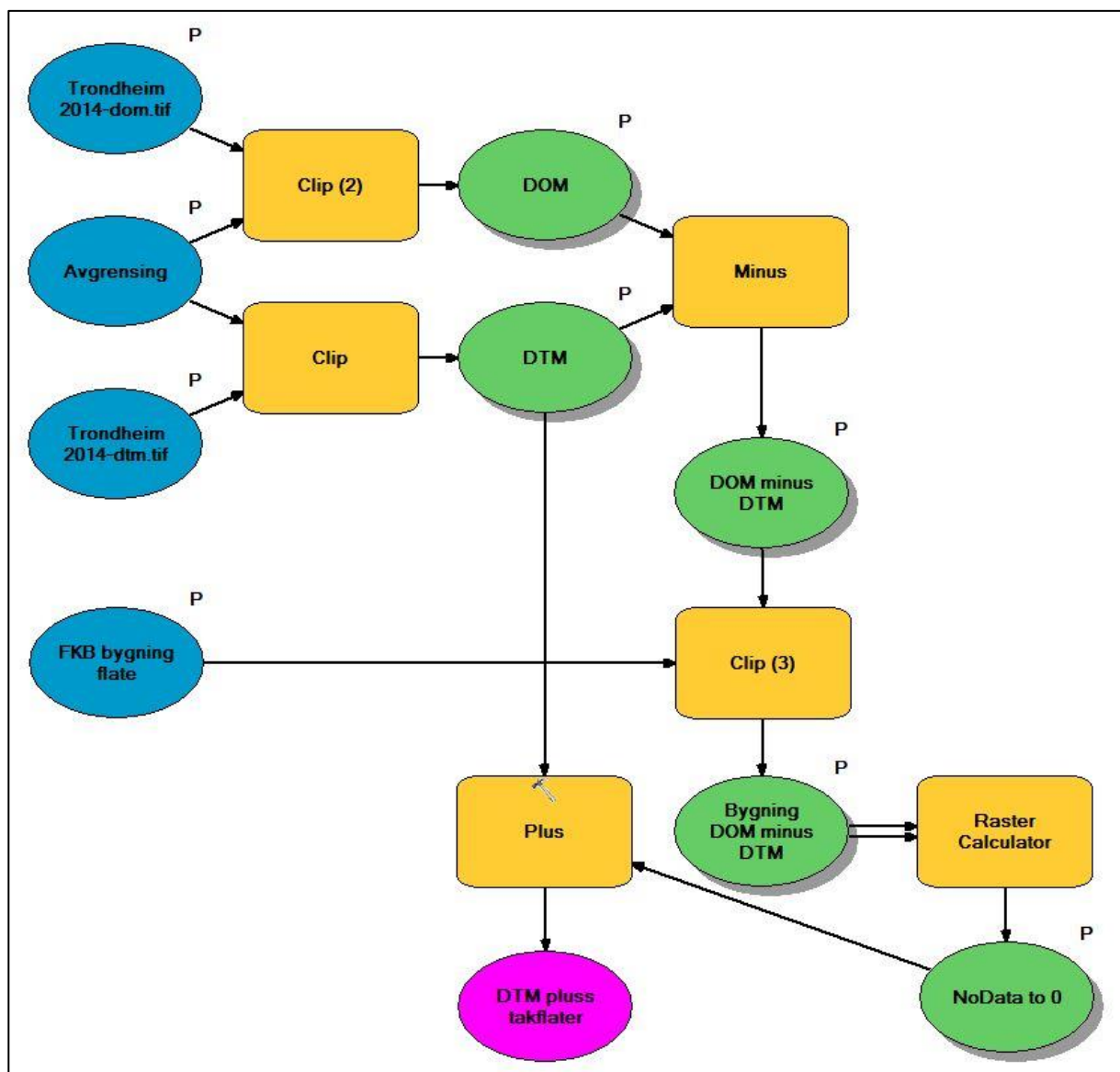
Figur 11: DTM med bygningsflatepolygoner (venstre) og endelig DHM (høyre). Bygningsflatepolygonene (lysegult) representerer bygningene i grunnriss. Endelig DHM er satt sammen av DTM og DOM for områder som dekkes av bygningsflater.

En egenutviklet metode for konstruksjon av DHM er brukt. Metoden går ut på å kombinere DTM med takflater hentet fra DOM ved hjelp av bygningsflatepolygoner, se Figur 11.

Bygningsflatene representerer bygningene i grunnriss, ikke som takflater. Med tanke på vannstrømning på bakkenivå ble det besluttet å bruke grunnriss for å unngå unaturlige barrierer for vannet på bakken.

Model builder i ArcMap ble benyttet for å automatisere operasjonen, se Figur 12. Alle verktøy brukt er å finne i ArcToolbox. Prosedyren kan beskrives i 5 korte steg:

- 1. Import og avgrensning av DTM og DOM:** DTM og DOM i TIFF format med 0,25 m oppløsning ble importert fra *hoydedata.no*. Et kartlag med avgrensning av ønsket analyseområde ble opprettet i ArcMap. *Clip (Datamanagement tools -> Raster -> Raster processing)* ble deretter brukt for å tilpasse DTM og DOM til avgrenset område. Dette for at ikke unødvendig store områder skulle prosesseres, og slik spare tid på videre operasjoner.
- 2. DOM minus DTM:** Høydeverdiene i DOM ble trukket fra høydeverdiene i DTM ved hjelp av *Minus (3D Analyst Tools -> Raster Math)*. Rasteret DOM minus DTM (se Figur 12) representerer da høyde over terreng for alle objekter som trær, hustak osv.
- 3. Velger bygningsflater:** Legger til kartlaget FKB bygning flate som viser alle bygninger i grunnriss i form av polygoner. Setter FKB bygning flate som *Output extent* i *Clip* for å velge ut kun bygninger i DOM minus DTM. Resulterende kartlag Bygning DOM minus DTM, representerer da høyde over terreng av takene. Alle områder som ikke er bygningsflater blir automatisk satt til *No data*.
- 4. No data lik 0:** Alle områder som ikke dekkes av bygninger i kartlaget Bygning DOM minus DTM er satt til *No data*. *No data* settes lik 0 ved hjelp av *Raster calculator*. Setter *Map Algebra expression* i *Raster calculator* til:
`Con(IsNull("%Bygning_DOM_min_DTM%"), 0, "%Bygning_DOM_min_DTM%")`
- 5. DTM pluss takflater:** Legger til takhøyder (No data to 0) på DTM ved hjelp av *Plus (3D Analyst tools -> Raster Math)*. Resulterende datasett DTM pluss takflater brukes videre som DHM i HEC-RAS.



Figur 12: Prosedyre i Model builder for konstruksjon av DHM for bruk i HEC-RAS. Inndata i blått, verktøy i gult, resulterende datasett i grønt og endelig DHM i rosa.

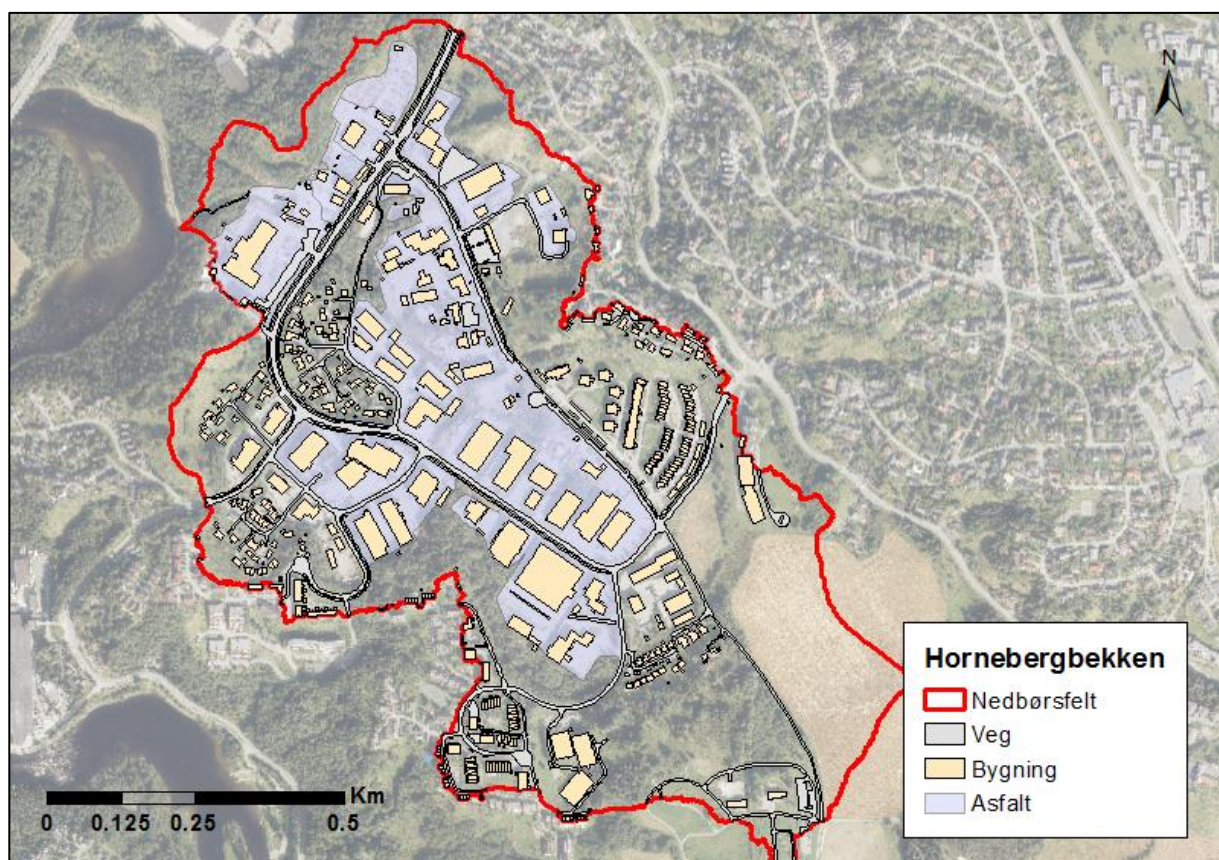
For å ta hensyn til taknedløp ble det vurdert å legge inn bygninger ved hjelp av vegger, slik at vann som ville falle på hustak ble sperret inne i bygningene og slik ikke bidra til avrenning på overflaten. Dette visste seg å fungere dårlig i HEC-RAS på grunn av at disse veggene ikke alltid fikk en kontinuerlig representasjon i beregningsnettet, noe som lett førte til åpninger i veggene og «utlekking».

6.2 Klargjøring av FKB-data i ArcGIS

Polygoner fra datasettene FKB-veg, FKB-bygning og FKB-AR5 ble brukt for å differensiere mellom ulike Mannings n verdier i HEC-RAS. FKB-veg og FKB-bygning ble brukt i sin helhet.

Datasettet FKB-veg skiller ikke mellom grusveger og asfaltveger. Alternativt kan grusveger fjernes manuelt fra datasettet, men det krever befarings i felt for å bekrefte hvilke som er grus og hvilke som er asfalt, noe som vil være tidkrevende, spesielt for Hornebergbekken. Det antas her at det er snakk om såpass få grusveger at det har liten betydning for modellen. Dermed tas alle vegflater med og gis en Mannings n verdi tilsvarende asfalt.

Aktuelle polygoner (i.e. områder hvor størsteparten består av asfalterte flater) i FKB-AR5 ble plukket ut manuelt. Ortofoto ble brukt for å avgjøre hvilke polygoner som representerte asfalterte områder. Aktuelle lag ble deretter slått sammen og importert til HEC-RAS. Figur 13 viser FKB-data brukt for feltet Hornebergbekken.



Figur 13: Hornebergbekken nedbørsfelt med tilhørende flatetyper. Flatetyper hentet fra datasettene FKB-veg, FKB-bygning og FKB-AR5.

Linjer fra datasettet FKB-veg ble brukt som bruddlinjer i HEC-RAS. Før import til HEC-RAS var det nødvendig å fjerne overflødige linjer i datasettet. Linjene som ble fjernet var objekt typer merket: *Vegrekkverk*, *Vegsperring*, *VeggrøftÅpen*, *Skiltportal*, *VegoppmerkingLangsgående*, *VegkantFikitiv* og *GangfeltAvgrensning*.

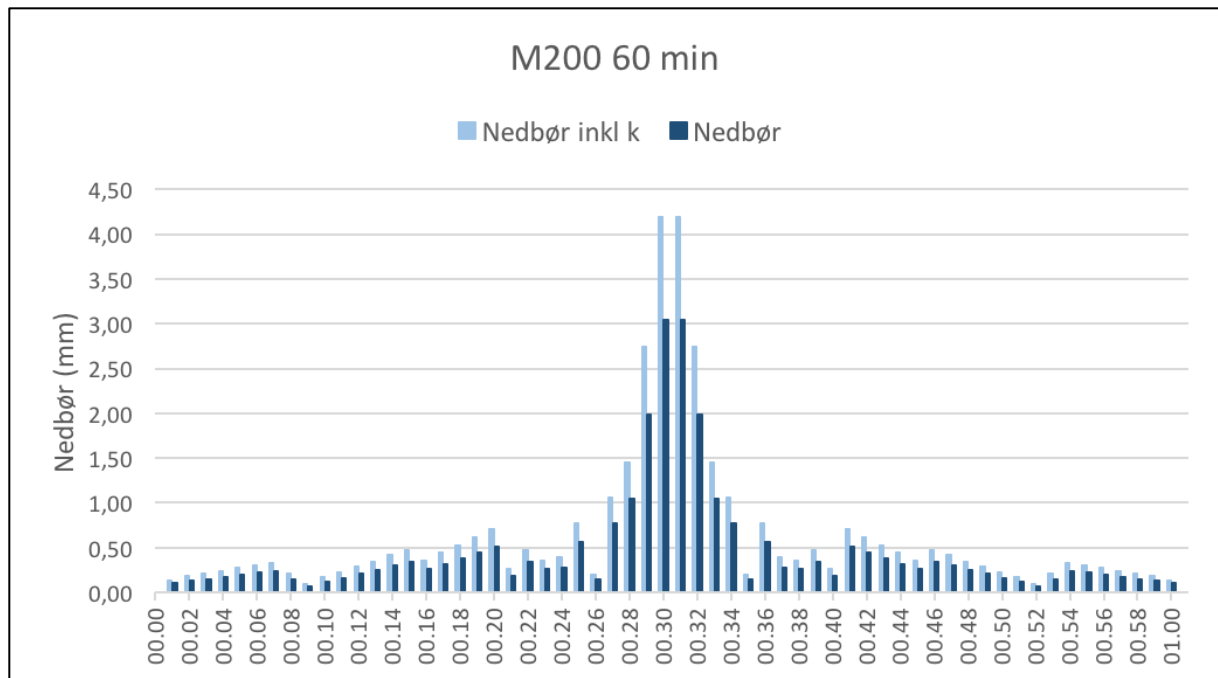


Figur 14: FKB-veg før (venstre) og etter (høyre) fjerning av overflødig linjetyp.

6.3 Bearbeiding av nedbørsdata

Bruk av nedbørsdata er litt ulik for de to feltene som undersøkes. Da det er tilgjengelige data for avrenning for RIS brukes to tidligere registrerte nedbørsserier fra Risvolla målestasjon for å se hvor godt HEC-RAS evner å modellere disse hendelsene.

For Hornebergbekken er det tatt utgangspunkt i IVF-kurve for Risvolla for perioden 1987 – 2016. IVF-kurve er omdannet til symmetriske regnhyetogram i henhold til Lindholm *et al.* (2012) og nedbørsserie på 60 minutter brukes, se Figur 15. Metoden inkluderer effekten av de mest intense minuttene. Lindholm *et al.* (2012) foreslår at åpne flomveier i urbane områder dimensjoneres for gjentaksintervall på 200 år. Har derfor valgt å bruke gjentaksintervall på 200 år i modellen. For å ta hensyn til framtidige klimaendringer legges det også til en klimafaktor. Det anbefales å bruke høyeste klimafremskrivning (NOU 2015: 16). For et regn med returperiode 200 år gir dette klimafaktorer på 1,26 og 1,38 for henholdsvis 1-døgns og 3-timers nedbør. I følge NOU 2015: 16 (2015) ser man en tendens til at klimafaktoren blir høyere for regn av kortere varighet og økende returperiode. Da det i dette tilfellet skal simuleres en nedbørshendelse med varighet på 1 time velges høyeste klimafaktor 1,38.



Figur 15: Symmetrisk hyetogram for nedbør med returperiode 200 år og varighet 60 min. Beregnet med utgangspunkt i IVF-verdier for Risvollan for perioden 1987 – 2016. Mørkeblå søyler illustrerer nedbør basert på IVF-verdier. Lyseblå søyler er nedbør inkludert en klimafaktor, k , på 1,38.

6.3.1 Beregning av effektiv nedbør

HEC-RAS tar ikke hensyn til infiltrasjon. Nedbørsserier må derfor bearbeides på forhånd slik at de representerer effektiv nedbør. En måte å gjøre dette på er å trekke fra en konstant prosentandel fra hvert tidskritt i nedbørsserien som representerer tap (se figur 9-40a i Dingman (2008)). Dingman (2008) definerer effektiv nedbør som:

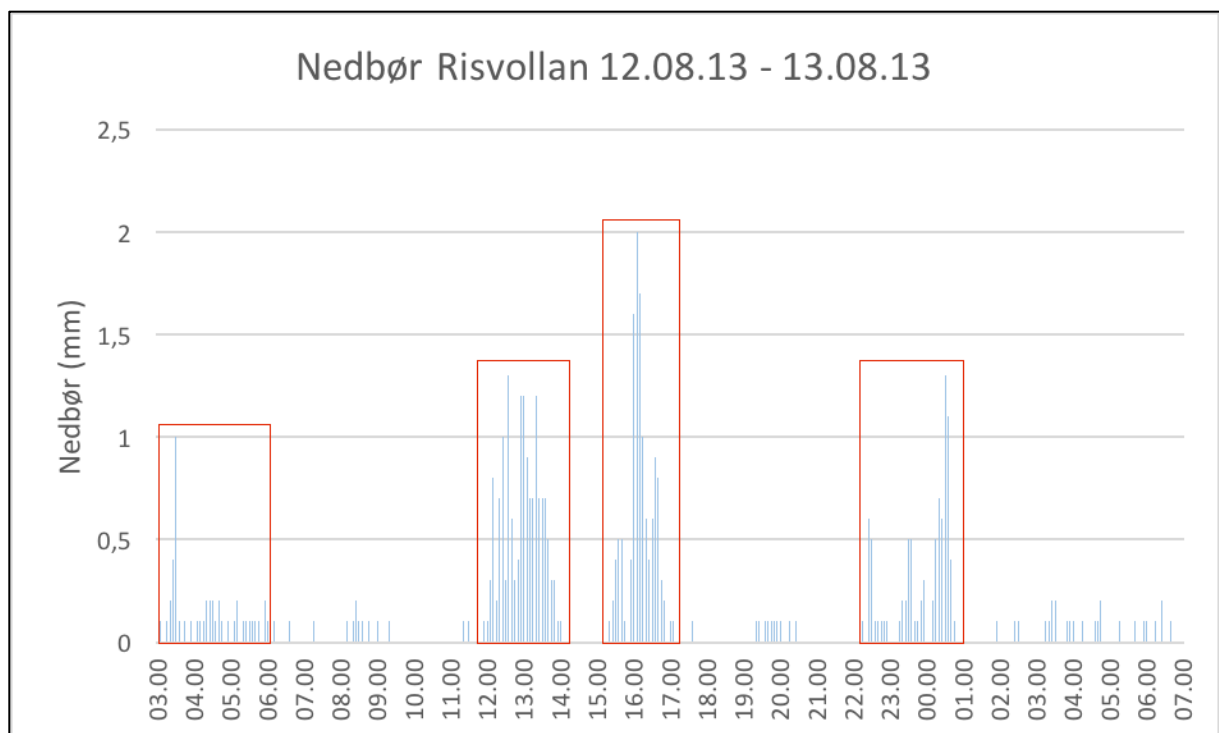
$$W_{eff} = W - ET - \Delta S_c - \Delta D - \Delta \theta \quad (14)$$

Hvor W er total nedbør, ET er andel av nedbøren som evapotranspirer under hendelsen, ΔS_c er netto lagret nedbør i trekronene, ΔD er netto nedbør til gropmagasinering og $\Delta \theta$ er netto infiltrert vann. Da ET og ΔS_c ofte er små neglisjeres de i denne modellen. ΔD modelleres i HEC-RAS og trenger derfor ikke beregnes på forhånd. Dermed gjenstår det kun å ta høyde for infiltrasjonstapet, $\Delta \theta$, ved utregning av effektiv nedbør.

Flatene som utgjør nedbørsfeltet er ansett som impermeable (i.e. asfalt og hustak) eller permeable (gress o.l.). Andel nedbør som infiltrerer i områder med permeable flater er regnet ut ved hjelp av Green-Ampt metoden, beskrevet i Dingman (2008). Samtlige nedbørsserier, både faktiske hendelser og de som er laget ut i fra IVF-kurver, er justert for infiltrasjon på denne måten.

Metoden for å beregne infiltrasjon med Green-Ampt er i utgangspunktet utviklet for bruk med nedbør med konstant intensitet, såkalte kasseregn. Må derfor gjøre en del forenkende grep ved utregning av infiltrasjon. Ved bruk av registrerte nedbørshendelser fra Risvollan målestasjon kan prosedyren beskrives i fire korte steg:

1. Nedbørserie plottes ved hjelp av Excel og «hovedbolker» med nedbør identifiseres, se Figur 16. Hver av «hovedbolkene» defineres som en separat nedbørshendelse. Kriteriet er at de inneholder 5-minuttsverdier på 0,4 mm eller mer. Det skilles mellom to hendelser hvis det er mer enn 15 min uten registrert nedbør mellom dem.



Figur 16: Registrert nedbør per 5 min Risvollan målestasjon 12.08.13 – 13.08.13. Identifiserte «hovedbolker» med nedbør markert med rødt.

2. Hver nedbørshendelse omgjøres til kasseregn med konstant intensitet, w , og en gitt varighet, t , og Green-Ampt metoden brukes for å regne ut total mengde infiltrert vann, $F(t)$ i løpet av hendelsen. Verdier for hydraulisk konduktivitet, K , porøsitet, θ_e , og kapillærtrykk, ψ_f , er satt til henholdsvis 0,34 cm/t, 0,434 og 8,89 cm. Verdiene gjelder for leirjord (*loam* på engelsk) og er hentet fra Rawls, Brakensiek og Miller (1983). Vanninnhold ved starten av beregninger, θ_0 , settes lik 0,3.
3. Antar ingen infiltrasjon for tette flater. Beregner andel effektiv nedbør, N_{eff} , for hver enkelt hendelse ved hjelp av formel 15 og multipliserer med observerte verdier i aktuell

nedbørshendelse for å få en serie med effektiv nedbør som kan brukes som inndata i HEC-RAS.

$$N_{eff} = 1 - \left(\frac{F(t)}{\text{Sum nedbør}} \cdot N_{inf} \right) \quad (15)$$

N_{inf} er andel permeable flater. For Risvollan regnbed tilsvarer dette 0,87.

4. «Småregn» som ikke faller innenfor en av nedbørshendelsene neglisjeres – antar at dette infiltreres.

Ved bruk av symmetrisk hyetogram som inndata følges trinn 2 og 3 ovenfor. Hele hyetogrammet vil her behandles som én hendelse.

Det tas ikke hensyn til ledningsnettets kapasitet ved beregning av effektiv nedbør. Det antas at dette ikke utgjør en stor feilkilde for RIS siden det ikke er sluk innenfor nedbørsfeltets grense, slik det er avgrenset av Dalen (2012). For Hornebergbekken skal et flomscenario hvor ledningsettet er blokkert eller ødelagt simuleres. Dette er i henhold til Lindholm *et al.* (2008) som påpeker at det bør finnes et avrenningssystem på overflaten som kan håndtere alt overvannet under et slikt scenario.

6.4 Modelloppsett i HEC-RAS

To modeller settes opp i HEC-RAS: en for Risvollan regnbed (RIS) og en for Hornebergbekken. RIS er et betydelig mindre felt i forhold til Hornebergbekken, i tillegg finnes tilgjengelige vannføringsmålinger for feltet, noe som gjør at oppsatt modell kan kalibreres og verifiseres. Dette gjør at arbeidet med RIS er noe mer omfattende. Erfaringer fra RIS vil legge føringer for oppsett av Hornebergbekken-modellen.

I det følgende vil hvert felt presenteres i forhold til oppsett av hydraulisk modell i HEC-RAS.

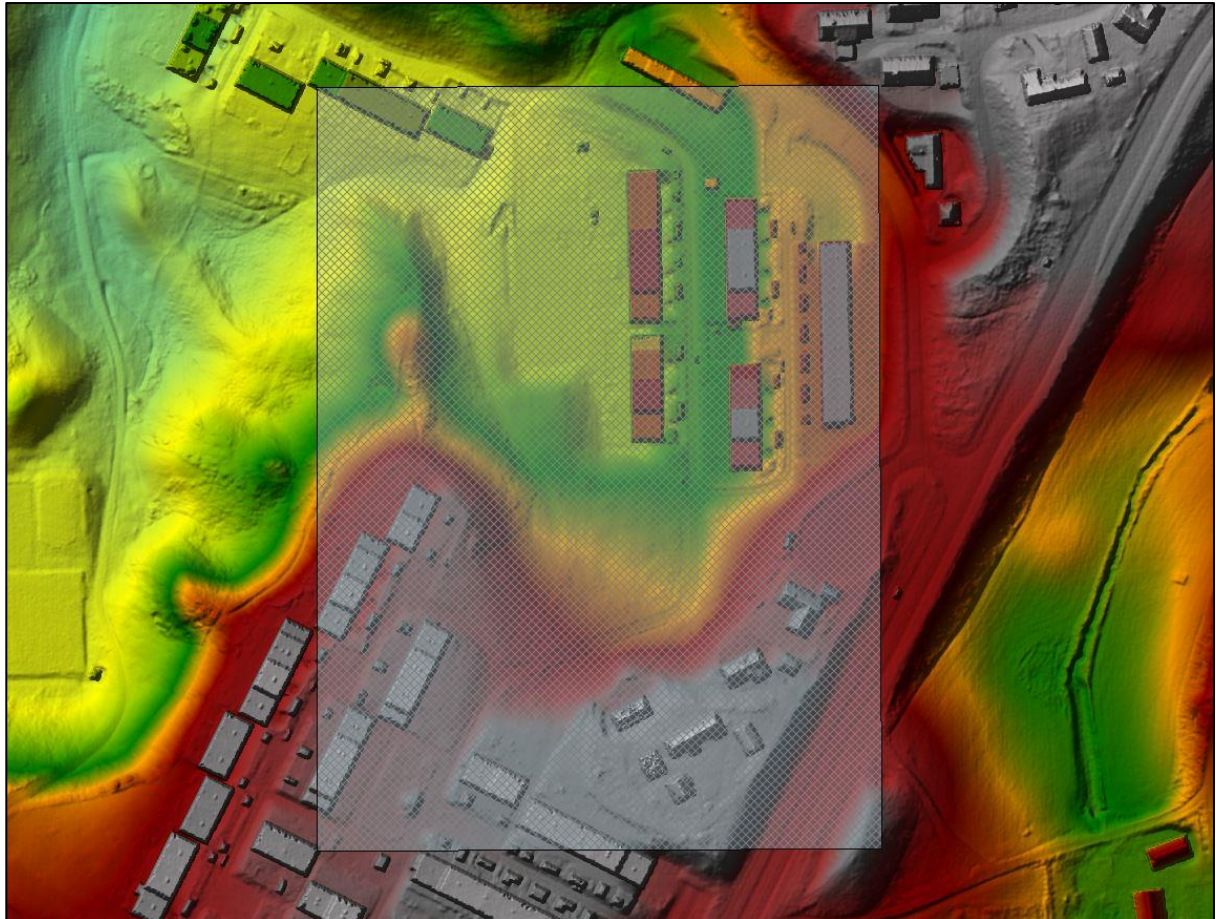
6.4.1 Risvollan regnbed

Hovedgrunnen til valg av RIS som studieområde er eksisterende vannføringsmålinger for innløpet til regnbedet. Tanken er å sammenligne simulert vannføring inn i regnbedet med registrerte verdier for å kunne si noe om hvor godt egnet valgt metode er til modellering av kraftige nedbørshendelser.

DHM med 0,25 m oppløsning importeres til HEC-RAS i TIFF format via RAS Mapper. For å redusere beregningstid settes gjennomsnittlig grid størrelse i HEC-RAS til 1 m. Dette burde være tilstrekkelig da tidligere studier har oppnådd gode resultater ved bruk av 2 m grid størrelse

(Hunter *et al.*, 2008). Det er noe usikkerhet rundt avgrensning av feltet (Pedersen, 2017) og det besluttes derfor at simuleringer kjøres på et større område, se Figur 17. 2D-området dekker et areal på 5,6 ha målt i luftlinje.

Ved bruk av 2D-området avmerket i Figur 17 er det åpenbart at takflater vil kunne gi et bidrag til simulert avrenning. Dette er en potensiell feilkilde i modellen.



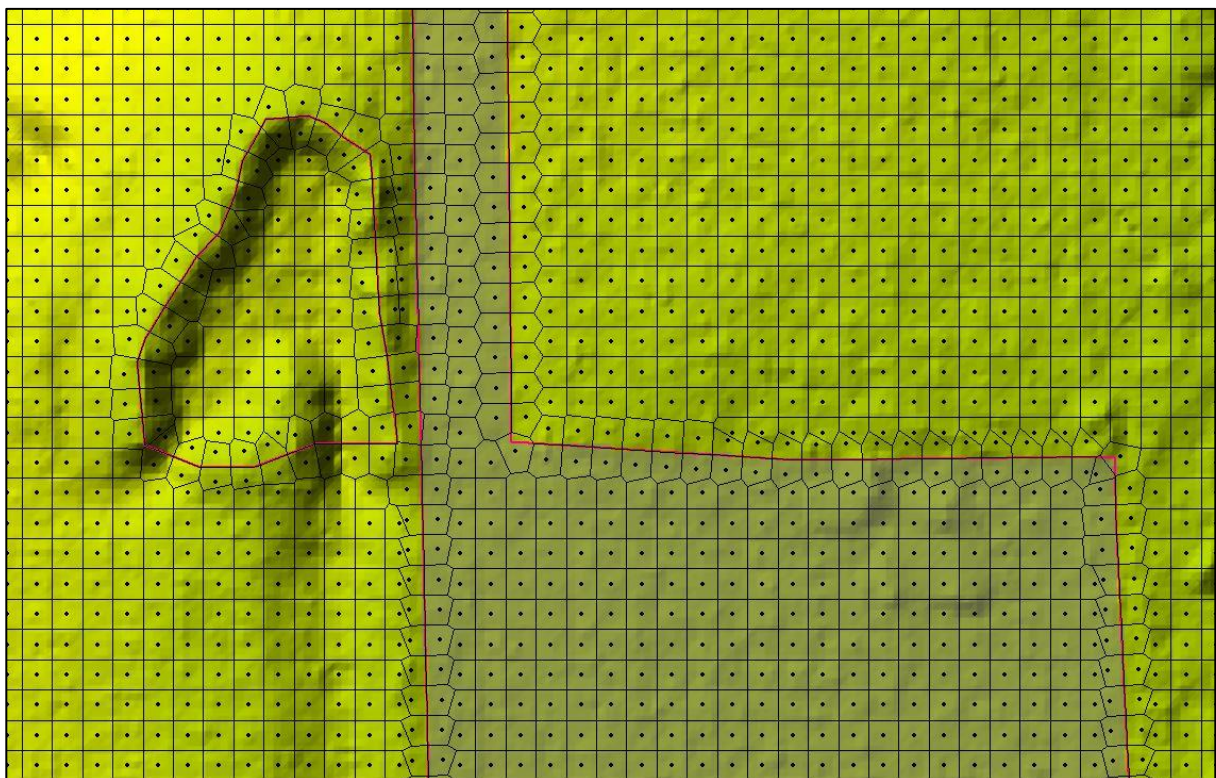
Figur 17: Oppsatt 2D område (skravert) for Risvollan regnbed i HEC-RAS.

Brunner (2016b) anbefaler å legge bruddlinjene til høybrekk i terrenget. I dette tilfellet blir det hovedsakelig fortauskanter og vollene som utgjør sidene på regnbedet, se Figur 18. Bruddlinjene for regnbedet tegnes opp manuelt i ArcGIS for så å importeres til HEC-RAS. Bruddlinjer for vegkanter importeres i form av *shape* filer opprettet i ArcGIS.

Et arealdekkelag (*land cover layer* i HEC-RAS) opprettes med utgangspunkt i FKB-data for å skille mellom ulike overflatetyper (se Figur 18). Det er valgt å skille mellom to overflatetyper: gress og asfalt, med Mannings *n* verdier på henholdsvis 0,1 og 0,011. For enkelthetskyld settes *n* verdi for asfalt for alle tette flater (inkludert takflater). Verdiene er hentet fra Engman (1986)

og representerer såkalt effektiv ruhet. Verdiene gjelder for sjiktstrømning og tar høyde for effekten av kraftig regn.

Nedbør påføres direkte på 2D-området med metoden for regn-på-grid. Det antas at hele området er tørt i forkant av simuleringen. Da registrerte vannføringsmålinger er tilgjengelig kjøres to registrerte nedbørsserier med kraftig nedbør for å se hvorvidt modellen evner å reprodusere disse. Innløpet til regnbedet er et skarpkantet V-overløp. Det er ikke mulig å modellere et slikt overløp i HEC-RAS. Nøyere inspeksjon av terrengmodellen viser at V-overløpets høyde ikke er fanget opp i terrengmodellen. Vil derfor ikke få med effekten av at vann samles opp foran overløpet før vannføring registreres.



Figur 18: Utsnitt fra 2D området til RIS i HEC-RAS. Viser beregningsnett med bruddlinjer (rosa linje) langs regnbedets kant og vegkanter. Arealdekkelag for tak og asfalterte flater markert med grått.

Simulert vannføring beregnes for en profillinje plassert i regnbedets innløp. Profillinjens plassering er valgt ut i fra betraktninger rundt terrengmodellen og bruk av ortofoto. Den er derfor ikke eksakt plassert i forhold til V-overløpet.

Som anbefalt av Brunner (2016b) kjøres modellen først med ligningssett for diffusiv bølge, deretter for dynamisk bølge for sammenligning. Når det kommer til valg av tidskritt i beregninger settes Courant tall lik 1 for 2D-område som startes helt tørt, dette er i henhold til Brunner (2016b). Formel 11 og 13 brukes for beregning av tidskritt for henholdsvis dynamisk

og diffusiv bølge. Valg av hastighet i formlene baseres på test-simuleringer og tidligere erfaring. Justeringer av tidskritt foretas hvis modellen blir ustabil.

For å evaluere modellen brukes Nash-Sutcliffe forklart varians, R^2 :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \overline{Q_o})^2} \quad (16)$$

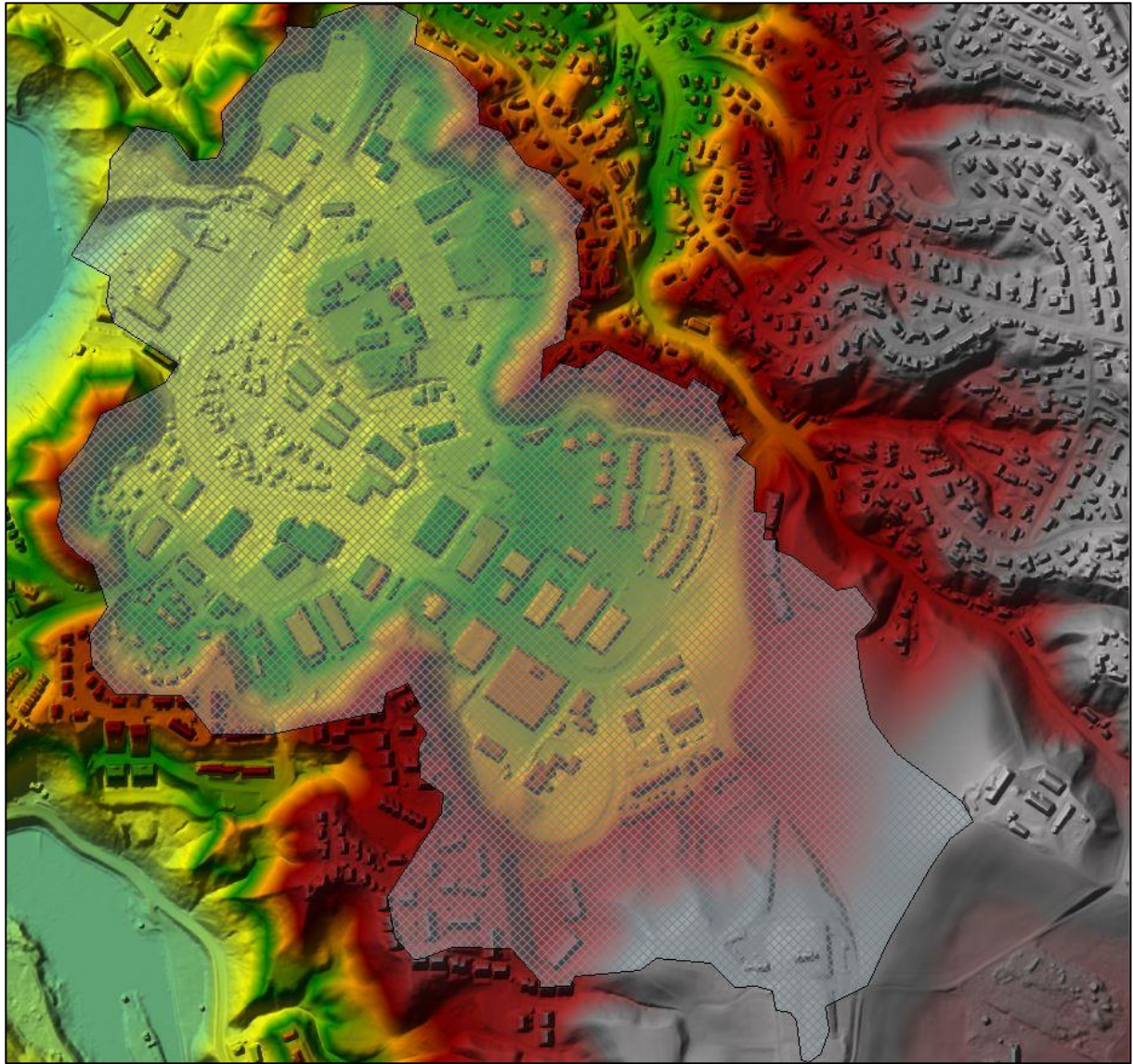
hvor Q_m^t er modellert vannføring ved tid t , Q_o^t er observert vannføring ved tid t og $\overline{Q_o}$ er gjennomsnittlig observert vannføring. R^2 kan variere fra $-\infty$ til 1. R^2 lik 1.0 tilsvarer en perfekt match mellom modellert vannføring og observerte data. R^2 lik 0.0 indikerer at modellert vannføring er like nøyaktig som gjennomsnittet av observerte data. $R^2 < 0$ oppstår når det observerte gjennomsnittet bedre kan forutsi vannføringen enn modellen.

6.4.2 Hornebergbekken

Prosedyren for oppsett er i hovedtrekk den samme som for RIS. Det følger derfor bare en gjennomgang av de områdene hvor dette oppsettet skiller seg fra RIS.

Hele nedbørsfeltet til Hornebergbekken ble satt som 2D-område, se Figur 19. Avgrensing av feltet ble gjort ved hjelp av ArcGIS. Prosedyren for avgrensing av nedbørsfelt er beskrevet i prosjektoppgaven (Pedersen, 2017).

Da dette er et betydelig større felt sammenlignet med RIS er det sannsynlig at simuleringstiden blir høy. Erfaringer fra RIS vil her brukes for å velge egnet grid størrelse, mer om dette i kapittel 7.2.1. Bruddlinjer og arealdekkelag opprettes på samme måte som for RIS. Nedbør påføres direkte 2D-området med metoden for regn-på-grid. Nedbørsserie i form av et symmetrisk hyetogram med returperiode 200 år og 60 minutters varighet settes som ekstern randbetingelse, se kapittel 6.3. Simuleringen fortsetter 50 min etter at den siste nedbøren har falt.



Figur 19: Oppsatt 2D område (skravert) for Hornebergbekken nedbørsfelt i HEC-RAS.

7 Resultater og diskusjon

I det følgende presenteres resultater fra simuleringer av nedbørshendelser gjort for de to studieområdene Risvolla regnbed (RIS) og Hornebergbekken. For RIS er to registrerte nedbørsserier med kraftig nedbør modellert og sammenlignet opp mot registrerte vannføringsmålinger for innløpet til regnbedet. For Hornebergbekken er en nedbørshendelse med returperiode 200 år (M200) modellert og resultatene sammenlignet med kommunens aktsomhetskart for overvannsflo. Erfaringer fra RIS utgjør grunnlaget for oppsettet av Hornebergbekken-modellen og modelloppsettet presenteres derfor her som en del av resultatene.

7.1 Risvolla regnbed

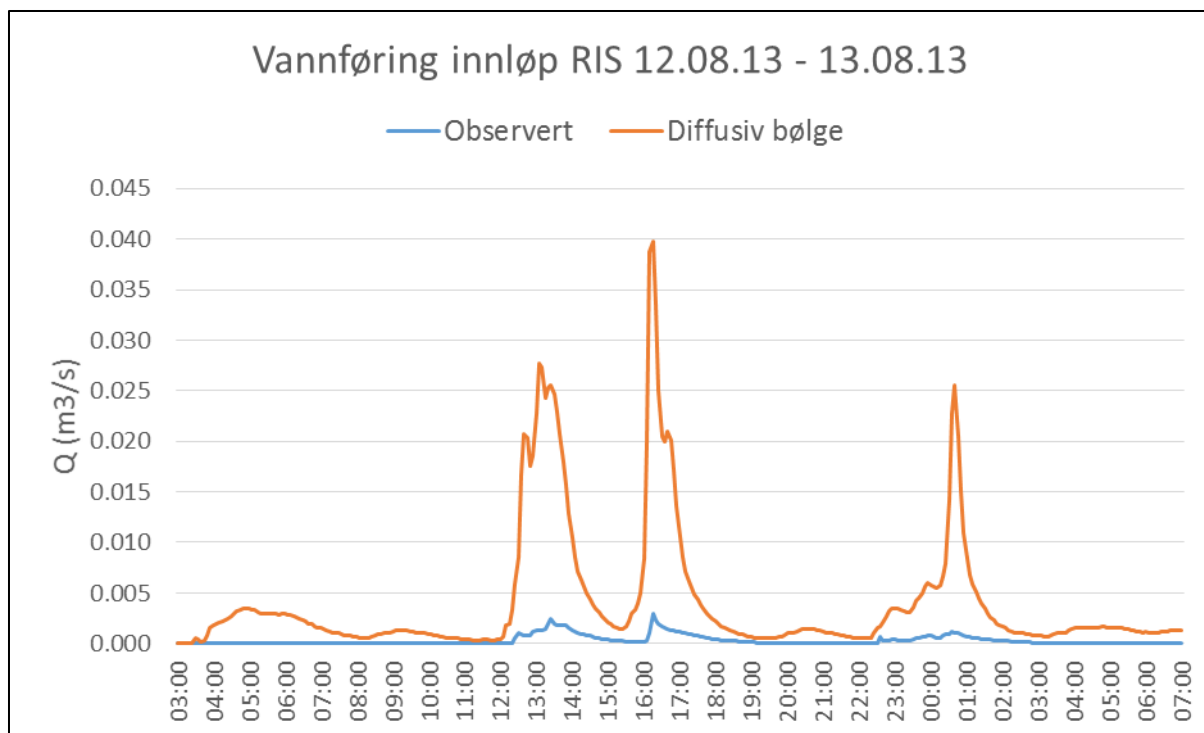
To serier med registrert kraftig nedbør er simulert. Seriene har varierende utforming og varighet. Begge serier har en tidsoppløsning på 5 minutter. Videre presenteres resultater for hver nedbørsserie med tanke på beregning av effektiv nedbør og simulert vannføring for innløpet til regnbedet. Tabell 2 under viser en oversikt over hver av nedbørsseriene.

Nedbørsserie nummer	Dato og tid		Varighet	Simuleringstid	
	Start	Slutt		Diffusiv bølge	Dynamisk bølge
1	12.08.13	13.08.13	28 t	13 t 5 min	31 t 1 min
	03:00	07:00		($\Delta T=0,2$ s)	($\Delta T=0,1$ s)
2	13.09.11	14.09.11	19 t	3 t 5 min	6 t 21 min
	18:00	13:00		($\Delta T=0,5$ s)	($\Delta T=0,3$ s)

Tabell 2: Oversikt simuleringer RIS. Nedbørsserie 1 og 2 med tilhørende informasjon om dato og tid, varighet, simuleringstid i HEC-RAS og tidskritt i beregninger, ΔT .

7.1.1 Nedbørsserie 1

Det ble først kjørt en simulering med den observerte nedbøren i sin helhet, altså uten å ta hensyn til infiltrasjon, se Figur 20. Resultatene gir svært høy simulert vannføring sammenlignet med observert vannføring. Dette tyder på at store mengder av observert nedbør går til infiltrasjon, noe en burde kunne forvente da hele 87% av nedbørsfeltet består av permeable flater i form av gress på leirjord.



Figur 20: Vannføring, Q , for innløpet til Risvolla regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13. Simulert vannføring fra observert nedbør. Simulering kjørt med ligningssett for diffusiv bølge.

For å ta hensyn til infiltrasjon deles nedbørsserien inn i fire separate nedbørshendelser, som beskrevet i kapittel 6.3.1. Tabell 3 viser beregnet andel effektiv nedbør, N_{eff} , for hver av de fire hendelsene.

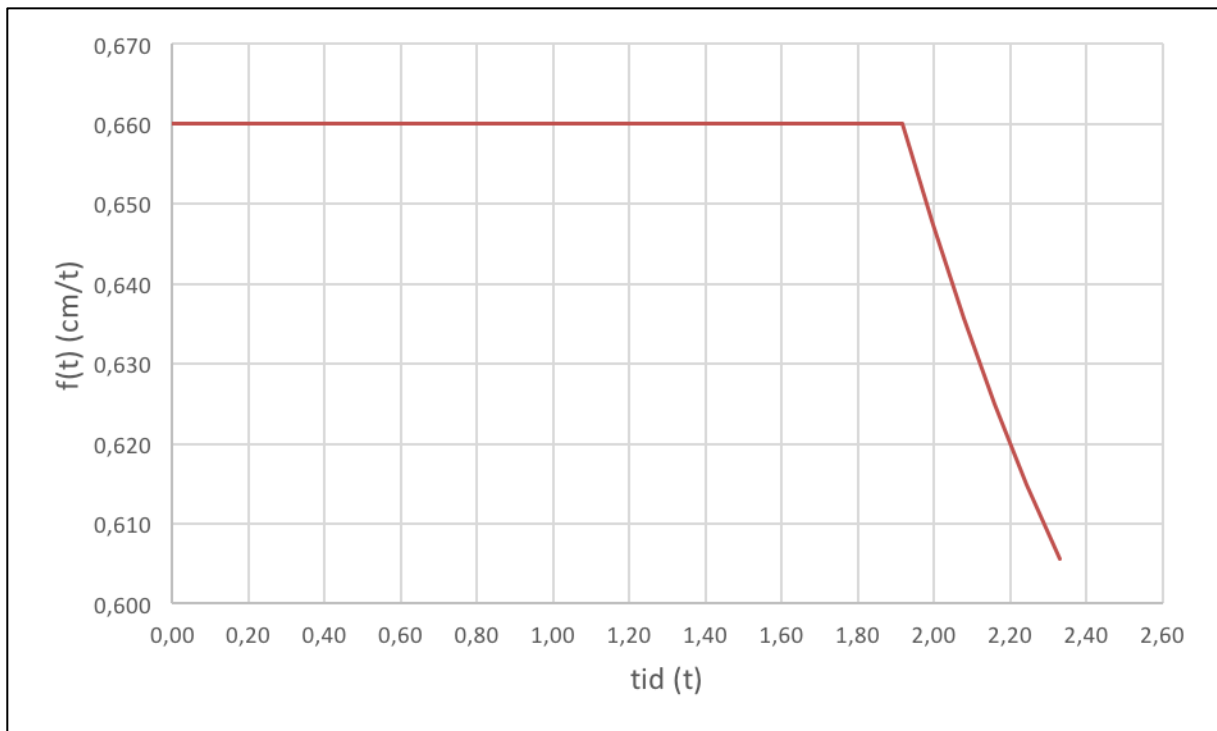
Hendelse nummer	Start tid	Slutt tid	Varighet (t)	Sum nedbør (mm)	w (cm/t)	F(t) (mm)	N_{eff}
1	03:05	06:10	3,08	4,80	0,16	4,80	0,130
2	11:55	14:15	2,33	15,50	0,66	15,30	0,141
3	15:20	17:05	1,75	12,50	0,71	12,40	0,137
4	22:10	00:45	2,58	8,90	0,34	8,90	0,130

Tabell 3: Nedbørsserie 1 inndelt i fire separate nedbørshendelser. Tabellen viser start og slutt tider, varighet, sum, gjennomsnittlig intensitet (w), total mengde infiltrert vann ($F(t)$) og beregnet andel effektiv nedbør (N_{eff}) for hver hendelse.

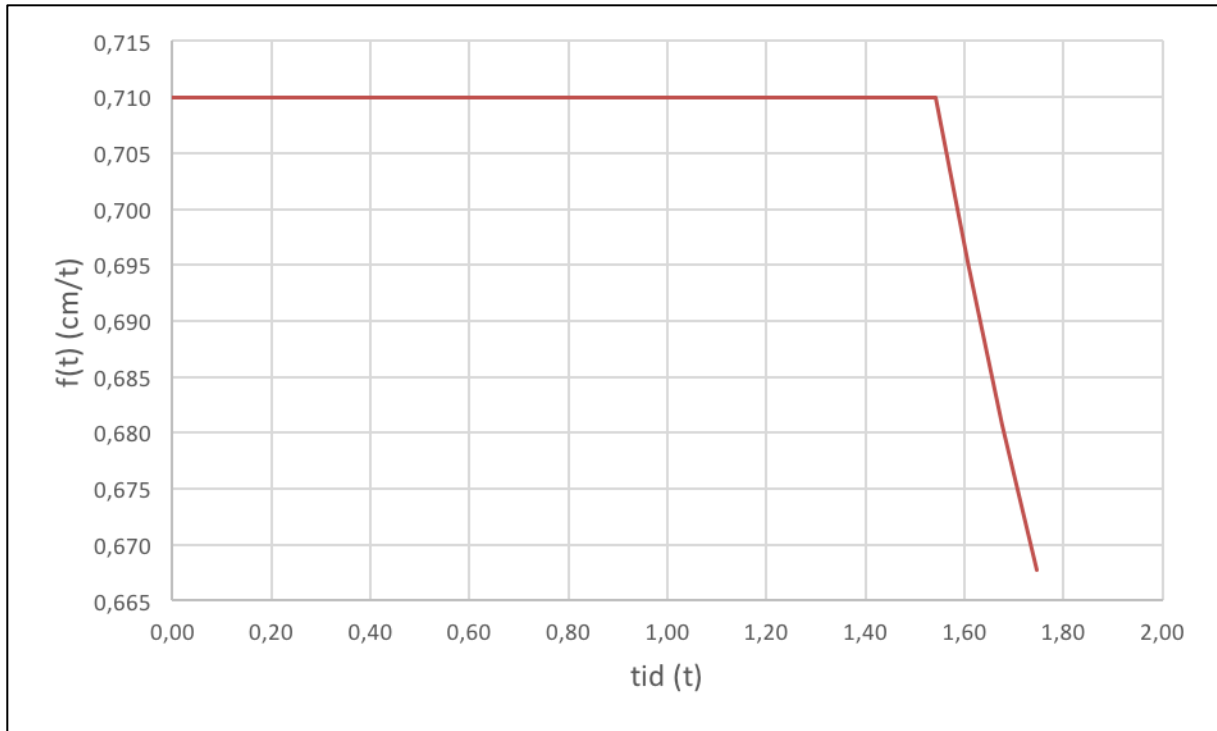
Hydraulisk konduktivitet, K , for leirjord er satt til 0,34 cm/t. Når intensiteten på nedbøren er lik eller lavere enn dette går alt til infiltrasjon. Ser av Tabell 3 at dette er tilfellet for hendelse nummer 1 og 4 i serien. N_{eff} blir da en funksjon av andel permeable og impermeable flater, se formel 15. For RIS er andel impermeable flater satt til 13%. Som påpekt tidligere er det en viss usikkerhet rundt hva som er riktig avgrensning av nedbørsfeltet. Her er det tatt utgangspunkt i

tall fra Dalen (2011). Velges en annen avgrensning av feltet vil dette påvirke andelen permeable og impermeable flater og dermed N_{eff} .

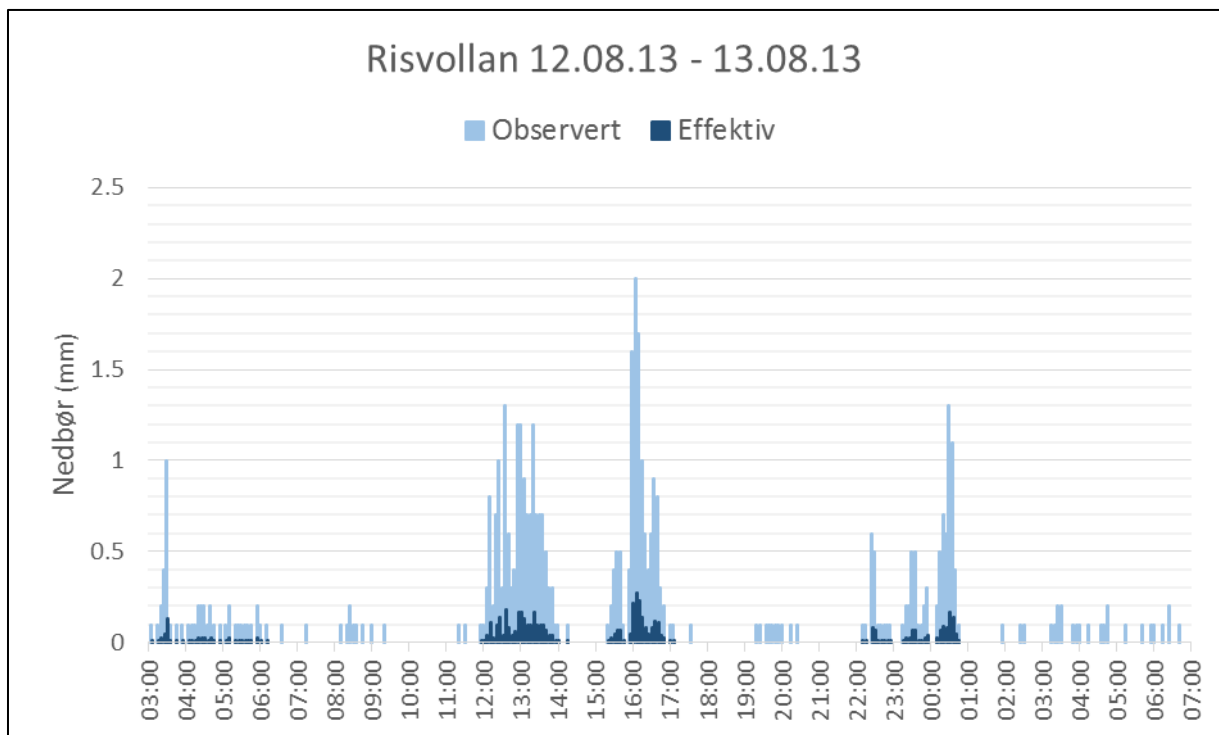
Videre viser Tabell 3 at total mengde infiltrert vann, $F(t)$, for hendelse 2 og 3 er svært høy. Dette er på grunn av at infiltrasjonsraten, $f(t)$, er lik nedbørens intensitet, w , gjennom største delen av begge disse hendelsene, se Figur 21 og Figur 22 for henholdsvis hendelse 2 og 3. Beregnet infiltrasjonsandel for de to hendelsene er så stor at også her er andelen effektiv nedbør i stor grad bestemt av andel permeable og impermeable flater.



Figur 21: Green-Ampt infiltrasjonsrate, $f(t)$, for nedbørshendelse nr 2 (Tabell 3). X-akse illustrerer tiden mellom klokken 11:55 og 14:15 12.08.13. Varighet nedbør 2,33 t, intensitet, w , 0,66 cm/t. Gjelder for leirjord med hydraulisk konduktivitet, K , 0,34 cm/t, porøsitet, θ_e , 0,434, kapillærtrykk, ψ_f , 8,89 cm og vanninnhold ved starten av beregninger, θ_0 , lik 0,3.

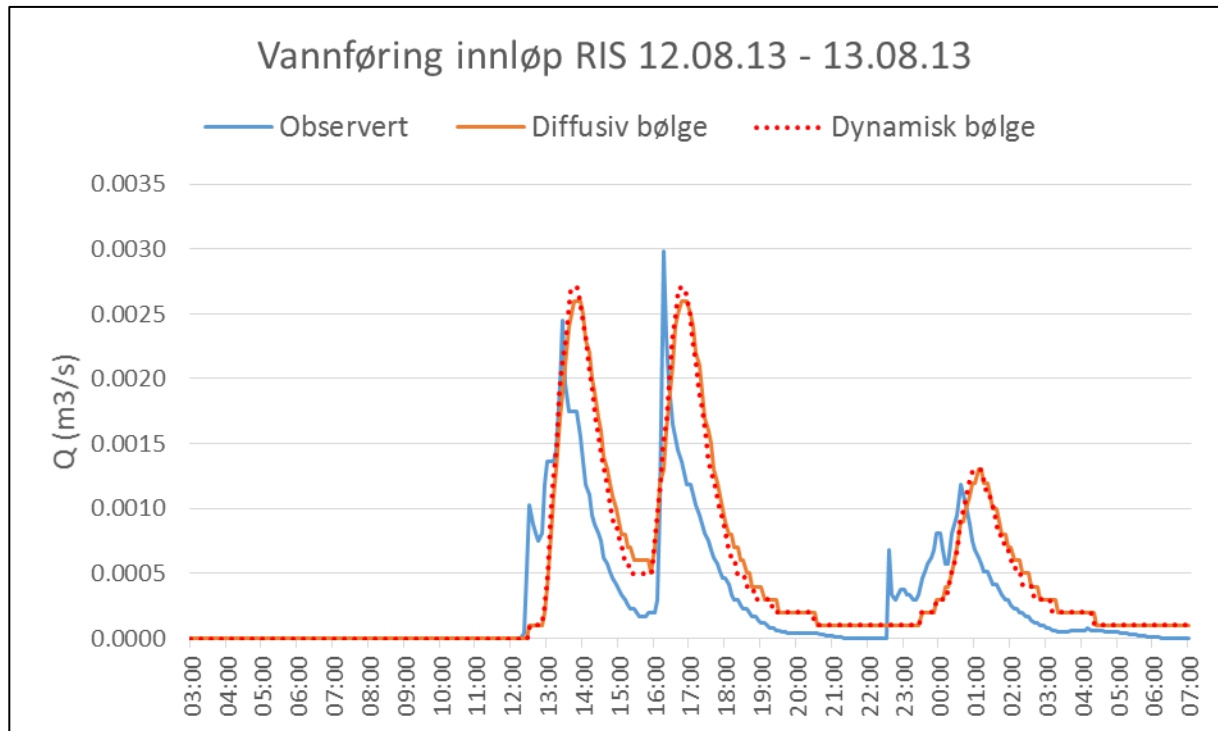


Figur 22: Green-Ampt infiltrasjonsrate, $f(t)$, for nedbørbørshendelse nr 3 (Tabell 3). X-akse illustrerer tiden mellom klokken 15:20 og 17:05 12.08.13. Varighet nedbør 1,75 t, intensitet, w , 0,71 cm/t. Gjelder for leirjord med hydraulisk konduktivitet, K , 0,34 cm/t, porøsitet, θ_e , 0,434, kapillærtrykk, ψ_f , 8,89 cm og vanninnhold ved starten av beregninger, θ_0 , lik 0,3.



Figur 23: Nedbør Risvolla målestasjon 12.08.13 – 13.08.13. Oppløsning 5 min. Observert nedbør i lyseblått og beregnet effektiv nedbør i mørkeblått.

Figur 23 viser observert og beregnet effektiv nedbør. Summen av observert nedbør er 46,60 mm. Summen av beregnet effektiv nedbør er 5,59 mm. Totalt reduseres nedbøren med 88%. Når modellen kjøres med beregnet effektiv nedbør oppnås en forklart varians, R^2 , lik 0,31 og 0,39 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge, se Figur 24.



Figur 24: Vannføring, Q , for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13. Observert vannføring for V-overløpet (blå) og simulert vannføring for beregnet effektiv nedbør. To simuleringer med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

Modellen ser her ut til å overestimere vannmengdene noe. Dette skyldes trolig at beregnet effektiv nedbør er for høy. Videre ser man en forskyvning (forsinkelse) i simulert respons. Maksimal observert vannføring inntreffer klokken 16:15, mens maksimal simulert vannføring inntreffer 30 og 25 minutter senere, for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge. Simuleringer gir relativt lik respons for hendelse 2 og 3. Dette stemmer ikke med observerte verdier som viser tydelig at hendelse 3 gir høyere spissvannføring sammenlignet med hendelse 2.

Valg av Mannings n vil kunne påvirke responstiden. Det er valgt en relativt høy Mannings n verdi for gress på 0,1. Tallet er foreslått av Engman (1986) og gjelder for sjiktstrømning under kraftig regn med intensiteter på 50-100 mm/t. Høyeste gjennomsnittlige nedbørintensitet for dette tilfellet er beregnet til 7,1 mm/t (se Tabell 3), noe som er betydelig lavere og dermed bør resultere i en lavere Mannings n verdi. Chow (1959) anbefaler en Mannings n verdi på rundt 0,03 for kort gress. Kan derfor tenkes at en Mannings n verdi på 0,1 er for høy og at nedjustering

av denne vil føre til raskere avrenning og dermed mer sammenfallende responstider mellom observert og simulert avrenning.

Som man ser av Figur 24 er resultatene fra simuleringer med bruk av de to ligningssettene, diffusiv og dynamisk bølge, relativt like. Beregnet Nash-Sutcliffe forklart varians indikerer at bruk av dynamisk bølge evner å predikere avrenning noe bedre enn diffusiv bølge. Dette stemmer med Brunner (2016b) hvor det påpekes at dynamisk bølge kan antas å gi mest nøyaktige resultater. Også Cea, Garrido og Puertas (2010) finner at bruk av dynamisk bølge gir mer nøyaktige resultater sammenlignet med diffusiv bølge.

Kalibrering av Mannings n

Det er vanlig prosedyre å kalibrere friksjonsparameteren til observerte data ved modellering av urban flom (Fewtrell *et al.*, 2008). I denne oppgaven foreligger ingen observerte data for Hornebergbekken hvor en 200 års hendelse skal modelleres. Modellen kan dermed ikke verifiseres. Dette er et velkjent problem som påpekes av flere (Hunter *et al.*, 2008; Dottori, Di Baldassarre og Todini, 2013). For å kunne si noe om modell-sensitivitet i forhold til variasjoner i Mannings n er dette testet for RIS hvor man har observerte data.

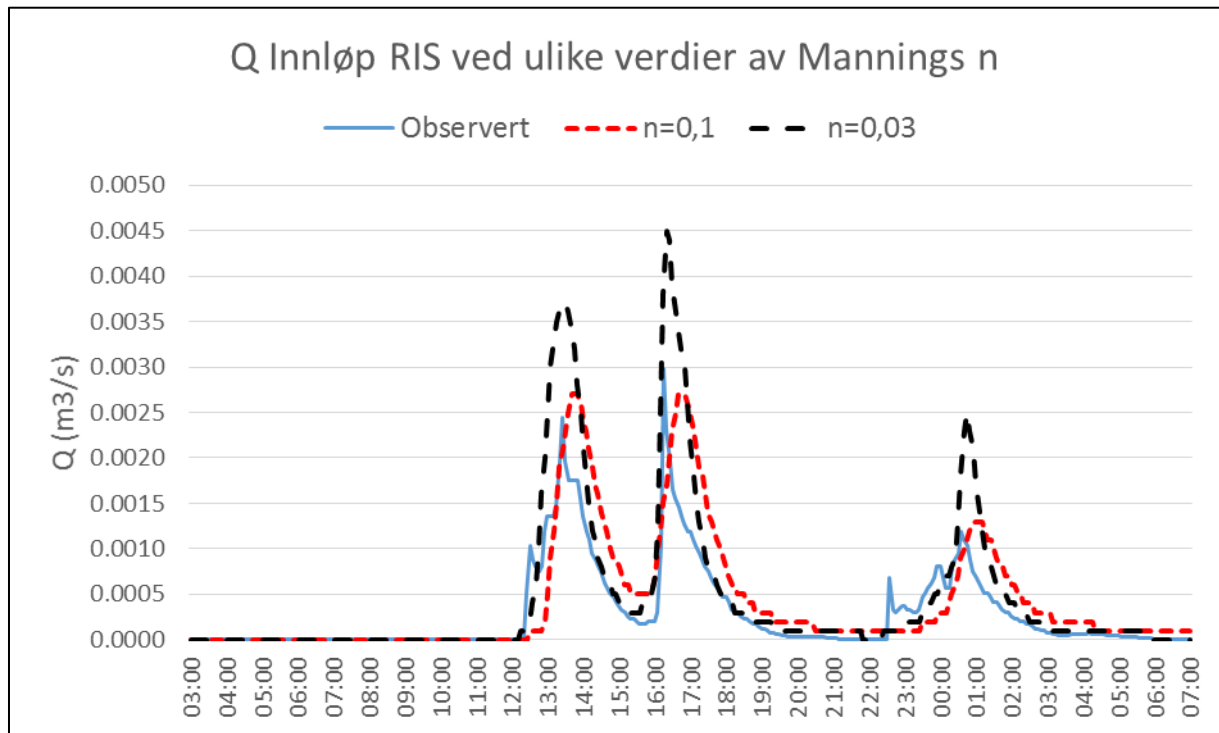
Nedbørsserie 1 er her simulert med bruk av to ulike verdier av Mannings n for gressflater: 0,1 og 0,03. Verdiene er hentet fra henholdsvis Engman (1986) og Chow (1959). Har valgt å ikke variere Mannings n for tak og asfalterte flater da disse utgjør en forholdsvis liten andel (13%) av feltet. Mannings n for tak og asfalterte flater er satt til 0,011, i henhold til Engman (1986), for begge simuleringer.

Som diskutert tidligere er en n verdi på 0,1 for gressflater relativt høy. Ser en forskyvning av responsen ved bruk av n lik 0,1. Ved n lik 0,1 inntreffer maksimal vannføring 25 minutter for sent i forhold til observerte verdier. Ved n lik 0,03 inntreffer maksimal vannføring 5 minutter for sent i forhold til observerte verdier, se Figur 25. Dette ser ut til å gjelde for hele serien ved $n=0,03$, man ser en generell forskyvning i riktig retning med tanke på responsen.

Av observert vannføring ser man tydelig at de to midterste nedbørshendelsene (2 og 3) genererer størst spissvannføring. Generert spissvannføring ved hendelse 3 er større enn for hendelse 2. Simuleringen med n lik 0,1 får ikke med denne forskjellen i spissvannføring for de to hendelsene. Simuleringen gir en spissvannføring på 0,0027 m³/s for begge hendelser. Ved Mannings n lik 0,03 får man derimot med denne forskjellen i spissvannføring for de to hendelsene. Til tross for dette er forklart varians for simuleringen -0,05. Dette skyldes

hovedsakelig at nedjusteringen av Mannings n ser ut til å gi for høy vannføring. Den høye vannføringen kan skyldes at effektiv nedbør er for høy.

Siden vannføringskurvens generelle «form» og *timing* ser ut til å stemme bedre ved bruk av n lik 0,03 tolkes dette som at en nedjustering av n er riktig og at det er sannsynlig at den største feilkilden her er beregnet effektiv nedbør.



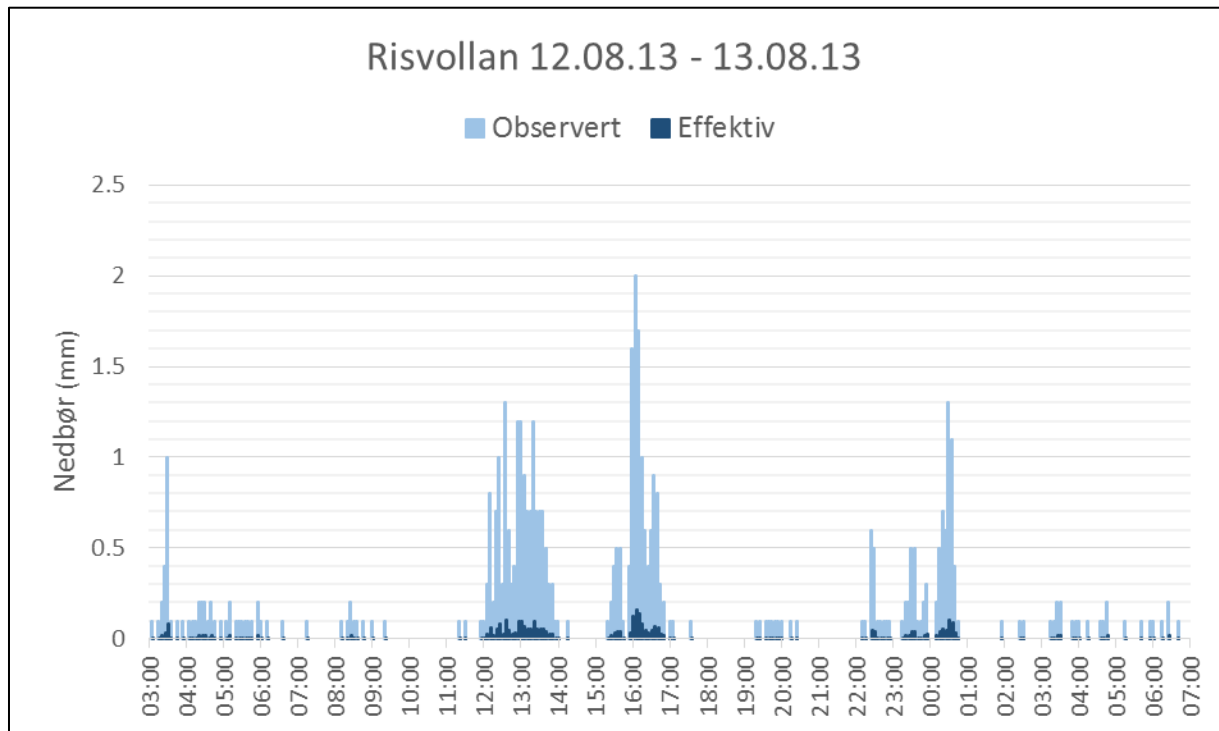
Figur 25: Vannføring, Q , ved ulike verdier av Mannings n for gressflater. Q for innløpet til Risvollan regnbed (RIS), nedbørsserie 1. Observert Q for V-overløpet (blå) og modellert Q ved $n=0,1$ (rød) og $n=0,03$ (svart). Bruk av ligningssett for dynamisk bølge.

Kalibrering av effektiv nedbør

Hvis man antar at en nedjustering av n er riktig vil dette føre til økt vannføring (se Figur 25) og krever derfor at man også må kalibrere effektiv nedbør. Tidligere beskrevet metode for beregning av effektiv nedbør baseres på bruk av Green-Ampt for permeable flater og en antagelse om ingen infiltrasjon for impermeable flater. Effektiv nedbør beregnes så ut i fra en vektning av andel permeable og impermeable flater. Metoden fører i praksis til at man får en nedre grense for andel effektiv nedbør. I praksis blir denne nedre grensen bestemt ut i fra andelen tette flater, altså 13%. Det vil si man ender opp med en nedre grense på 13% for definerte nedbørshendelser og resten neglisjeres, noe som totalt sett resulterer i en andel effektiv nedbør på rett under 13%. Ut i fra Tabell 3 ser man at nedre grense enten er nådd eller er nær ved å nås. Velger derfor å forkaste original metode og heller beregne effektiv nedbør med en

forenklet metode. Ved forenklet metode deles ikke nedbørsserien inn i separate hendelser. Det anslås en andel effektiv nedbør for hele nedbørsserien uten at noe av nedbøren neglisjeres.

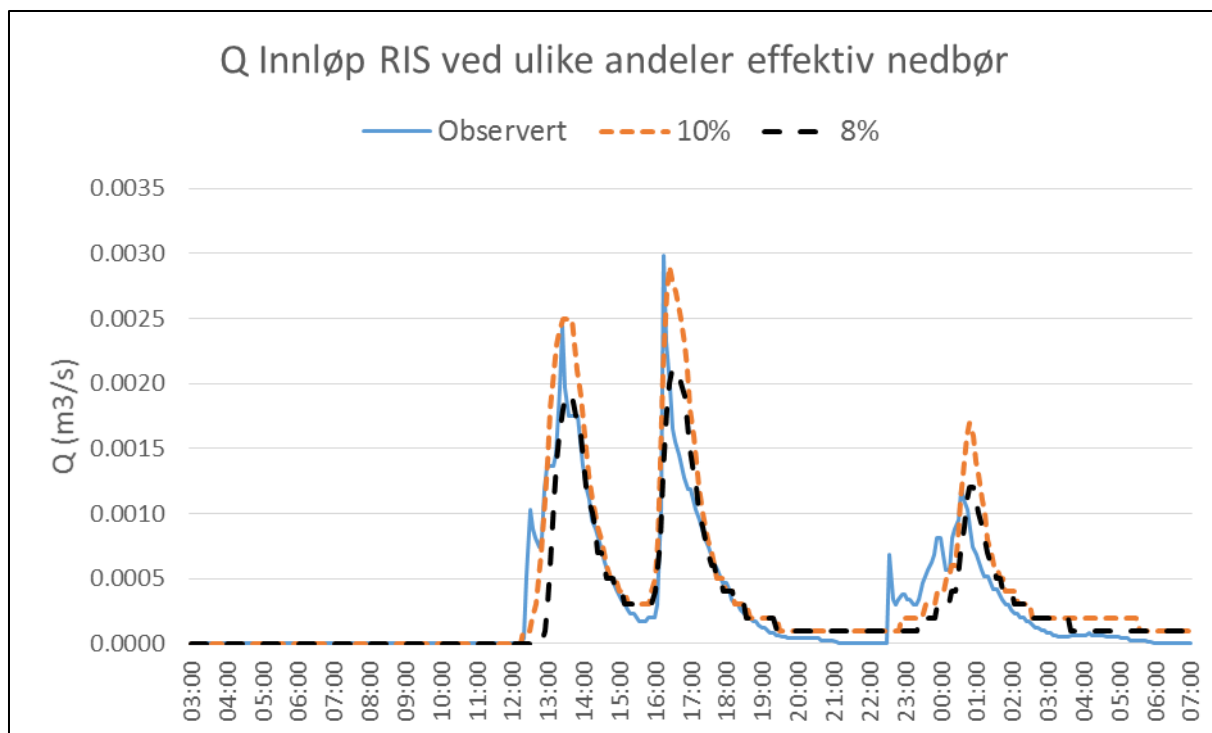
Beregnet effektiv nedbør utgjorde originalt 12% av observert nedbør. Ut i fra hydrogrammet (Figur 25) anslås effektiv nedbør til å være noe lavere enn dette. Modellen kjøres for 8% og 10% effektiv nedbør, Figur 26 illustrerer effektiv nedbør satt til 8% av observert nedbør.



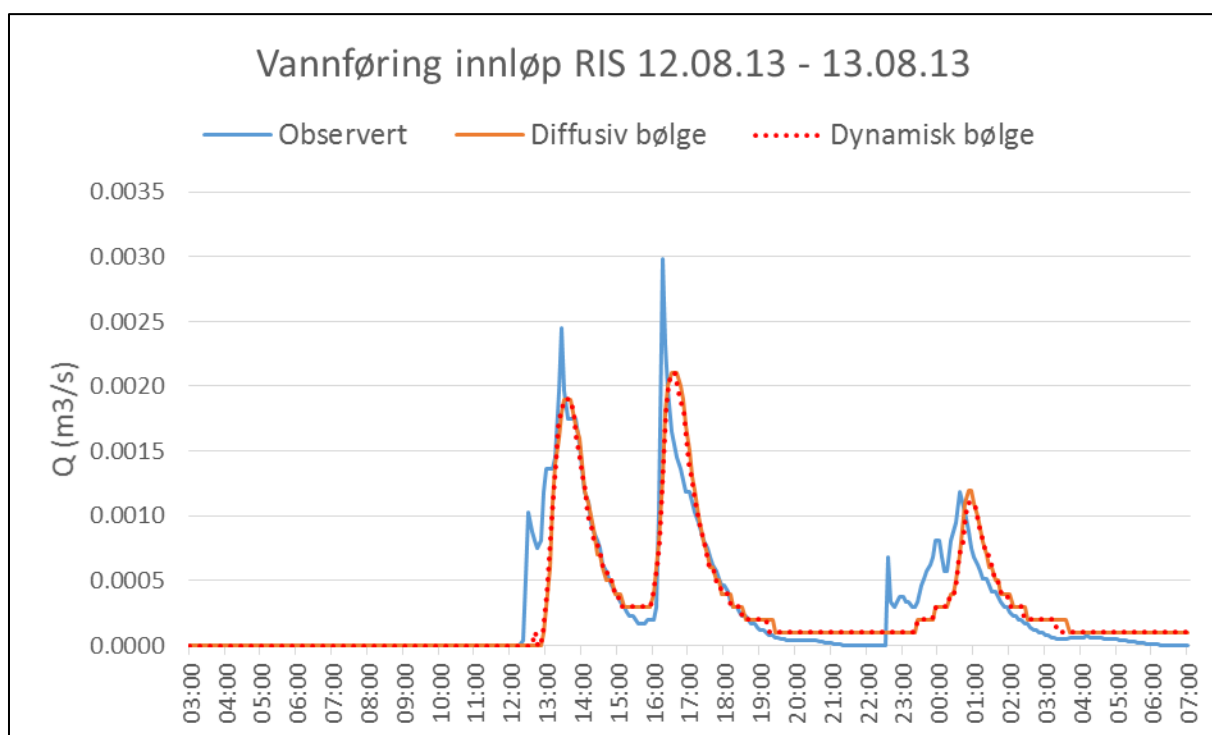
Figur 26: Nedbør Risvollan målestasjon 12.08.13 – 13.08.13. Oppløsning 5 min. Observert nedbør i lyseblått og beregnet effektiv nedbør i mørkeblått. Beregnet effektiv nedbør utgjør 8% av observert nedbør.

Når modellen kjøres med effektiv nedbør satt til 8% og 10% av observert nedbør oppnås en forklart varians på henholdsvis 0,77 og 0,71 ved bruk av ligningssett for diffusiv bølge. Se Figur 27 for modellert vannføring. Begge kjøringene oppnår altså et langt bedre resultat enn første kjøring som gav en forklart varians på 0,31 for diffusiv bølge. Ut i fra Figur 27 ser det ut som at 10% nedbør er for mye, mens 8% ser ut til å stemme bedre med observerte verdier. Vil derfor videre fokusere på resultater fra kjøring med 8% effektiv nedbør.

Ved kjøring av ligningssett for dynamisk bølge og 8% effektiv nedbør oppnås en marginal økning av forklart varians til 0,78, se Figur 28.



Figur 27: Vannføring, Q , ved ulike andeler effektiv nedbør. Q for innløpet til Risvollan regnbed (RIS), nedbørsserie 1. Mannings n for gressflater lik 0,03. Observert Q for V-overløp (blå) og modellert Q ved 10% (oransje) og 8% effektiv nedbør (svart). Bruk av ligningssett for diffusiv bølge.



Figur 28: Vannføring, Q , for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 12.08.13 – 13.08.13. Observert vannføring for V-overløpet (blå) og simulert vannføring for beregnet effektiv nedbør. Effektiv nedbør utgjør 8% av observert nedbør. To simuleringer med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

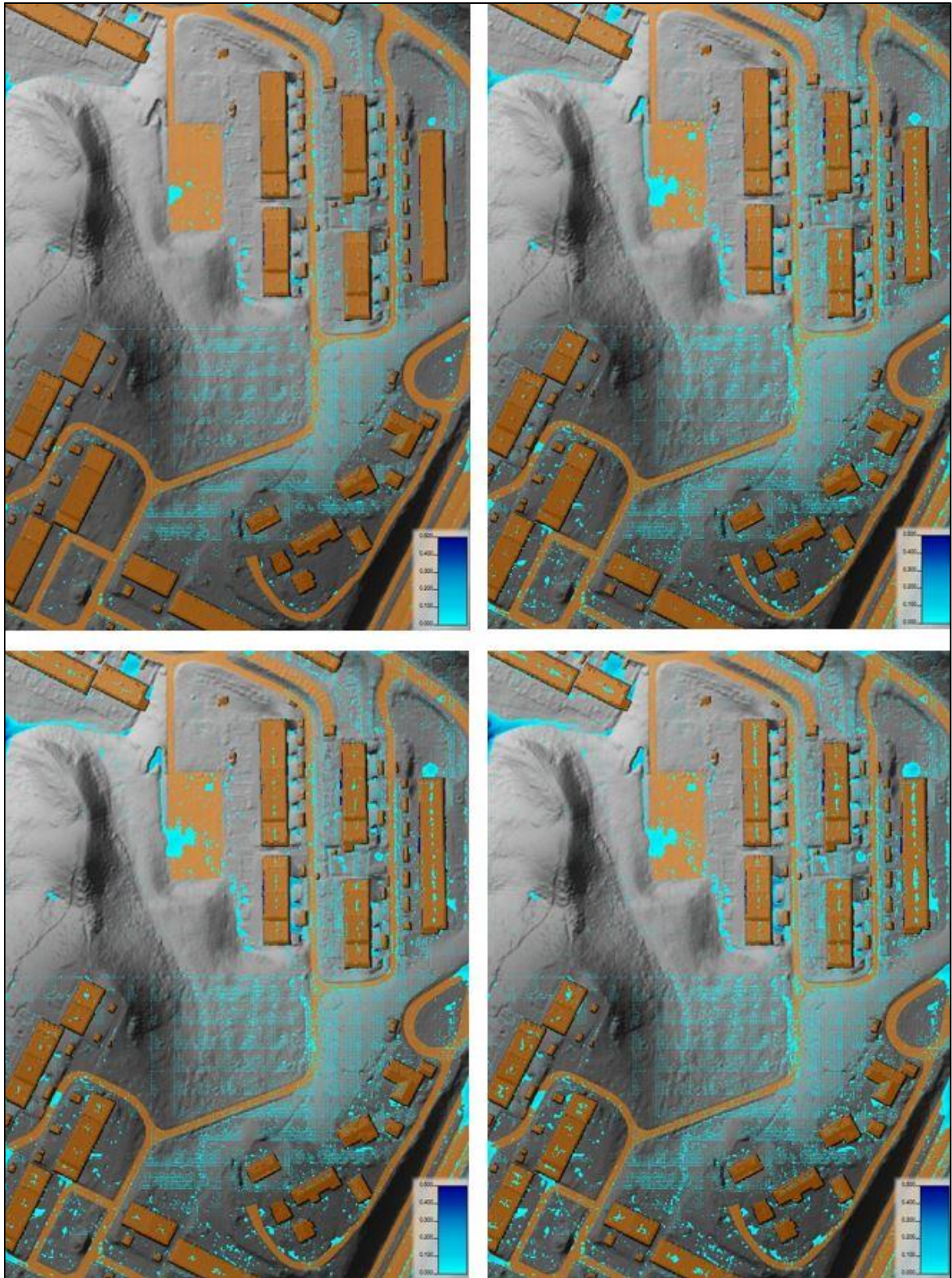
Maksimal observert vannføring inntreffer klokken 16:15, mens maksimal simulert vannføring inntreffer 15 minutter senere. Ser altså fortsatt en forsinkelse i simulert respons, men forsinkelsen er mindre sammenlignet med første kjøring av modellen (Figur 24). Ut i fra Figur 25 kan man anta at denne forbedringen med tanke på responsen kommer av nedjustering av Mannings n fra 0,1 til 0,03. Ytterligere nedjustering av Mannings n vil trolig gi raskere respons i modellen, men 0,025 er anbefalt nedre verdi for kort gress (Chow, 1959), og har dermed ikke så mye å gå på. I tillegg er det vanlige ved kalibrering av friksjonsparameteren å ende opp med verdier som er høyere enn de empirisk avledete verdiene (Fewtrell *et al.*, 2008). Er derfor grunn til å tro at resterende forsinkelse i respons skyldes andre faktorer.

I metoden med regn-på-grid som her er brukt er nedbør påført jevnt over hele feltet, men i virkeligheten vil asfalterte flater ha en mye større andel generert avrenning enn gressflatene. Dette er en svakhet ved denne typen modellering i HEC-RAS. Store deler av feltets asfalterte flater er lokalisert nær innløpet til regnbedet. Det er mulig at dette i praksis gir en raskere respons da de asfalterte flatene i nærheten vil generere avrenning raskere og i større mengder enn resten av feltet. Dette kan også være grunnen til at maksimal vannføring er lavere i modellen sammenlignet med observerte verdier – man får ikke med effekten av hurtig avrenning fra nærliggende asfalterte flater.

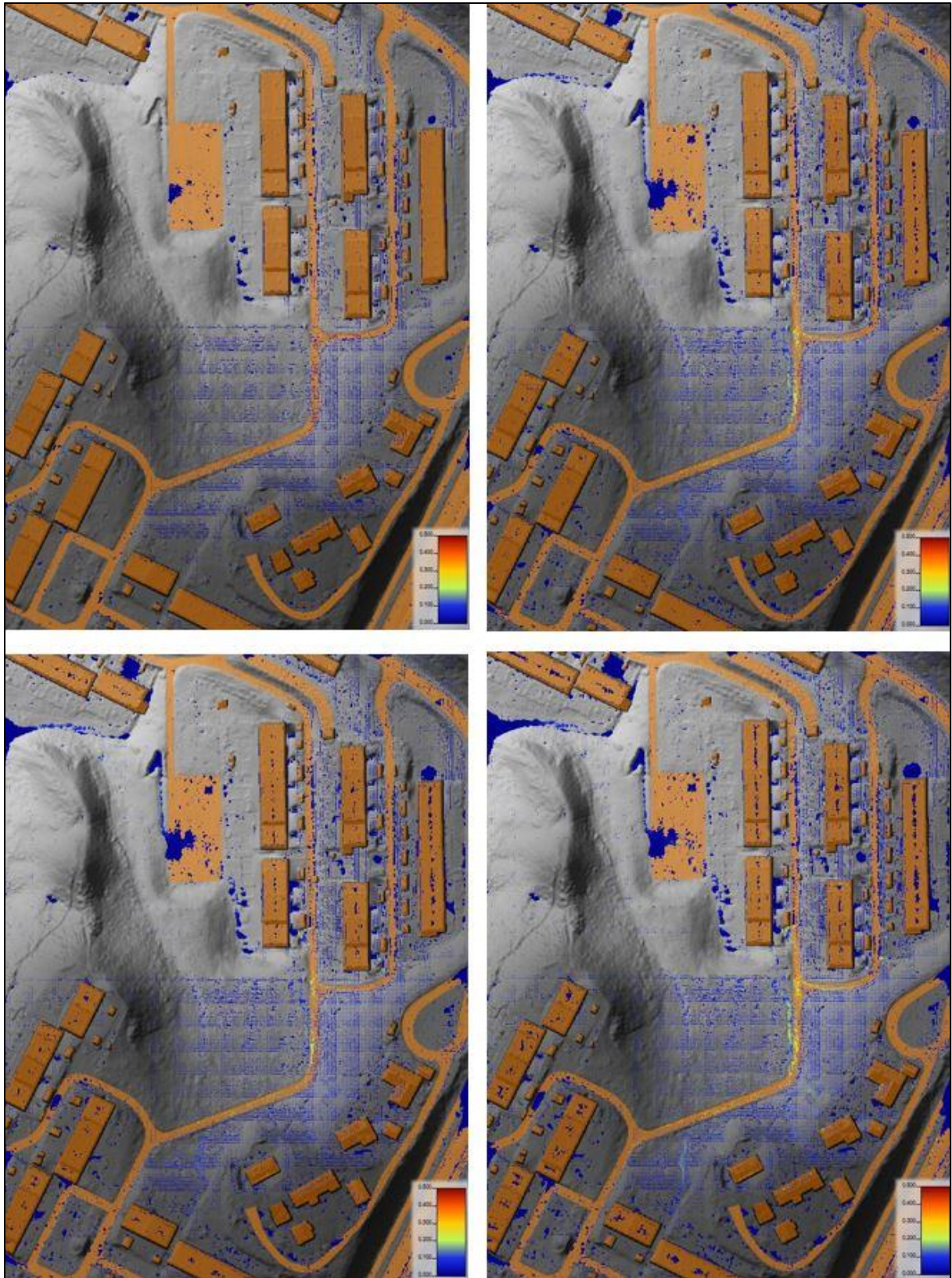
Figur 29 - Figur 32 viser fordeling av vann i 2D-området i forhold til dybder og hastigheter for både diffusiv og dynamisk bølge. Som forventet ser man ingen påfallende forskjeller med bruk av de to ligningssettene.

Figur 29 viser fordelte dybder ved fire ulike tidspunkter. Slik 2D-området er satt opp her vil ikke vann ha mulighet til å strømme ut av området. Ser derfor at det bygger seg opp dammer i områdets ytterkanter. Det er ikke funnet noen måte å la vann strømme ut av 2D-området når nedbør settes som eneste randbetingelse. Ved et slikt oppsett er det derfor viktig at 2D-området er stort nok slik at området som skal studeres ikke berøres av slike unaturlige dammer. Ut i fra tidligere estimer av regnbedets nedbørfelt (se Figur 4) skulle dette ikke være noe problem her. Det vil si at oppdemmede dammer i modellen ikke påvirker oppstrøms vannivå og hastigheter i det aktuelle nedbørfeltet.

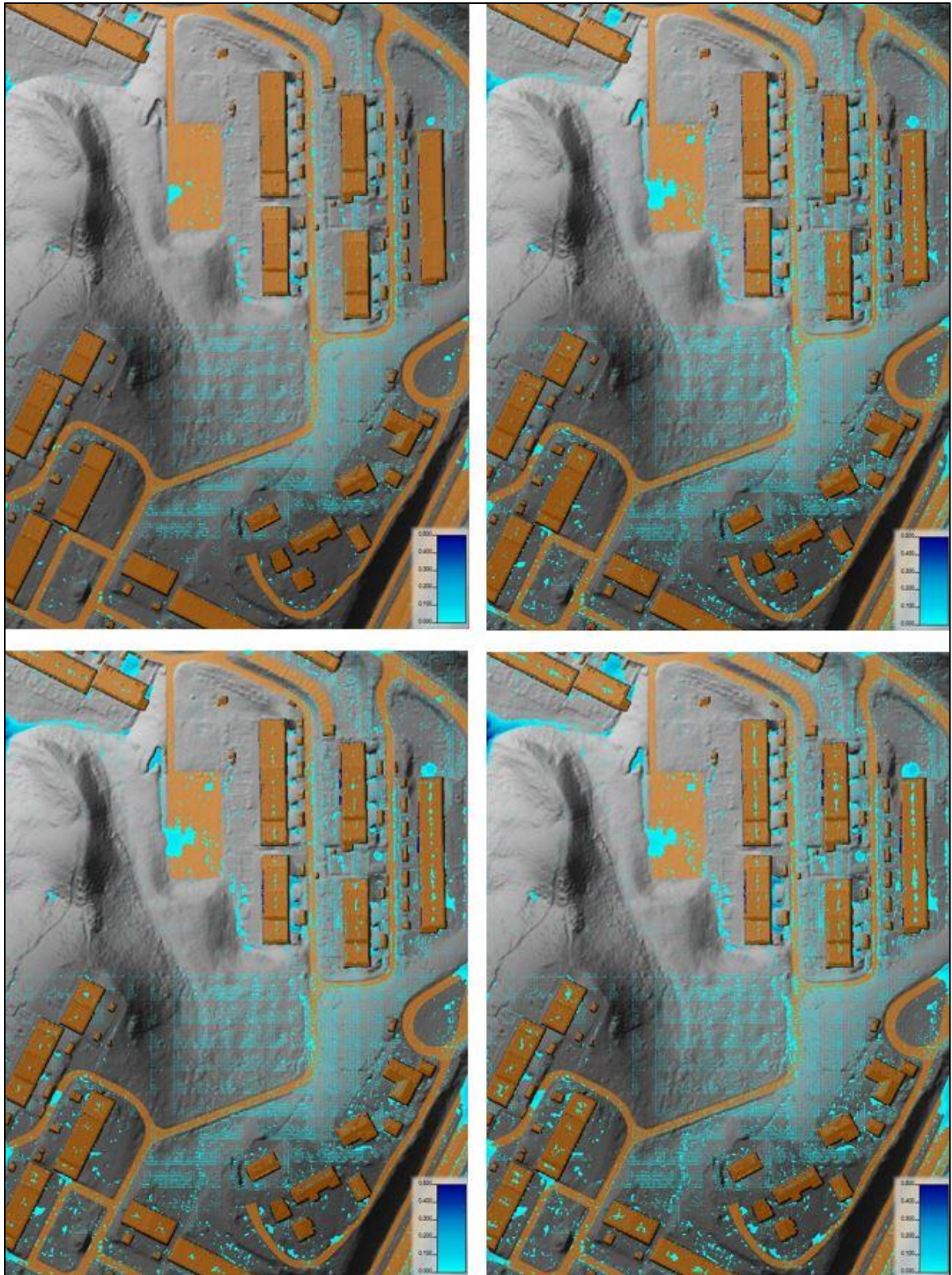
Modellerte hastigheter er relativt lave for både diffusiv (Figur 30) og dynamisk bølge (Figur 32). Høyeste hastigheter oppstår langs en veg sør-øst for regnbedet. Klokken 16:15 kommer hastighetene her opp i cirka 0,25 – 0,35 m/s.



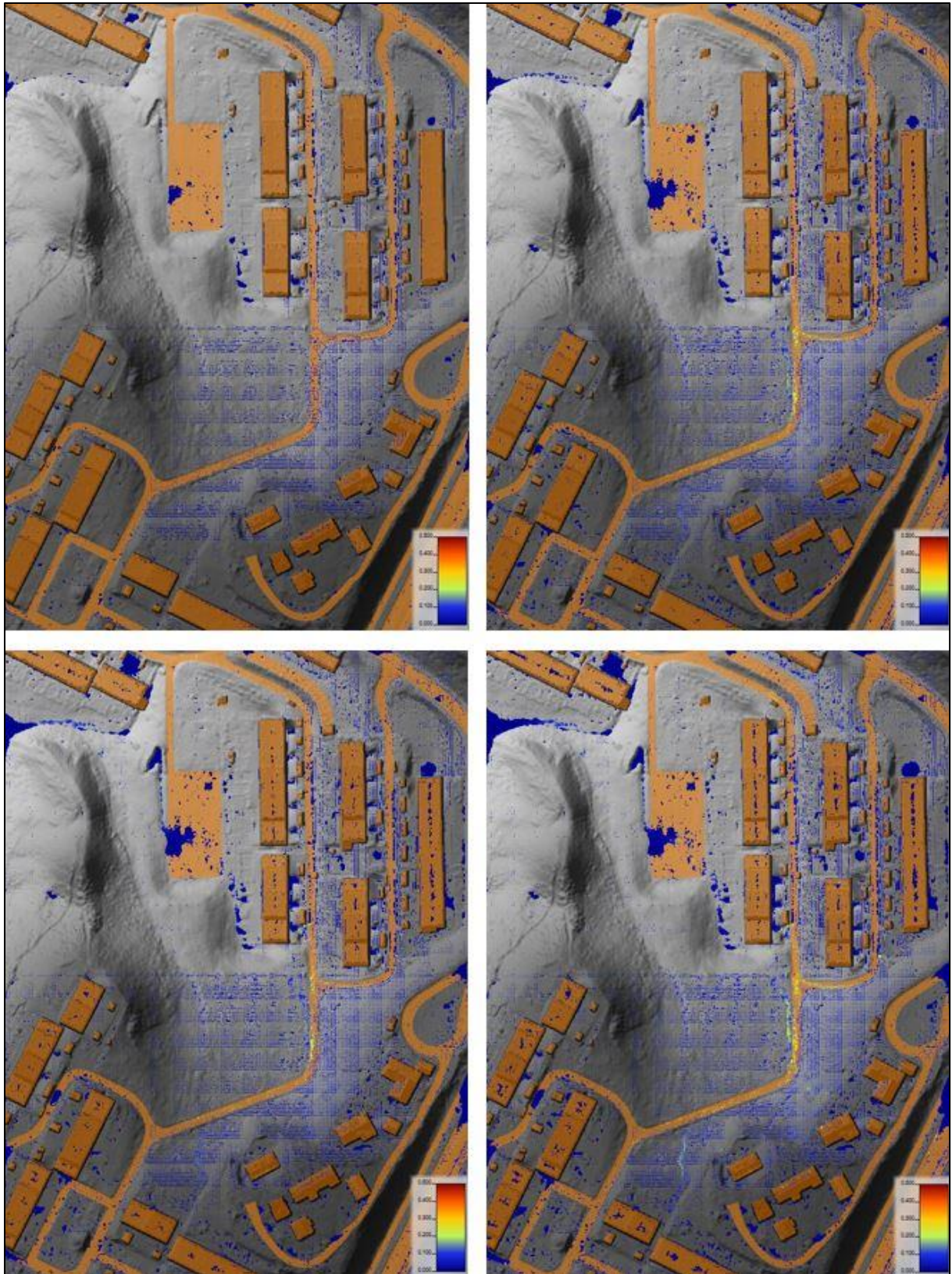
Figur 29: Resultat simulering (diffusiv bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13. Dybder for fire ulike tidspunkter 12.08.13. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 12:00, 13:15, 13:50 og 16:15. Fargeskala illustrerer dybder på 0 – 0,5 m. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.



Figur 30: Resultat simulering (diffusiv bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13. Hastigheter for fire ulike tidspunkter 12.08.13. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 12:00, 13:15, 13:50 og 16:15. Fargeskala illustrerer hastigheter på 0 – 0,5 m/s. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.



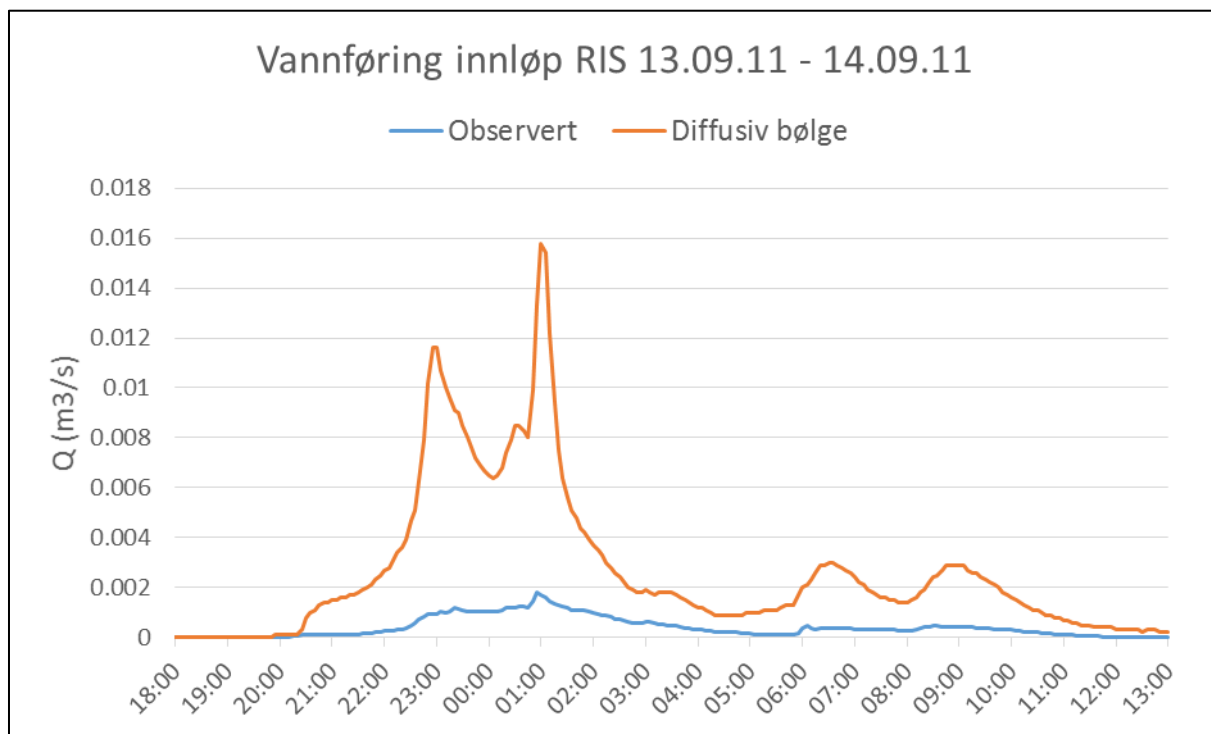
Figur 31: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13. Dybder for fire ulike tidspunkter 12.08.13. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 12:00, 13:15, 13:50 og 16:15. Fargeskala illustrerer dybder på 0 – 0,5 m. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.



Figur 32: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13. Hastigheter for fire ulike tidspunkter 12.08.13. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 12:00, 13:15, 13:50 og 16:15. Fargeskala illustrerer hastigheter på 0 – 0,5 m/s. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.

7.1.2 Nedbørsserie 2

Det ble først kjørt en simulering med den observerte nedbøren i sin helhet, altså uten å ta hensyn til infiltrasjon, se Figur 33. Dette gav svært høy simulert vannføring sammenlignet med observert vannføring og illustrerer nødvendigheten av å ta hensyn til infiltrasjon ved å beregne effektiv nedbør.



Figur 33: Vannføring, Q , for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 13.09.11 – 14.09.11. Simulert vannføring fra observert nedbør. Simulering kjørt med ligningssett for diffusiv bølge.

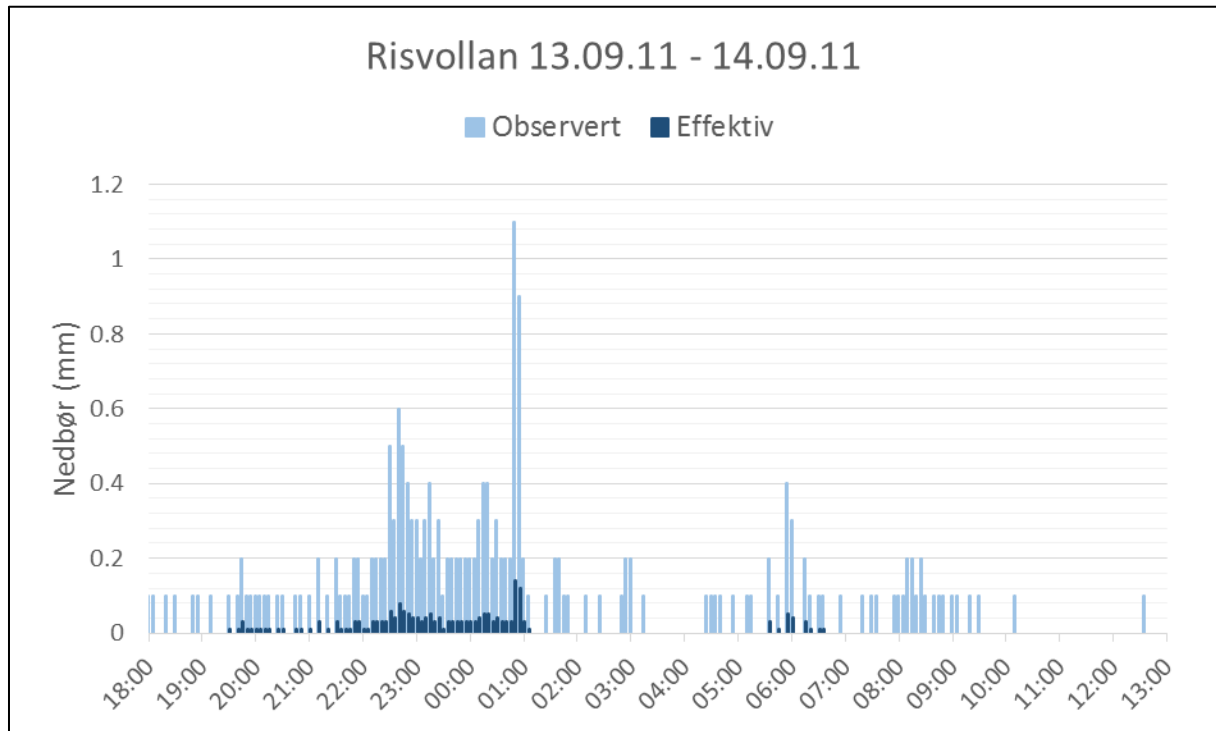
For å beregne effektiv nedbør er nedbørsserien delt inn i to nedbørshendelser. Tabell 4 viser beregnet andel effektiv nedbør, N_{eff} , for hver av de to hendelsene.

Hendelse nummer	Start tid	Slutt tid	Varighet (t)	Sum nedbør (mm)	w (cm/t)	$F(t)$ (mm)	N_{eff}
1	19:30	01:05	5,60	14,00	0,25	14,00	0,13
2	05:35	06:35	1,00	1,50	0,15	1,50	0,13

Tabell 4: Nedbørsserie 2 inndelt i to separate nedbørshendelser. Tabellen viser start og slutt tider, varighet, sum, gjennomsnittlig intensitet (w), total mengde infiltrert vann ($F(t)$) og beregnet andel effektiv nedbør (N_{eff}) for hver hendelse.

Ser av Tabell 4 at ingen av de to hendelsene har en intensitet, w , som er større enn hydraulisk konduktivitet på 0,34 cm/t. Dermed beregnes all nedbør som faller på permeable flater til å gå til infiltrasjon. Figur 34 viser observert og beregnet effektiv nedbør. Summen av observert

nedbør er 20,80 mm. Summen av beregnet effektiv nedbør er 2,03 mm. Totalt reduseres nedbøren med 90%.

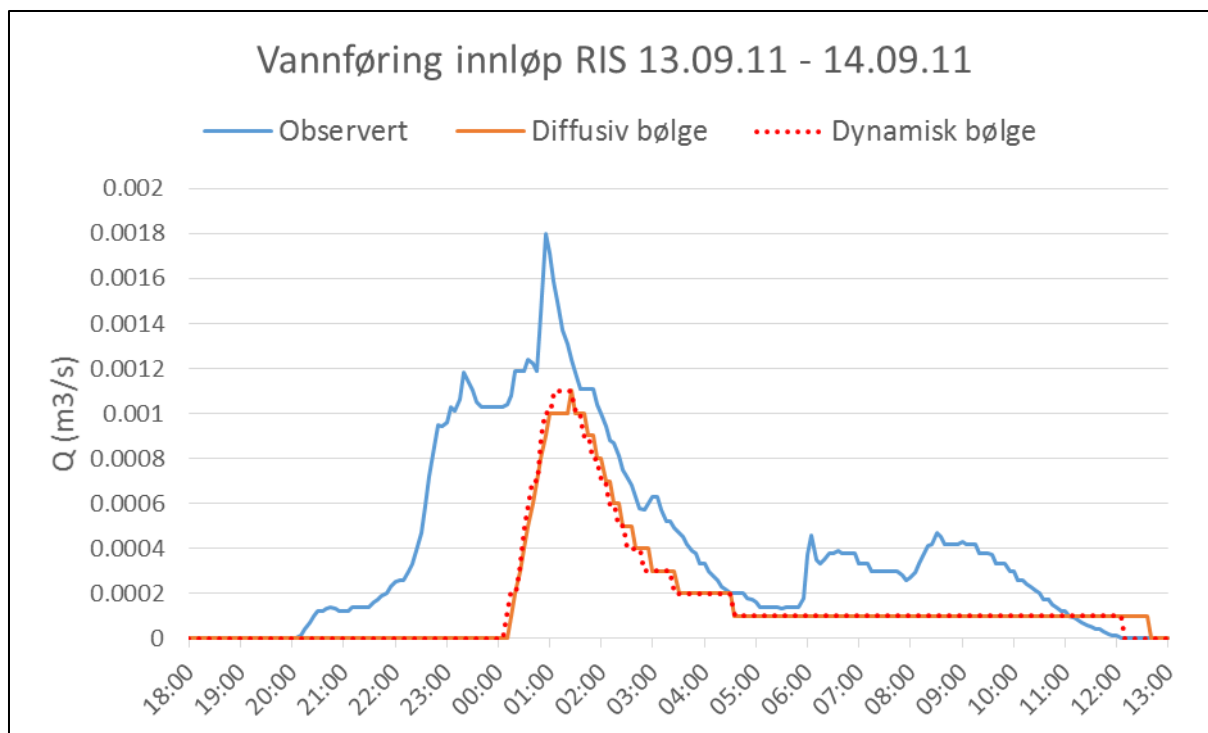


Figur 34: Nedbør Risvollan målestasjon 13.09.11 – 14.09.11. Oppløsning 5 min. Observert nedbør i lyseblått og beregnet effektiv nedbør i mørkeblått.

Når modellen kjøres med beregnet effektiv nedbør oppnås en forklart varians, R^2 , lik 0,11 og 0,14 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge, se Figur 35. Det er langt mindre overensstemmelse for observert og modellert vannføring for denne nedbørsserien sammenlignet med første simulering av nedbørsserie 1. Modellert vannføring er mye lavere enn observert vannføring, noe som tyder på at infiltrasjonsandelen er mindre enn forventet. Dette er motsatt fra tilfellet med nedbørsserie 1 hvor første kjøring av modellen gav vannføringsverdier som var noe høyere enn observerte verdier.

Ved beregning av effektiv nedbør er det her gjort en del antagelser. Nedbørsserien er delt inn i kun to hendelser, all nedbør mellom disse hendelsene neglisjeres – antar at dette går til infiltrasjon. I dette tilfellet kan det se ut som for mye av nedbøren er neglisjert.

Det er gjort en antagelse om at nedbørsfeltet er helt tørt ved starten av simuleringen. Hvis denne antagelsen er riktig er det ikke nødvendig å ta hensyn til gropmagasinering i feltet ved beregning av effektiv nedbør. Er derimot antagelsen feil og det allerede er vann i feltet vil dette gi økt avrenning og effektiv nedbør må justeres opp.



Figur 35: Vannføring, Q , for innløpet til Risvollan regnbed (RIS) 13.09.11 – 14.09.11. Observert vannføring for V-overløpet (blå) og simulert vannføring for beregnet effektiv nedbør. To simuleringer med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

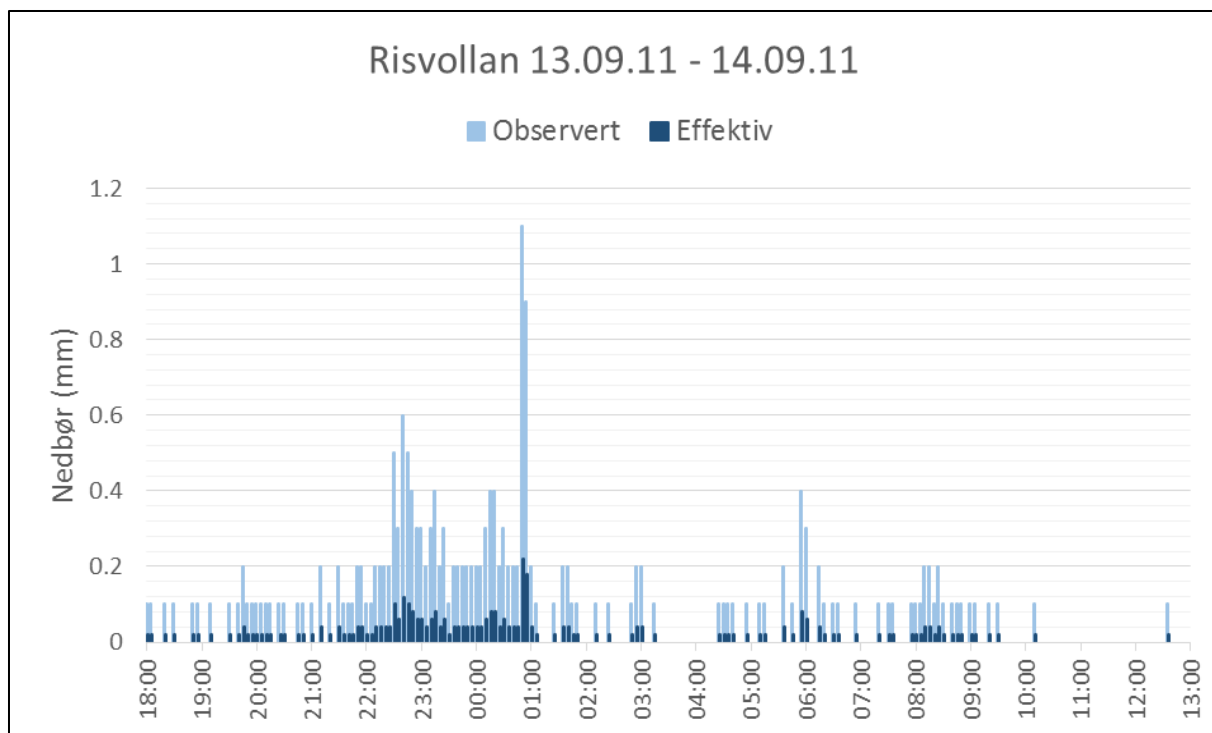
Kalibrering av effektiv nedbør

Bruk av en forenklet metode for å anslå andel effektiv nedbør gav gode resultater for nedbørsserie 1. Bruker derfor samme metode her. Beregnet effektiv nedbør utgjorde originalt 10% av observert nedbør. Ut i fra hydrogrammet (Figur 35) anslås ny andel effektiv nedbør til å være 20% av observert nedbør, se Figur 36.

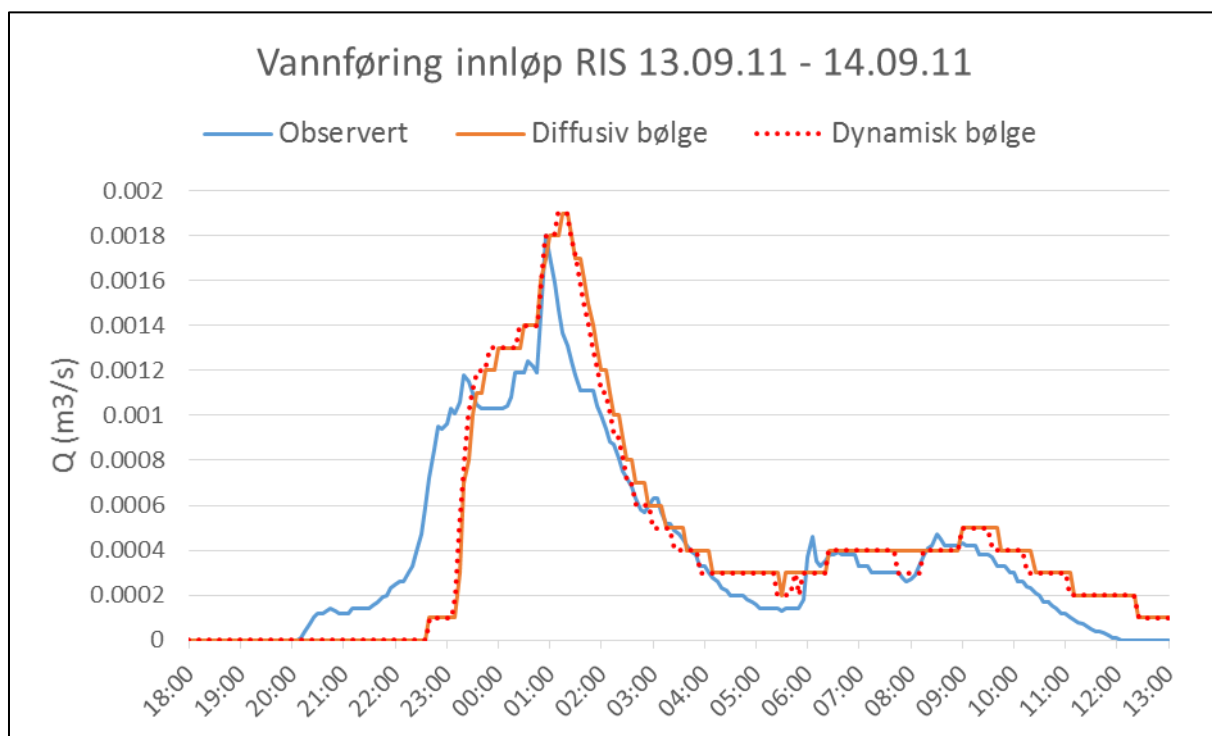
Når modellen kjøres med 20% effektiv nedbør oppnås en forklart varians, R^2 , lik 0,68 og 0,72 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge, se Figur 37. Dette er et langt bedre resultat og tyder på at tidligere beregnet effektiv nedbør var for lav for denne nedbørsserien. Det kan også tyde på at antagelsen om at all nedbør mellom de største hendelsene infiltreres er feil.

I likhet med nedbørsserie 1 ser man her at responsen er forsinket. Eksempelvis inntreffer maksimal observert vannføring klokken 00:55, mens maksimal simulert vannføring inntreffer 20 (diffusiv bølge) og 15 minutter (dynamisk bølge) senere. Erfaring fra nedbørsserie 1 tyder på at kalibrering av Mannings n er nødvendig for at timingen her skal bli bedre.

I likhet med nedbørsserie 1 ser det ut til at bruk av dynamisk bølge gir noe bedre resultat.



Figur 36: Nedbør Risvollan målestasjon 13.09.11 – 14.09.11. Oppløsning 5 min. Observert nedbør i lyseblått og beregnet effektiv nedbør i mørkeblått. Effektiv nedbør tilsvarer 20% av observert nedbør.



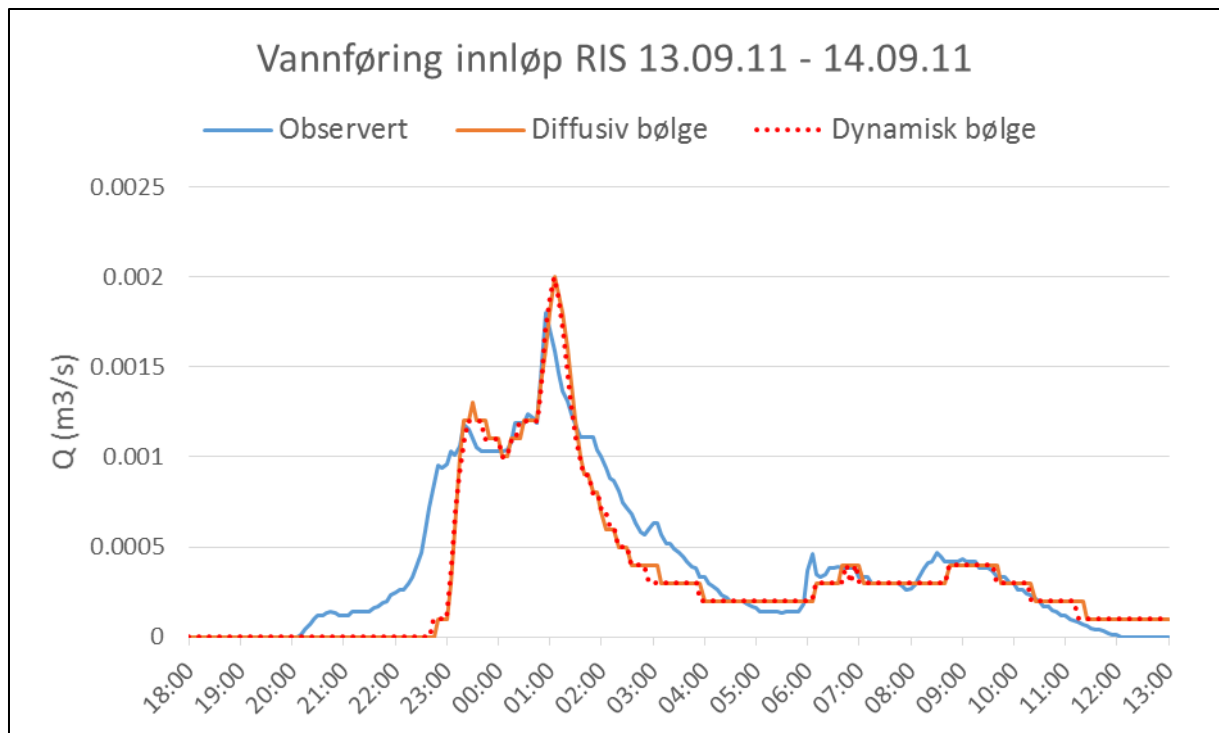
Figur 37: Vannføring, Q , for innløpet til RIS 13.09.11 – 14.09.11. Observert vannføring for V-overløpet (blå) og simulert vannføring for beregnet effektiv nedbør tilsvarende 20% av observert nedbør. Mannings n for gressflater lik 0,1. To simuleringer med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

Kalibrering av Mannings n

For å forbedre timingen av hydrogrammet i Figur 37 justeres Mannings n ned fra 0,1 til 0,03 slik det ble gjort for nedbørsserie 1. Kalibrering av nedbørsserie 1 gav økt vannføring ved nedjustering av Mannings n til 0,03. Tar hensyn til dette ved at effektiv nedbør reduseres fra 20 til 15%.

Når modellen kjøres med mannings n lik 0,03 og 15% effektiv nedbør oppnås en forklart varians, R^2 , lik 0,77 og 0,79 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge, se Figur 38. Maksimal observert vannføring inntreffer klokken 00:55, mens maksimal simulert vannføring inntreffer 10 minutter senere. Dette er en forbedring sammenlignet med de foregående simuleringene med Mannings n lik 0,1.

I likhet med nedbørsserie 1 ser man også her en forsinkelse i responsen selv etter at Mannings n er justert ned. Som diskutert tidligere er det sannsynlig at dette skyldes at nedbør fordeles jevnt over hele feltet. Modellen får dermed ikke med effekten av det som vil være hurtig avrenning fra regnbedets nærliggende tette flater. Her har HEC-RAS forbedringspotensiale. Hvis det hadde vært mulig å påføre romlig variabel nedbør vil man kunne ta høyde for at avrenning vil variere avhengig av flatetype. Dermed kunne man satt effektiv nedbør til å være høyere for impermeable flater. Dette ville trolig ført til raskere respons i modellen på grunn av regnbedets nærliggende asfalterte flater.

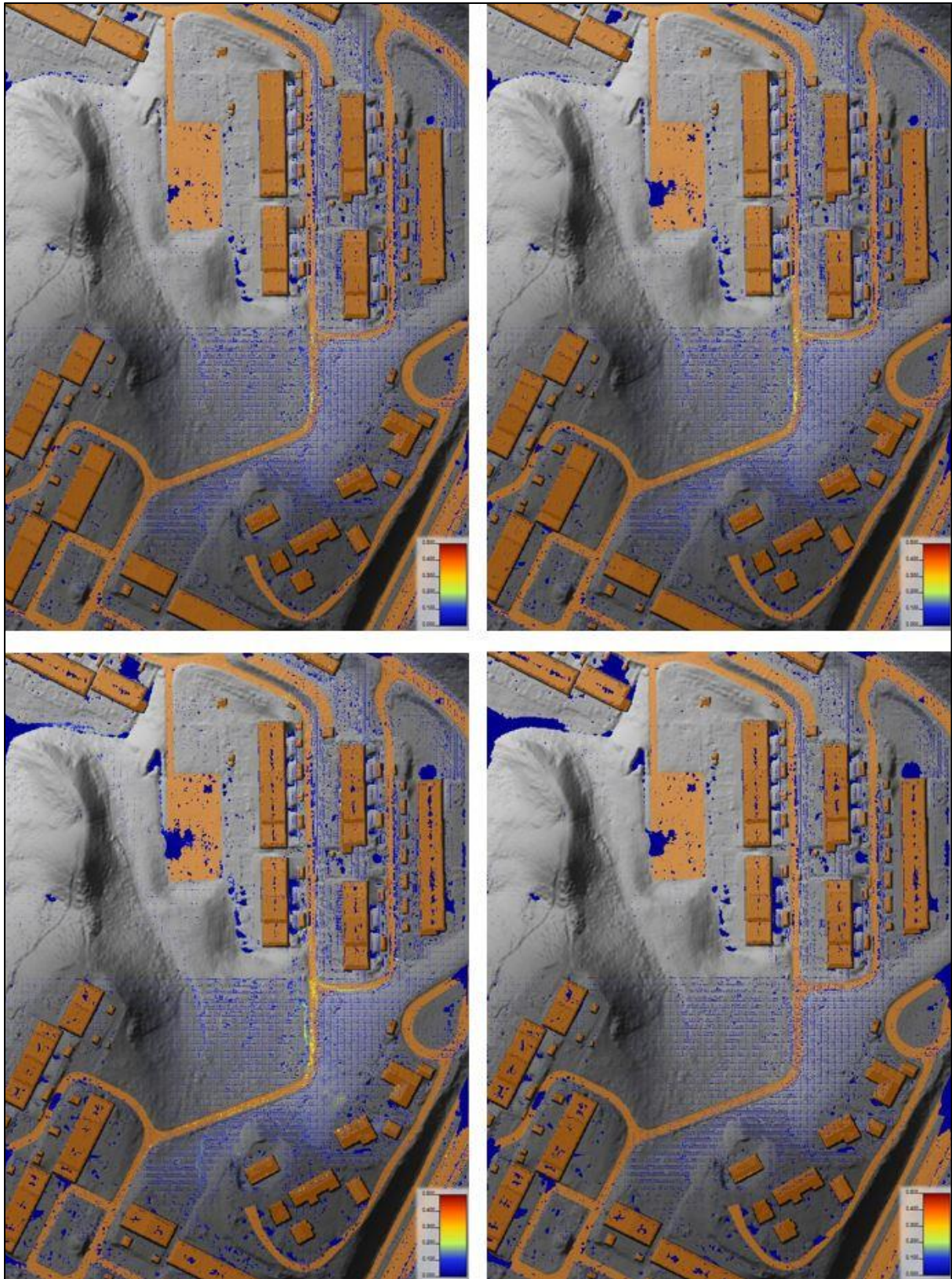


Figur 38: Vannføring, Q , for innløpet til RIS 13.09.11 – 14.09.11. Observert vannføring for V-overløpet (blå) og simulert vannføring for beregnet effektiv nedbør tilsvarende 15% av observert nedbør. Mannings n for gressflater lik 0,03. To simuleringer med bruk av to ulike ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

Figur 39 og Figur 40 viser fordeling av vann i 2D-området i forhold til henholdsvis dybder og hastigheter.



Figur 39: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 13.09.11 – 14.09.11. Dybder for fire ulike tidspunkter. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 22:40, 23:00, 00:55 og 05:00. Fargeskala illustrerer dybder på 0 – 0,5 m. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.



Figur 40: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 13.09.11 – 14.09.11. Hastigheter for fire ulike tidspunkter. Fra øvre-venstre, øvre-høyre, nedre-venstre til nedre-høyre: 22:40, 23:00, 00:55 og 05:00. Fargeskala illustrerer hastigheter på 0 – 0,5 m/s. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.

7.1.3 Bruk av ulike grid størrelser

Fewtrell *et al.* (2008) påpeker at det må gjøres et kompromiss mellom graden av detaljer og beregningstid. Et grid med lavere oppløsning vil redusere beregningstiden men ikke nødvendigvis få med seg like mange topografiske detaljer. For å teste hvorvidt endringer i beregningsnettets oppløsning og utforming påvirker modellen er begge nedbørsserier simulert med bruk av tre ulike grid: 1 m oppløsning (grid 1), 2 m oppløsning (grid 2) og 2 m oppløsning med 1 m oppløsning langs bruddlinjer (grid 3), se Tabell 5 for oversikt. Grid 1 er benyttet som standard grid i rapporten, alle foregående simuleringer er derfor gjennomført med bruk av grid 1.

Nedbørsserie	Grid	ΔT (s)	Simuleringstid (t)	R^2
1	1	0,2	12,65	0,77
	2	0,4	1,57	0,70
	3	0,2	3,55	0,89
2	1	0,5	3,83	0,77
	2	1,0	0,40	0,53
	3	0,5	0,98	0,80

Tabell 5: Simuleringer kjørt med tre ulike grid. Informasjon om tidskritt, ΔT , brukt i beregninger, simuleringstid og resulterende forklart varians, R^2 , for hver simulering. Alle simuleringer gjort med bruk av diffusiv bølge.

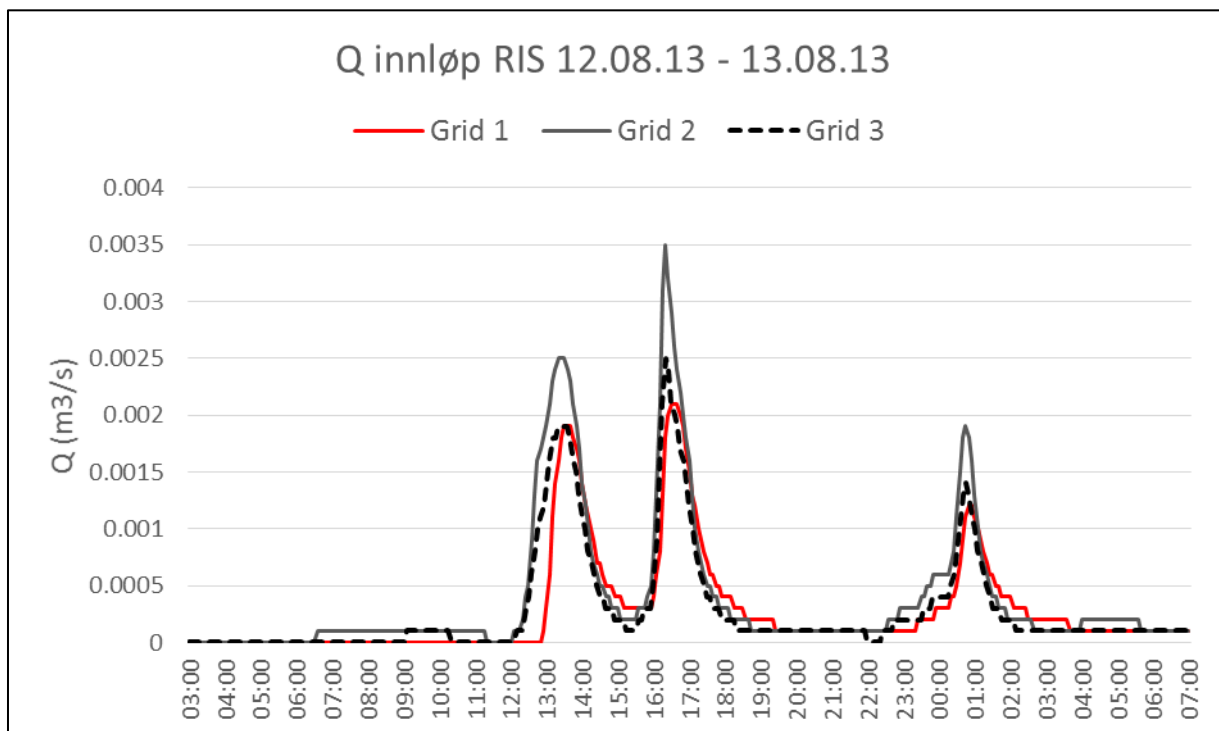
I følge Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) bør høyoppløselige data utgjøre basisen for hydraulisk modellering når slike data er tilgjengelige. I dette arbeidet ligger derfor en DHM med 0,25 m oppløsning til grunn for samtlige modeller uavhengig av beregningsnettets grid størrelse.

Figur 41 viser resulterende vannføring for nedbørsserie 1 ved bruk av de tre ulike gridene. Grid 1 gir en forklart varians i forhold til observerte verdier på 0,77. Til sammenligning gir grid 2 og grid 3 henholdsvis 0,70 og 0,89. Modellen sammenfaller altså, i dette tilfellet, dårligere med observerte verdier ved å redusere oppløsning til 2 m for hele gridet. Grid 3 ser derimot ut til å gi bedre resultater enn grid 1 som har høyere oppløsning.

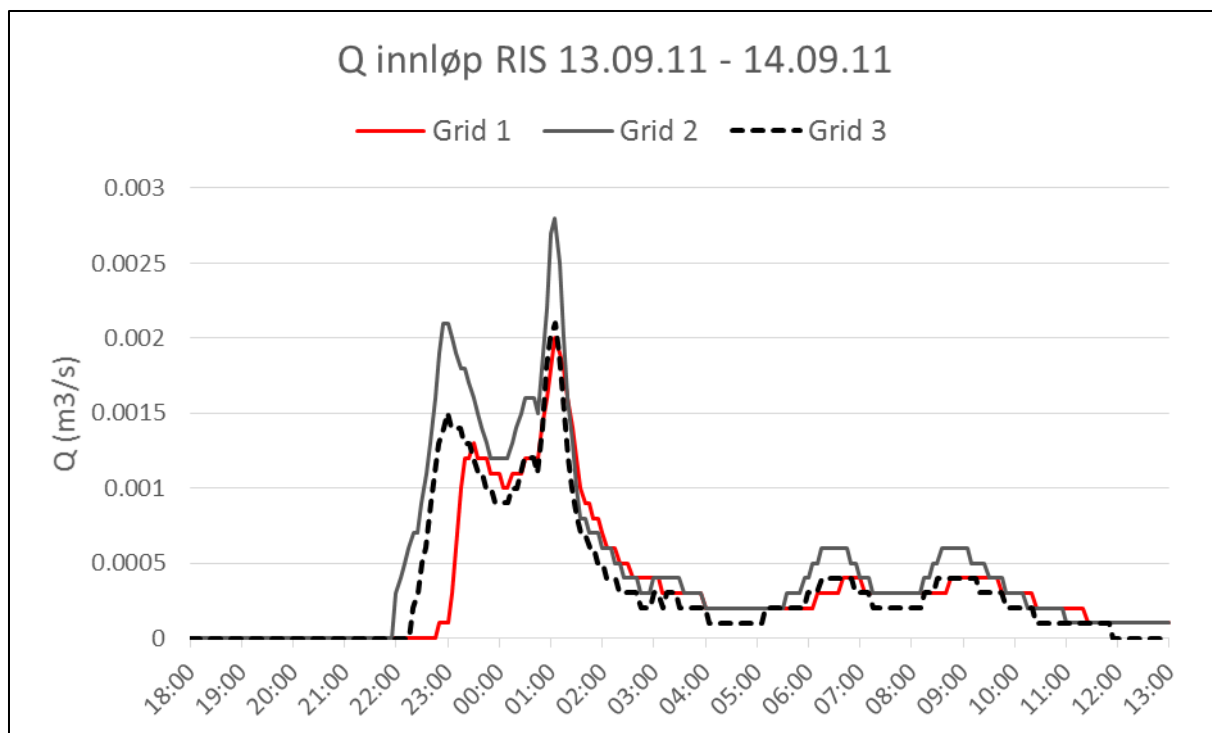
Nedbørsserie 2 gir lignende resultater, se Figur 42. Med grid 1 oppnås en forklart varians på 0,77. Ved bruk av grid 2 og grid 3 oppnås henholdsvis 0,53 og 0,80. Igjen faller forklart varians ved bruk av grid 2, mens den faktisk blir høyere ved bruk av grid 3. Dette tyder på at det er

viktig å få med topografien rundt vegkanter o.l. ved økning av grid størrelse, noe som også poengteres av Hunter *et al.* (2008). Det demonstrerer også et poeng som trekkes frem av Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013), nemlig at høyere oppløsning ikke nødvendigvis øker nøyaktigheten av resultatene.

Det er interessant å se at det er mulig å oppnå gode, til og med bedre, resultater ved å øke grid størrelsen, da dette reduserer simuleringstiden betraktelig. For nedbørsserie 1 gir det en reduksjon i simuleringstid på hele 72% å velge grid 3 fremfor grid 1. Tilsvarende gir dette for nedbørsserie 2 en reduksjon på 74%.



Figur 41: Modellert vannføring, Q , ved bruk av ulike grid. Q innløp Risvolla regnbed (RIS) nedbørsserie 1. Grid 1 har 1 m oppløsning, grid 2 har 2 m oppløsning og grid 3 har 2 m oppløsning med 1 m oppløsning langs bruddlinjer. Bruk av ligningssett for diffusiv bølge.



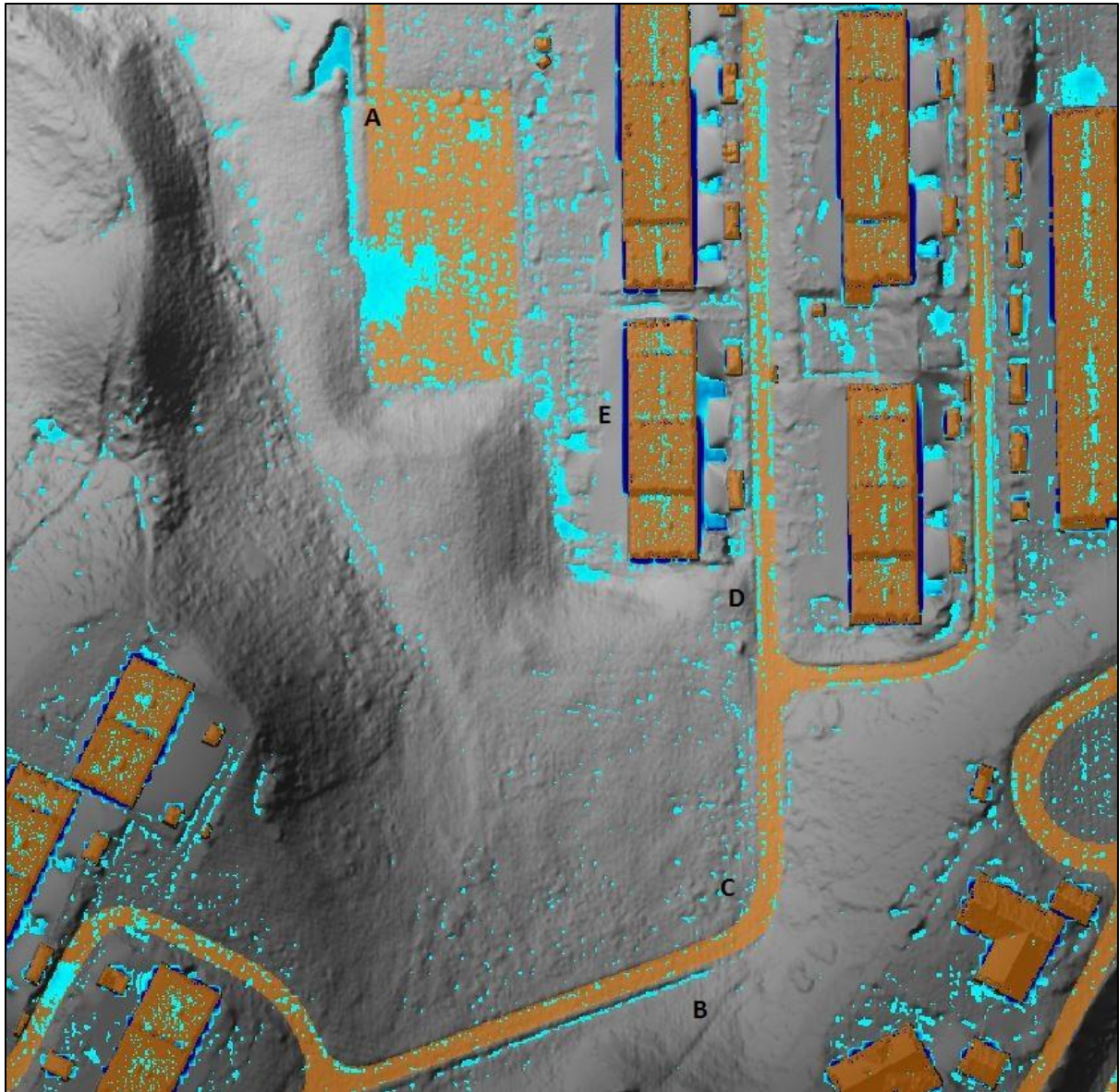
Figur 42: Modellert vannføring, Q , ved bruk av ulike grid. Q innløp Risvollan regnbed (RIS) nedbørsserie 2. Grid 1 har 1 m oppløsning, grid 2 har 2 m oppløsning og grid 3 har 2 m oppløsning med 1 m oppløsning langs bruddlinjer. Bruk av ligningssett for diffusiv bølge.

7.1.4 Visuell verifikasjon av modellert vannstrøm

I forbindelse med prosjektoppgaven ble det gjort en befaring av feltet under et nedbørstilfelle 19.02.17. Bildene fra befaringen er brukt her for å verifisere modellert vannstrøm i HEC-RAS. Modellert vannstrøm var særlig synlig i grøfter og på asfalterte flater. Fordelingen av vann i feltet ser ut til å stemme ganske bra. Dette kommer tydelig frem ved punkt A (Figur 43) hvor modellen får med seg at vannet går via en gresskledd vannveg før det når regnbedets innløp, se Figur 6. Ved punkt B (Figur 43) ser man tydelig at det renner vann i en grøft ved veien, noe som bekreftes av bilder fra befaring, se Figur 44.

I modellen renner vannet av vegen ved punkt C (Figur 43), dette bekreftes av bilder fra befaring, se Figur 45 (til venstre). Ved punkt D i modellen renner vannet tydelig på venstre side av vegen, noe som også kan bekreftes, se Figur 45 (til høyre).

Ved punkt E (Figur 43) sees tydelig modellert vannstrøm fra tak. I realiteten er alle tak i området koblet til ledningsnett via direkte taknedløp. Følgelig kan modellert vannstrøm ikke bekreftes. Dette er en viktig feilkilde i modellen, da det sannsynligvis bidrar til økt vannføring inn i regnbedet. Konsekvensen av dette kan være at effektiv nedbør må justeres ned for å kompensere for urealistisk avrenning fra takflater.



Figur 43: Resultat simulering (dynamisk bølge) av nedbør for RIS 12.08.13 – 13.08.13. Utsnitt viser dybder kl 13:50 12.08.13. Bokstaver indikerer områder for visuell verifikasjon. Arealdekkelag med tak og asfalterte flater markert med oransje.



Figur 44: Synlig bekk i grøften til venstre ved punkt B. Stemmer med modellert vannstrøm i HEC-RAS. Befaring 19.02.17.



Figur 45: Bekreftet vannstrøm i felt. Til venstre: vannet renner ut av vegbanen ved punkt C. Til høyre: vannstrøm på vegens venstre side (sett mot nord) ved punkt D. Befaring 19.02.17.

7.1.5 Sammenligning av nedbørsserie 1 og 2

Nedbørsserie 1 og 2 er svært ulike med tanke på intensitet. Serie 1 karakteriseres av kortere nedbørsepisoder med høy intensitet. I serie 2 er nedbøren mye jevnere fordelt og det er ikke like lett å skille mellom ulike episoder.

Valgt metode for beregning av effektiv nedbør gir ikke tilfredsstillende resultater for de to seriene. For serie 1 gir første kjøring med beregnet effektiv nedbør for høye vannføringsverdier, for serie 2 gir første kjøring for lave verdier. Ut i fra dette kan man anta at beregnet andel av nedbør som går til infiltrasjon er for liten for serie 1 og for stor for serie 2. Dette tyder på at det er stor usikkerhet knyttet til beregning av infiltrasjon og effektiv nedbør.

Resultatene tyder på at det er nødvendig å kalibrere effektiv nedbør for hver enkelt nedbørsserie. Gode resultater oppnås ved bruk av en enklere metode hvor en anslår effektiv nedbør som en andel av observert nedbør. En andel på 8% og 15% gir gode resultater for henholdsvis nedbørsserie 1 og 2.

Det var nødvendig å kalibrere Mannings n for å oppnå bedre timing av hydrogrammet. En verdi på 0,011 og 0,03 for henholdsvis asfalt og gress gav gode resultater for begge serier. Flere Mannings n verdier kunne vært utprøvd, men det er antatt at resterende forsinkelse i modellrespons skyldes andre faktorer. Samme sett med Mannings n verdier gav gode resultater for begge nedbørsserier, noe som tyder på at denne parameteren kan kalibreres ved hjelp av kun én registrert nedbørsserie. Kan imidlertid ikke si dette med sikkerhet uten at Mannings n er kalibrert for flere nedbørsserier.

Kalibrert versjon av hver nedbørsserie ble modellert ved bruk av tre ulike grid. Standard grid benyttet i samtlige simuleringer har 1 m oppløsning og henvises til som grid 1. Grid 2 gav reduksjon i forklart varians for begge serier sammenlignet med grid 1. Grid 3 gav økning i forklart varians for begge serier. Gridets oppløsning og utforming påvirker altså modellert vannføring i stor grad. Resultatene tyder på at et grid med lavere oppløsning enn 1 m med fordel kan brukes så lenge oppløsningen holdes høy rundt bruddlinjer. Flere modelleringsforsøk med ulike grid må gjennomføres for å finne hva som er optimal utforming og oppløsning av gridet.

7.2 Hornebergbekken

En nedbørshendelse med returperiode 200 år (M200) er simulert med bruk av diffusiv og dynamisk bølge. Videre presenteres valgt modelloppsett basert på erfaringer fra RIS, beregning av effektiv nedbør for feltet og resultater fra modellert flomhendelse i forhold til romlig fordeling av dybder og hastigheter. Resultatene sammenlignes med kommunens aktsomhetskart for overvannsflo.

7.2.1 Modelloppsett i HEC-RAS

Da Hornebergbekken er et betydelig større felt sammenlignet med RIS var det nødvendig å gjøre et kompromiss mellom detaljeringsgrad og simuleringstid. Utprøving av ulike grid for RIS gav gode resultater ved bruk av grid med 2 m oppløsning og 1 m oppløsning langs veikanter, derfor ble dette valgt, se Figur 46.



Figur 46: Utsnitt fra 2D-området til Hornebergbekken i HEC-RAS. Viser beregningsnett (grid) med bruddlinjer (rosa linje) langs vegkanter. Grid oppløsning 2 m med 1 m oppløsning langs veikanter. Arealdekkelag for tak og asfalterte flater markert med blå-grå. Illustrerer et kryss lokalisert vest i nedbørsfeltet (der Leirfossvegen møter Fossegrenda).

Erfaringer fra RIS indikerte at en Mannings n verdi på 0,1 for gressflater kan være for høy. Utprøving av lavere verdi (0,3) hentet fra Chow (1959) gav bedre timing av hydrogrammet. I tillegg gjelder verdier hentet fra Engman (1986) for sjiktstrømming på flomsletter med 50 – 100 m lengde og med nedbørintensiteter på 50 – 100 mm/t. På grunn av feltets størrelse må man anta at det flere steder vil oppstå vannstrømmer som strekker seg over 100 m. Antar også at det

flere steder vil forekomme strømning over dybder som ikke lenger er så grunne at de kan defineres som sjiktstrømning. Gjennomsnittlig intensitet for nedbørshendelsen som her skal simuleres er 36,9 mm/t, altså lavere enn det Engman-verdiene er beregnet for. For Hornebergbekken velges derfor Mannings n verdier i henhold til Chow (1959). I følge Fewtrell *et al.* (2008) blir i praksis friksjonsparameteren ofte høyere enn de empirisk avledete verdiene. Da det ikke foreligger observerte data for området kan ikke friksjonsparameteren kalibreres. Må derfor anta et sett friksjonsparametere. Antar høyeste foreslåtte verdier av Mannings n. Dette gir 0,035 og 0,016 for henholdsvis gress og asfalt. Anbefalt verdi for takpapp er 0,014, men for enkelhets skyld settes også Mannings n for tak lik 0,016.

Ved utregning av nødvendig tidskritt i beregninger ble gjennomsnittlig cellestørrelse, ΔX , satt til 1 m og maksimal hastighet, V , antatt å være 10 m/s.

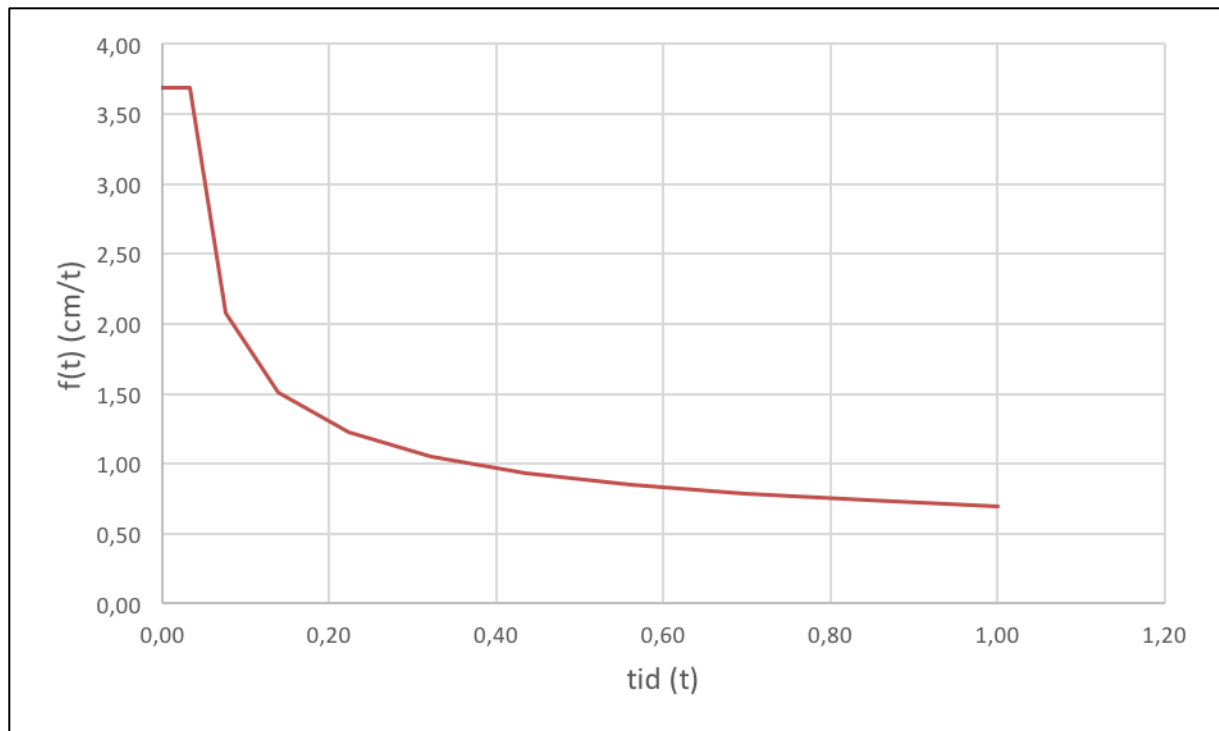
7.2.2 Beregning av effektiv nedbør

Symmetrisk hyetogram for nedbørshendelse med varighet 60 min og returperiode 200 år ligger til grunn. Lagt på en klimafaktor på 1,38. N_{eff} er beregnet på samme måte som for RIS. Se Tabell 6 for beregnede verdier.

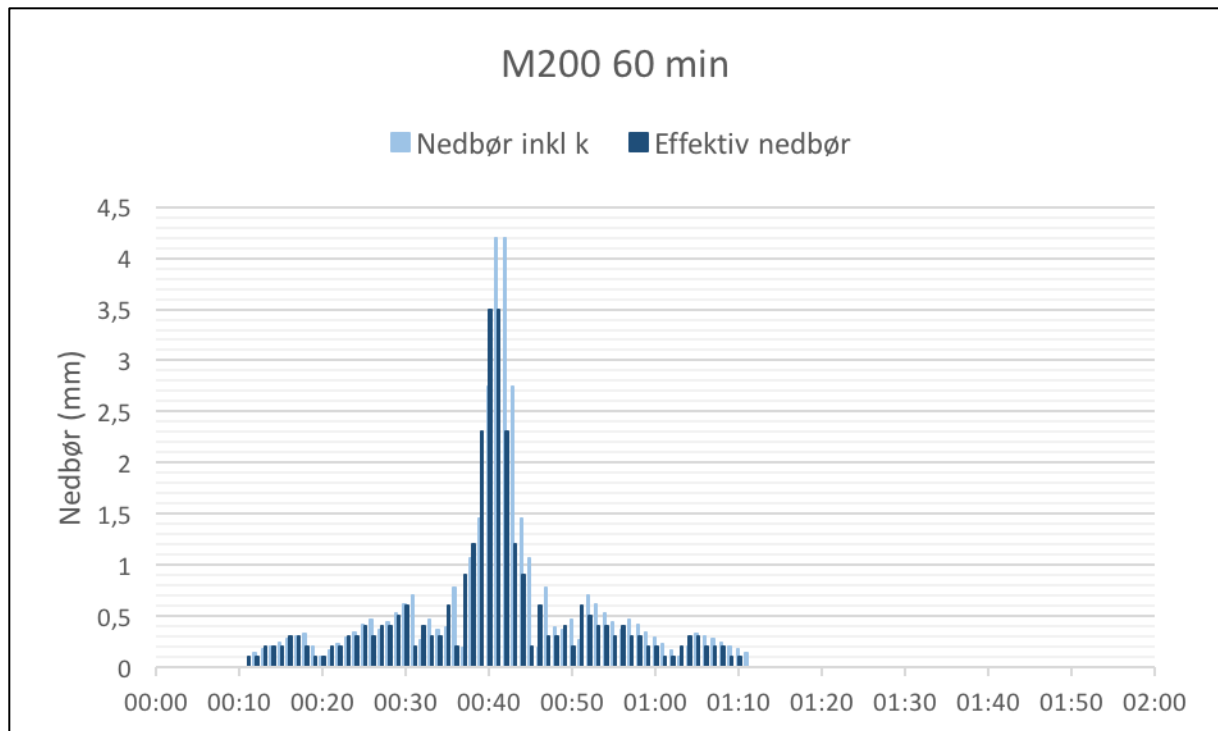
Returperiode (år)	k (t)	Varighet	Sum nedbør m/ k (mm)	w (cm/t)	F(t) (mm)	N_{eff}
200	1,38	1,00	36,85	3,68	11,30	0,83

Tabell 6: Beregnede verdier for M200. Tabellen viser varighet, sum, gjennomsnittlig intensitet, w, total mengde infiltrert vann, F(t), og beregnet andel effektiv nedbør, N_{eff} , for en hendelse med returperiode 200 år og klimafaktor, k, lik 1,38.

Ser av Tabell 6 at total mengde infiltrert vann, $F(t)$, er liten sammenlignet med sum nedbør. Nedbørens gjennomsnittlige intensitet er høy og dermed synker infiltrasjonsraten raskt til et lavt nivå, se Figur 47.



Figur 47: Beregnet Green-Ampt infiltrasjonsrate, $f(t)$, for M200. Nedbør med returperiode 200 år og klimafaktor, k , lik 1,38. Varighet nedbør 1 t, intensitet, w , 3,685 cm/t. Gjelder for leirjord med hydraulisk konduktivitet, K , 0,34 cm/t, porøsitet, θ_e , 0,434, kapillærtrykk, ψ_f , 8,89 cm og vanninnhold ved starten av beregninger, θ_0 , lik 0,3. Figur 48 viser nedbør med en klimafaktor, k , lik 1,38 og beregnet effektiv nedbør. Summen av nedbør er 36,85 mm. Summen av beregnet effektiv nedbør er 30,48 mm. Totalt reduseres nedbøren med 17%. Det er ved utregning av effektiv nedbør ikke tatt hensyn til ledningsnettets kapasitet. Må derfor se på resultatene som et ekstremtilfelle hvor ledningsnettets er blokkert eller ødelagt. Videre er det en del usikkerhet knyttet til beregning av effektiv nedbør for et så stort felt med store romlige variasjoner i forhold til flatetyper. Nedbøren påføres jevnt over hele feltet som effektiv nedbør beregnet gjennom vekting av andelen permeable og impermeable flater. Det ville gitt et mer realistisk bilde av situasjonen om det var mulig å påføre romlig variabel nedbør. Foreløpig er ikke dette en mulighet i HEC-RAS, må derfor gjøre forenklinger som her.



Figur 48: Symmetrisk hyetogram for nedbør med returperiode 200 år og varighet 60 min. Lyseblå verdier beregnet med utgangspunkt i IVF-verdier for Risvollan for perioden 1987 – 2016 inkludert en klimafaktor, k , på 1,38 (lyseblå). Mørkeblå søyler representerer beregnet effektiv nedbør.

7.2.3 Flomsimulering

En nedbørshendelse med 200 års returperiode er simulert, se Tabell 7.

Returperiode (år)	Mannings n		Varighet (t)	Simuleringstid	
	Gress	Asfalt/tak		Diffusiv bølge	Dynamisk bølge
200	0,035	0,016	2	12 t 16 min ($\Delta T=0,2$ s)	24 t 47 min ($\Delta T=0,1$ s)

Tabell 7: Oversikt simulering av M200 for Hornebergbekken. Informasjon om valgte Mannings n verdier, simuleringens varighet, simuleringstid i HEC-RAS og tidskritt i beregninger, ΔT .

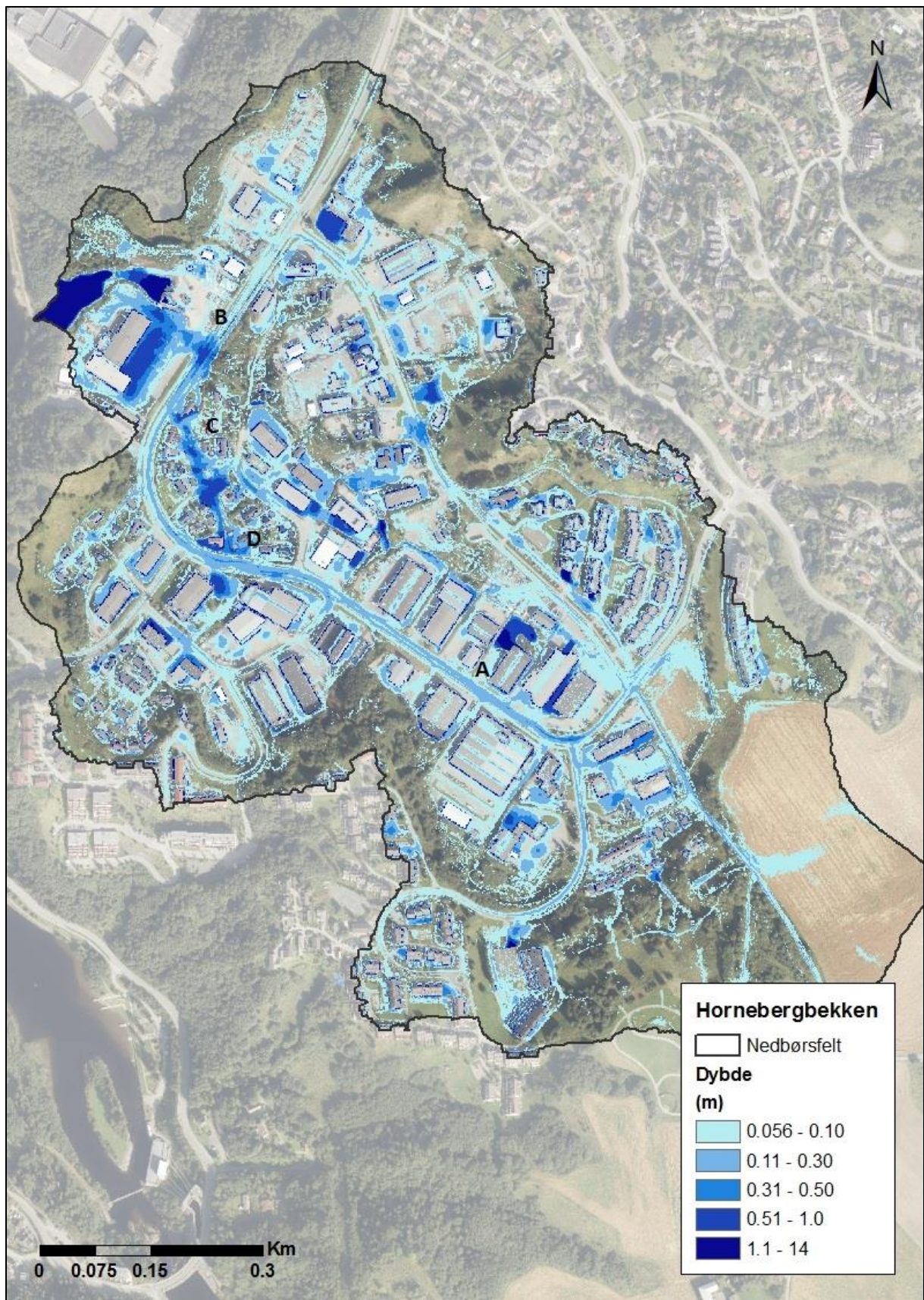
Figur 49 viser maksimale dybder i feltet under hendelsen. Det er gjort en antagelse om at vanndybder på 1 cm og under ikke vil utgjøre noe skadepotensial, disse er derfor neglisjert og vises ikke på kartet. Ser at det rundt flere av bygningene vil samle seg relativt store mengder vann. 98 av bygningene har maksimale vanndybder på over 10 cm inntil en eller flere av bygningens yttervegger. Dette utgjør 14% av bygningsmassen.

I denne modellen er bygninger representert ved hjelp av den såkalte bygningsblokk-metoden (Cea, Garrido og Puertas, 2010). Dette innebærer blant annet at vann ikke kan strømme inn i

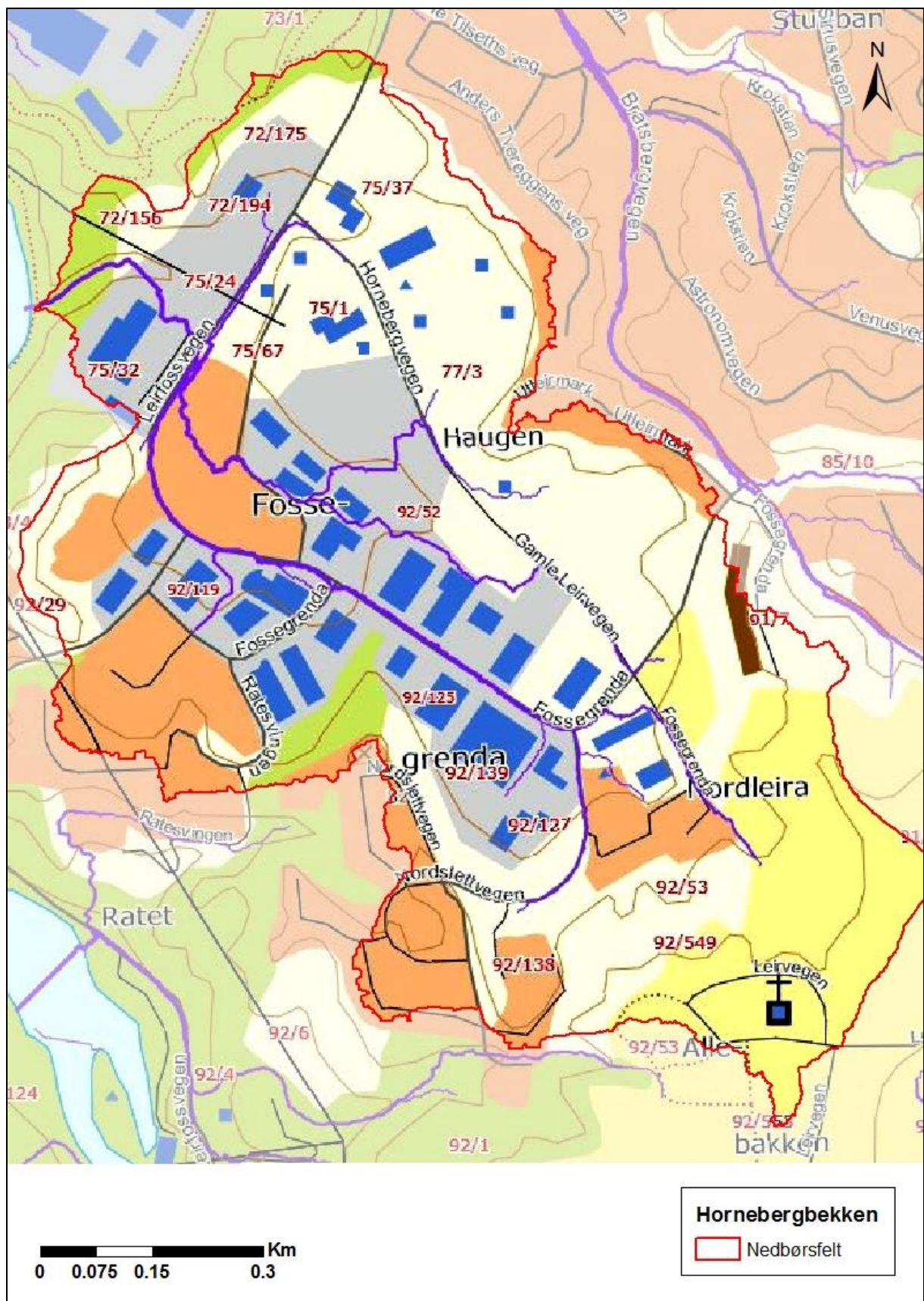
bygninger. Av Figur 49 ser man at store vannmengder (dybder $> 0,5$ m) samles rundt flere av bygningene. Det kan tenkes at noen av disse bygningene vil oversvømmes på innsiden ved en eventuell flom. Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) påpeker at det bør gjøres simuleringer av et slikt scenario. Dette er imidlertid ikke mulig å gjøre i HEC-RAS 2D. Dottori, Di Baldassarre og Todini (2013) påpeker i tillegg at det bør kjøres simuleringer av et scenario hvor potensielle hindringer, som for eksempel biler, er inkludert. Dette ligger utenfor denne rapportens rekkevidde, men er noe som kan vurderes for fremtidig arbeid.

Figur 49 viser at det ved utløpet til Nidelva nord i feltet samler seg opp unaturlig store mengder vann. Dette er på grunn av måten modellen er satt opp. Det er ikke mulig for vann å strømme ut av 2D-området. Må derfor se bort i fra denne ansamlingen av vann ved utløpet.

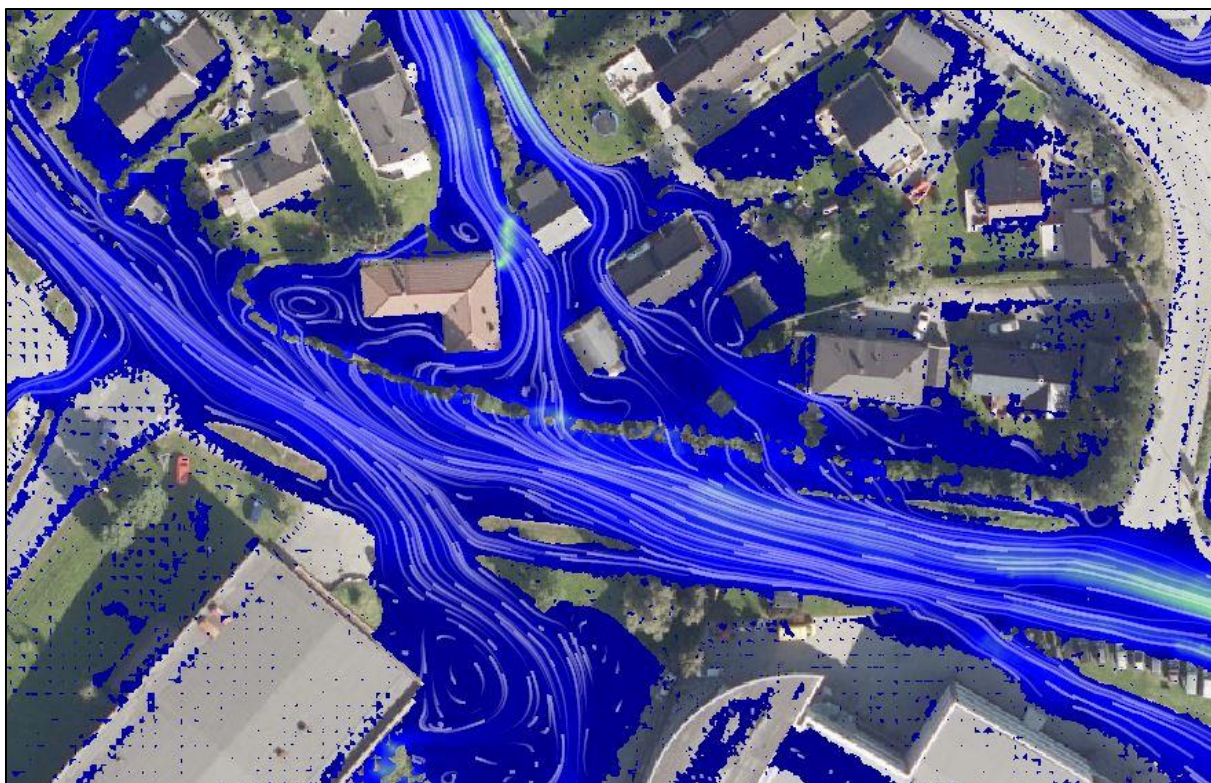
Sammenligner man dybdekartet (Figur 49) med kommunens aktsomhetskart (Figur 50) ser man flere likheter. Aktsomhetskartet viser avrenningslinjer som hovedsakelig følger hovedvegene. Dette bekreftes i stor grad av resultatene i HEC-RAS modellen. Ser av Figur 49 at vann samles opp langs hovedvegene og danner et elvesystem. Dette er tydelig flere steder, blant annet ved punkt A i Figur 49. Ved punkt B (Figur 49) ser man at vannet renner av vegen over et industriområde før det renner ut i Nidelva. Det samme ser man av aktsomhetskartet (Figur 50). I modellen dannes en tydelig vannveg gjennom boligfeltet ved punkt C (Figur 49), noe man også kan se av aktsomhetskartet. Vannstrømmen som dannes ved punkt D i modellen er derimot ikke representert i aktsomhetskartet. Figur 51 illustrerer det aktuelle området ved et tidspunkt med høy vannføring. Ser tydelig at en del av vannet strømmer nordover fra hovedvegen og inn i boligområdet, hvilket fører til kraftig oversvømmelse av flere eneboliger og dannelse av en ny flomveg gjennom området. Denne flomvegen er ikke illustrert med avrenningslinje på aktsomhetskartet. Dette skyldes trolig at aktsomhetskartets avrenningslinjer er generert ved hjelp av en GIS-analyse av en terrengmodell. En slik analyse baserer seg kun på terrengets helning og tar dermed ikke hensyn til at vannet kan ta nye veier under et flomscenario. Dette er en svakhet ved aktsomhetskartene slik de produseres i dag.



Figur 49: Maksimale dybder ved M200 i Hornebergbekken nedbørsfelt. Nedbørsfeltets avgrensning markert med rødt. Simulering kjørt med ligningssett for dynamisk bølge. Bokstaver indikerer områder for sammenligning med kommunens aktsomhetskart. Bakgrunn: ortofoto.



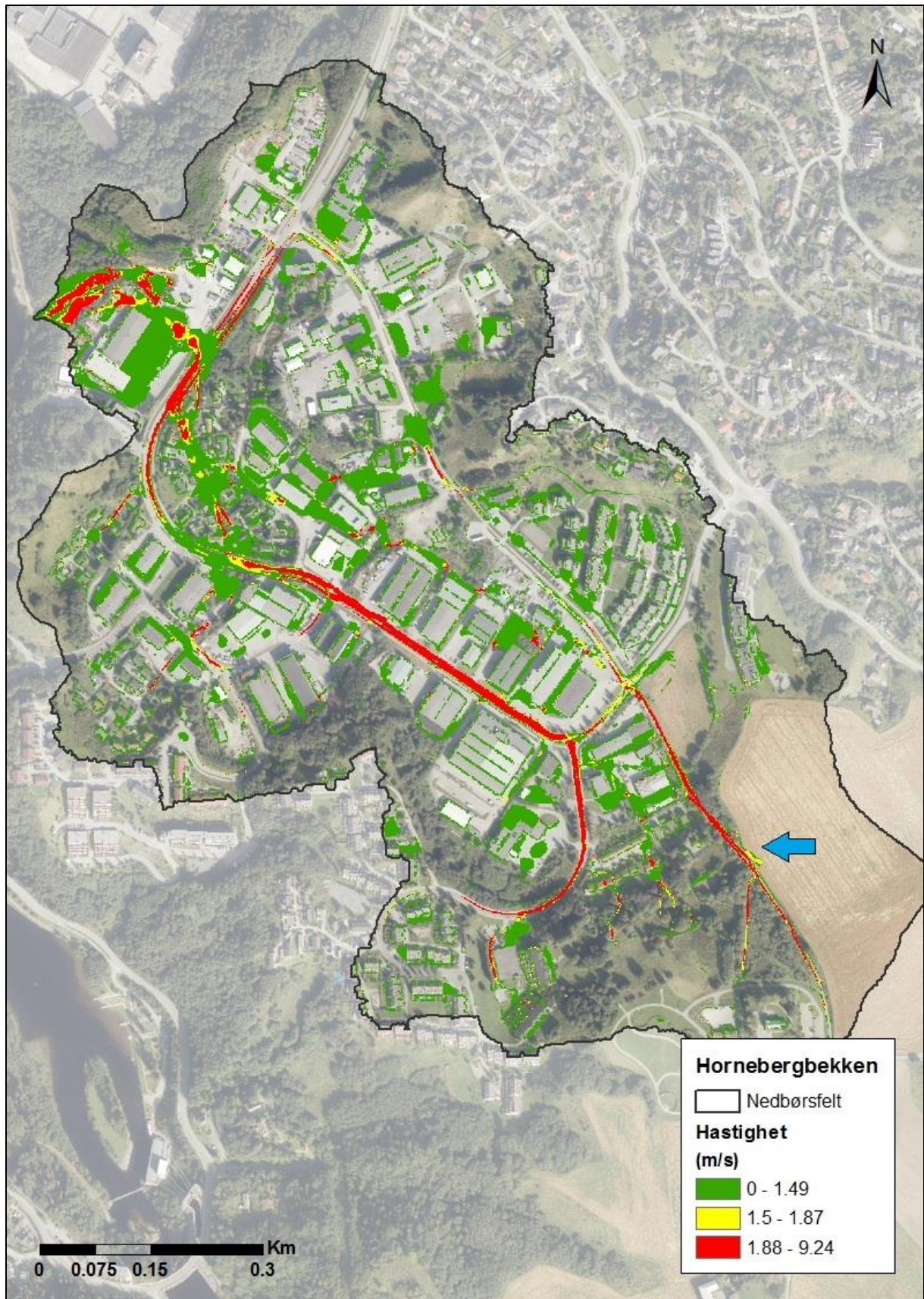
Figur 50: Aktsomhetskart med flomveger (lilla). Nedbørsfeltets avgrensning markert med rød linje. Aktsomhetskart hentet fra Trondheim kommunes nettsted for kartinnsyn (Trondheim Kommune, 2018).



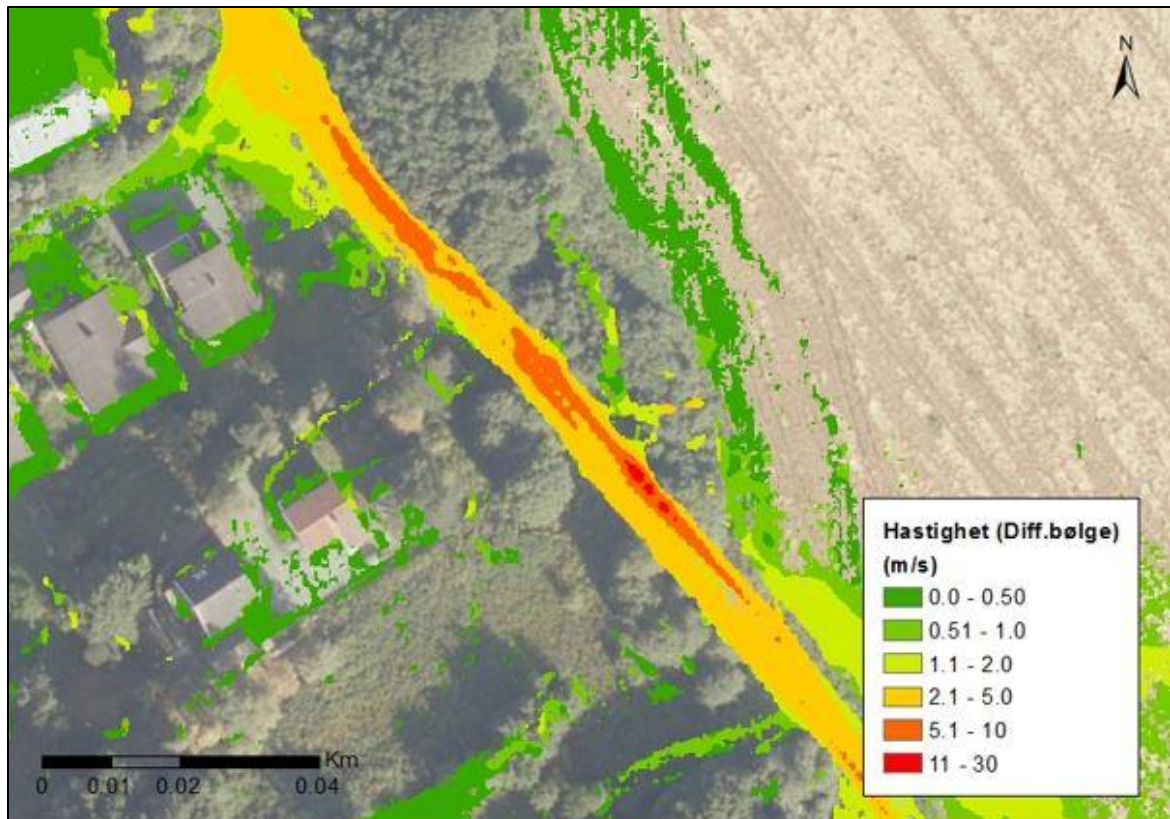
Figur 51: Vannstrøm langs hovedveg og inn i boligfelt ved punkt D. Utsnitt fra modellen i HEC-RAS 48 minutter etter simuleringsstart. Strømlinjer er partikkelsimuleringer som illustrerer strømretning. Simulering kjørt med ligningssett for dynamisk bølge.

Et annet aspekt ved flom som aktsomhetskartene ikke gir noen informasjon om er hastigheter. Resultater fra HEC-RAS-modellen gir informasjon om dette. Figur 52 illustrerer maksimale hastigheter i feltet for den aktuelle 200-årshendelsen i områder hvor maksimal vann-dybde er større eller lik 9 cm. Kartet (Figur 52) er utformet i henhold til de tre farenivåene for fotgjengere slik de er definert av Russo, Gomez og Macchione (2013): lav (grønn), moderat (gul) og høy (rød). Figuren viser tydelig at de største hastighetene hovedsakelig oppstår langs hovedvegene. Under en eventuell flomhendelse vil derfor fremkommeligheten for fotgjengere bli kraftig redusert langs disse vegene.

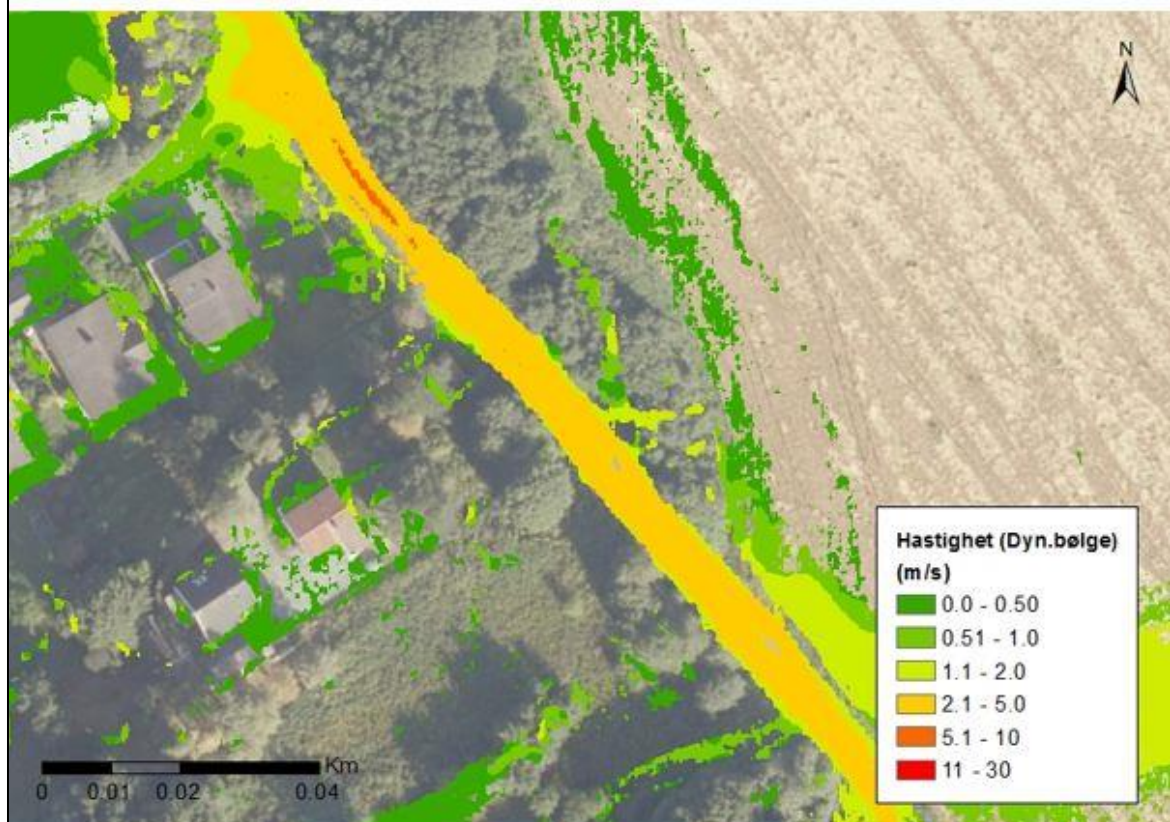
For å illustrere forskjellen ved å kjøre simuleringer med diffusiv og dynamisk bølge er en bratt vegstrekning sør-øst i feltet studert nærmere i forhold til modellerte hastigheter. Det aktuelle området er indikert med blå pil i Figur 52. Figur 53 viser maksimale hastigheter oppnådd under nedbørshendelsen ved bruk av diffusiv (a) og dynamisk bølge (b). Ser tydelig av figuren at bruk av diffusiv bølge i dette tilfellet gir høyere hastigheter. En grunn til dette er at ligningssettet for diffusiv bølge er en forenklet tilnærming av gruntvannsligningene hvor akselerasjon, eddy viskositet og coriolis effekt er neglisjert. For dynamisk bølge gjøres ikke denne forenklingen og man kan derfor anta at dynamisk bølge gir mest nøyaktige resultater (Brunner, 2016b).



Figur 52: Maksimale hastigheter i områder med dybde ≥ 9 cm ved M200. Hornebergbekken nedbørsfelt. Blå pil indikerer området som illustreres i Figur 53. Simulering kjørt med ligningssett for dynamisk bølge. Bakgrunn: ortofoto.



(a)

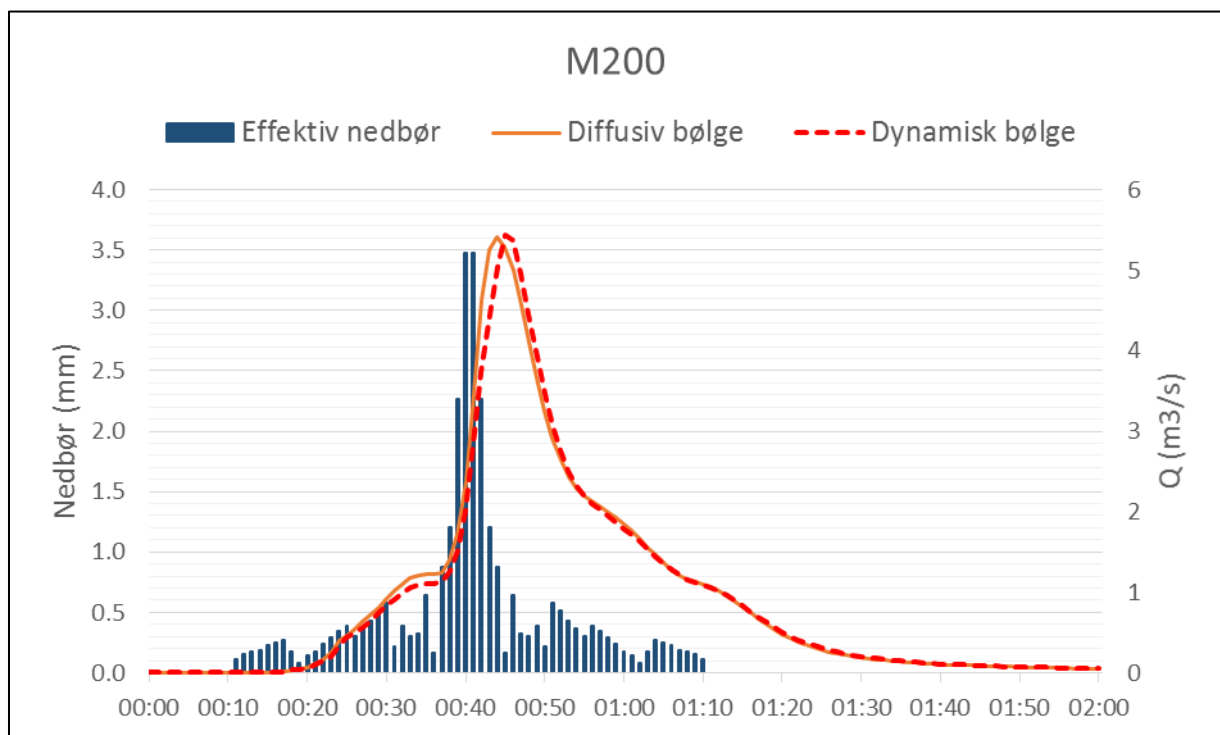


(b)

Figur 53: Beregnede maksimale hastigheter ved M200. Bruk av diffusiv (a) og dynamisk bølge (b).

Selv med bruk av dynamisk bølge viser Figur 53 høye hastigheter langs vegen. En kontrollberegning med Mannings formel er derfor gjort for den aktuelle vegstrekningen. Informasjon rundt dybder og tverrsnitt er hentet fra HEC-RAS og en overslagsberegning er gjort. Se Vedlegg B for utregning. Beregnet hastighet med Mannings formel gir 5,86 m/s. Altså ser ikke beregninger gjort med dynamisk bølge ut til å være så urealistiske. Simulerte hastigheter gjort med diffusiv bølge kan derimot tenkes å være for høye en del steder.

Figur 54 illustrerer modellert vannføring for et tverrprofil av vegen Fossegrenda ved punkt A (Figur 49). I likhet med resultatene fra RIS ser det her ut til å være liten forskjell i modellert vannføring ved bruk av de ulike ligningssettene.



Figur 54: Effektiv nedbør (venstre akse) og modellert vannføring (høyre akse) for M200. Modellert vannføring for et tverrprofil av vegen Fossegrenda ved punkt A. Simulering utført med bruk av to ligningssett: diffusiv (oransje) og dynamisk bølge (rød).

8 Oppsummering og konklusjon

To modeller er satt opp i HEC-RAS: en for nedbørsfeltet til Risvollan regnbed (RIS) og en for Hornebergbekken. RIS-modellen er kjørt med observerte data, mens Hornebergbekken-modellen er kjørt for en nedbørsepisode med returperiode på 200 år. To nedbørsserier med kraftig nedbør er simulert for RIS. Modellen er verifisert ved hjelp av vannføringsmålinger for regnbedets innløp og feltobservasjoner.

Ved simulering av nedbørsserie 1 for RIS oppnås en forklart varians på 0,77 og 0,78 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge. Ved nedbørsserie 2 oppnås en forklart varians på 0,77 og 0,79 for henholdsvis diffusiv og dynamisk bølge. Simulert og observert vannføring for regnbedets innløp sammenfaller altså i stor grad.

Det var nødvendig å kalibrere både Mannings n og effektiv nedbør. Mannings n for gressflatene var i utgangspunktet satt for høyt. En nedjustering fra 0,1 til 0,03 gav hurtigere respons i modellen og dermed bedre timing av hydrogrammet for begge nedbørsseriene. Gjenværende forsinkelse i modellen etter kalibrering av Mannings n skyldes trolig at det ikke er mulig å påføre romlig variabel nedbør i HEC-RAS. Dette fører til at man ikke får med effekten av hurtig og høyere andel avrenning fra tette flater.

Valgt metode for beregning av effektiv nedbør gir varierende resultater. For nedbørsserie 1 er vannføring noe overestimert, mens for serie 2 er den kraftig underestimert. Dette tyder på stor usikkerhet i forhold til beregning av effektiv nedbør og gjør at denne må kalibreres for hver enkelt nedbørsserie. Ved kalibrering av effektiv nedbør er original metode forkastet til fordel for en enklere beregningsmetode hvor en estimert andel av observert nedbør settes som effektiv nedbør. Dette viste seg å gi tilfredsstillende resultater. Gode resultater ble oppnådd med effektiv nedbør satt til 8% og 15% for henholdsvis nedbørsserie 1 og 2.

Modellert vannstrøm er i stor grad bekreftet gjennom feltobservasjoner. Modell med underliggende terrengmodell med 0,25 m oppløsning, beregningsnett (grid) med 1 m oppløsning og bruddlinjer langs veg- og fortauskanter ser ut til å være tilstrekkelig detaljert. Modellen får med seg viktige detaljer som vegkrumning, fortauskanter og små grøfter langs vegen.

Modellert vannføring påvirkes av variasjoner i beregningsnettets utforming og oppløsning. Reduksjon fra 1 m til 2 m oppløsning gav dårligere samsvar mellom observert og modellert vannføring sammenlignet med standard grid med 1 m oppløsning. Grid med 2 m oppløsning og 1 m oppløsning langs bruddlinjer gav imidlertid bedre resultater sammenlignet med standard

grid. Dette tyder på at grid med lavere oppløsning kan benyttes så lenge oppløsningen holdes høy langs veg- og fortauskanter.

En svakhet med modellen er at den ikke kan kobles mot ledningsnett. Dette gjør at avrenning fra hustak inkluderes og gir trolig forhøyet modellert vannføring. For å kompensere for dette må andel effektiv nedbør reduseres, derfor er det sannsynlig at 8% og 15 % effektiv nedbør for de to seriene er noe lavere enn det som faktisk er tilfellet.

Resultatene fra modellering av RIS viser at simulert og observert vannføring sammenfaller i stor grad, i tillegg bekreftes modellert vannstrøm i stor grad av feltobservasjoner. Dette indikerer at HEC-RAS 2D er et egnet verktøy for å studere fordeling av vann i et urbant felt. Det må imidlertid tas hensyn til enkelte åpenbare svakheter ved modellen. Modellen kan ikke kobles opp mot ledningsnett, noe som vil gi forhøyet avrenning flere steder og må derfor tas hensyn til. En annen svakhet ved modellen er at det ikke er mulig å påføre romlig varierende nedbør. Nedbør påføres likt for alle celler, noe som trolig bidrar til at det oppstår en forsinkelse i simulert vannføring sammenlignet med observert vannføring.

Det er funnet at beregning av effektiv nedbør, valg av Mannings n og utforming av grid er viktige faktorer ved etablering av HEC-RAS-modellen. Resultatene indikerer at effektiv nedbør er svært variabel og beregning av denne innebærer stor usikkerhet. Både valg av Mannings n og utforming av gridet påvirker simulert vannføring i forhold til volum og responstid. Mannings n må derfor kalibreres og det bør testes ut ulike grid. Resultatene indikerer at Mannings n er enklere å kalibrere enn effektiv nedbør. Bedre metoder for å estimere effektiv nedbør er nødvendig for å unngå at dette må kalibreres for hver enkelt nedbørsserie som kjøres.

En nedbørsepisode med 200 år returperiode er simulert for Hornebergbekken nedbørsfelt. Resultatene gir informasjon om romlig fordeling av dybder og hastigheter, noe som kan brukes til å eksempelvis vurdere sikre flomveger, designe vegger for flomavledning og ellers gi en forståelse av hydraulikken til nedbørsfeltet.

Resultatene bekrefter i stor grad lokasjon av flomveger slik de er illustrert med avrenningslinjer i kommunens aktsomhetskart. Modellresultatene synliggjør i tillegg flere potensielle flomveger enn de som er illustrert i aktsomhetskartet. GIS-analysen som ligger til grunn for aktsomhetskartet tar ikke høyde for at vannet kan ta nye veier under et flomscenario. Det bør derfor vurderes å ta i bruk HEC-RAS-modellering for produksjon av fremtidige aktsomhetskart, da dette vil gi kart med mer informasjon enn det dagens kart gir.

Bruk av diffusiv og dynamisk bølge gir svært like resultater i forhold til modellert vannføring for både RIS og Hornebergbekken. Er det imidlertid ønskelig å studere hastigheter gir sannsynligvis dynamisk bølge mest nøyaktige resultater.

9 Forslag til videre arbeid

Med bakgrunn i arbeid som er gjort i denne rapporten foreslås følgende tiltak til videre oppfølging:

- To nedbørsserier er simulert med RIS-modellen. Flere nedbørshendelser bør simuleres for å gi et bedre grunnlag for evaluering av modellen.
- I denne rapporten er modellert vannstrøm verifisert gjennom feltobservasjoner under en tilfeldig nedbørshendelse. Modellen bør verifiseres ytterligere med drone-bilder av feltet tatt under en nedbørshendelse som så simuleres.
- Resultatene indikerer stor usikkerhet ved beregning av effektiv nedbør. Det bør utvikles bedre metoder for beregning av effektiv nedbør for å unngå at denne må kalibreres for hver enkelt nedbørsserie som modelleres.
- Det ble funnet at et grid med lavere oppløsning gav bedre resultater enn standard-gridet som ble brukt. Det bør undersøkes nærmere hva som er optimal utforming og oppløsning av gridet med tanke på å finne et kompromiss mellom nødvendig detaljeringsgrad og simuleringstid.
- Hornebergbekken bør modelleres for flere alternative scenarier, for eksempel ved å inkludere biler i terrenngmodellen, for å se hvordan dette gir utslag i modellen.

Referanser

- Blom Geomatics AS (2014) *Trondheim minikonkurranse Laserskanning*. (LiDAR-Rapport BNO14018). Oslo: Blom Geomatics AS. Tilgjengelig fra: https://hoydedata.no/LaserInnsyn/ProsjektRapport?filePath=\\statkart.no\hoydedata_orig\vol1\96\metadata\Trondheim%202014_Projektrapport.pdf (Hentet: 21.06.18).
- Braskerud, B. C., Paus, K. H. og Ekle, A. (2013) *Anlegging av regnbed. En billedkavalkade over 4 anlagte regnbed*. (NVE rapport 3/2013). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/rapport/2013/rapport2013_03.pdf (Hentet: 21.06.2018).
- Bratlie, R. (2015) Beregning av flomveier med eksempler på bruk i kommunal forvaltning (s. 24-34). Ås: Kart og plan vol. 75.
- Brunner, G. W. (2016a) *Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. (HEC-RAS CPD-69). Davis CA: US Army Corps of Engineers. Tilgjengelig fra: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf> (Hentet: 21.06.18).
- Brunner, G. W. (2016b) *2D Modeling User's Manual Version 5.0*. (HEC-RAS CPD-68A). Davis CA: US Army Corps of Engineers. Tilgjengelig fra: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%202D%20Modeling%20Users%20Manual.pdf> (Hentet: 21.06.18).
- Butler, D. og Davies, J. W. (2011) *Urban drainage*. 3. utg. London: Spon Press.
- Casulli, V. (2009) A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60(4), s. 391-408. doi: 10.1002/flid.1896.
- Cea, L., Garrido, M. og Puertas, J. (2010) Experimental validation of two-dimensional depth-averaged models for forecasting rainfall-runoff from precipitation data in urban areas, *Journal of Hydrology*, 382(1-4), s. 88-102. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.12.020.
- Chow, V. T. (1959) *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill.
- Dalen, T. (2011) *Hydrologisk ytelse av regnbed i kaldt klima*. Prosjektoppgave, Norwegian University of Science and Technology.
- Dalen, T. (2012) *Hydrologisk dimensjonering av regnbed i kaldt klima*. Masteroppgave, NTNU.
- Dingman, S. L. (2008) *Physical hydrology*. 2nd ed. utg. Long Grove, Ill: Waveland Press.
- Dottori, F., Di Baldassarre, G. og Todini, E. (2013) Detailed data is welcome, but with a pinch of salt : Accuracy, precision, and uncertainty in flood inundation modeling, *Water Resources Research*, 49(9), s. 6079-6085. doi: 10.1002/wrcr.20406.
- Engman, E. T. (1986) ROUGHNESS COEFFICIENTS FOR ROUTING SURFACE RUNOFF, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, 112(1), s. 39-53. Tilgjengelig fra: <Go to ISI>://WOS:A1986AYT6600004.

- ESRI (2015) ArcGIS Desktop 10.4.
- Fewtrell, T. J. *et al.* (2008) Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments, *Hydrological Processes*, 22(26), s. 5107-5118. doi: 10.1002/hyp.7148.
- HEC (2016a) *HEC-RAS, Release Notes Version 5.0.3*. Tilgjengelig fra: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_5.0.3_Release_Notes.pdf (Hentet: 21.06.18).
- HEC (2016b) HEC-RAS 5.0.3.
- Heywood, I., Cornelius, S. og Carver, S. (2011) *An introduction to geographical information systems*. 4th. utg. Harlow: Prentice Hall.
- Hunter, N. M. *et al.* (2008) Benchmarking 2D hydraulic models for urban flooding, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 161(1), s. 13-30. doi: 10.1680/wama.2008.161.1.13.
- Kartverket (2016) *Områder og planer for datafangst 2016*. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Prosjekter/Nasjonal-detaljert-hoydemodell/omrader-og-status-datafangst-2016/> (Hentet: 21.06.18).
- Lindholm, O. *et al.* (2008) *Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering*. (Norsk Vann rapport 162/2008). Hamar: Norsk Vann. Tilgjengelig fra: <https://www.norskvann.no/index.php/kompetanse/va-bokhandelen/rapporter/product/801-a162-veiledning-i-klimatilpasset-overvannshandtering> (Hentet: 21.06.18).
- Lindholm, O. *et al.* (2012) *Veiledning i dimensjonering og utforming av VA-transportsystem*. (Norsk Vann rapport 193/2012). Hamar: Norsk Vann. Tilgjengelig fra: <https://norskvann.no/kompetanse/va-bokhandelen/rapporter/product/408-r193-veiledning-i-dimensjonering-og-utforming-av-va-transportsystem> (Hentet: 21.06.18).
- Meiforth, J. (2013) *Modelling flood streams for urban planning in Trondheim, Norway*. Masteroppgave, University of Salzburg.
- NCCS (2015) *Klima i Norge 2100*. Oslo: Norwegian Environment Agency.
- Nordeidet, B., Schow, C. S. og Killerich, T. (2015) *Overvannsflo - metoder for kartlegging og analyser*. (Oppdragsrapport M-424). Alta: Rambøll. Tilgjengelig fra: <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M424/M424.pdf> (Hentet: 21.06.18).
- Norges Geologiske Undersøkelse (2018) *Nasjonal løsmassedatabase*. Tilgjengelig fra: http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/ (Hentet: 21.06.18).
- NOU 2015: 16 (2015) *Overvann i byer og tettsteder*. Oslo: Klima- og Miljødepartementet.
- Pedersen, V. M. (2017) *Mapping of Risvollan raingarden watershed using ArcGIS and LiDAR data*. Project thesis, Norwegian University of Science and Technology.
- Pirotti, F., Guarnieri, A. og Vettore, A. (2013) State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface, *European Journal of Remote Sensing*, 46, s. 66-78. doi: 10.5721/EuJRS20134605.

- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L. og Miller, N. (1983) GREEN-AMPT INFILTRATION PARAMETERS FROM SOILS DATA, *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 109(1), s. 62-70. Tilgjengelig fra: [<Go to ISI>://WOS:A1983QA44000005](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1983)109:1(62)).
- Russo, B., Gomez, M. og Macchione, F. (2013) Pedestrian hazard criteria for flooded urban areas, *Natural Hazards*, 69(1), s. 251-265. doi: 10.1007/s11069-013-0702-2.
- Sampson, C. C. *et al.* (2012) Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models, *Advances in Water Resources*, 41, s. 1-17. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.02.010.
- Standard Norge (2005) *NS-ISO 1438-1 Vannføringsmåling i åpne kanaler ved bruk av overløp og venturikanal - Del 1: Tynnplateoverløp* Tilgjengelig fra: <https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=146254> (Hentet: 21.06.18).
- Statens Kartverk (2013a) *Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning, Versjon 2.0*. Tilgjengelig fra: http://www.kartverket.no/globalassets/standard/sosi-kap3-produktspesifikasjoner/fkb-laser/fkb-laser-v20_2013-02-01.pdf (Hentet: 21.06.18).
- Statens Kartverk (2013b) *SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB - Bygning*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/globalassets/standard/sosi-kap3-produktspesifikasjoner/fkb02/5-bygning-2013-01-01.pdf> (Hentet: 21.06.18).
- Statens Kartverk (2014) *SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for FKB - Veg*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/globalassets/standard/sosi-kap3-produktspesifikasjoner/fkb-4.5/14-veg-2014-03-01.pdf> (Hentet: 21.06.18).
- Teng, J. *et al.* (2017) Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis, *Environmental Modelling & Software*, 90, s. 201-216. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.01.006.
- Trondheim Kommune (2018) *Kartinnsyn*. Tilgjengelig fra: <https://kart5.nois.no/trondheim/Content/Main.asp?layout=trondheim&time=1529599869&vwr=asv> (Hentet: 21.06.18).

Vedlegg A Vannføringstabell innløp RIS

Vannføringstabell for 123.113.0.1001.1 Gen:0, Per:1 02.11.2010 -
Regnbed Risvollan KRST (Teoretisk kurve for skarpkantet V-overløp med
overløpsvinkel 150 grader.

Kurven er ikke gyldig ved oppstuvning. Kurven forutsetter riktig
installasjon av overløp og sensor.

Hjelp punkter er beregnet v.hj.a. programmet Overløpskurver med
beregningssteg 0,01 m.)

Segment nr. 1: $Q = 3.84750 (h + 0.0000) **$ 2.39060
Gjelder for $0.000 \leq \text{høyde} < 0.062$

Segment nr. 2: $Q = 5.11570 (h + 0.0010) **$ 2.50040
Gjelder for $0.062 \leq \text{høyde} < 0.145$

Segment nr. 3: $Q = 6.25330 (h + 0.0205) **$ 2.78480
Gjelder for $0.145 \leq \text{høyde} < 0.250$

Vannføring i kubikkmeter pr. sekund

Vannstand(m)		0	1	2	3	4
5	6	7	8	9		
	0.0	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002
0.003	0.005	0.007	0.010	0.013		
	0.1	0.017	0.021	0.026	0.032	0.038
0.045	0.053	0.062	0.071	0.082		
	0.2	0.093	0.105	0.118	0.132	0.148
0.164	---	---	---	---		

Vedlegg B Kontrollberegning av hastighet

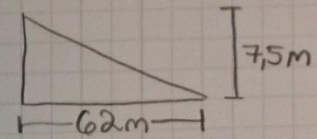
Kontrollberegning Mannings formel

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

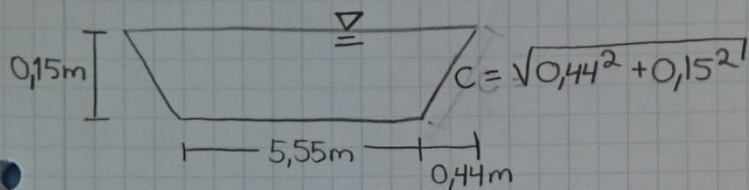
$$n = 0,016$$

Vegens helning:

$$S = \frac{7,5 \text{ m}}{62 \text{ m}}$$



Forenklet tverrsnitt veg:



$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{5,55 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m} + 0,15 \cdot 0,44 \text{ m}}{5,55 \text{ m} + 2 \cdot \sqrt{0,44^2 + 0,15^2}} = 0,14$$

$$V = \frac{1}{0,016} \cdot \left(\frac{5,55 \text{ m} \cdot 0,15 \text{ m} + 0,15 \cdot 0,44 \text{ m}}{5,55 \text{ m} + 2 \cdot \sqrt{0,44^2 + 0,15^2}} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{7,5 \text{ m}}{62 \text{ m}} \right)^{1/2} = \underline{\underline{5,86 \text{ m/s}}}$$