



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2018 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Modellering av effekten av flomforebyggende tiltak i et urbant område

Modelling the effect of flood damage-reducing
measures in an urban area

Ellen Vaage Grimnes
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på studiet Vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven er utarbeidet høsten 2017 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Hensikten med oppgaven har vært å utarbeide en metodikk for å modellere effekten av flomforebyggende tiltak i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell. Programvarene som er benyttet er ArcGIS Desktop levert av NMBU og MIKE 21 Flow Model levert av DHI.

Jeg vil rette en stor takk til min hovedveileder, Jon Arne Engan, for godt samarbeid og konstruktive tilbakemeldinger. I tillegg vil jeg takke Anne Lundgren på vegne av Geodata, for kurs og veiledning i ArcGIS. Takk til DHI og Halvor Hardang for lån av lisens og for gode råd til arbeidet med MIKE 21. Takk til Jørgen Hellesjø i Drammen kommune for god samarbeidsvilje og befarings. Jeg ønsker også å takke Norconsult AS for lån av datamaskin.

Ås, 3. januar 2018

Ellen Vaage Grimnes

*Mange bekker små
gjør en stor å.*

Norsk ordtak

Sammendrag

Som følge av klimaendringer og urbanisering forventes urbane flommer å forekomme hyppigere og øke i størrelse. Urbane flommer forårsaker skader på infrastruktur og bygninger, og er en stor samfunnskostnad. For å kunne predikere størrelsen og strømningsbevegelser ved en gitt flom i et område, kan avrenningsmodeller benyttes. Avrenningsmodeller kan gi informasjon om problemområder, eventuelle flaskehalsar og forventede skader. Denne informasjonen kan blant annet benyttes til planlegging av flomforebyggende tiltak.

Formålet med denne oppgaven var hovedsakelig å utarbeide en metodikk for å modellere effekten av flomforebyggende tiltak i en todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell ved hjelp av programvarene ArcGIS Desktop og MIKE 21 Flow Model levert av DHI. Ved å gjøre dette kan man opparbeide kunnskap til å planlegge så effektive og samfunnsøkonomiske tiltak som mulig. Metodikken skulle utarbeides ved å ta utgangspunkt i en 100-årsflom i et område på 10,5 km² i Drammen kommune. Det er ikke tatt hensyn til infiltrasjon eller ledningsnett.

Det ble utarbeidet en metodikk for å modellere effekten av tiltak, men denne er svært tidskrevende og komplisert å utføre nøyaktig. ArcGIS Desktop og MIKE 21 Flow Model bør kombineres med et avansert konstruksjonsprogram, for eksempel BIM, for å kunne modellere effekten av tiltak. For å besvare problemstillingen i oppgaven er det blant annet utarbeidet en metodikk for å beregne volum av oversvømmelser i utvalgte områder basert på modelleringsresultater. Dette er et funksjonelt verktøy for å måle effekt av tiltak eller validere en avrenningsmodell. Utarbeidelsen av oppgaven avdekket også at store høydeforskjeller, over 2-5 meter, mellom naboruter i rasteret som benyttes, kan føre til betydelige overdrivelser av oversvømmelser i resultatene. Størrelsen på overdrivelsene kan måles i MIKE 21. I modellen som denne oppgaven tok utgangspunkt i, utgjorde overdrivelsen 19% av totalt nedbørsvolum.

Abstract

Increased urbanization and climate change causes urban floods to occur more frequent and increase in size. Urban floods cause damage to infrastructure and buildings, and constitute a major cost to society. Drainage models can be used to predict the size and the flow movement for a given flood in an area.

Drainage models can provide information on problem areas, possible bottlenecks and expected damages. Further, this information can be used to plan flood-reducing measures.

The main objective of this thesis was to prepare a methodology to model the effect of flood reducing measures in a two-dimensional hydraulic drainage model using the software of ArcGIS Desktop and MIKE 21 Flow Model provided by DHI. Based on this, necessary knowledge, to plan as effective and socio-economic measures as possible, was obtained. The methodology was compiled based on a 100-year flood in an area of 10.5 km² in Drammen municipality. Infiltration was not taken into account.

A methodology to model the effect of measures was compiled. However, this methodology is very time consuming and hard to perform with accuracy. Ideally, ArcGIS Desktop and MIKE 21 Flow Model should be combined with an advanced drawing program, such as Autocad Civil 3D, to model the effect of measures. To answer the problem in this thesis, a methodology was developed to calculate flood volume in selected areas based on modelling results. This is an effective tool to measure the effect of measures and to validate a drainage model. The preparation of this thesis revealed that high altitude differences, more than 2-5 meters, between neighbouring routes in the grid used can lead to significant exaggerations of floods in the result. The scope of the exaggeration can be measured in MIKE 21. The exaggeration of flooding in the model that was going to be used in this thesis was 19% of the total precipitation volume.

Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag.....	V
Abstract.....	VII
Innledning.....	1
1.1 Problemstilling.....	2
2 Bakgrunn.....	3
2.1 Klima.....	3
2.1.1 Klima generelt.....	3
2.1.2 Klima i Norge.....	3
2.2 Klimaendringer.....	5
2.2.1 Klimaendringer generelt.....	5
2.2.2 Klimaendringer i Norge.....	5
2.3 Urbanhydrologi.....	7
2.4 Nedbør.....	9
2.4.1 Nedbørstyper.....	9
2.4.2 Konstruert nedbør.....	10
2.5 Overvannsdiskonering.....	11
2.5.1 Konvensjonell overvannsdiskonering.....	11
2.5.2 Lokal overvannsdiskonering.....	12
2.5.3 Overvannsdiskonering i København.....	14
2.6 Beregning av avrenning og modellering.....	16
2.7 MIKE 21 FLOW MODEL.....	18
2.8 ArcGIS Desktop.....	21
2.9 Tidligere arbeid.....	22
3 Metode.....	25
3.1 Analyseområde.....	25
3.2 Validering og justering av terrengmodell.....	27
3.3 Konstruksjon av regnhyetogram.....	30
3.4 Modelloppsett for simuleringene.....	32
3.4.1 Nedbørdata.....	32
3.4.2 Batymetri.....	33
3.4.3 Infiltrasjon.....	33
3.4.4 Ruhet.....	33
3.4.5 Eddy viskositet.....	33

3.4.6	«Flood and dry»	33
3.4.7	Simuleringstid.....	34
3.5	Planlegging av flomveier og fordrøyning	34
3.5.1	Planlegging og innlegging av tiltak	34
3.5.2	Volumberegning av oversvømmelser	38
3.5.3	Fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet	39
3.6	PC-spesifikasjoner	41
4	Resultater	43
4.1	Kvalitetssikring og justering av terrengmodell	43
4.2	Simulering I: Eksisterende terreng.....	44
4.3	Simulering II: Flomveier og fordrøyning i tiltaksområde.....	46
4.4	Simulering III: Fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet	47
4.5	Sammenligning av volum av oversvømmelser	47
5	Diskusjon	51
5.1	Kvalitetssikring og justering av terrengmodell	51
5.2	Konstruert nedbør	52
5.3	Planlegging og innlegging av flomforebyggende tiltak	52
5.3.1	Valg av tiltak.....	52
5.3.2	Vurdering av metodikken for modellering av effekten av tiltak.....	53
5.4	Videre arbeid.....	53
6	Konklusjon.....	55
7	Referanser.....	57
	Vedlegg A Beregning av oversvømmelsesvolum i resultatfiler.....	I
	Vedlegg B Utvalg av spesifikke verdier eller områder i dfs2-filer.....	III
	Vedlegg C Å legge inn flomveier og fordrøyning i terrengmodellen.....	V

Innledning

Klimaendringene fører til økt nedbør i Norge. Den gjennomsnittlige, årlig nedbøren øker, og kortvarig, kraftig nedbør forekommer hyppigere og er mer intens enn tidligere. Nedbørsøkningen har vært størst de senere årene og forventes å tilta fram mot 2100 (Hanssen-Bauer et al. 2015b).

Større nedbørsmengder i kombinasjon med urbanisering fører til mer avrenning i byer og tettsteder. Fortetting, og følgelig en større andel tette flater, bidrar til mer overvann. Overvann er en samlebetegnelse for nedbør, smeltevann og stormflo som ikke infiltreres, men renner av på overflaten. Når overvannsmengdene i en by eller et tettsted overskrider kapasiteten i ledningsnett, oppstår pluvial flom. Ifølge NVE er elveflom (fluvial flom), styrtflom, urban flom (pluvial flom) og stormflo de mest relevante flomtypene i Norge (Waagø 2012). Hyppigheten og skadeomfanget av pluvial flom har økt kraftig i de senere år, og pluvial flom er i dag den flomtypen som forårsaker flest skader i tettbygde strøk (Hanssen-Bauer et al. 2015a).

I følge Klima- og miljødepartementet er erstatningsutbetalinger som følge av flom mellom 1,6 og 3,6 milliarder kroner årlig (NOU 2015:16). Dagens overvannsdisponering er ikke tilpasset de økende mengdene av overvann, og store investeringer i flomforebyggende tiltak er nødvendig for å senke skadepotensialet, særlig i byer og tettsteder.

For å kunne predikere størrelsen og utbredelsen av en flom, er det utviklet modelleringsverktøy som kan simulere overvannets bevegelser i terrenget. Simuleringene kan gi gode indikasjoner på problemområder og eventuelle flaskehals. Ved å bygge og kjøre slike modeller kan man opparbeide kunnskap til å planlegge så effektive og samfunnsøkonomiske tiltak som mulig. I denne oppgaven skal det simuleres et 100-årsregn i et område i Drammen kommune i programmet MIKE 21 Flow Model. Ut fra simuleringens resultater skal nødvendig fordrøyningsvolum i nedbørsfeltet beregnes og tiltak planlegges og dimensjoneres. Videre skal tiltakene legges inn i terrengmodellen slik at effekten av disse kan simuleres og vurderes. Denne framgangsmåten er basert på Københavns skybruddsplan fra 2012. Målet er å utarbeide en metodikk for å utføre dette ved hjelp av MIKE 21 og ArcGIS Desktop, og deretter

vurdere om metodikken er ideell for planlegging av flomsikring, samt identifisere eventuelle svakheter og styrker ved denne fremgangsmåten.

1.1 Problemstilling

Denne masteroppgaven skal svare på følgende problemstilling:

Hvordan kan effekten av flomforebyggende tiltak modelleres ved hjelp av MIKE 21 og ArcGIS, og er dette et anvendelig verktøy for god og helhetlig overvannshåndtering?

For å besvare problemstillingen, er det utledet tre spørsmål:

- Hvordan kan flomforebyggende tiltak legges inn i terrengmodellen som skal benyttes i avrenningsmodellen?
- Hvordan kan nødvendig fordrøyningsvolum beregnes for et nedbørsfelt i et urbant område ved bruk av MIKE 21 Flow Model?
- Hvilke svakheter og styrker har den utarbeidede metodikken?

2 Bakgrunn

2.1 Klima

2.1.1 Klima generelt

Vær og klima er begreper som sorterer under meteorologien, vitenskapen om atmosfærens prosesser og fysikk (Dannevig & Harstveit 2017). Vær er et begrep for de meteorologiske prosessene som går for seg i de nedre delene av atmosfæren, hovedsakelig opp til 15 km over bakken i det som kalles troposfæren. Parametere som beskriver vær er luftfuktighet, lufttrykk, temperatur, nedbør, solstråling, skydekke og vind. Vær beskriver en tilstand i øyeblikket. Klima er et begrep for værforhold i et område over lengre tid og baseres på statistiske data. Klima kan beskrives ved gjennomsnittsverdier og variasjoner rundt disse samt maks- og minimumsverdier (Harstveit 2009). Klimasystemet er de fysiske komponentene på jordkloden som påvirker klimaet. Disse komponentene er atmosfæren, havet, kryosfæren (snø og is), biosfæren (områder der det finnes liv) og landjorda (Hanssen-Bauer et al. 2015b).

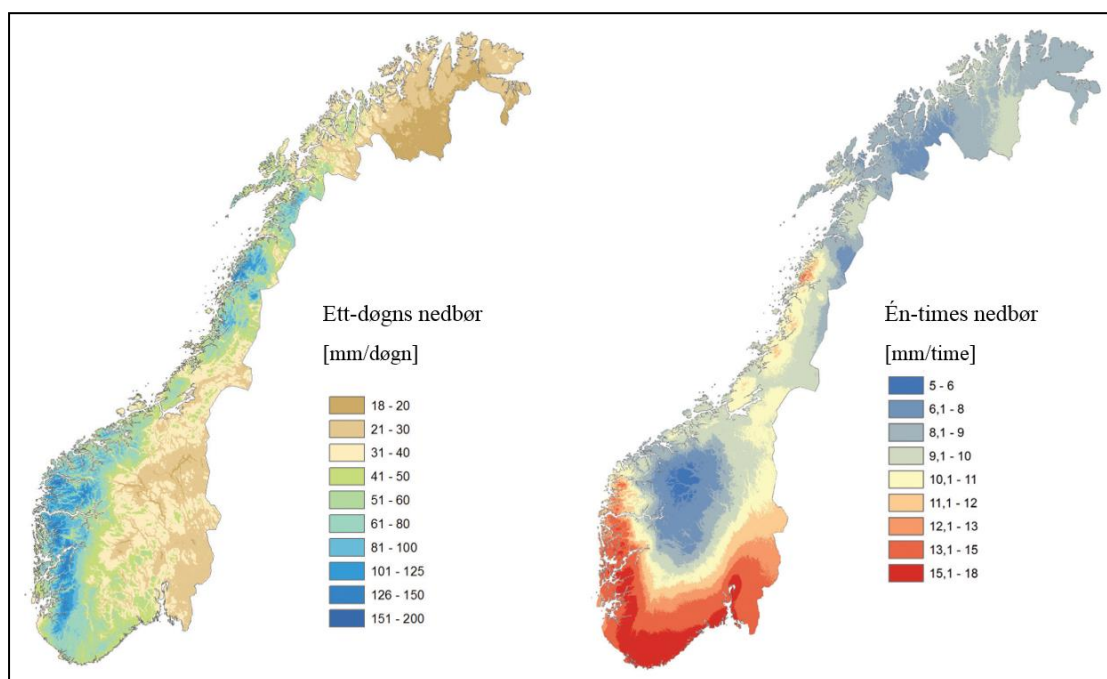
Beregning, analyse og sammenligning av statistiske verdier, krever referanseperioder. Innen klimatologien benyttes klimanormaler og herunder normalperioder. Klimanormaler presenterer gjennomsnittsverdier for flere meteorologiske og hydrologiske variabler over en 30-årsperiode. For å kunne sammenligne klimanormaler internasjonalt, har verdens meteorologiske organisasjon (WMO) vedtatt bestemte standard normalperioder som skal beregnes i alle land. Gjeldende standard normalperiode er 1961-1990 og neste normalperiode vil være 1991-2020 (Aune 1993). Ettersom det i dag foregår relativt raske endringer i klimaet, er det blitt naturlig å benytte statistikk fra en yngre 30-årsperiode da dette gir en bedre indikasjon på dagens normalverdier. Miljødirektoratets klimatilpasningsrapport «Klima i Norge 2100» benytter 1971-2000 som referanseperiode (Hanssen-Bauer et al. 2015b) og FNs klimapanel (IPCC) benytter perioden 1986-2005 i sin siste klimarapport (2014).

2.1.2 Klima i Norge

Det norske klimaet er mildere enn breddegraden skulle tilsi. Dette skyldes hav- og luftstrømmer som den nordatlantiske strømmen («Golfstrømmen») og vandrende sørlige lavtrykk. Lavtrykkene frakter varm og fuktig luft til den norske kysten, mens Golfstrømmen fører til en høyere havtemperatur som forklarer landets milde vintre. Klimaet i Norge varierer i stor grad ut fra geografi og sesong. De høye fjellkjedene

mellom øst og vest medfører et markant værskille i Sør-Norge. Østlandet får et mer kontinentalt og tørt klima enn avstanden fra kysten tilsier, mens klimaet på Vestlandet preges av mye nedbør på grunn av de fuktige luftmassene fra vest som tvinges over fjellene (Hanssen-Bauer et al. 2015b). Nord-Norge har ikke det samme markante værskillet, men har likevel et fuktig klima langs kysten og et tørrere klima på Finnmarksvidda (Dannevig & Harstveit 2013).

Gjennomsnittlig årsnedbør i Norge ligger mellom 1400 og 1500 mm (Hanssen-Bauer et al. 2015b; Sorteberg 2014). Det er betydelige geografiske variasjoner innad i landet, fra under 400 mm i indre strøk på Østlandet til over 3000 mm i kystnære områder på Vestlandet (Sorteberg 2014). Nedbørsmengden er generelt betydelig høyere langs kysten i Norge enn i innlandet. De kraftigste nedbørshendelsene målt i døggnedbør (mm/døgn) finner sted på Vestlandet, men de kraftigste nedbørshendelsene på timesskala finner sted på Østlandet. Dette er illustrert i figur 2-1. Til tross for lite nedbør gjennom året er det følgelig Østlandet som mottar den mest intense nedbøren (Sorteberg 2014).



Figur 2-1: Geografisk fordeling av henholdsvis døggnedbør og timesnedbør. Tilpasset fra Førland et al. (2015) og Hanssen-Bauer, I et al. (2015a).

2.2 Klimaendringer

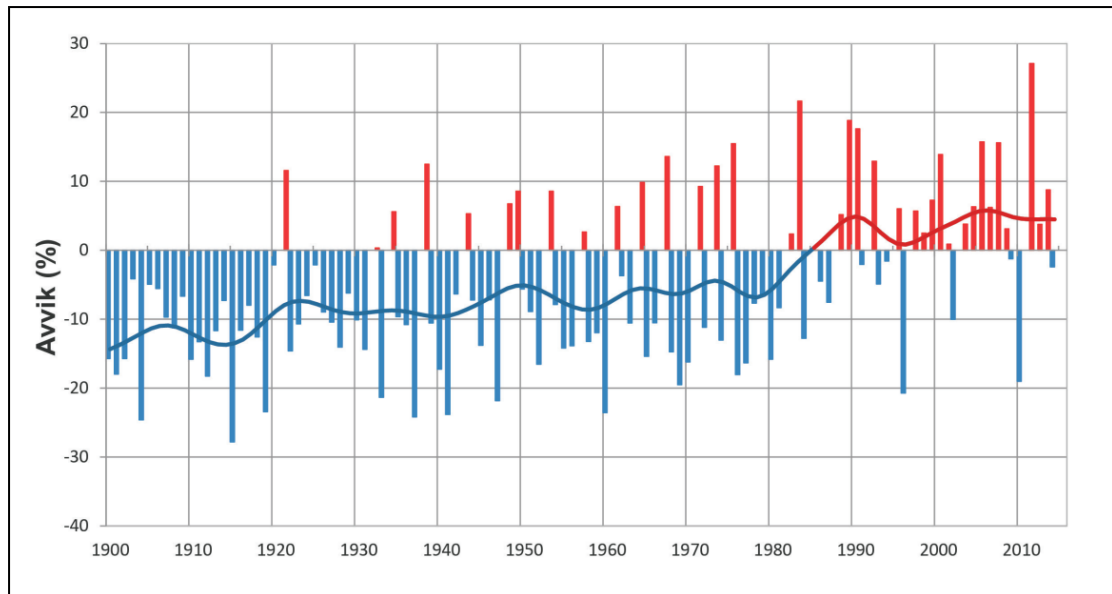
2.2.1 Klimaendringer generelt

Fram til midten av 1900-tallet anså forskere og historikere klima som noe stabilt og konstant i tid, men siden gikk klimatologien gjennom et slags paradigmeskifte da forskere kom fram til at klimaet var i kontinuerlig endring (Heymann 2009). Endringen skyldes variasjoner i strålingsbalansen, dvs. balansen mellom innstråling fra solen, refleksjon av solstråling og varmeutstråling fra jorda og atmosfæren (Benestad & Mamen 2016). Klimaendringene som har vært registrert siden 1950 skiller seg fra tidligere ved å være særlig raske (IPCC 2013). Årsakene til dette er delvis menneskeskapte og delvis naturlige (Fuglestad et al. 2017). Forskning på fremtidige temperaturer og nedbør baserer seg på kompliserte klimamodeller og medfører stor grad av usikkerhet. Graden av menneskelig påvirkning er vanskelig å slå fast, men ifølge FNs klimapanel er menneskelig aktivitet hovedårsaken til endringene. Klimapanelets rapport hevder også at med mindre utslippene av drivhusgasser begrenses, vil den globale temperaturen fortsette å øke, isfjell og isbreer fortsette å smelte og havnivået stige. Det forventes også endringer i atmosfæriske og oseaniske sirkulasjonssystemer (IPCC 2013).

Det knyttes også store usikkerheter til predikering og observasjon av endringer i total nedbør globalt. Til tross for denne usikkerheten mener forskere å ha belegg for at forekomsten av ekstremnedbør i både nedbørsfattige og nedbørsrike områder vil øke. Klimamodeller og observasjoner fra de siste 60 årene støtter disse konklusjonene (Donat et al. 2016; Ingram 2016). Fenomenet kan forklares: Et varmere klima fører til øket fordampning, og luften kan dessuten holde på mer fuktighet. Dette skaper kraftigere regnskyll når luften kjøles ned (Christensen 2016).

2.2.2 Klimaendringer i Norge

Endringer i sirkulasjonsmønstrene på jorda påvirker både de vandrende lavtrykkenes bevegelser og styrke. Dessuten øker volumet av og temperatur i Golfstrømmen (Hanssen-Bauer et al. 2015b). Dette bidrar til at Norge er sårbart for klimaendringer.



Figur 2-2: Utvikling av årsnedbør for Fastlands-Norge i perioden 1900-2014. Kurven viser årlig avvik fra middelverdien i normalperioden 1971-2000 i prosent. Hentet fra Hanssen-Bauer et al. (2015a).

Fra 1900-2014 har midlere årstemperatur i Norge økt med ca. 1°C. Det har vært perioder med stigende og synkende temperaturer, men i de siste 40 årene har økningen vært markant. Siden 1900 har gjennomsnittlig årlig nedbør i Norge økt med 18% (Hanssen-Bauer et al. 2015b). Utviklingen er illustrert i figur 2-2. Økningen forventes å intensiveres fram mot år 2100. Nedbørsstatistikken viser i tillegg at den intensive korttidsnedbøren vil forekomme hyppigere og bli enda mer intens (Hanssen-Bauer et al. 2015b). Områdene som er mest utsatt for og som sannsynligvis vil takle denne type nedbør dårligst, er den sørøstlige kyststrekningen av landet. Det kan forventes at omtrent halvparten av de 20 byene langs Oslofjorden/Skagerak vil oppleve regnflom som følge av en ekstrem nedbørshendelse (over 100 mm i løpet av to timer) innen de neste 50 år er omme (DSB 2016).

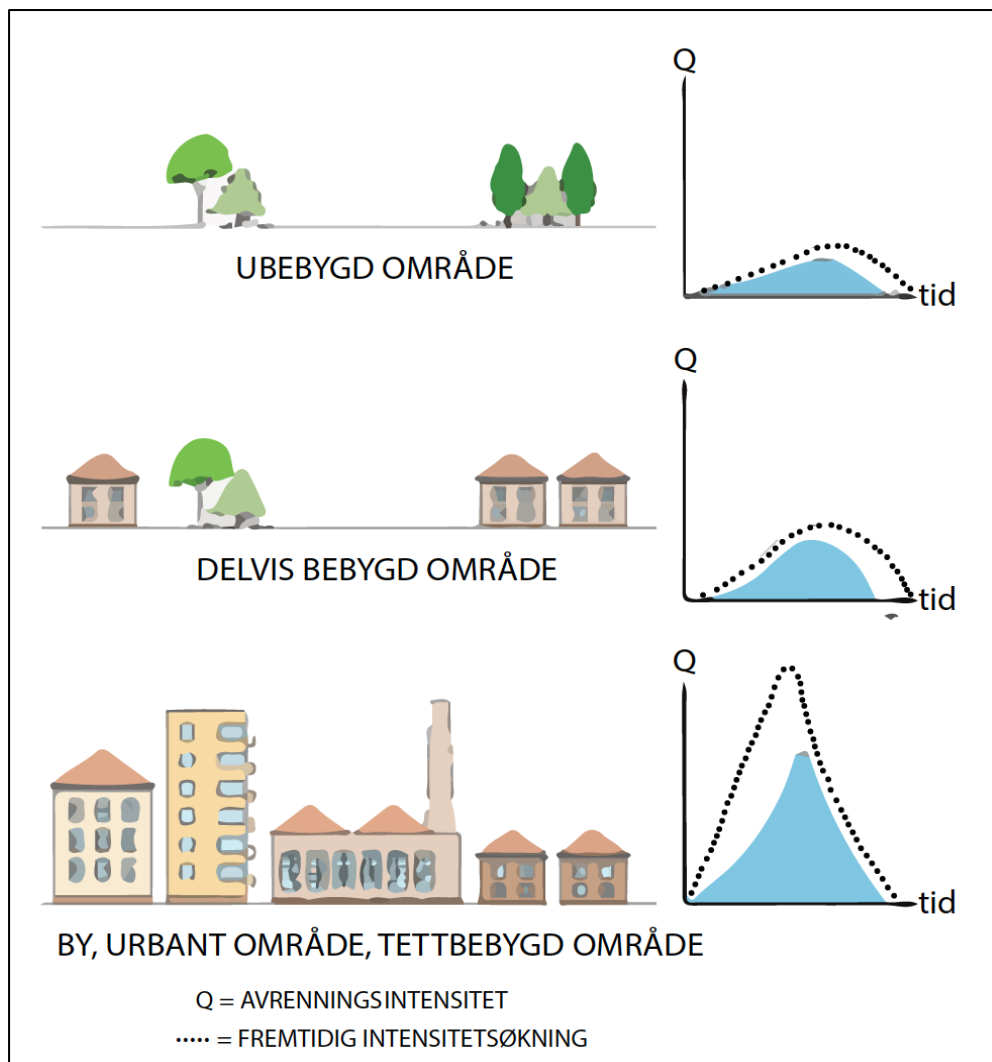
2.3 Urbanhydrologi

Hydrologi er læren om vannets egenskaper, forekomst, kretsløp, fordeling på jorden og vekselvirkninger med omgivelser (Tollan 2009). Studiet av vannets kretsløp står sentralt i hydrologien og omhandler interaksjonen mellom hav og innsjøer, atmosfære, grunnvann og is. Sirkulasjonen mellom disse reservoarene kan beskrives av vannbalanseligningen

$$P = R + E + \Delta S \quad (1)$$

der P er nedbør, R er avrenning på overflaten og i grunnen, E er evapotranspirasjon, en samlebetegnelse for transpirasjon og evaporasjon, og ΔS er endring i magasinert vannmengde i en gitt tidsperiode.

Delen av vannets kretsløp som knyttes til bebygde områder er definert som urbanhydrologi (Thorolfsson, S. T. 2014). Urbanhydrologi omhandler de hydrologiske effektene av byutvikling og er et sentralt tema for å kunne forstå og løse problemer knyttet til byer og tettsteder. Ved en nedbørshendelse i ubebygde områder vil mesteparten av vannet stort sett infiltrere ned i grunnen eller returnere til atmosfæren gjennom evaporasjon (fordampning) eller transpirasjon (fordampning via planter). Kun en liten andel av vannet vil renne av på overflaten. I byer og tettsteder er en stor andel av naturlige permeable flater erstattet av nesten impermeable flater som asfalt og takbelegg. I tillegg er det lite vegetasjon, og de tidligere naturlige vannveiene er ofte utjevnet (Thorolfsson, S. T. 2014). Særlig endringen til tettere flater har stor effekt på avrenningen. Mengden av overflateavrenning øker ettersom en lavere andel av vannet infiltreres. Mindre infiltrasjon og økt andel harde flater fører også til at konsentrasjonstiden, tiden fra en regndråpe faller i ytterkanten av et nedbørsfelt til den når utløpet, reduseres. Avrenningstoppene i et urbant område vil dermed være større og opptre tidligere enn i et ruralt område. Dette illustreres i figur 2-3. Andre utfordringer ved urbanisering er miljøgifter inklusive tungmetaller som akkumulerer i tørrvårsperioder og blir vasket ut til resipienter under nedbørshendelser. Lavere grunnvannsstand som følge av mindre infiltrasjon kan føre til setninger som skader bygninger eller infrastruktur.



Figur 2-3: Avrenningstopper ved ulik grad av urbanisering. Tilpasset fra SINTEF Byggforsk (2012).

Sentraliseringen og befolkningsveksten i Norge fører til at byer og tettsteder vokser og fortettes. I følge en undersøkelse utført av Vista Analyse i 2015 har andelen av grønne arealer i norske byer siden 1999 blitt redusert med 20%. Predikering av fremtidig befolkningsvekst innebærer store usikkerheter, men statistisk sentralbyrå kalkulerer med en økende vekst fram mot 2100, hovedsakelig i sentrale strøk og særlig i storbyer (Tønnessen et al. 2016). Dette tyder på at overflateavrenning trolig vil by på økende utfordringer framover, og behovet for god overvannshåndtering er stort.

2.4 Nedbør

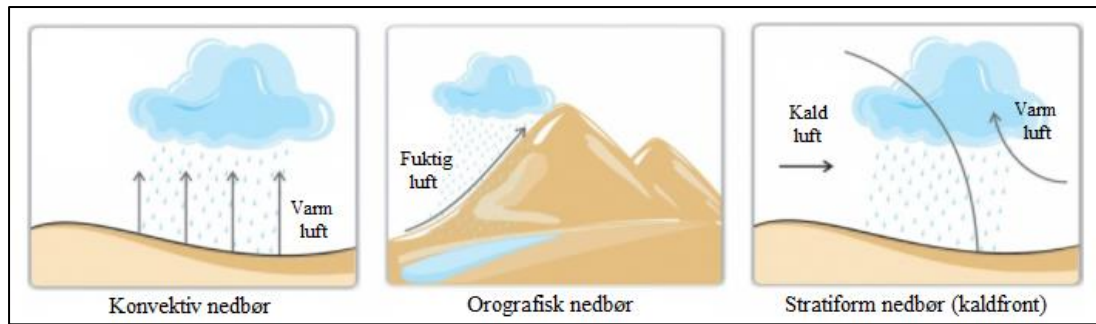
Nedbør oppstår ved at fuktig luft løftes til høyere lag og dermed ekspanderer på grunn av synkende lufttrykk og avkjøles. Når luftens temperatur og vanndamptrykket synker vil den relative luftfuktigheten øke. Dersom vanndampen når metning (100% relativ fuktighet, gjerne kalt duggpunktet) vil vannpartiklene i luften kondensere til små dråper eller iskrystaller. Under riktige forhold vil disse koalisere til de er tunge nok til å kunne falle som nedbør (Thorolfsson, S. 2014). Nedbør kan hovedsakelig deles inn i tre typer; stratiform nedbør, orografisk nedbør og konvektiv nedbør. Man skiller mellom nedbørstypene ut ifra årsakene til at luften stiger, og de kjennetegnes ved ulik intensitet, varighet, geografiske forhold og romlig fordeling (Abdella 2013). Karakteristikken for hver nedbørtype er illustrert i figur 2-4.

2.4.1 Nedbørstyper

Stratiform nedbør, også betegnet som frontnedbør eller storskala nedbør, dannes ved at varm og kald luft kolliderer. Den varme luften vil da presses over den kalde. Stratiform nedbør kan skyldes en kaldfront, varmfront eller okklusjon (met.no 2009). En kaldfront oppstår når kald luft fortrenger varm luft og en varmfront oppstår når varm luft fortrenger kald luft. En kaldfront som tar igjen en varmfront og dermed presser varm luft oppover kalles okklusjon.

Orografisk nedbør oppstår når fuktig luft møter fjell eller høyder og tvinges til å stige. Denne typen nedbør fører til store nedbørsmengder i områder der fuktig havluft strømmer mot høye fjellkjeder. På motsatt side av disse fjellene vil luften synke og varmes opp. Temperaturstigningen og det reduserte vanninnholdet fører ofte til klarvær (Met 2017). Stratiform og orografisk nedbør kjennetegnes av lang varighet og lav intensitet over et stort areal, enten på mesoskala eller synoptisk skala (10 km <) (Kyselý et al. 2015).

Konvektiv nedbør, også kalt bygenedbør, er et typisk sommerfenomen og oppstår ved at bakken og fuktig luft nær bakken varmes opp av solen og stiger. Dersom luften stiger høyt nok, og luften som omgir den ikke er tørr og kan utjevne den høye luftfuktigheten, vil det dannes nedbør. Denne typen nedbør kjennetegnes ved at den er lokal (ofte på mikroskala eller nedre del av mesoskala), intens og har kort varighet.



Figur 2-4: Figuren viser tre nedbørstyper; konvektiv, orografisk og stratiform nedbør, og hvordan disse oppstår. Tilpasset fra Nirman (2014).

2.4.2 Konstruert nedbør

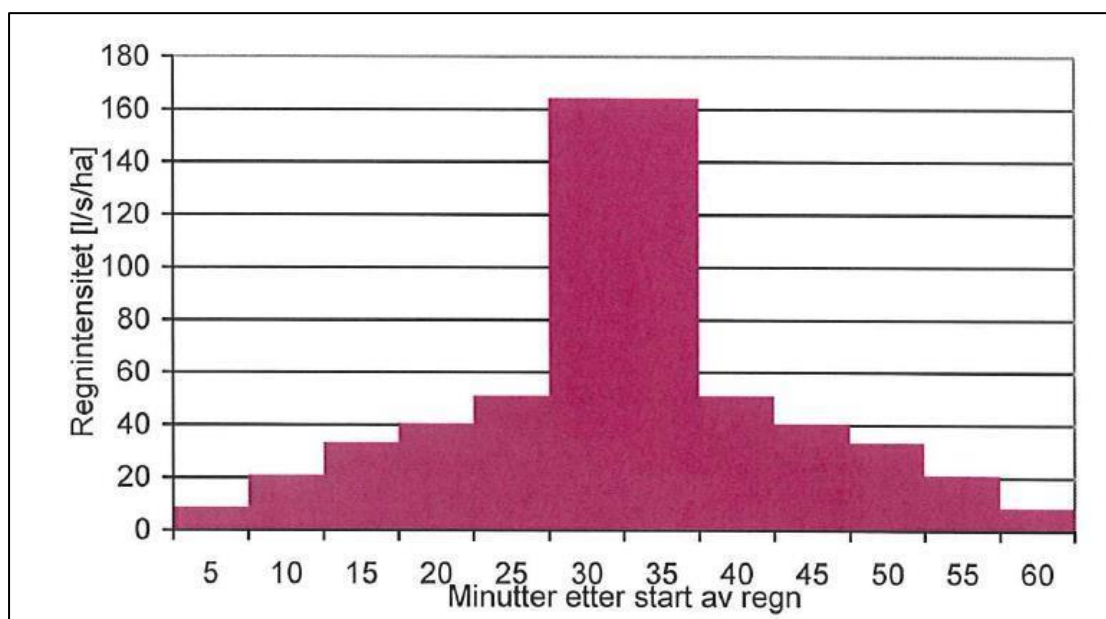
En konstruert nedbørshendelse er en etterligning av en reell nedbørshendelse, og benyttes i avrenningsberegninger og avrenningsmodeller. Hendelsen konstrueres ut fra nedbørstatistikk som er representativ for det aktuelle området. Nedbørstatistikken hentes ofte fra en intensitets-, varighets- og frekvenskurve (IVF-kurve). Intensiteten forteller hvor mye nedbør som faller per tidsenhet, og varigheten viser hvor lenge nedbør med en gitt intensitet varer. Frekvens, også kalt returperiode eller gjentakintervall, er en verdi på hvor ofte en kan forvente en gitt nedbørmengde. En nedbørshendelse med 100 års gjentakintervall forventes å forekomme gjennomsnittlig en gang hvert hundrede. Sannsynligheten for at hendelsen vil forekomme i løpet av det neste året er 0,01. Verdiene fra en IVF-kurve er basert på minst 10 år med kvalitetskontrollert nedbørdata (Norsk klimaservicesenter 2016). I Norge er det opprettet offisielle IVF-kurver fra 49 ulike nedbørstasjoner.

En konstruert nedbørshendelse kan bl.a. konstrueres som et kasseregn eller et regnhyetogram. Et kasseregn har konstant intensitet angitt ut fra en bestemt varighet. Et symmetrisk regnhyetogram konstrueres ut fra flere verdier i IVF-kurven slik at intensiteten bygges opp til en toppintensitet for så å avta (Lindholm 2013). Det er fordelaktig å bruke et regnhyetogram framfor et kasseregn ettersom det gir en bedre etterligning av en reell nedbørshendelse. Hyetogrammet kan benyttes for hele nedbørsfeltet da det inneholder virkningen av korte, intense regn og lengre regn med høyere totalvolum. Det vil heller ikke være nødvendig å ta hensyn til nedbørsfeltets konsentrasjonstid (Lindholm 2013).

Et hyetogram konstrueres ved at regnintensiteter beregnes i tidsintervall med formelen

$$I_n - I_{n-s} = \frac{V_n - V_{n-s}}{t_s} \quad (2)$$

der I_n er intensiteten ved varighet n , I_{n-s} er intensiteten ved varighet n subtrahert med valgt tidsintervall s , $V_n - V_{n-s}$ er nedbørvolumdifferansen mellom stegene og t_s er valgt tidsintervall. Beregnede intensiteter for hvert tidsintervall speiles om aksene i hyetogrammet slik at man får et symmetrisk hyetogram som vist i figur 2-5.



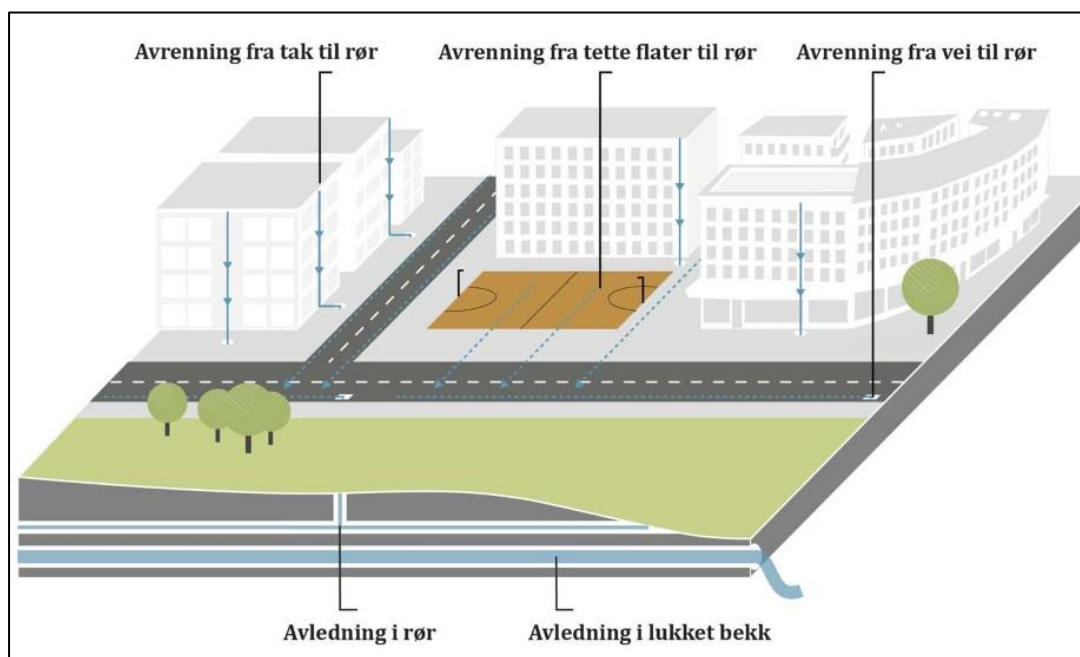
Figur 2-5: Eksempel på et regnhyetogram med beregningssteg på fem minutter. Hentet fra Johansen og Moldekleiv (2016).

2.5 Overvannsdisponering

2.5.1 Konvensjonell overvannsdisponering

Tradisjonell håndtering av overvann i urbane strøk går ut på å bortlede vannet i lukkede ledninger under bakken. Konseptet er illustrert i figur 2-6. Overvann bortledes sammen med spillvann i fellessystemer eller atskilt i egne rørledninger i separatsystemer. I et fellessystem ledes avløpet fra bebyggelsen til et renseanlegg og videre til en resipient. Kapasiteten i ledningsnettets er ofte den begrensende faktoren i slike systemer. I et separatsystem ledes overvann som oftest direkte til resipient. Stadig flere fellessystemer erstattes av separatsystemer (Lindholm 2014). Formålet med dette er å kunne eliminere noen problemer knyttet til overvann i urbane strøk. Ved store nedbørshendelser vil det som nevnt tidligere genereres mer avrenning enn ledningsnettets har kapasitet til å

bortlede, og man får oppstuvning og flom. For å avlaste ledningsnett og renseanlegg er det ofte satt inn overløp i strategiske punkter som benyttes i disse situasjonene. I et fellessystem vil dette medføre at urensset avløpsvann ledes direkte ut i naturen. Det urensede avløpsvannet kan også strømme til overflaten via kummer eller inn i kjellere via sluk. I et separatsystem vil vann som ledes ut i naturen være mindre forurenset, sannsynligheten for kjelleroversvømmelser være lavere og belastningen på renseanlegg være på et lavere og mer stabilt nivå.



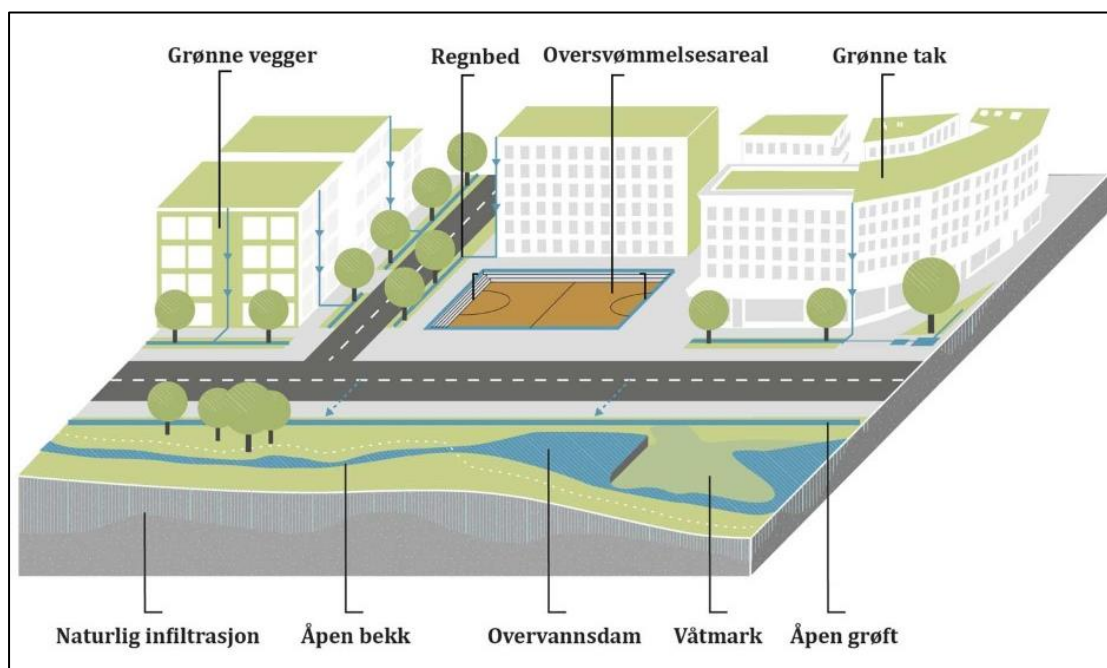
Figur 2-6: Konvensjonell overvannsdisponering. Tegnet av Hanna Haukøya Storemyr. Hentet fra NOU 2015:16.

Avløpsledningene i Norge er tradisjonelt sett dimensjonert for å håndtere klimaet og bebyggelsen på etableringstidspunktet. Økende nedbørmengder og urbanisering har ført til at kapasiteten i ledningsnett ikke er tilstrekkelig, og det vil ikke være samfunnsøkonomisk å håndtere den økende avrenningen ved kun å oppgradere kapasiteten (NOU 2015:16). I de senere år har det vært et økt fokus på at overflateavrenning i større grad skal baseres på de naturlige avrenningssystemene som finnes i ubebygde områder. Dette konseptet kalles lokal overvannsdisponering (LOD).

2.5.2 Lokal overvannsdisponering

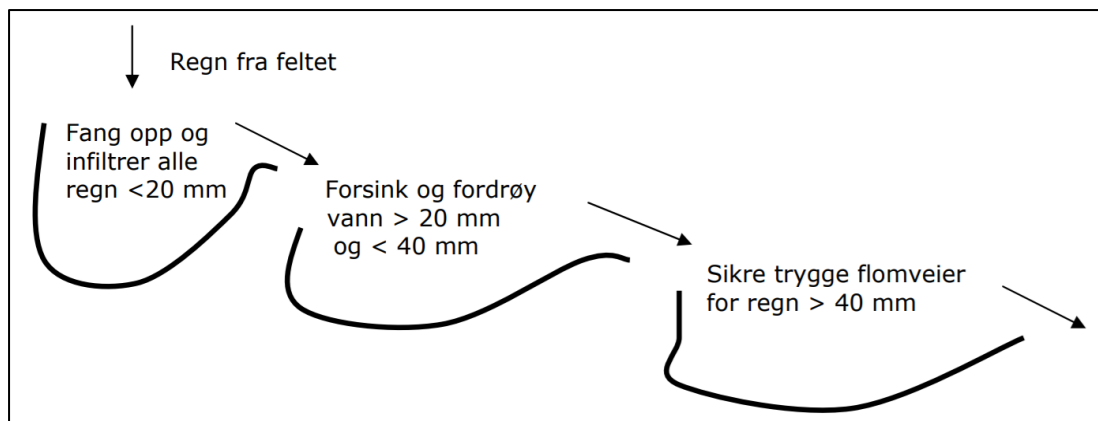
Lokal håndtering av overvann innebærer at vannet skal følge naturlige veier -enten via åpne vannveier og fordrøynings- og forsinkelselementer til resipient, via infiltrasjon til grunnen eller en kombinasjon av disse. Fordrøyning og forsinking holder tilbake

vann slik at avrenningstopper reduseres og infiltrasjon reduserer total overflateavrenning. Disse konseptene skal hovedsakelig forebygge vannskader og vil samtidig redusere belastningen på ledningsnett. Løsningene skal tilpasses lokale forhold, og i tillegg til å forebygge skader, være bærekraftige og tilføre kvaliteter til omgivelsene gjennom eksempelvis biomangfold eller rekreasjon. Visjonen er å utnytte vannet som en ressurs og i størst mulig grad håndtere overvannet på overflaten som en del av bybildet (Lindholm 2014). Konseptet er illustrert i figur 2-7.



Figur 2-7: Lokal overvannsdiskonering. Tegnet av Hanna Haukøya Storemyr. Hentet fra NOU 2015:16.

For å oppnå målene ved lokal overvannsdiskonering på en effektiv måte har Lindholm utviklet en «treleddsstrategi» som illustrerer hvordan nedbør av ulike størrelser skal håndteres i et nedbørfelt. I første ledd er nedbørmengden så liten at den i de fleste tilfeller kan håndteres ved infiltrasjon eller tilbakeholdelse. Ved en litt større nedbørshendelse skal det overskridende/overskytende vannet ledes til åpne fordrøynings- og forsinkelsesanlegg. I tredje ledd er nedbørmengdene så store at de ikke kan håndteres av fordrøyning og infiltrasjon alene. Det bør anlegges flomveier som kan bortlede disse vannmengdene til en resipient på en trygg måte (Lindholm 2014). Treleddsstrategien er illustrert i figur 2-8. Flomveiene bør frakte overvannet via en rensedam, særlig dersom bilveier benyttes. Overvannet kan vaske med seg tungmetaller og miljøgifter som har akkumulert i tørrværsperioder. Dette bør renses før det renner ut i naturen (Ræstad 2014).



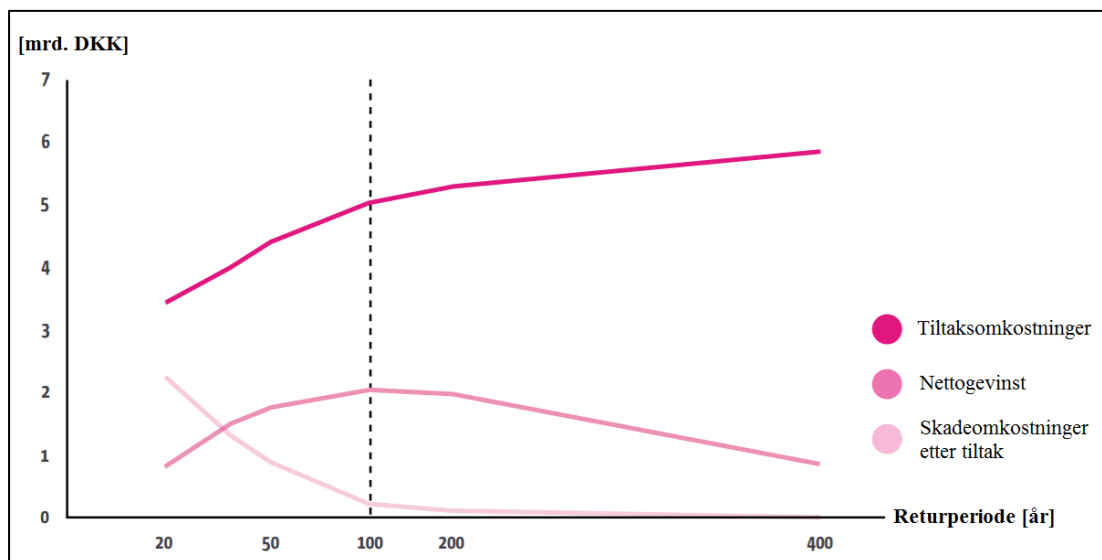
Figur 2-8: Treleddstrategi for overvannsdiskonering. Nedbørverdiene er eksempler og må tilpasses lokalt. Hentet fra Lindholm et.al. (2008).

Et viktig og utfordrende prinsipp ved lokal overvannsdiskonering er at nedbørsfeltet skal studeres som en helhet. Problemene starter ofte oppstrøms ved at store mengder overvann genereres og renner videre med stor hastighet til den nedre delen av nedbørsfeltet hvor vannet akkumulerer (Olsen et al. 2015). Dersom tiltak ikke dimensjoneres med hensyn til beregninger for hele nedbørsfeltet kan vannmengdene i nedre del av nedbørsfeltet føre til store problemer. Dette har vært tilfellet ved flere flomsituasjoner de siste årene, blant annet under flere ekstreme nedbørhendelser i København (Københavns kommune 2012; Olsen et al. 2015). Disse nedbørhendelsene førte til enorme skader som resulterte i at København kommune forkastet sin daværende klimatilpasningsplan og året etter presenterte en ny skybruddsplan med markant høyere krav og investeringer enn tidligere.

2.5.3 Overvannsdiskonering i København

Fokuset på overvannsproblematikken i København har vært stort de siste årene. Dette skyldes hovedsakelig tre kraftige nedbørhendelser som oppstod i løpet av ett år fra 2010 til 2011. Disse nedbørhendelsene førte til store oversvømmelser og et skadeomfang på til sammen 5 - 6 milliarder danske kroner (Københavns kommune 2012). Beregninger og analyser i ettertid viste at den daværende skybruddsplanens fordrøyningsmagasiner og bufferområder hadde betydelig lavere kapasitet enn avrenningsmengden et kraftig regn ville generere. Det ble ut fra dette laget en ny plan for overvannshåndtering i byen som omfatter sikring av byen ved kraftige nedbørhendelser. Planen går ut på at byen skal tåle et 100-årsregn, men at det ved en slik nedbørhendelse godtas vannspeil 10 cm over terreng. Ved et vannspeil på 10 cm, vil det fortsatt være mulig å bevege seg med bil eller til fots, og det regnes som overkommelig å sikre kjellernedganger og bygninger

mot dette vannivået. Gjentakelsesintervallet er bestemt ut fra en kost/nytte-analyse som er illustrert i figur 2-9. Dette skal oppnås ved å erstatte fellessystemer med separatsystemer, kombinert med flomsikring av byen ved hjelp av flomveier og oppmagasinering for fordrøyning og forsinking (Københavns kommune 2012).



Figur 2.9: Gevinst av utførte tiltak ut fra ulike dimensjonerende returperioder. Hentet fra Københavns kommunes «Skybrudsplan» (2012).

Flomveier som følger området topografi skal være den overordnede infrastrukturen for avledning av overvann. Forsinkelsesveier og sentral forsinkelse skal tillegges grønne områder, idrettsanlegg eller plasser der vannet utgjør minimal skade.

Figur 2-10 og 2-11 illustrerer eksempler på henholdsvis sentral forsinkelse og en flom- og forsinkelsesvei. Planlegging og dimensjonering av tiltak utføres for hele nedbørfelt i to trinn. I trinn 1 beregnes dimensjonsgivende vannføring for flomveiene. I trinn 2 beregnes volumet av oversvømmelser utover 10 cm over terreng når flomveiene er implementert. Denne verdien er dimensjonerende for nødvendig fordrøyningsvolum i området. På denne måten oppnås helhetlig og sikker overvannsdisponering.



Figur 2-10: Fordrøyningsdam i sentrum. Eksempel på sentral forsinkelse som oppgraderer eksisterende byrom. Hentet fra skybrudsplanen til Københavns kommune (2012).



Figur 2.11: Grønn flomvei. Eksempel på flom- og forsinkelsesvei som generer byliv. Hentet fra skybruddsplanen til Københavns kommune (2012).

2.6 Beregning av avrenning og modellering

Behovet for å utføre analyser av flomrisiko setter krav til presis avrenningsberegning. Metoden for beregningen avhenger av nedbørsfeltets størrelse. Basismodellen som brukes på arealer inntil 50 hektar er en enkel overflatemodell, Den rasjonelle formel (Lindholm 2014):

$$Q = \Phi AI \quad (3)$$

Q er avrenningsvann målt i liter pr. sekund, avrenningskoeffisienten Φ er forholdet mellom avrenning og nedbørsmengde. Koeffisienten øker vesentlig når regnets intensitet og varighet øker. Det kan forklares med at mengden nedbør som infiltreres eller holdes tilbake av vegetasjonen og terreng er ganske konstant, og når regnintensiteten eller varigheten av regnet øker, vil andelen av vann som renner av også øke. A er arealet målt i hektar, mens I betegner nedbørsintensiteten og måles i liter pr. sekund / hektar.

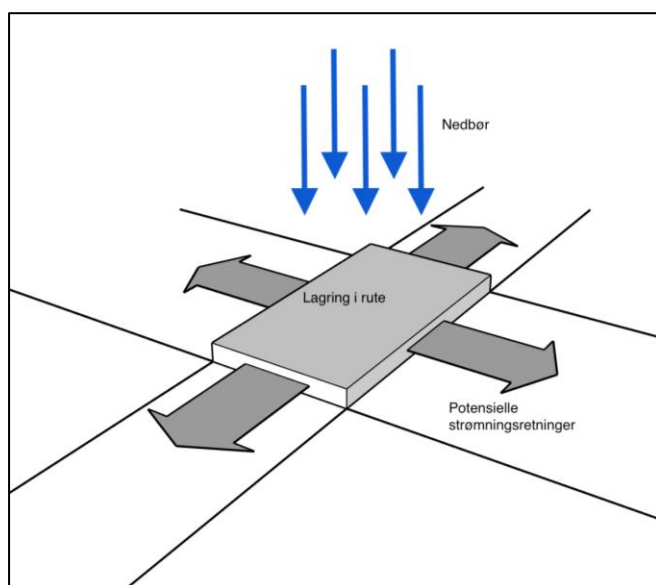
Ved avrenningsberegning på arealer større enn 20-50 hektar er det behov for mer avanserte modeller (Paus 2017). Også disse matematiske modellene har nevnte basisformel som utgangspunkt, men er mer kompliserte, og beregner, analyserer og predikerer hendelsesforløp langt raskere enn de manuelle metodene gjør. Usikkerheten som er knyttet til denne modelleringen gjelder i første rekke tilgangen på lokale nedbørsmålinger samt tilrenningstid på overflatene (Lindholm 2011).

For å redusere usikkerhetene i en modell kan verifikasjon, kalibrering og validering gjennomføres. Modellverifikasjon vil si kontroll av at modellen løser de matematiske ligningene korrekt. Ved kalibrering kontrolleres det hvor følsom modellen er i forhold

til endringer av inngangsparametere. Ved validering studeres overenstemmelsen mellom modellens resultater og observasjoner/målinger (Engan 2015).

For å modellere overvannsavrenning, kan man bruke enkle GIS-analyser eller todimensjonale hydrauliske modeller. GIS-analysen identifiserer lavbrekk i terrenget og beregner drenslinjer. Nedbøren som faller i en rute vil strømme til den av de åtte tilstøtende rutene med lavest verdi, men siden analysene ikke gjør hydrauliske beregninger, gir den ingen informasjon om hvilken mengde vann som skal til for å fylle eventuelle nedsenkninger.

Todimensjonale modeller gjør derimot hydrauliske beregninger i hver rute og er derfor mer nøyaktige. Hver rute har fire potensielle strømningsretninger som vist i figur 2-12. Disse modellene kan gi informasjon om både tidsforløp, hastighet, retning og volumstrøm. Det finnes også endimensjonale hydrauliske modeller for beregning av vannets oppstuvning i ledningsnettet, og ved å kombinere disse to modellene, får man en modell som kan beskrive dynamikken mellom avløpssystemet og overflateavrenning ved en nedbørsepisode (Engineers Australia 2012).



Figur 2-12: Strømretninger i todimensjonal hydraulisk avrenningsmodell. Illustrasjon tilpasset fra Engineers Australia (2012).

2.7 MIKE 21 FLOW MODEL

MIKE 21 Flow Model (MIKE 21) er et hydraulisk modelleringsverktøy utviklet av DHI. Programvaren benyttes hovedsakelig til kyst og havmodellering, men egner seg også for dammer, elvemunninger, overflateavrenning i urbane områder og andre hydrauliske fenomener med fritt vannspeil der lagdeling kan neglisjeres (DHI 2017c). Simuleringene i programvaren gir informasjon om vanddybder og vannføringer ved gitte tidspunkt og maksimale vanddybder som kan forventes av gitte nedbørshendelser.

MIKE 21 kan brukes alene eller i kombinasjon med andre programvarer utviklet av DHI. Etersom MIKE 21 er et modelleringsystem for todimensjonal strømning med fritt vannspeil kan det alene kun brukes til overflatesimulering. Ved modellering av overflateavrenning vil ledningsnettets dermed ikke bli tatt hensyn til. Dette kan skape et urealistisk resultat, særlig ved modellering av nedbørhendelser med volum tilsvarende kapasiteten i ledningsnettets. For å oppnå en mer nøyaktig og helhetlig modell kan MIKE 21 kombineres med MIKE Urban i MIKE Flood. MIKE Urban er et endimensjonalt modelleringsverktøy for ledningsnett og MIKE Flood er et verktøy som setter sammen MIKE 21 og MIKE Urban. Dette krever et godt datagrunnlag for ledningsnettets. Usikkerheten ved å ekskludere ledningsnettets blir lavere jo større nedbørhendelsen er. I det følgende tas det utgangspunkt i at MIKE 21 benyttes alene.

Det eksisterer to versjoner av MIKE 21 Flow Model; Flexible mesh og Raster. Disse presenterer den topografiske informasjonen i terrengmodellen på to ulike måter. Flexible mesh er bygget opp av trekantene av ulike størrelser mens raster består av et rutenett med rektangler av samme størrelse. Videre beskrivelse av MIKE 21 baseres på raster.

Modulen er et numerisk modelleringsystem som tar utgangspunkt i Navier-Stokesligningene. Tre hovedformler benyttes for å gi en beskrivelse av variasjoner i vannføring og vannhøyde. Disse er anvendelige for strømning som kan studeres som ett lag, dvs. en vertikalt homogen vannstrøm. Beregningene begrenser seg dermed til situasjoner med relativt lav vanddybde.

Massebevaring integrert over vanndybden er gitt ved

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (4)$$

der ζ er terrenghøyde, p er flukstetthet i x-retning, q er flukstetthet i y-retning, d er tidsvarierende vanndybde og t er tid (DHI 2017a). Bevegelsesmengde integrert over vanndybde i x-retning og y-retning er gitt ved ligning (5) og (6) respektivt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 * h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h_{\tau_{xx}}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial y} (h_{\tau_{xy}}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2+q^2}}{C^2 * h^2} - \\ \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h_{\tau_{xy}}) \right] + \Omega p - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

der h er vanndybde, g er tyngdens akselerasjon, C er Chezys ruhetskoeffisient som beregnes fra manningstallet, ρ_w er vannets tetthet, τ_{xx} , τ_{xy} , τ_{yy} er komponenter for effektiv skjærspenning, Ω er coriolisparameter, f er faktor for vindfriksjon, V er vindhastighetskomponenter i x- og y-retning og p_a er atmosfærisk trykk (DHI 2017a).

Mens romlig diskretisering av likning (5) og (6) kan løses ved såkalt «cellesentrert endelig volum-metode», kan den eksplisitte differensialmetoden «upwind» benyttes til å løse tidsintegrasjonen. I denne metoden begrenses tidssteget i simuleringen for å oppnå et bestemt Courant-Friedrich-Lewy-tall (CFL-tall) mindre enn 1, slik at en med det unngår ustabile resultater. CFL-tallet for gruntvannslikningene er definert ved

$$C_R = \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7)$$

der t er tidssteg og Δx bredden til en rute i rasteret.

2.7.1 Modellparametere

MIKE 21 Flow Model simulerer ulike hydrodynamiske situasjoner med hensyn til ulike parametere og grensebetingelser. Disse legges til og endres i programmets brukergrensesnitt, MIKE Zero. Relevante parametere ved simulering av overflateavrenning beskrives kort nedenfor.

Batymetri

Batymetrien er terrengmodellen for modellområdet og følgelig en svært viktig komponent i en avrenningsmodell. Topografien er lagret som høydeverdier i firkantede ruter av samme størrelse i et rutenett (raster). Geografisk posisjon, projeksjonssone og grensebetingelser lagres også i batymetrien (DHI 2017c).

Nedbør

Nedbør er, sammen med batymetrien, den viktigste parameteren i avrenningsmodellen. Nedbør tillegges modellen som konstant verdi i alle ruter, varierende i tid eller varierende i tid og rom. Generelt brukes tidsvarierende konstruerte nedbørhendelser som er basert på nedbørstatistikk. Evaporasjon kan legges inn under samme punkt som nedbør. Også denne kan være konstant eller varierende i både tid og rom.

Infiltrasjon

Infiltrasjon kan gi stor effekt på overflateavrenning (Abry 2016). Effekten er knyttet til infiltrasjonsraten som avhenger av dekke og fysiske egenskaper i jorda som metningsgrad og porestørrelse. Infiltrasjonskapasiteten, hvor mye vann jorda kan lagre, avhenger av jorddybde, grunnvannsstand og lagdeling. Infiltrasjon avtar ved nedbørhendelser ettersom jorden mettes med vann. I MIKE 21 kan man legge inn konstant infiltrasjon med kapasitet, netto infiltrasjon eller ingen infiltrasjon. Netto infiltrasjon kan variere i tid og rom eller være konstant. Ved store nedbørshendelser antas det at infiltrasjonen kan neglisjeres.

Ruhet

Å ta hensyn til ruhet er viktig for å oppnå en mer virkelighetsnær simulering. Ruhet sier noe om hvordan en vannstrøm påvirkes av underlaget, og kan uttrykkes med Mannings ruhetstall, M . Tallet er høyt for glatte og harde underlag og lavt for ujevne underlag. Et høyere ruhetstall vil føre til høyere hastighet.

Vannets friksjonstap som følge av ruhet kan beskrives av Mannings formel

$$v = MR^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

der v er vannhastighet i et tverrsnitt, M er Mannings ruhetstall, R er hydraulisk radius og I er helningen.

Hydraulisk radius er forholdet mellom strømningsareal i et tverrsnitt og våt perimeter. Verdien bestemmer hvor stor effekt ruheten har på friksjonstapet. Når bredden i en vannstrøm er mye større enn dybden kan hydraulisk radius settes til vanndybden. Denne forenklingen benyttes i modellen.

Eddy-viskositet

MIKE 21 beregner skjærspenning forårsaket av turbulens ved å benytte eddy-viskositet. Eddy-viskositet kan inkluderes i modellen som en konstant verdi, som en verdi varierende i rom eller beregnes med Smagorinskys formel (DHI 2017c). Smagorinskys formel kan bestemme eddy-viskositet i hver rute ut fra rutestørrelse og vannhastighet. I modeller der rutestørrelse er større enn vanndybden kan konstant eller ingen eddy-viskositet benyttes (Engineers Australia 2012).

2.8 ArcGIS Desktop

Gjennom forenklete fremstillinger av den virkelige verden inneholder geografiske data informasjon om hvor et fenomen er, hvilke egenskaper fenomenet har og når observasjonen av fenomenet er gjort (Tenge 2005). Eksempler på slike data kan være registrering av folketall, radonmålinger eller forekomst av nedbør i et bestemt område. Slike data brukes ofte i forbindelse med arealplanlegging og forvaltning (Ørstavik, 2015).

Et geografisk informasjonssystem (GIS) er et system utviklet for å registrere, lagre, analysere, administrere og presentere geografiske data. Slike data brukes ofte i forbindelse med arealplanlegging og forvaltning (Ørstavik 2015). ArcGIS er en programvare utviklet av det amerikanske teknologiselskapet «Environmental Systems Research Institute» (ESRI). Programvaren omfatter flere GIS-relaterte digitale verktøy (Esri 2017).

ArcMap er en sentral applikasjon i ArcGIS og benyttes ofte til kartbehandling av geografiske data. Dataene kan fremstilles i vektorkart eller rasterkart. Vektordata består av punkter, linjer og flater som plasseres på jordoverflaten ved X- og Y-koordinater (Kartverket 2017). Rasterdata representerer et avgrenset område av jordoverflaten som et rutenett (grid) av celler med lik størrelse. Hver celle representerer informasjon i form av en verdi, for eksempel temperatur eller høyde (Esri 2016).

2.9 Tidligere arbeid

Følgende masteroppgaver om utprøving av metodikk for avrenningsmodellering i Drammen kommune har blitt publisert ved NMBU i løpet av de siste årene:

- Utprøving av metodikk for produksjon av aktsomhetskart for flomfare i urbane områder
(Myrvoll 2015)
- Urbane flomveier. Generering av drenslinjer for området Solumstrand i Drammen ved hjelp av ArcGIS
(Murtnes 2015)
- Utprøving av metodikker for modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS, MIKE 21 og MIKE FLOOD
(Johansen og Moldekleiv 2016)
- Modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS og MIKE 21 med fokus på overflateruhet og infiltrasjon
(Abry 2016)
- Modellering av urbane pluviale flommer ved bruk av værradar
(Kjølseth og Vatne 2017)

I de tre siste masteroppgavene ble MIKE 21 benyttet som modelleringsverktøy. Johansen og Moldekleiv sammenlignet modellering i ArcGIS med modellering i MIKE-programmer, og konkluderte ut fra dette at MIKE-programmene ga en mer nøyaktig framstilling. Abry vurderte effekten av infiltrasjon og ruhet ved modellering i MIKE 21, og konkluderte at valg av infiltrasjonsrate hadde stor innvirkning på avrenning mens ruhet hadde lavere innvirkning. Disse benyttet samme terrengmodell

på raster-format. Kjølseth og Vatne fant en metode for å benytte værradardata som nedbørdata i modellen.

Det ble i 2015 dessuten utgitt en bacheloroppgave ved Høyskolen i Østfold:

- Analyse av overvannsstrømmer og skadedata ved hjelp av ArcGIS, case Drammen
(Gryga, Hellesjø, Hystad og Myrvold, 2015)

I denne oppgaven ble det blant annet foreslått fordrøyningsiltak ut fra drenslinjer generert i ArcGIS, for å senke risiko knyttet til flom, men det ble ikke gjort beregninger på disse tiltakene.

3 Metode

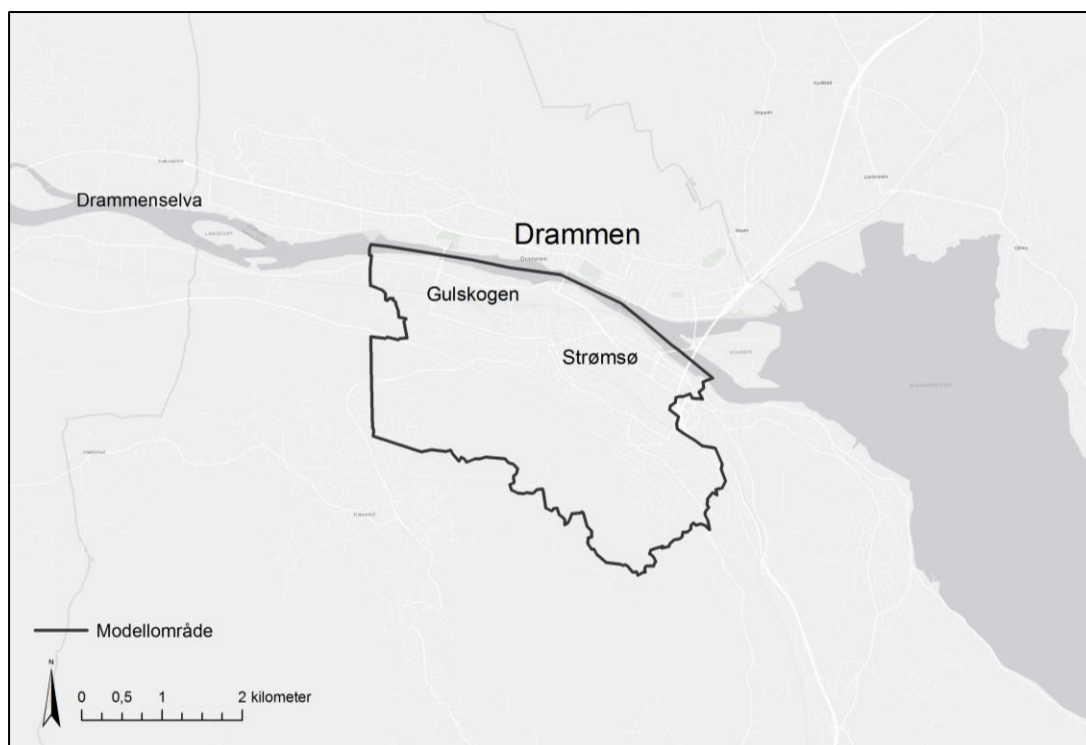
Besvarelsen av problemstillingen i denne oppgaven er basert på modelleringer og beregninger ut fra en konstruert 100-årsflom i et pilotområde i Drammen. Metoden er inspirert av framgangsmåten som er foreslått i «Skybrudsplanen» i København (2012).

Metoden deles inn i følgende steg:

- Kvalitetssikring og justering av terrengmodell
- Valg og konstruksjon av nedbørhendelse
- Modelloppsett for simuleringene
- Innlegging av flomveier

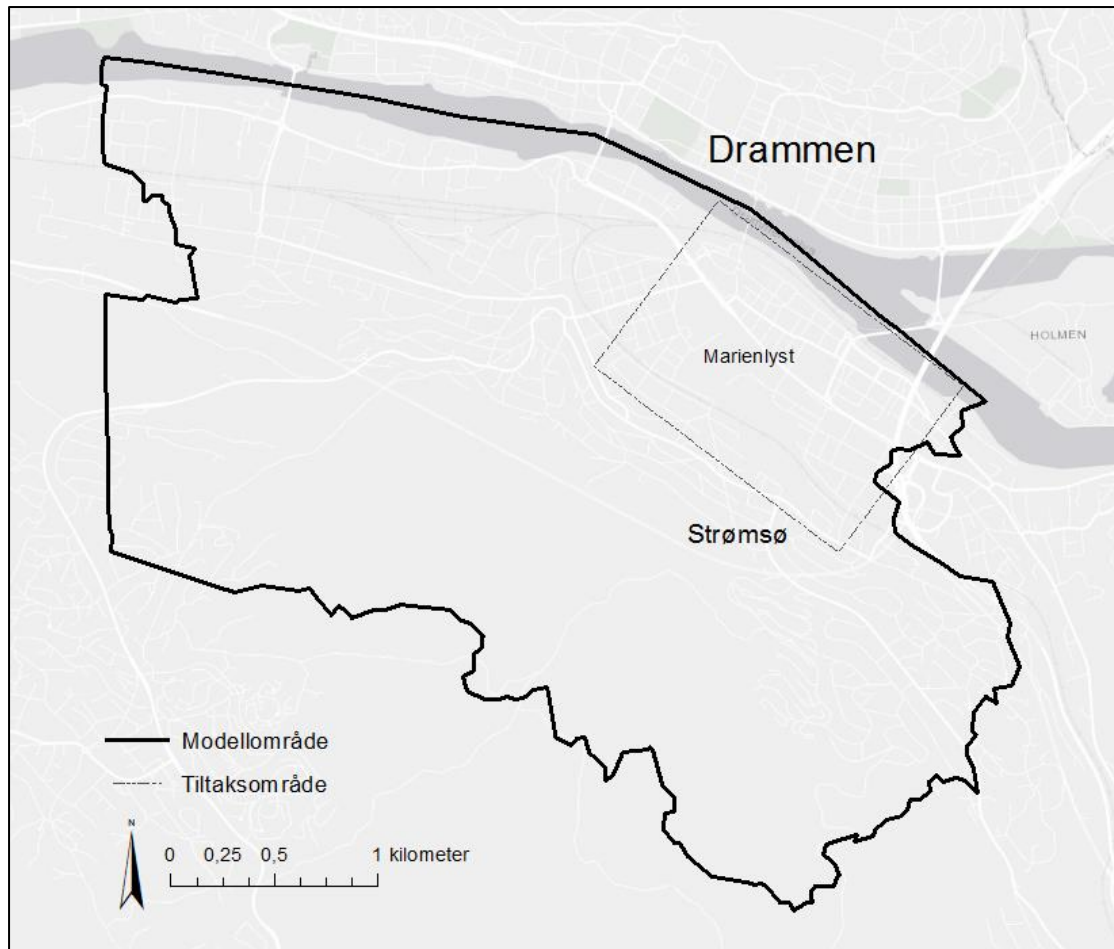
3.1 Analyseområde

Analyseområdet for avrenningsmodelleringen er et nedbørfelt på ca. 10,5 km² i Drammen kommune. Nedbørfeltet ligger på sørsiden av Drammenselva, og strekker seg fra Strømsø og deler av Gulskogen bydel opp til Haukås og den nordøstlige delen av Konnerud bydel. Området vises i figur 3-1. Nedre del av feltet er relativt flatt og kan defineres som et urbant område. Øvre del av nedbørfeltet har brattere terreng og består hovedsakelig av skogområder. Beregninger i Nevina viser at nedbørfeltet har en urbanprosent på 46% og skogprosent på 39%. De resterende flatene er dyrket mark, bekker eller vann (Kjølseth & Vatne 2017). Analyseområdet er særlig utsatt for flom på grunn av topografiske forhold og geografisk plassering, og er tidligere benyttet i masteroppgaver av Murtnes (2015), Johansen og Moldekleiv (2016), Abry (2016) og Kjølseth & Vatne (2017).



Figur 3-1: Analyseområde. Illustrasjon laget av Grimnes.

På bakgrunn av modelleringsresultatene for et 100-årsregn under dagens forhold ble det valgt et tiltaksområde i Strømsø bydel rundt Marienlyst stadion. Tiltakene som skal legges inn i modellen har som formål å redusere oversvømmelser i dette tiltaksområdet. Avgrensningene for området illustreres i figur 3-2. Området må håndtere store vannmengder som genereres høyere oppe i nedbørfeltet og har flere nedsenkninger hvor overvann akkumuleres istedenfor å ledes ut i Drammenselva. Hastighetsreduksjonen som følge av endringen fra bratt til flatt terreng bidrar også til oversvømmelsene. Dette området har i de senere år hatt høyt skadeomfang ifølge Drammen kommune (Hellesjø & Lauvås 2017).



Figur 3-2: Tiltaksområde. Illustrasjon laget av Grimnes.

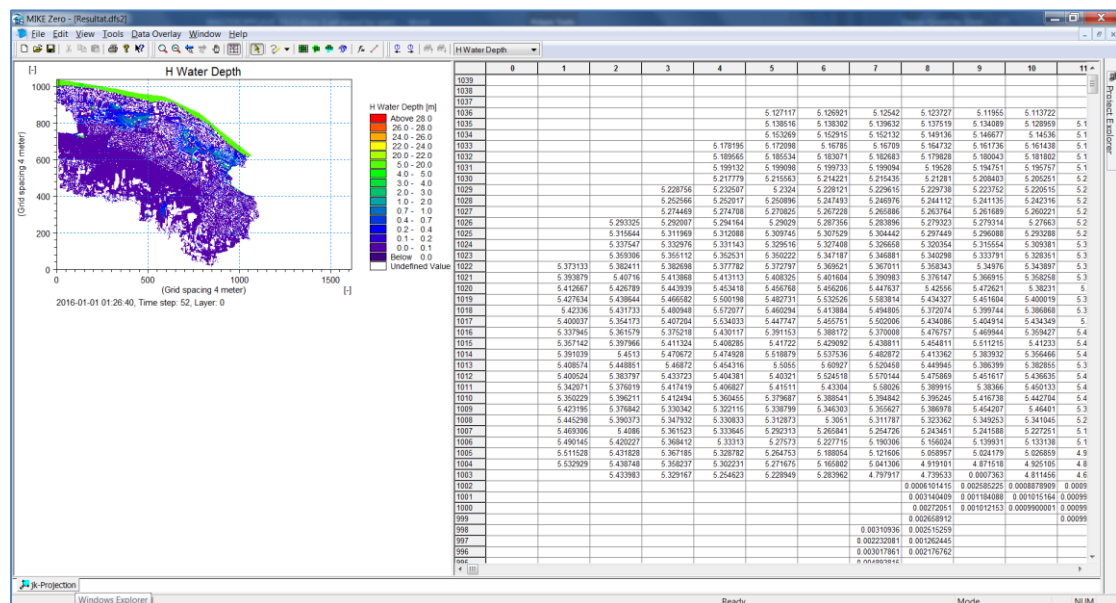
3.2 Validering og justering av terrengmodell

Det ble tatt utgangspunkt i terrengmodellen utarbeidet av Johansen og Moldekleiv (2016). For framgangsmåte henvises det til deres masteroppgave.

Ettersom deler av svaret på problemstillingen skulle baseres på volum av oversvømmelser startet prosessen med å kalibrere og validere modellen med hensyn på volum. Det ble utført en testkjøring for å kontrollere at modellen fungerte og ga riktige verdier på oversvømmelser i forhold til inngangsdata. Modelloppsettet for kjøringen er beskrevet i kapittel 3.4.

Resultatfilen av en simulering består av 144 rutenett av samme dimensjon som batymetrien. Hvert rutenett representerer et tidsintervall på 1,67 minutter av den simulerte perioden. Verdiene i hver rute kan settes til vannstand eller vannføring øverst på siden. En illustrasjon av verdiene presenteres i et vindu ved siden av rutenettet. Figur 3-3 viser hvordan et tidssteg presenteres. Vannstand (H Water Depth) ble valgt i

verktøylinjen øverst i vinduet. I verktøylinjen er det også mulig å enkelt bla gjennom tidsstegene.



Figur 3-3: Skjermdump av hvordan resultater fra et tidssteg fremstilles i MIKE 21.

For å kontrollere at modellen fungerte som den skulle ble den totale økningen av vannvolumet i analyseområdet sammenlignet med det totale volumet av nedbør. Etersom modellen er lukket, skal disse verdiene samsvare med hverandre. Økningen av vannvolum ble beregnet ved å subtrahere volumet i siste tidssteg med volumet i første tidssteg. Volumet ble beregnet i MIKE 21 ved hjelp av verktøyet «Calculate Statistics». Bruk av verktøyet er beskrevet i vedlegg A. Beregningene viste at total økning i volum var 19% (148.000 m³) høyere enn totalt volum av nedbør. Beregningsverktøyet ble verifisert ved å kontrollberegne oversvømmelsesvolum på bakgrunn av resultatene i programmet MATLAB. Etter en uke med feilsøking ble grunnen til det beregnede avviket funnet. Det viste seg at når det er markante høydeforskjeller mellom ruter som ligger inntil hverandre, kan det oppstå negative verdier for vannivå i enkelte ruter. MIKE 21 vil da tilføre en vannmengde slik at vannivået blir 0. I den benyttede terrengmodellen var elven senket 10 meter og bygninger hevet 25 meter. Dette skapte en rekke vannkilder fra ruter i terrengmodellen. Omfanget av denne korreksjonen ble funnet ved å utføre små endringer i innstillingsscriptet til MIKE 21. Filen for oppsett («Setup.m21») ble åpnet i «Notepad» og det ble skrevet inn to linjer under «Hydrodynamic Module». Endringen vises i figur 3-4. Deretter ble det satt i gang en ny simulering, som i tillegg til resultatfiler, genererte

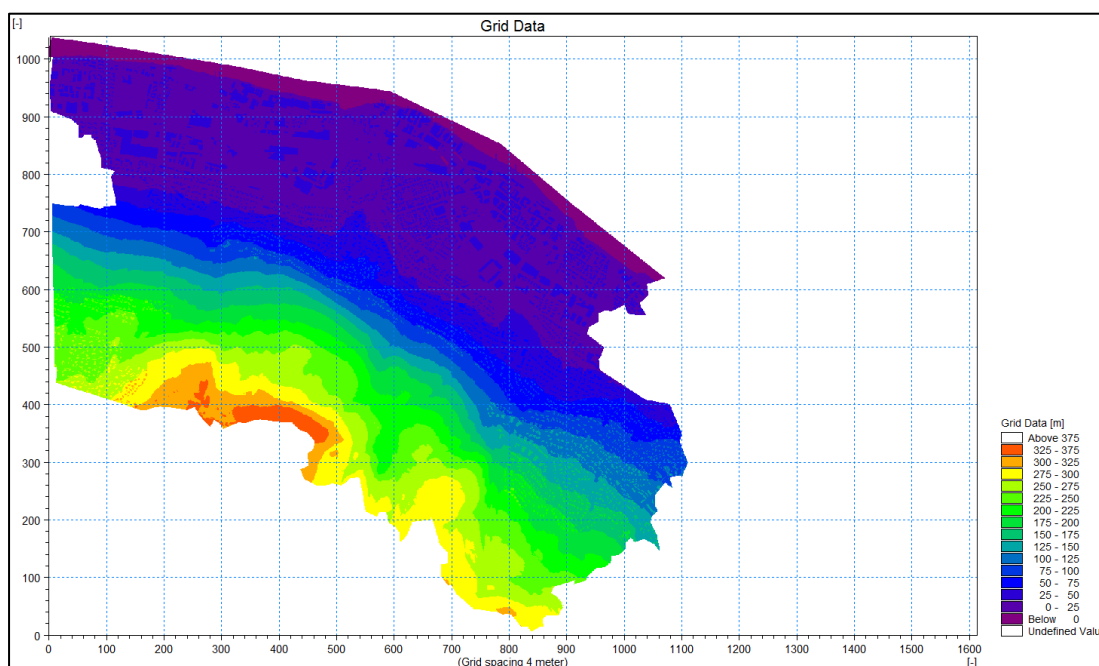
en rasterfil som oppga tilført vann på grunn av korreksjoner i hver rute. Summen av dette volumet var 151.000 m³ og stemte dermed godt overens med avviket.

```
[HYDRODYNAMIC_MODULE]
[OPTION_PARAMETERS]
  Generate_watercorr_file = true ← ←
  Watercorr_freq = 1
EndSect // OPTION_PARAMETERS

[OPEN_BOUNDARY]
EndSect // OPEN_BOUNDARY
```

Figur 3-4: De to linjene som pekes på ble skrevet inn i «Setup.m21», for å finne ut hvor mye vann som ble tilført modellen i tillegg til nedbør.

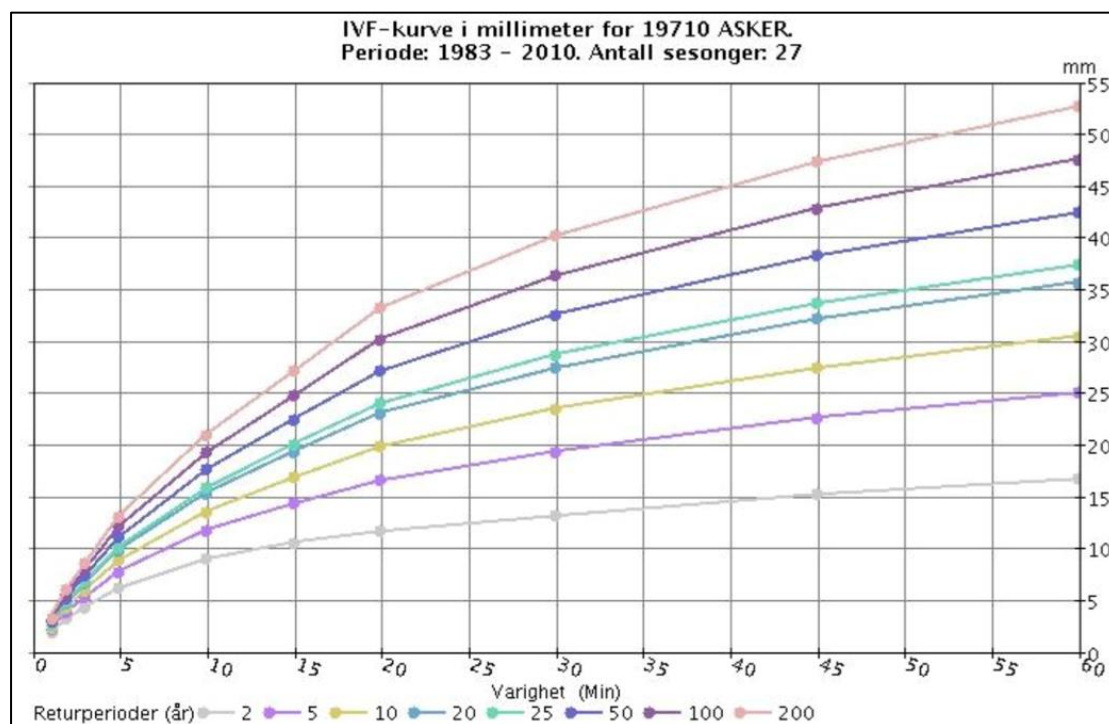
For å redusere denne feilkilden, ble fallet fra elvebredden til elva gjort mer gradvis med verktøyet «interpolation» under «Tools». I tillegg ble terrenghøyder endret manuelt i noen ruter med svært høy vanntilførsel der terrenghøydene åpenbart var uriktige, eksempelvis ved markante høydeforskjeller på en vannflate. Feilen ble redusert til 3% (24.000 m³), og dette ble godtatt. Feilen ble ikke tatt høyde for i videre beregninger av oversvømmelsesvolum. Ytterligere reduksjon ville krevd oppbygging av ny terrengmodell der bygninger legges inn på en annen måte. Benyttet terrengmodell slik den presenteres i MIKE 21 er illustrert i figur 3-5.



Figur 3-5: Skjermdump av terrengmodell slik den presenteres i MIKE Zero.

3.3 Konstruksjon av regnhyetogram

Et konstruert regnhyetogram tilsvarende et 100-årsregn representativt for området er benyttet. Gjentakingsintervallet ble valgt ut ifra kost-/nytteanalysen for København kommune som er presentert i kapittel 2.5.3. Det er antatt en klimafaktor på 1.5 ut fra forventede endringer i nedbørsmønster og forventet urbanisering. Det er valgt en varighet på 60 minutter da det er kortvarige regn som utgjør den største risikoen i området. Ettersom det ikke eksisterer en IVF-kurve for Drammen kommune av nyere dato, benyttes verdier fra IVF-kurven for Asker som vises i figur 3-6. Ikke oppgitte verdier ble funnet ved interpolering. Asker ligger ca. 20 km fra Drammen. Dette anses å utgjøre en lavere usikkerhet enn å bruke eldre nedbørdata. Regnhyetogrammet er konstruert i steg på 2,5 minutter. Dette er valgt for å få med høye intensitetstopper da flere studier hevder at nedbørstasjoner og klimamodeller ofte underestimerer de høyeste nedbørintensitetene siden de er svært lokale (Abdella 2013; Kjølsest & Vatne 2017; Orskaug et al. 2010).

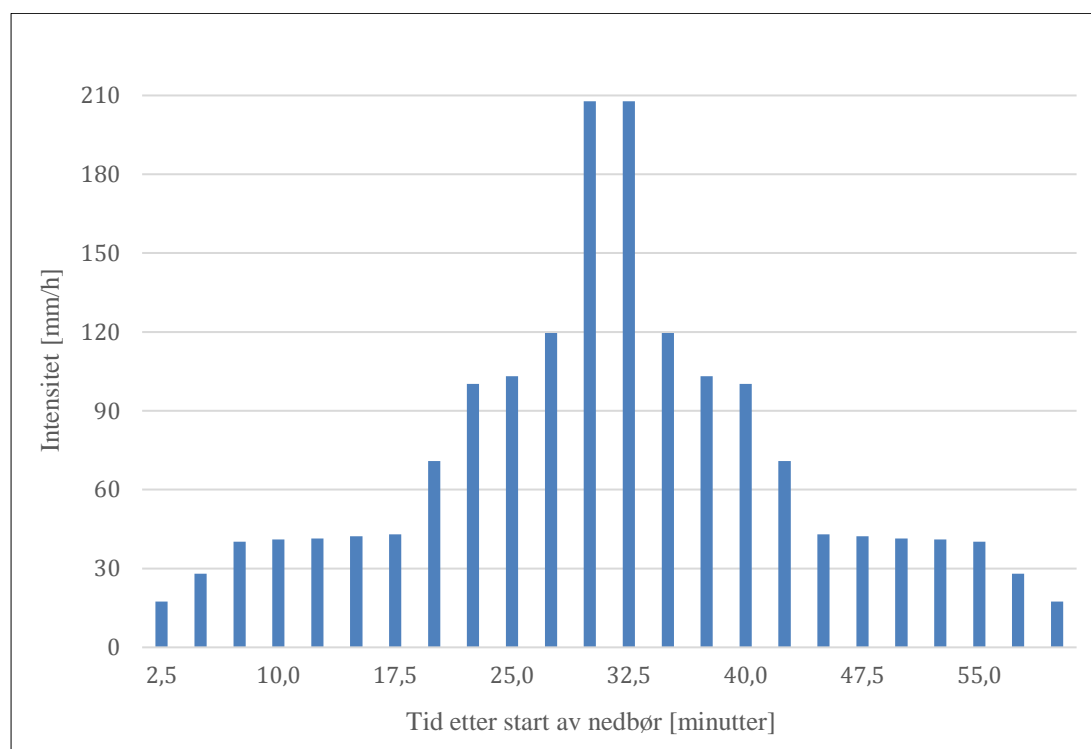


Figur 3-6: IVF-kurve for Asker kommune hentet fra Norsk klimaservicesenter (2016).

Da MIKE 21 er en overflatemodell som ikke tar hensyn til ledningssystemet, er det naturlig å trekke fra en nedbørsmengde tilsvarende kapasiteten til ledningssystemet. Ifølge veilederen for dimensjonering av avløpsledninger fra Statens forurensningstilsyn

(SFT) var det tidligere standard praksis å dimensjonere avløpssystemer tilsvarende et kasseregn med gjentaksintervall på 10 år. Basert på dette kan man anta at et fratrekk av denne størrelsen kan godtas. Det er likevel valgt å ikke trekke fra nedbør i modelleringen for å ta høyde for at rørledninger kan gå tett, samt erfaringer og simuleringer som tyder på at ledningsnett i Drammen har noe lavere kapasitet enn et 10-årsregn (Hellesjø & Lauvås 2017).

Regnhyetogrammet ble konstruert med formel (2) i kapittel 2.3.3. Det ble deretter gjort små justeringer slik at hyetogrammet vokste mot midten for hvert steg. Til slutt ble alle verdier justert opp slik at totalvolumet i hyetogrammet svarte til totalvolumet av et 60-minutters kasseregn. Justeringen utgjorde en endring på ca. 10%. Hyetogrammet vises i figur 3-7.



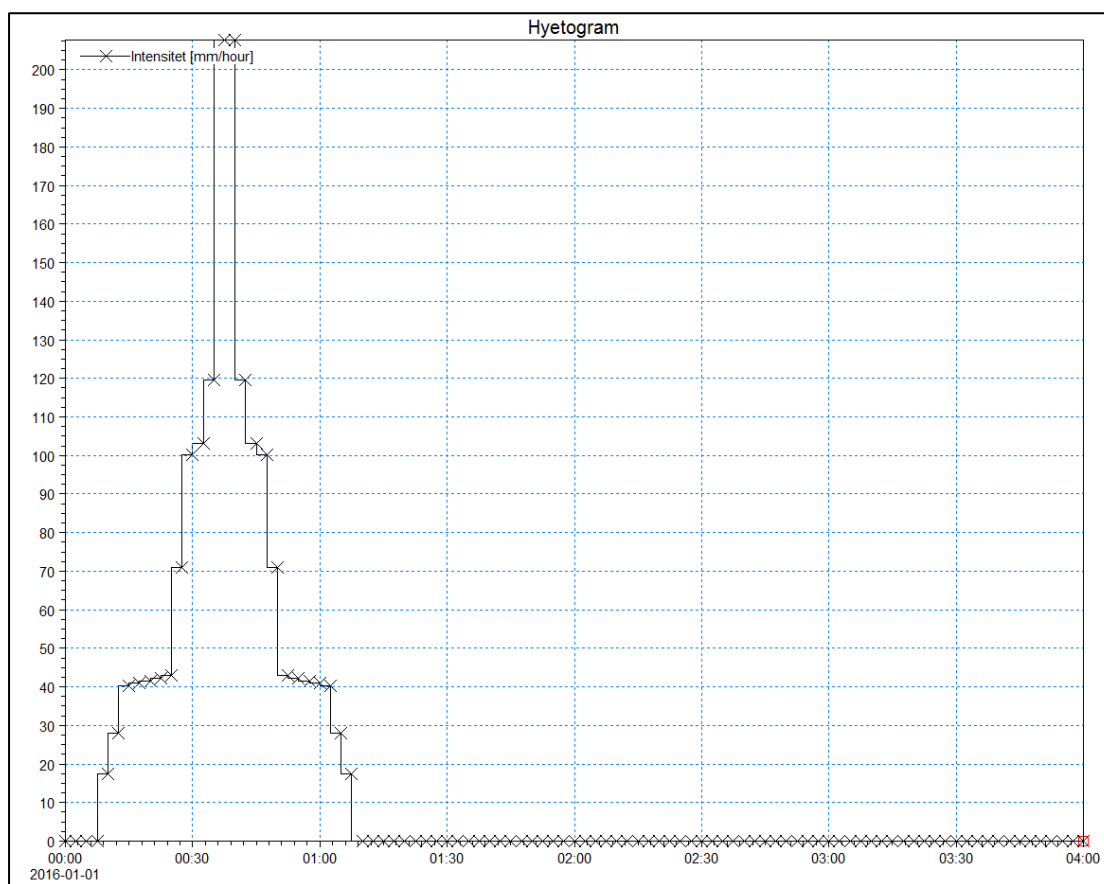
Figur 3-7: Konstruert 100-års regnhyetogram med klimafaktor 1.5 for Asker kommune.

3.4 Modelloppsett for simuleringene

Alle utførte simuleringer hadde samme oppsett bortsett fra små endringer i terrengmodellen som følge av innlegging av tiltak. I simulering I ble dagens terreng modellert. I simulering II ble terreng med innlagte flomveier og fordrøynings tiltak i tiltaksområdet modellert. I simulering III ble fordrøynings tiltak oppstrøms tiltaksområde modellert. De mest relevante parameterne for modelloppsettet gjennomgås i kapittel 3.4.1 - 3.4.7.

3.4.1 Nedbørdata

Figur 3-8 viser benyttet hyetogram slik det presenteres i MIKE Zero. Regnfilen ble laget i Excel og konvertert til en dfs0-fil i MIKE Zero Toolbox. Utfyllende beskrivelse av framgangsmåten gis i oppgaven til Johansen & Moldekleiv (2016). Varigheten til regnfilen må tilsvare varigheten på simuleringsperioden. Derfor legges det til en hale av 0-verdier.



Figur 3-8: Konstruert 100-års regnhyetogram med klimafaktor 1.5 for Asker kommune som dfs0-fil i MIKE Zero.

3.4.2 Batymetri

Terrengmodellen ble lagt inn under batymetri. Her ble også koordinatsystemet til terrengmodellen, ETRF 1989 UTM Zone 32N, registrert. Det ble huket av for «Cold start». Størrelsen på hver rute i terrengmodellen er 16 m^2 . Denne størrelsen ble funnet ved empirisk metode av Johansen & Moldekleiv (2016). For høy oppløsning kan føre til numeriske ustabiliteter og blow-ups i programmet (DHI 2017c).

Det ble hovedsakelig benyttet tre ulike terrengmodeller: En som representerte eksisterende situasjon, en med flomveier og fordrøyningsbassenger i nedre del av nedbørfeltet og en der det ble simulert fordrøyning i øverste del av nedbørfeltet som skulle tilsvare beregnet nødvendig fordrøyningsvolum fra resultatene i simulering 2.

3.4.3 Infiltrasjon

Det er ikke tatt hensyn til infiltrasjon i simuleringene da hovedfokuset var å finne en metode for å legge inn flomtiltak og beregne oversvømmelser. Dette fører til usikkerheter, men godtas da betydelige deler av analyseområdet er leirholdige og/eller har høy grunnvannstand (Drammen kommune 2015). Det er bedre å anta for lav infiltrasjonskapasitet enn for høy. I en reell situasjon bør likevel infiltrasjon undersøkes og inkluderes da dette kan ha stor effekt på avrenningen (Abry 2016).

3.4.4 Ruhet

Det er valgt en konstant ruhet og manningstall er satt til 14 i hele området. Denne verdien er benyttet i lignende studier (Abry 2016; Johansen & Moldekleiv 2016).

3.4.5 Eddy viskositet

Eddy-viskositet er satt til $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ etter anbefalinger fra DHI (DHI 2017c; Hardang 2017).

3.4.6 «Flood and dry»

«Drying depth» og «Flooding depth» bestemmer når bevegelsesmengde-ligningene inkluderes i beregningene i en rute. For simuleringene i denne oppgaven er «Drying depth» og «Flooding depth» satt til henholdsvis 0,001 og 0,002 basert på DHIs anbefalinger. Når vannstanden i en rute er under 0,001 meter vil bevegelsesmengde ikke beregnes i denne ruta før vannstanden overskrider 0,002 meter. Disse verdiene kan

dobles slik at simuleringstiden reduseres, men dette vil føre til noe lavere avrenning (DHI 2016b).

3.4.7 Simuleringstid

En simuleringsperiode på 4 timer ble valgt for å kunne se hvordan flommen utviklet seg etter nedbørhendelsen. Tidsstegintervallet ble satt til 0,1 da dette var benyttet i lignende studier (Abry 2016; Johansen & Moldekleiv 2016) og dette ga et Courants tall under 1 som indikerer en stabil og nøyaktig simulering. Ifølge DHI Oslo kunne også 0,2 benyttes som tidsstegintervall uten å skape betydelige endringer i resultatet. Dette ble prøvd ut mot slutten og ga minimale utslag, samtidig som det halverte simuleringstiden.

3.5 Planlegging av flomveier og fordrøyning

Innlegging av tiltak deles i to trinn. I trinn 1 tegnes det opp flomveier og sentral forsinkelse i sentrum, ved hjelp av ArcGIS, ut fra simuleringsresultatene av eksisterende situasjon (simulering I). Tiltakene baseres på løsninger som anbefales i Københavns skybruddsplan (Københavns kommune 2012). Dette samsvarer med anbefalinger fra NVE og Norsk Vann (Lindholm et al. 2008; Olsen et al. 2015; Ræstad 2014). Grunnet en tidkrevende prosess ble det kun tegnet flomveier i tiltaksområdet. Terrengmodellen som ble laget for å modellere effekten av disse tiltakene ble benyttet i simulering II. Basert på resultatene fra simuleringen II ble det lagt inn en etterligning av fordrøyningstiltak oppstrøms tiltaksområdet i terrengmodellen. Effekten av dette ble modellert i simulering III.

3.5.1 Planlegging og innlegging av tiltak

Flomveier ble tegnet med utgangspunkt i de naturlige flomveiene som ble vist i resultatene av den første simuleringen av eksisterende situasjon. Det ble kun tegnet flomveier i tiltaksområdet ettersom metoden var svært tidkrevende. Områder med lavt skadepotensial, som det var naturlig for vannet å ledes til, ble senket slik at de fungerte som fordrøyningsdammer. Det ble ikke gjort beregninger på dette, men dammene ble laget for å få maksimal fordrøyning uten å påvirke omkringliggende infrastruktur og bygninger. Det ble heller ikke gjort beregninger på flomveienes helninger og bredde, men flomveienes utforming ble forsøkt dimensjonert så ideelle som mulig ut fra

forholdene. Helning ble valgt for å få maksimal utnyttelse av høydeforskjellene mellom flomveiens høyeste punkt og elv. Vannet Blekkjern har blitt senket etter at laserdataene ble innhentet. Denne endringen ble tegnet inn i terrengmodellen, og stemmen plassert på høyeste nivå. Informasjonen om dette ble innhentet fra Glitrevannverket (Hønsi 2017).

Tiltakene ble tegnet inn som en shape-fil i programvaren ArcGIS. Det ble tegnet til sammen 900 polygoner manuelt. Endringer og sammenslåinger førte til at shape-filen til slutt bestod av 450 polygoner. Disse illustreres i figur 3-9. Hver polygon ble tillagt en individuell høyde manuelt i «Attributes» for å oppnå fall, U-formede flomveier og fordrøyning i dammer. Alle deler av flomveiene måtte ligge på en lavere kote enn omkringliggende terreng, men kunne ikke fravike markant. Å tegne inn tiltak og legge på høyde var en svært tidkrevende prosess. Detaljert framgangsmåte er beskrevet i vedlegg C-1.

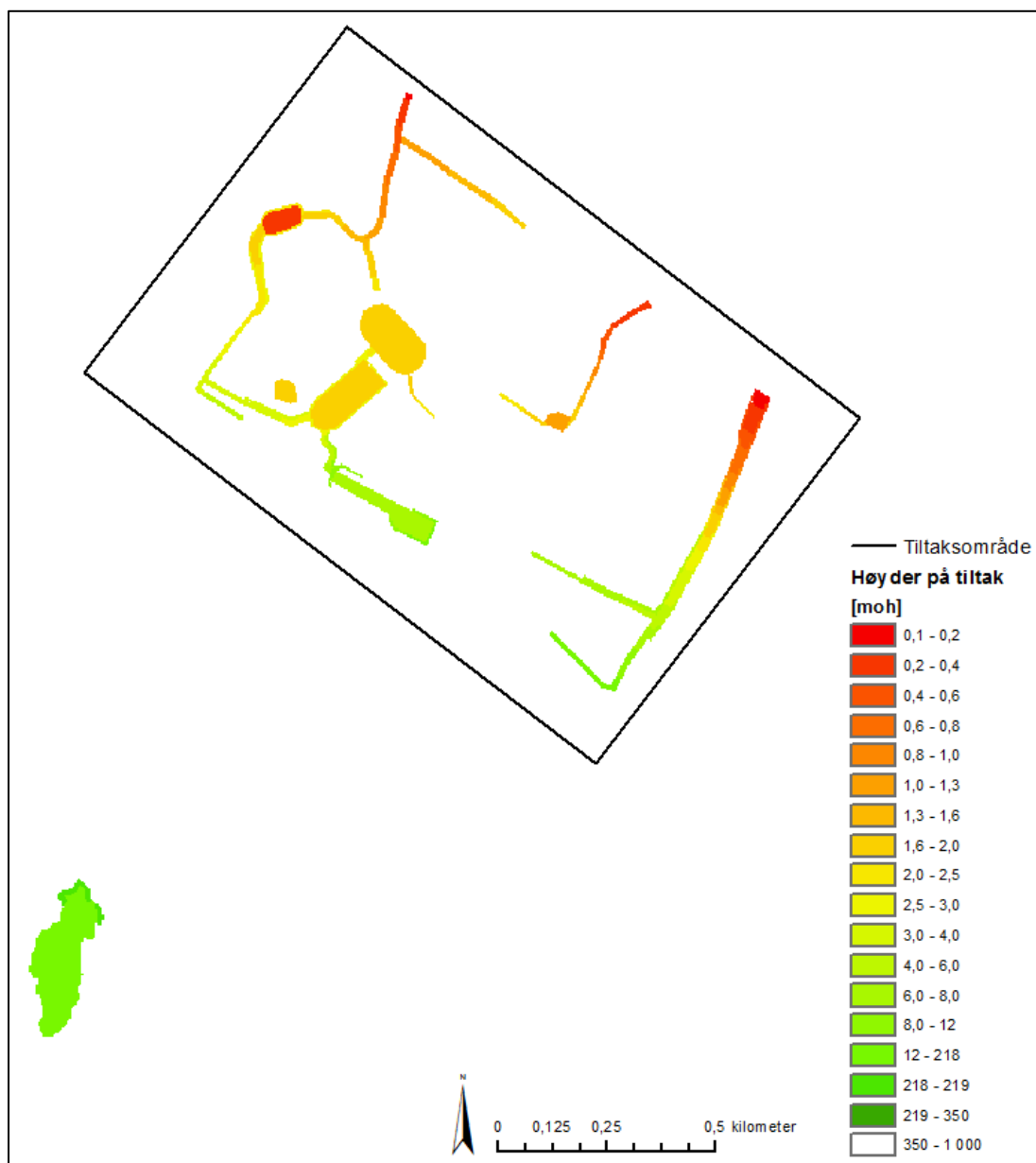
Da MIKE 21 er en programvare for overflatesimulering kan det ikke legges inn «flomtuneller» som kan benyttes der topografi begrenser muligheter for åpne flomveier. Det er derfor ikke lagt inn tiltak for nedsenkninger i underganger. For å oppnå et jevnt fall ned mot Drammenselva, er flomveiene enkelte steder dype i forhold til omliggende terrenghøyde. Disse kan i virkeligheten belegges med rist eller gjøres om til en tunell.



Figur 3-9: Tiltak tegnet som 450 polygoner i ArcGIS Desktop. Hver polygon ble tillagt egen høyde manuelt. Illustrasjon laget av Grimmes.

De to sør-østlige flomveisutløpene munner ut i Drammenselva via grøntområder der rensedamper kan opparbeides slik at oppsamlede miljøgifter inkludert tungmetaller fra veier ikke blir skylt ut i resipient. Utløpet til flomveien i nord-vest gir ikke disse mulighetene, men forsinkelsesdammen ved Drammen museum kan fungere som rensedam ved mindre nedbørhendelser.

For å legge de nye høydene inn i terrengmodellen, ble shape-filen først konvertert til raster med verktøyet «Polygon To Raster». Rasteret vises i figur 3-10.



Figur 3-10: Flomveier og fordrøynings-/forsinkelsesdammer som raster. Illustrasjon laget av Grimnes

Det konverterte rasteret og eksisterende terrengmodell ble deretter smeltet sammen til en ny terrengmodell med verktøyet «Mosaic To New Raster». Detaljert beskrivelse av framgangsmåten kan leses i vedlegg C-2. Den nye terrengmodellen ble deretter lagt inn i MIKE 21 med samme metode som beskrevet i masteroppgaven til Johansen og Moldekleiv (2015).

3.5.2 Volumberegning av oversvømmelser

Hovedmålet med å beregne volum av oversvømmelsene i denne oppgaven er å finne det eksakte volumet som må fordrøyes for å unngå oversvømmelser. Volumberegningene kan også benyttes til å måle effekten av tiltak. I denne oppgaven er det beregnet volum av oversvømmelser i tiltaksområdet for eksisterende terreng, for endret terreng med innlagte flomveier og noe fordrøyning og for simulert fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet. Volum som var relevant å fordrøye var vann som stod høyere enn 10 cm over terreng. Akkumulert nedbør under 10 cm ble ekskludert fra beregningene med verktøyet «Selections». Oversvømmelser i grønne områder, idrettsanlegg og andre områder med lavt skadepotensiale ble også ekskludert fra beregningene. Dette ble gjennomført ved å tegne opp polygoner over områder som skulle ekskluderes i Arcmap. Detaljert framgangsmåte beskrives i vedlegg B. Områdene fikk tillagt egen høyde med samme metode som flomveiene. Videre ble informasjonen lagt inn i MIKE 21, og verdier med den valgte høyden ble lagret som et utvalg, en «Selection». Figur 3-11 viser en illustrasjon av området som ble inkludert i volumberegningene.

Oversvømmelser ble beregnet for flere tidssteg for hvert simuleringsresultat slik at det mest kritiske tidspunktet med hensyn til vannivå ble funnet. Verktøyet «Calculate statistics» ble benyttet til beregningene og beskrives i vedlegg A. Vannvolumet for det mest kritiske tidspunktet i simulering II (terreng med hovedflomveier og fordrøyning i grønne områder i tiltaksområdet) ble benyttet som veiledende verdi for nødvendig fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet.



Figur 3-11: Det blåskraverte området er utsatte områder som ikke skal oversvømmes utover 10 cm. Illustrasjon laget av Grimnes.

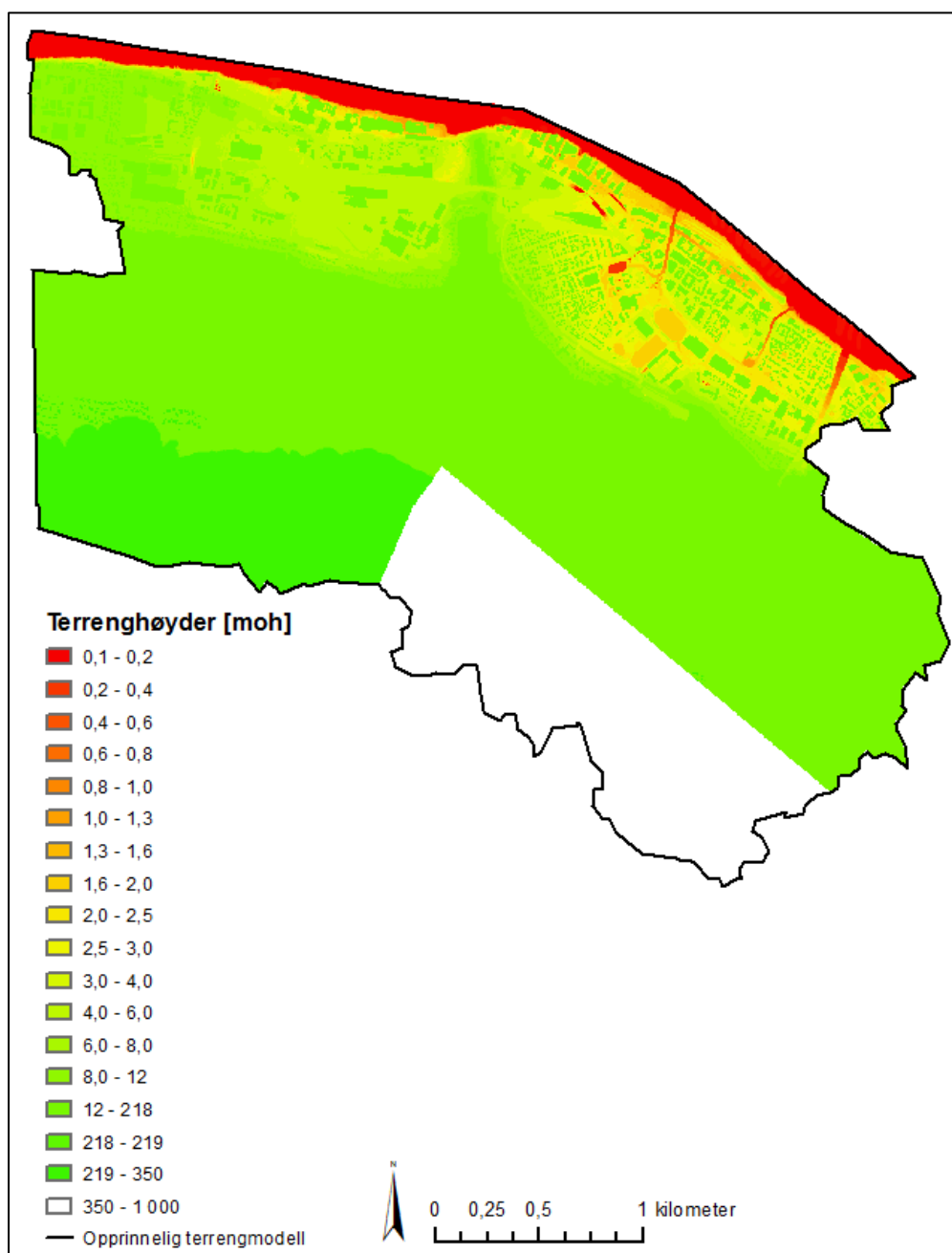
3.5.3 Fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet

For å simulere effekten av infiltrasjon- og fordrøyningstiltak oppstrøms tiltaksområdet var det nærliggende å benytte samme metode som ved innlegging av fordrøyning i tiltaksområdet. Etersom denne metoden var svært tidkrevende og ville gjøre det vanskelig å oppnå et bestemt fordrøyningsvolum, ble en annen metode benyttet. Det beregnede volumet ble trukket fra ved å fjerne et areal øverst i nedbørfeltet fra terrengmodellen. Total nedbørmengde i hver rute var 71,2 mm. Det ble fjernet et areal som multiplisert med denne nedbørmengden svarte til nødvendig fordrøyningsvolum. Akkumulert vann i Blekktjern ble tatt hensyn til.

Arealet ble beregnet med følgende formel

$$A = \frac{V_{over} + V_{Blekk tjern}}{H_{nedbør}} \quad (6)$$

der A er areal, V_{over} er volum som skal fordrøyes, $V_{Blekk tjern}$ er volum av vann akkumulert i Blekk tjern og $H_{nedbør}$ er akkumulert nedbør. Arealet ble fjernet ved å tegne polygoner og legge til høyde som forklart i kapittel 3.5.1. Terrengmodellen for simulering III er illustrert i figur 3-12.



Figur 3-12: Terrengmodell for simulering av fordrøyningstiltak oppstrøms tiltaksområdet (simulering III). Illustrasjon laget av Grimnes.

Denne metoden for å legge inn fordrøyningstiltak er ikke ideell da den baseres på at all fordrøyning skjer høyt oppe i nedbørfeltet. Dette vil antakeligvis ikke senke avrenningstoppen i høy grad til tross for at total avrenning synker. Det ble likevel kjørt simuleringer med denne terrengmodellen for å se effekten.

3.6 PC-spesifikasjoner

Modelleringsarbeidet i forbindelse med masteroppgaven ble utført på en datamaskin utlånt av Norconsult AS.

Operativsystem: Windows 7 64-bit Operating System

Prosesor: Intel R Core (TM) i7-4800MQ CPU @ 2.70 GHz

Installert minne: 32 GB

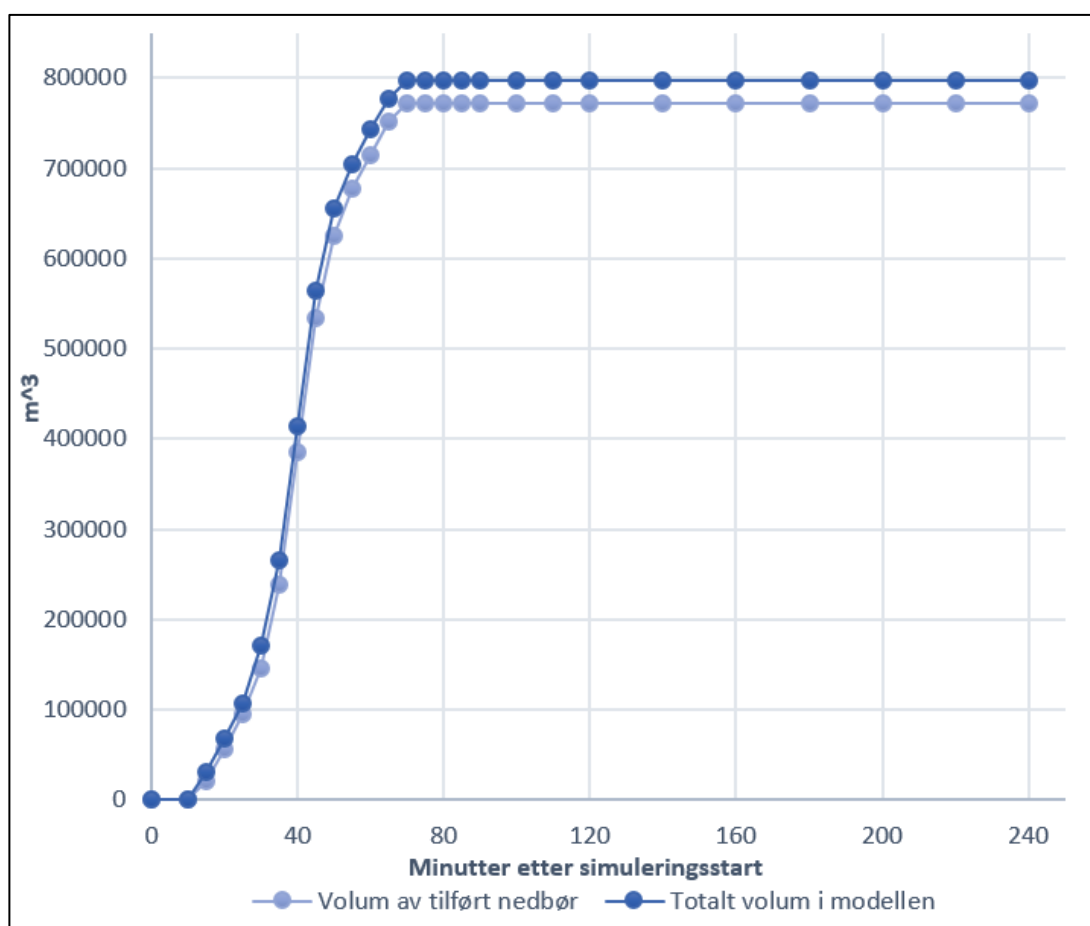
Harddisk: 936 GB

GPU: NVIDIA Quadro K2100M 667MHz/3000MHz

4 Resultater

4.1 Kvalitetssikring og justering av terrenngmodell

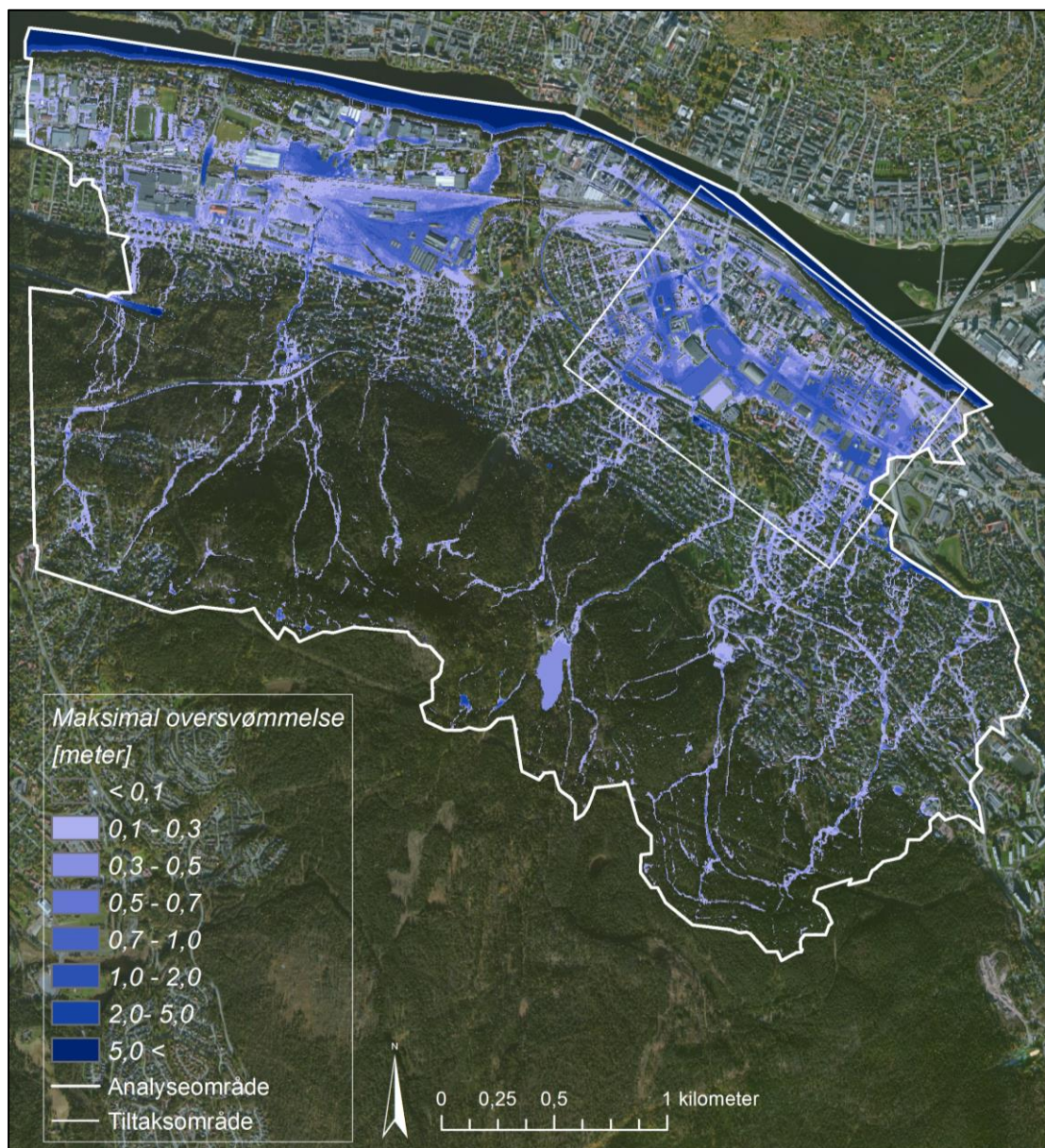
Kvalitetssikring av modellen avdekket, som nevnt i kapittel 3.2, at uregelmessigheter i beregningene førte til betydelige avvik i avrenningsmengdene. Terrenngmodellen ble justert for å redusere avvikene. Figur 4-1 viser økning av vannvolum i hele analyseområdet etter justeringene, og volum av nedbør som er tilført ved ulike tidssteg. Vannvolumet stabiliserer seg på 796 000 m³. Totalt nedbørsvolum er 772 000 m³. Det vil si at avviket er 24 000 m³. Korreksjonsvolumet MIKE 21 tilfører er 28 000 m³. Det vil si at total økning av volum i modellen er 4000 m³ høyere enn totalt nedbørsvolum. Dette utgjør 0,5%. Kurvene viser at programmet ikke utfører korreksjoner og tilfører vann etter nedbørhendelsens slutt.



Figur 4-1: Forholdet mellom volum av nedbør tilført modellen og total volum av overvann i modellen.

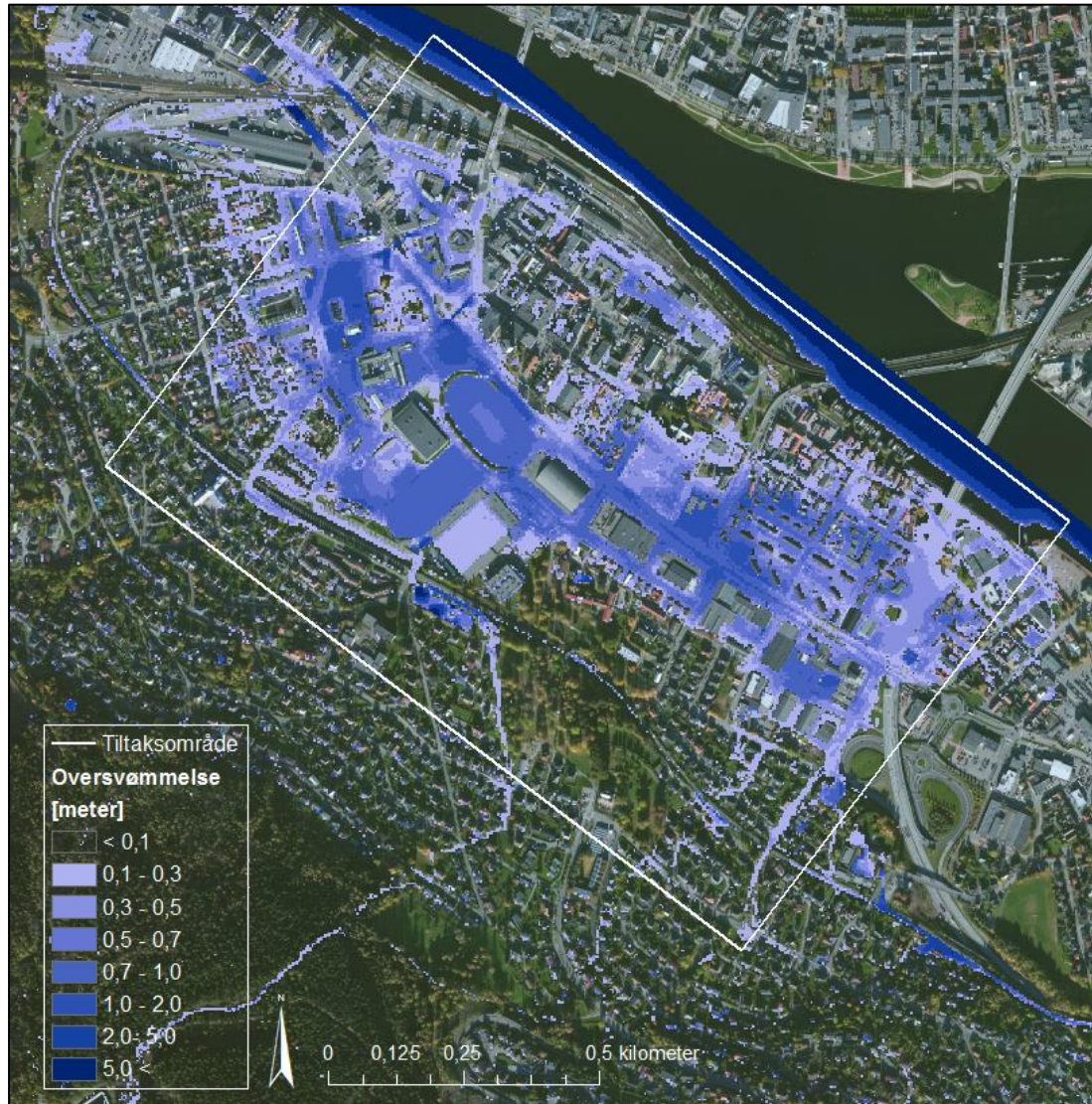
4.2 Simulering I: Eksisterende terreng

Resultatet fra simulering I viser oversvømmelser på dagens terreng. Figur 4-2 viser maksimal oversvømmelse i hvert punkt i analyseområdet fra hele simuleringsperioden. Denne illustrasjonen ble, sammen med erfaringer fra Drammen kommune, lagt til grunn for valg av tiltaksområde.



Figur 4-2: Maksimal oversvømmelse i hvert punkt fra hele simuleringsperioden ved en 100-årsflom med klimafaktor 1,5.

Figur 4-3 viser oversvømmelsene i tiltaksområde ved det mest kritiske tidspunktet. Denne illustrasjonen ble sammen med figur 4-2, lagt til grunn for plassering av flomveier og fordrøyningsbassenger i tiltaksområdet.



Figur 4-3: Oversvømmelser ved det mest kritiske tidspunktet i simulering I, 108 minutter etter simuleringsstart. Her ser man tydelig at sentrum ligger i et lavbrenn som fører til at vannet akkumuleres i sentrumsområdene istedenfor å ledes videre til Drammenselva.

4.3 Simulering II: Flomveier og fordrøyning i tiltaksområde

Figur 4-4 viser det mest kritiske tidspunktet i simulering II. Flomveier og fordrøyningstiltak, som er illustrert i figur 3-10 i kapittel 3.5.1, er lagt inn i terrenngmodellen. Tiltakene har betydelig effekt på avrenningen, men er ikke tilstrekkelige ved en 100-årsflom.



Figur 4-4: Mest kritiske tidspunkt i simulering II, 63 minutter etter simuleringstart. Oversvømmelsene i utsatte områder er redusert og overvannet følger de tiltenkte flomveiene.

4.4 Simulering III: Fordrøyning oppstrøms tiltaksområdet

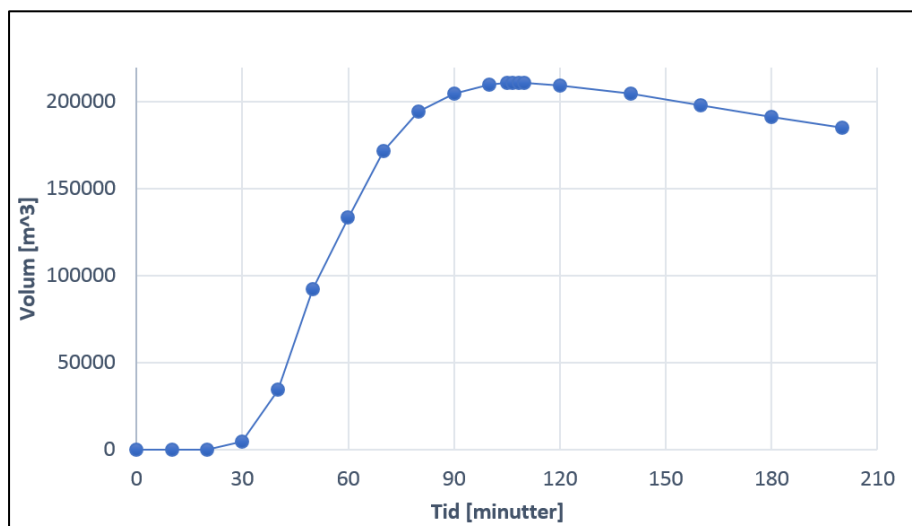
I simulering III ble deler av nedbørfeltet oppstrøms tiltaksområdet fjernet for å simulere fordrøyningstiltak tilsvarende volumet av «ikke godtatte» oversvømmelser i simulering II. Dette volumet var 102 000 m³. Også tiltakene fra simulering II ble inkludert i denne simuleringen. Effekten av dette i tiltaksområdet var liten, og vanskelig å se visuelt. Resultatet fra simuleringen er illustrert i figur 4-5.



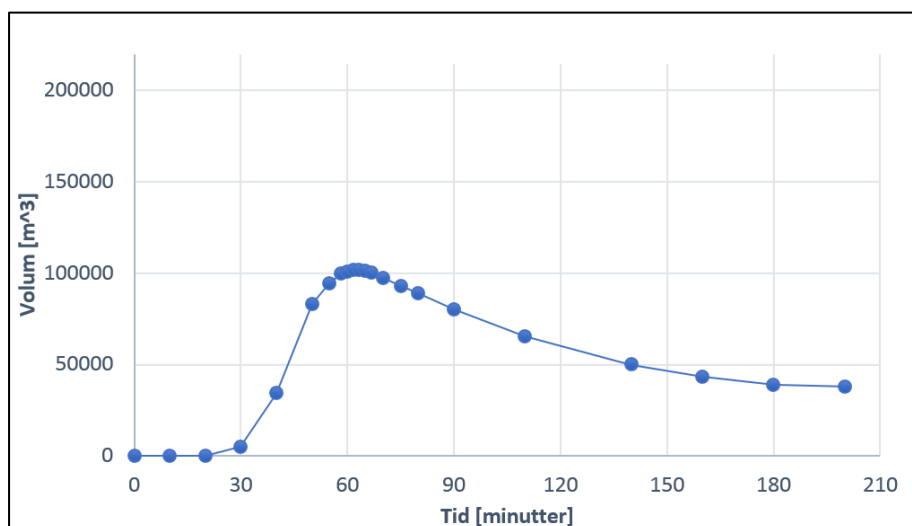
Figur 4-5: Mest kritiske tidspunkt for simulering III, 63 minutter etter simuleringstart.

4.5 Sammenligning av volum av oversvømmelser

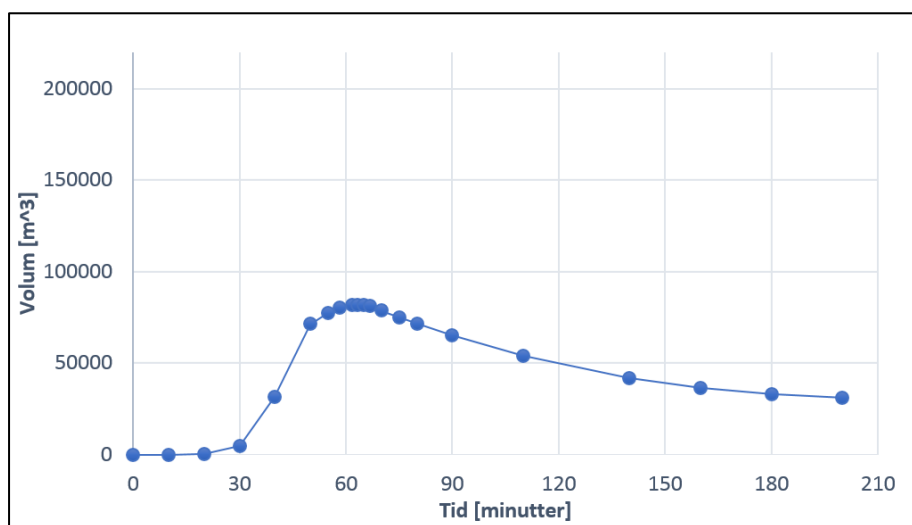
Avrenningsvolum i utsatte områder i tiltaksområde i simulering I, II og III er illustrert i henholdsvis figur 4-6, figur 4-7 og figur 4-8.



Figur 4-6: Akkumulert vann i simulering I.



Figur 4-7: Akkumulert vann i simulering II.



Figur 4-8: Akkumulert vann i simulering III.

Sammenligning av de mest kritiske tidsstegene i hver simulering er presentert i tabell 4-1.

Tabell 4-1: Sammenligning av det mest kritiske tidspunktet i hver simulering.

	Simulering I <i>Dagens terreng</i>	Simulering II <i>Tiltak i tiltaksområde</i>	Simulering III <i>Fordrøyning oppstrøms</i>
Mest kritiske tidspunkt	108 minutter	63 minutter	63 minutter
Oversvømmelse i mest kritiske tidspunkt	211 000 m ³	102 000 m ³	82 000 m ³

Flomveier og fordrøyning i tiltaksområde førte til at oversvømmelser ble mer enn halvert. Fordrøyning øverst i nedbørfeltet som tilsvarte en total reduksjon av nedbørvolum på 102 000 m³, reduserte avrenningstoppen med 20 000 m³. Det mest kritiske tidspunktet oppstod senere i simulering I enn i simulering II og III.

5 Diskusjon

5.1 Kvalitetssikring og justering av terrengmodell

Beregningene av volum av overvann i modellen ble utført for å validere modellen og avdekke eventuelle avvik som måtte tas i betraktning ved videre beregninger av oversvømmelser og nødvendig fordrøyningsvolum. Beregningene avdekket, noe uventet, store avvik som ellers ville vært oversett. Dette viser viktigheten av å validere en modell (uavhengig av hva resultatet skal benyttes til). Ved modelleringsarbeid er det svært viktig å være kritisk og kontinuerlig ha i bakhode at resultatene kun gir en indikasjon på virkeligheten. Resultatene av valideringen understreker dette. De understreker også viktigheten av at modelloperatøren har tilstrekkelige fagkunnskaper på det respektive området, selv om et program utfører beregningene.

At modellen var lukket, gjorde det enkelt å beregne økningen av volum. Ved simuleringer der modellen er åpen og vann kan strømme ut, kan ikke beregninger på avrenningsvolum utføres slik det er gjort i denne oppgaven. Da er beregning av korreksjonsvolum et desto viktigere verktøy for å validere modellen. Ettersom disse korreksjonene kan ha så stor effekt som registrert i denne oppgaven, ville det vært naturlig at verktøyet for å måle korreksjonsvolum var en del av oppsettet til MIKE 21 slik at det enkelt kunne inkluderes i simuleringer. Dersom forfatteren hadde vært kjent med dette, ville mye tid vært spart. For å benytte metodikken fra København til overvannshåndtering, er det vesentlig å ha kontroll på korreksjonsvolumet.

Valideringsarbeidet viste også at MIKE 21 ikke fungerer for store høydeforskjeller og at strømningsmønsteret rundt bygninger ikke kan simuleres ved å heve bygningene. Det ble ikke utført analyser på hvor store høydeforskjeller mellom naboruter programmet taklet, men det ble registrert at høydeforskjeller under 1 meter ikke førte til problemer.

En av utfordringene ved overflatemodellering er simuleringstid og begrensninger for oppløsning. Antall simuleringssteg for modelloppsettet og rutestørrelse ble valgt ved empirisk metode av Johansen og Moldekleiv (2015). Store høydeforskjeller mellom naboruter fører, i tillegg til økt avrenningsvolum, til større sannsynlighet for blow-ups i programmet (DHI 2017b). Det er godt mulig at antall simuleringssteg og/eller rutestørrelse kan reduseres uten at dette fører til blow-ups dersom man unngår store høydeforskjeller mellom ruter som ligger inntil hverandre.

En modell vil kun være en indikasjon på hva som kan skje i virkeligheten. Målet er å utarbeide en modell som er så realistiske som mulig. Selv om modellen benyttet i denne oppgaven ble validert og justert i forhold til volum, har den forbedringspotensiale. De største feilkildene med denne modellen antas å være den lave oppløsningen til terrengmodellen, infiltrasjon og korreksjon på grunn av unaturlige høydeforskjeller.

5.2 Konstruert nedbør

En konstruert nedbørshendelse er benyttet som inngangsdata i avrenningsmodellen. Denne er, som nevnt, konstruert basert på statistikk over observert nedbør til en nedbørstasjon i Asker. Dette er vanlig modelleringspraksis i dag. At nedbørstasjonen ligger i Asker medfører en viss usikkerhet. Det ligger også en usikkerhet i at data fra nedbørstasjoner kan underestimere nedbørshendelsers omfang og størrelse. Dette gjelder særlig konvektiv nedbør da denne nedbørstypen er så lokal at de mest intense bygene ikke fanges opp ettersom de ikke faller der nedbørstasjonene er plassert (Abdella & Engeland 2013; Lepioufle 2015). Simuleringen gir likevel gode indikasjoner på hvor vannet vil bevege seg ved en 100-årsflom.

5.3 Planlegging og innlegging av flomforebyggende tiltak

5.3.1 Valg av tiltak

Programvare og oppløsning til terrengmodellen satte begrensninger for utforming av tiltak. Polygoner som ble tegnet inn måtte ha en størrelse på minst 16 m², da dette var terrengmodellens oppløsning. Det var dermed kun mulig å tegne inn overordnede tiltak som kun var en etterligning av hvordan tiltakene ville blitt i virkeligheten. Flomveiene måtte ligge lavere enn omkringliggende terreng og samtidig ha kontinuerlig fall til Drammenselva. For å oppnå dette måtte store deler av terrenget endres, noen steder med over en meter. Slike betydelige endringer i et urbant område kan være urealistisk da det er kostbart og kan komme i konflikt med annen infrastruktur. Flomtuneller kan være en bedre løsning, men dette ble ikke foreslått da det ikke kan modelleres i MIKE 21. I tillegg står grunnvannsnivået i tiltaksområdet høyt.

Ettersom flomveiene sannsynligvis ikke kan utformes slik de er tegnet inn, kan volumberegninger på effekten av dem, kun ses på som veiledende for sammenligning av effekt av tiltak. Avrenningskurven for eksisterende terreng, simulering I, i figur 4-6 viser at volumet av oversvømmelser vokser raskt etter nedbørshendelsen har startet,

men at det synker svært sakte etterpå. Vannet stenges inne i sentrum, og dette viser at det må utføres tiltak som kan lede vannet bort. Dette belyser også en svakhet ved å ikke inkludere ledningssystemet i modelleringene. Kapasiteten til ledningsnett ved en 100-årsflom ville riktignok vært overbelastet, men overvannet ville sannsynligvis blitt ledet bort fra tiltaksområdet etter hvert. Analyseområdets topografi med lavbrekk i tiltaksområdet gjør likevel at innføring av trygge flomveier er helt nødvendig for å unngå flom ved kraftige nedbørshendelser. I avrenningskurven fra simulering II, figur 4-7, er det tydelig at en større andel av vannet finner veien bort fra sentrumsområdet. Fordrøyningstiltaket oppstrøms i simulering III hadde forholdsvis liten effekt. Dette skyldes antageligvis at fordrøyningen lå for høyt oppe i nedbørsfeltet. Selv om totalt tilført volum ble senket, økte konsentrasjonstiden til nedbørsfeltet og avrenningstoppen ble dermed lite påvirket.

5.3.2 Vurdering av metodikken for modellering av effekten av tiltak

Det ble utarbeidet en metodikk for å legge inn flomtiltak i terrengmodellen slik at effekten av dem kunne modelleres. Da metodikken var svært tidkrevende og i tillegg unøyaktig, anbefales det å utarbeide en bedre metode basert på et mer avansert konstruksjonsprogram («BIM»), for eksempel Autocad Civil 3D. Det er også nødvendig med høyere oppløsning på modellen for å oppnå et mer nøyaktig resultat og kunne simulere mindre tiltak, som for eksempel opphøyd kantstein. En oppløsning på 1 * 1 meter hadde vært mer ideell, men satt betydelig større krav til datakapasitet. Den utarbeidede metodikken inkluderer ikke infiltrasjon. For å oppnå en optimal modellering av fordrøynings- og forsinkelsestiltak bør infiltrasjon inkluderes. Det er da viktig å legge inn en infiltrasjonskapasitet for å ta høyde for at jorda etter hvert blir mettet.

5.4 Videre arbeid

Utarbeidelsen av metodikken har vist at MIKE 21 Flow Model og ArcGIS Desktop er verktøy med betydelige svakheter ved simulering av effekten av flomforebyggende tiltak. Derfor anbefales det å utarbeide en mer effektiv metode ved hjelp av et tre-dimensjonalt konstruksjonsprogram. Å tilegne seg kunnskap om hvilke konstruksjonsprogram som egner seg best og hvordan tiltakene som tegnes i det respektive konstruksjonsprogrammet kan overføres til en terrengmodell, er absolutt relevant for framtidig VA-prosjektering. Tre-dimensjonal prosjektering benyttes stadig

mer, og dersom tiltak likevel skal tegnes i 3D, vil det være formålstjenlig å kunne overføre disse modellene til et modelleringsprogram.

For å i større grad ta hensyn til ledningsnett, særlig i lavbrekk som det utpekte tiltaksområdet i denne oppgaven, kan MIKE 21 kombineres med MIKE Urban. Da en slik modell er mer tidkrevende å bygge og simuleringstiden øker betraktelig, vil det være interessant å undersøke hvordan ledningsnett kan tas høyde for kun ved å bruke en overflatemodell. En idé er å identifisere lavpunkter i overflatemodellen der det er plassert sluk. I disse rutene kan det legges inn et utløp som tillater en begrenset vannføring. Dette kan være interessant å studere nærmere.

Annet arbeid som er interessant for overflatemodellering er å utføre forsøk på hvor store høydeforskjeller naboruter en terrengmodell kan ha før korreksjoner av MIKE 21 fører til en økning av vannvolum i modellen.

I tillegg til vann- og avløpsingeniører er blant annet landskapsarkitekter habile i prosjekter som omhandler overvannsløsninger. Denne masteroppgaven har ikke vurdert hvordan de ulike løsningene vil påvirke bymiljø, rekreasjonsmuligheter og trivsel, men en slik analyse kunne trolig være relevant i en masteroppgave skrevet av en landskapsarkitekt.

Avrenningsmodellering har betydelige usikkerheter som det vil være interessant å studere nærmere. Kjølseth og Vatne utarbeidet i sin masteroppgave en metode for å bruke værradardata som inngangsdata (2017). Det ville vært interessant å benytte værradardata fra spesifikke nedbørshendelser til å modellere hendelsene og deretter sammenligne resultatene med oppsatte vannføringsmålere i det respektive området. Et slikt studie vil kunne gi mye informasjon om hvilke krav som bør stilles til terrengmodell, infiltrasjonsdata, ruhet m.m. for å oppnå tilfredsstillende resultater ved en flomsimulering i urbane felt. Dermed blir det enklere å vurdere hvilke flomforebyggende tiltak som er mest lønnsomme.

6 Konklusjon

Det er utarbeidet en metode for å modellere effekten av flomtiltak ved bruk av ArcGIS og MIKE 21 Flow Model. Metoden fungerer, men er svært tidkrevende og komplisert å utføre på en slik måte at resultatets nøyaktighet blir tilfredsstillende. Ut fra dette konkluderes det med at disse programmene alene har betydelige svakheter ved modellering av effekten av flomtiltak, og bør kombineres med et mer avansert konstruksjonsprogram, for eksempel Autocad Civil 3D.

Beregning av oversvømmelsesvolum i MIKE 21 er effektivt og gjør det enklere å planlegge nødvendige fordrøyningsvolumer i et nedbørfelt. Beregningene er også et godt verktøy for validering av modeller ved overflatesimuleringer.

Resultatene fra tiltakene som er lagt inn i terrengmodellen viser viktigheten av en helhetlig planlegging av overvannshåndtering i et nedbørfelt. Å opparbeide trygge flomveier som leder overvann bort fra tettsteder kombinert med fordrøying anses, ut fra resultatene, som effektiv overvannshåndtering. Arbeidet med oppgaven har også belyst viktigheten å validere egne modeller, å være kritisk til resultater fra egne modelleringer og bruke faglig kvalifiserte vurderinger.

Utarbeidelsen av oppgaven avdekket også at store høydeforskjeller, over 2-5 meter, mellom naboruter i rasteret som benyttes, kan føre til betydelige overdrivelser av oversvømmelser i resultatene. Størrelsen på overdrivelsene kan måles i MIKE 21. I modellen som denne oppgaven tok utgangspunkt i, utgjorde overdrivelsen 19% av totalt nedbørsvolum. Det er vesentlig å være klar over korreksjonsvolumet som MIKE 21 tilfører, for å kunne benytte metodikken fra overvannshåndteringen i København.

Erfaringer fra oppgaven fører til følgende anbefalinger for optimal overflatemodellering av effekten av flomforebyggende tiltak. Terrengmodellen bør ha en oppløsning på 1*1 meter og det bør innhentes detaljert data av grunnforhold slik at det kan tas høyde for infiltrasjon. Tiltak bør legges inn i terrengmodellen via et egnet konstruksjonsprogram, eksempelvis AutoCAD Civil 3D, og modellen bør valideres med hensyn på volum.

7 Referanser

- Abdella, Y. S. (2013). Application of radar data to estimate distributed return periods of extreme rainfall events over Trondheim: Development of a tool for estimating return periods using radar data. *SINTEF Energy Research*, 2013-01-03.
- Abdella, Y. S. & Engeland, K. (2013). Bruk av værradardata for beregning av gjentakintervallkart for ekstreme nedbørhendelser. *VANN*, 48 (2): 162-174.
- Abry, K. (2016). *Modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS og MIKE 21 med fokus på overflateruhet og infiltrasjon*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Insitutt for matematiske realfag og teknologi. 95 s.
- Askheim, S. (2017). *Skandinaviske Fjellkjede*. Store norske Leksikon. https://snl.no/Skandinaviske_fjellkjede (lest 01.10).
- Aune, B. (1993). Temperaturnormaler, normalperiode 1961-1990. *Det norske meteorologiske institutt - Klimaavdelingen*, 2: 3-9.
- Benestad, R. & Mamen, J. (2016). *Drivhuseffekten*. <https://snl.no/drivhuseffekten>: Store Norske Leksikon (lest 02.10).
- Christensen, A. (2016). *Skybrudd i ørkenen*. forskning.no. <https://forskning.no/2016/03/skybrudd-i-orkenen> (lest 01.10).
- Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2013). *Klima i Norge*. Store norske leksikon. https://snl.no/Klima_i_Norge (lest 01.10).
- Dannevig, P. & Harstveit, K. E. (2017). *Meteorologi*. Store norske leksikon. <https://snl.no/meteorologi> (lest 17.09).
- DHI. (2017a). MIKE 21 Flow Model & MIKE Flood Screening Tool: Hydrodynamic Module: Scientific Documentation. Hørsholm, Denmark. 53 s.
- DHI. (2017b). *MIKE 21 Flow Model: Hints and recommendations in applications with significant flooding and drying*. DHI Software Archive.
- DHI. (2017c). MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Model: User Guide. Hørsholm, Denmark. 144 s.
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A. & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6: 508.
- DSB. (2016). Risikoanalyse av regnflom i by: Krisescenarioer 2016 - analyser av alvorlige hendelser som kan ramme Norge. Skien: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). 72 s.

- Engan, J. A. (2015). Modellering av vannforsyningsnett. *Norges miljø- og biovitenskapelige universitet*, Forelesning 03.09.15.
- Engineers Australia. (2012). Australian Rainfall & Runoff: Revision Project 15: Two dimensional modelling in urban and rural floodplains. I: Babister, M. & Barton, C. (red.): Engineers Australia.
- Esri. (2016). *What is raster data?*
<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm> (lest 02.11.17).
- Esri. (2017). *Work Smarter With ArcGIS*. About ArcGIS.
<http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis> (lest 02.11.17).
- Fuglestad, J. S., Harstveit, K. E., Mamen, J. & Benestad, R. (2017). *Klimaendringer*. Store norske leksikon. <https://snl.no/klimaendringer> (lest 04.10).
- Førland, E., Mamen, J., Dyrødal, A., Grinde, L. & Myrnes, S. (2015). Dimensjonerende korttidsnedbør: Naturfareprosjektet Dp 5 Flom og vann på avveie. *NIFS-rapport*, 134 (2015): s. 36.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., et al. (2015a). Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015. *NCCS report*, 2 (2015): 39-56.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E. J., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J. E. Ø., Sandven, S., Sandø, A. B., Sorteberg, A., et al. (2015b). Klima i Norge 2100: Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015. *NCCS report*, 2 (15): 8-25.
- Hardang, H. (2017). *Møte hos DHI 24.11.17*. Grimnes, E. (red.). Forskningsparken, Oslo.
- Harstveit, K. E. (2009). *Vær: meteorologi*. Store norske leksikon.
<https://snl.no/v%C3%A6r-meteorologi> (lest 17.09).
- Hellesjø, J. & Lauvås, D. (2017). *Befaring i Drammen kommune*. Grimnes, E. V. (red.).
- Heymann, M. (2009). Klimakonstruktionen: Von der klassischen Klimatologie zur Klimaforschung. *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, 17 (171): 171-197.
- Hønsi, E. (2017). *Telefonsamtale, 28.11.17*. Grimnes, E. V. (red.). Ås.
- Ingram, W. (2016). Increases all round. *Nature Climate Change*, 6: 443.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental*

- Panel on Climate Change: Summary for Policymakers*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press. 30 s.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. I: Pachauri, R. K., Meyer, L. & Team, C. W. (red.). *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 978-92-9169-143-2. Switzerland. 4-11 s.
- Johansen, J. A. & Moldekleiv, H. J. S. (2016). *Utprøving av metodikker for modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS, MIKE21 og MIKE FLOOD*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 197 s.
- Kartverket. (2017). *Vektorkart*. Kartdatainformasjon. <https://kartverket.no/data/Kartdata/Vektorkart/> (lest 02.11.17).
- Kjølseth, T. M. H. & Vatne, I. (2017). *Modellering av urbane pluviale flommer ved bruk av værradar*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Fakultet for realfag og teknologi. 78 s.
- Kysely, J., Rulfová, Z., Farda, A. & Hanel, M. (2015). Convective and stratiform precipitation characteristics in an ensemble of regional climate model simulations. *Climate Dynamics*, 46 (1-2): 227-243.
- Københavns kommune. (2012). *Københavns kommunes skybrudsplan 2012*. København: Miljømetropolen. 32 s.
- Lepioufle, J.-M. (2015). Towards a better use of the precipitation radar data; a feasibility study. *METreport*: Norwegian Meteorological Institute.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. & Aaby, L. (2008). Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk Vann*, 162: s. 8.
- Lindholm, O. (2014). Håndtering av overvann. I: Ødegaard, H. (red.) *Vann- og avløpsteknikk*, s. 344-373. Hamar: Norsk Vann.
- Met. (Meteorologisk institutt 2017). *Orografisk nedbør*. Store norske leksikon. https://snl.no/orografisk_nedb%C3%B8r (lest 02.10.17).
- met.no. (2009). *Frontnedbør*. MetLex: Meteorologisk institutt.
- Murtnes, D. (2015). *Urbane flomveier. Generering av drenslinjer for området Solumstrand i Drammen ved bruk av ArcGIS*. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 111 s.
- Myrvoll, A. (2015). *Utprøving av metodikk for produksjon av aktsomhetskart for flomfare i urbane områder*. Ås: Universitetet for miljø og biovitenskap, Institutt for matematiske realfag og teknologi. 106 s.

- Nirman, S. K. (2014). *Cyclonic Rainfall*. Nirman Care.
http://www.nirmancare.com/blog/index.php?controller=post&action=view&id_post=110 (lest 02.10.17).
- Norsk klimaservicesenter. (2016). *Nedbør med kort varighet: IVF-verdier fra målestasjoner*.
<https://klimaservicesenter.no/faces/desktop/article.xhtml?uri=klimaservicesenteret/dimensjonerende-nedbør/korttidsnedbør>: Meteorologisk institutt, Norges vassdrags- og energidirektorat, UniResearch, Bjerknes Centre for Climate Research (lest 12.10).
- NOU. (2015: 16). *Overvann i byer og tettsteder: Som problem og ressurs*. Oslo: Klima- og miljødepartementet. 276 s.
- Olsen, M. H., Hopland, A. A., S. Myrabø, Viréhn, P. & Glad, P. A. (2015). Flom- og skredhendelser i Gudbrandsdalen: Naturfareprosjektet: Delprosjekt 5.3 Hendelser og kostnader. *Norges energi- og vassdragsdirektorat*, 123 (2015): 97.
- Orskaug, E., Scheel, I., Frigessi, A., Gutterop, P., Haugen, J. E., Tveito, O. E. & Haug, O. (2010). Evaluation of a dynamic downscaling of Norwegian precipitation. *Insuring Future Climate Change*.
- Paus, K. H. (2017). *Crash-kurs i overvannsberegninger*. Kurs i klimatilpasning og overvann, Norsk Vann.
- Ræstad, C. (2014). Håndtering av overvann fra urbane veier. *Norsk Vann*, 200 (2014): 56.
- SINTEF Byggforsk. (2012). Vann i by: Håndtering av overvann i bebygde områder. *Byggforskserien 311.015*.
- Sorteberg, A. (2014). Nedbør i Norge siden 1900. *Naturen*, 138 (06): 220-231.
- Tenge, G. (2005). *Hva er GIS?* Forelesningsnotater.
http://www.tenge.no/bilder_filer/Hva%20er%20GIS.pdf (lest 01.11.17).
- Thorolfsson, S. (2014). *VA-hydrologi*. 2 utg. Vann- og avløpsteknikk: Norsk Vann. 40-63 s.
- Thorolfsson, S. T. (2014). *VA-hydrologi*. I: Ødegaard, H. (red.) b. 2 *Vann- og avløpsteknikk*, s. 40-64. Hamar, Norge: Norsk Vann.
- Tollan, A. (2009). *Hydrologi*. I: Leksikon, S. N. (red.). <https://snl.no/hydrologi> (lest 15.10).
- Tønnessen, M., Leknes, S. & Syse, A. (2016). Befolkningsframskrivinger 2016-2100: Hovedresultater. *Statistisk sentralbyrå, Økonomiske analyser 3* (2016).

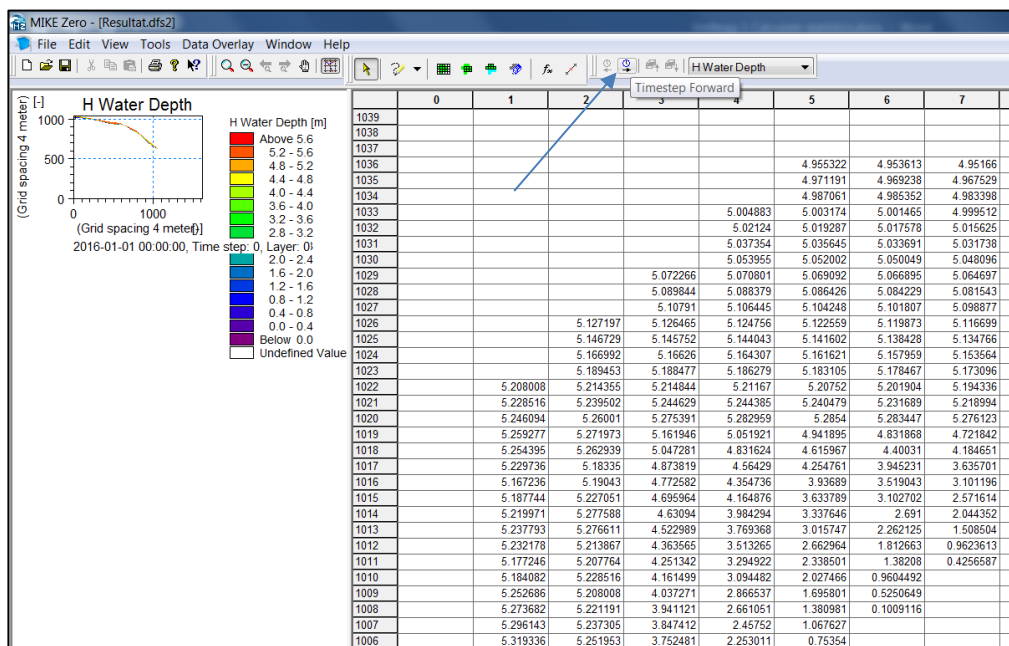
Waagø, O. S. (2012). *Flomrisikoplan for Gaula ved Melhus: Et eksempel på en flomrisikoplan etter EUs flomdirektiv*. Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat (lest 8).

Ørstavik, E. (2015). *Geografisk informasjonssystem*.
[https://snl.no/geografisk informasjonssystem](https://snl.no/geografisk_informasjonssystem): Store norske leksikon (lest 01.11.17).

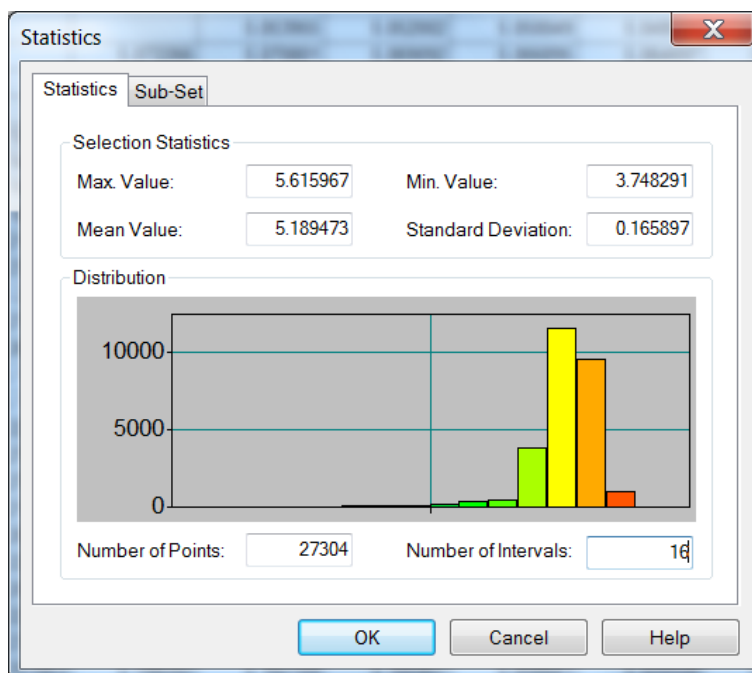
Vedlegg A

Beregning av oversvømmelsesvolum i resultatfiler

Ved volumberegninger av overvann må man benytte resultater fra ett enkelt tidssteg, ikke resultat-filer med maksverdier. Først åpnes resultatfilen i MIKE Zero og det blas fram til ønsket tidssteg som vist i figuren under.



Deretter velger man «Tools» i verktøylinjen øverst og klikker på «Calculate Statistics...». Da kommer det opp et vindu som vist i figuren under.



«Number of intervals» viser arealet av hver rute, «Mean value» er gjennomsnittet av vannivået i alle rutene og «Number of Points» er antall ruter.

Vannvolumet i modellen = «Mean Value» * «Number of Points» * «Number of Intervals»

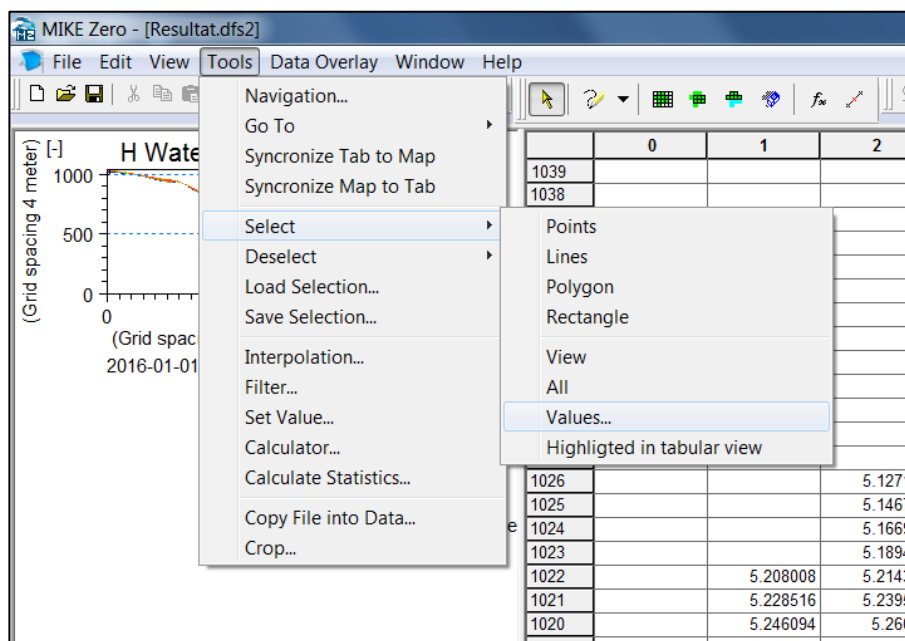
Dersom man ønsker å beregne volum av oversvømmelser over et bestemt nivå eller i et gitt område, kan man benytte verktøyet «select», «load selection» og/eller «save selection» før volumberegningene. Disse beskrives i vedlegg B.

Vedlegg B

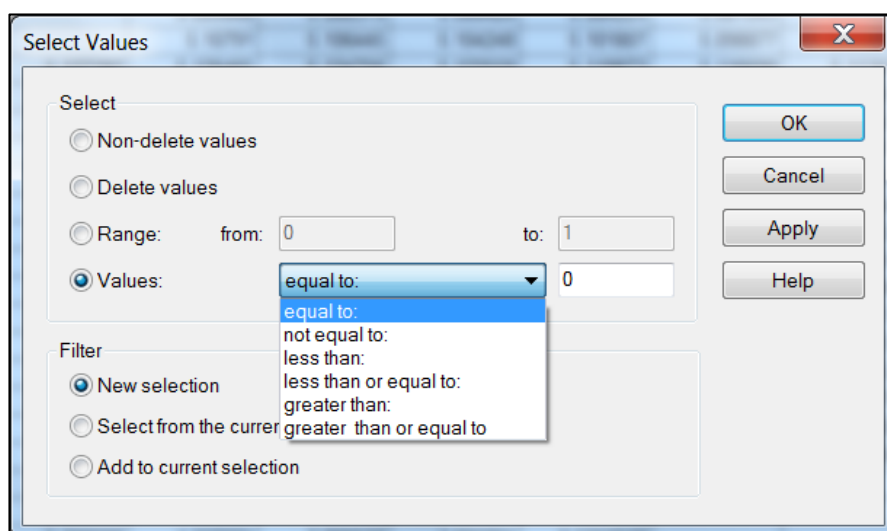
Utvalg av spesifikke verdier eller områder i dfs2-filer

B-1 Utvalg av verdier

For å velge eller ekskludere verdier fra en dfs2-fil velges verktøyet «Select» under «Tools», og deretter «Values», som vist under.



Da kommer følgende vindu opp på skjermen.



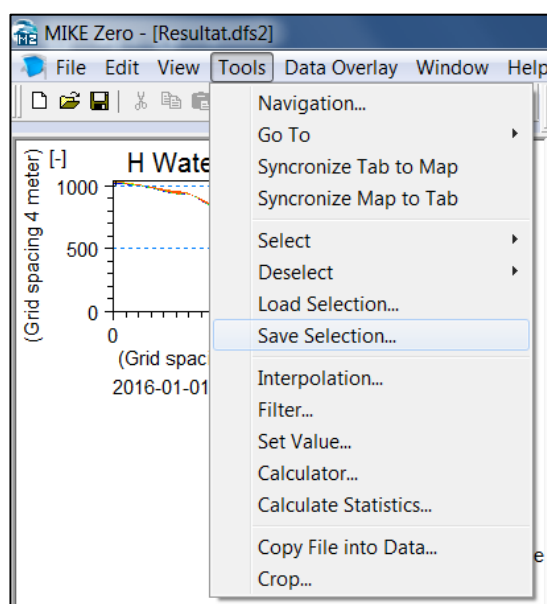
Her kan verdier over et visst spenn velges eller verdier lik/høyere/lavere enn en gitt verdi velges. For volumberegninger av resultater i denne oppgaven ble et spenn mellom 0.1 og 8 valgt. Dersom utvalget skal kombineres med et annet utvalg som allerede er lagt inn, må man huke av for «select from the current selection».

B-2 Utvalg av område

Man kan velge ut et gitt område på to måter.

Den ene metoden går ut på å benytte samme verktøy som nevnt over; «Select», og deretter velge «Polygon». Da kan man tegne opp polygoner som skal velges eller ekskluderes. Dette ble utprøvd, men ettersom forfatteren av denne oppgaven ikke hadde tilstrekkelige kunnskaper om muligheter for bakgrunnskart i MIKE 21, ble denne metoden for unøyaktig.

Den andre metoden går ut på å tegne polygoner i ArcGIS over områder som skal inkluderes i utvalget. Disse tillegges en spesifikk høyde. Deretter lages en versjon av terrenngmodellen der disse høydene er lagt til. Metoden for dette er tilsvarende hva som beskrives i vedlegg C. Dette rasteret lastes opp i MIKE 21 og ved bruk av «Select» og «Values» utgjør rutene som skal tas med i beregningene et utvalg. Dette utvalget lagres med verktøyet «Save Selection» som vist under.



Utvalget lagres som en dfs2-fil og kan benyttes senere i rasterer av samme størrelse og oppløsning. Da benyttes verktøyet «Load Selection» og det lagrede utvalget kan hentes fram fra mappen det ble lagret i. Dersom lagrede utvalg skal kombineres med utvalg av verdier må lagrede utvalg legges inn først.

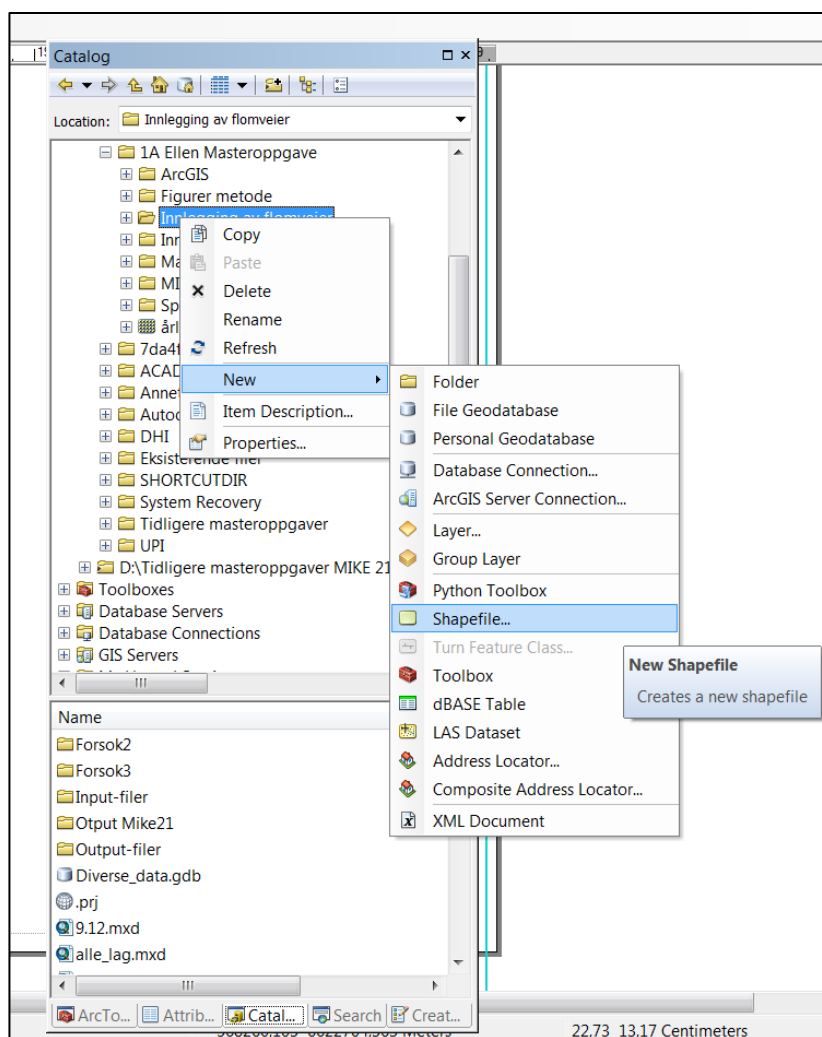
Vedlegg C

Å legge inn flomveier og fordrøyning i terrenngmodellen

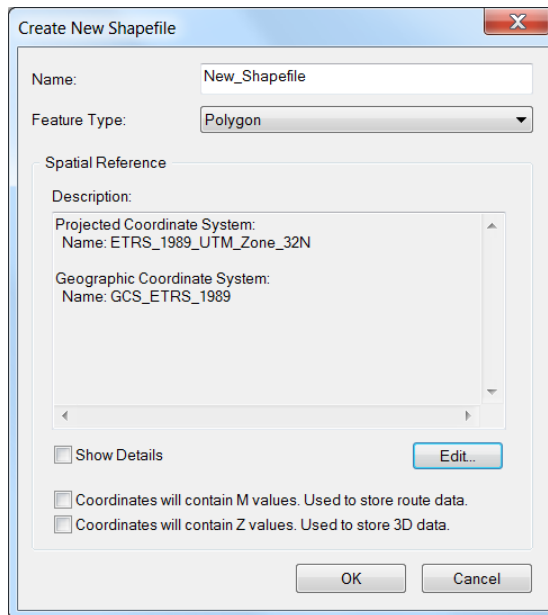
Framgangsmåten beskrives i to deler. Del 1 forklarer hvordan flomveier ble tegnet og tillagt høyde. Del 2 forklarer hvordan disse ble lagt inn i terrenngmodellen.

C-1 Å tegne flomveier

Først opprettes en ny shapefil i en ønsket mappe i «Catalog»-vinduet i Arcmap, som vist under.

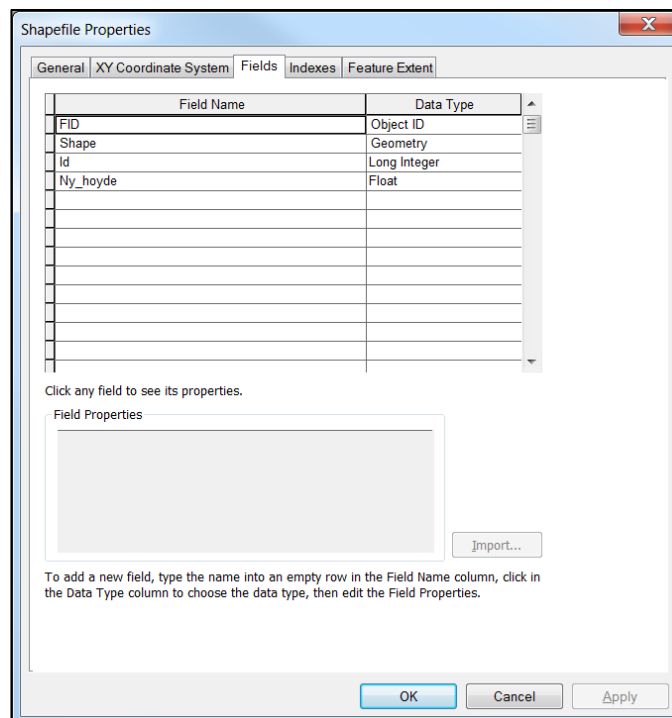


Da vil følgende vindu komme opp.

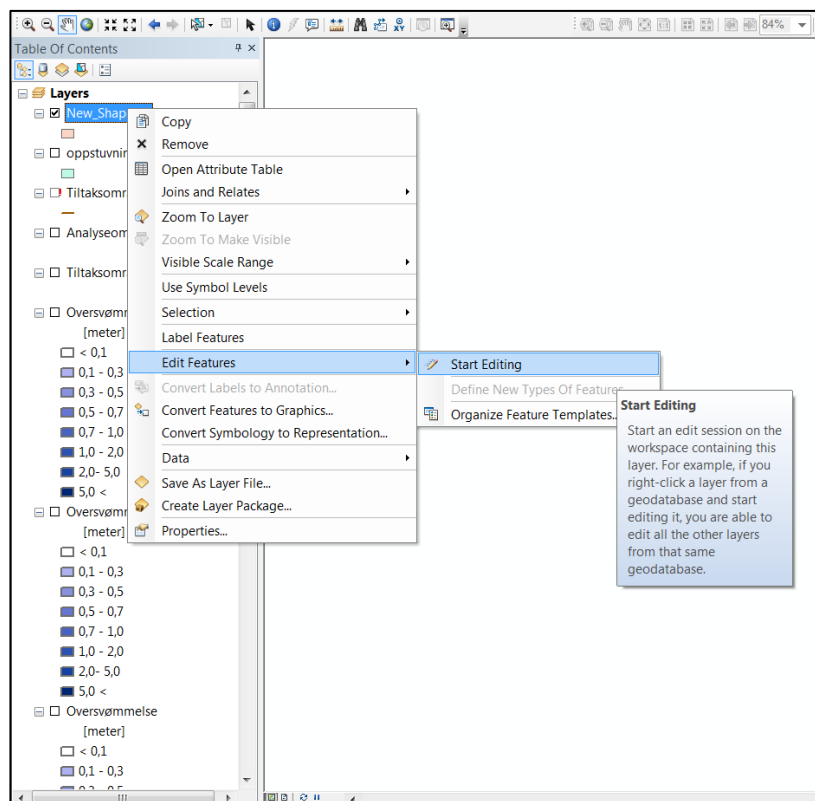


Under «Feature Type» velges Polygon, som vist i vinduet. «Spatial Reference» endres ved å klikke på «Edit» og settes til samme datum og projeksjon som terrenngmodellen har, i denne oppgaven; ETRS 1989 UTM Zone 32N.

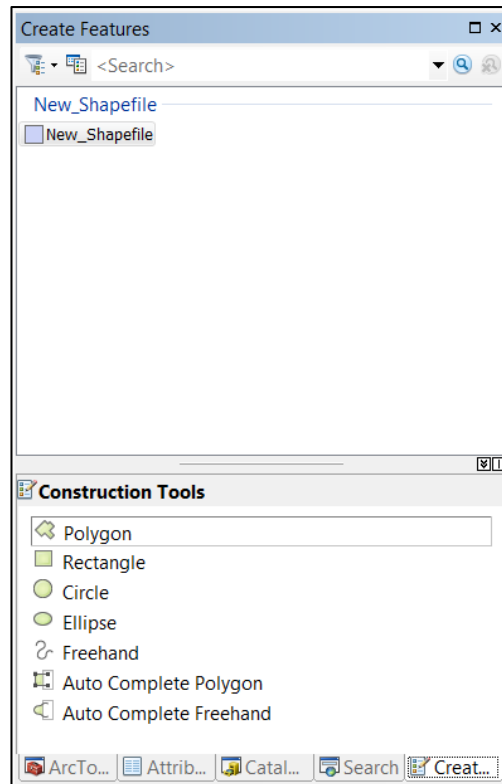
For å kunne legge til en høyde i polygonene som tegnes, må det legges til en ny «Field» i shape-filen. Dette gjøres ved å dobbelklikke på shape-filen i Catalog-vinduet. Da vises følgende vindu på skjermen.



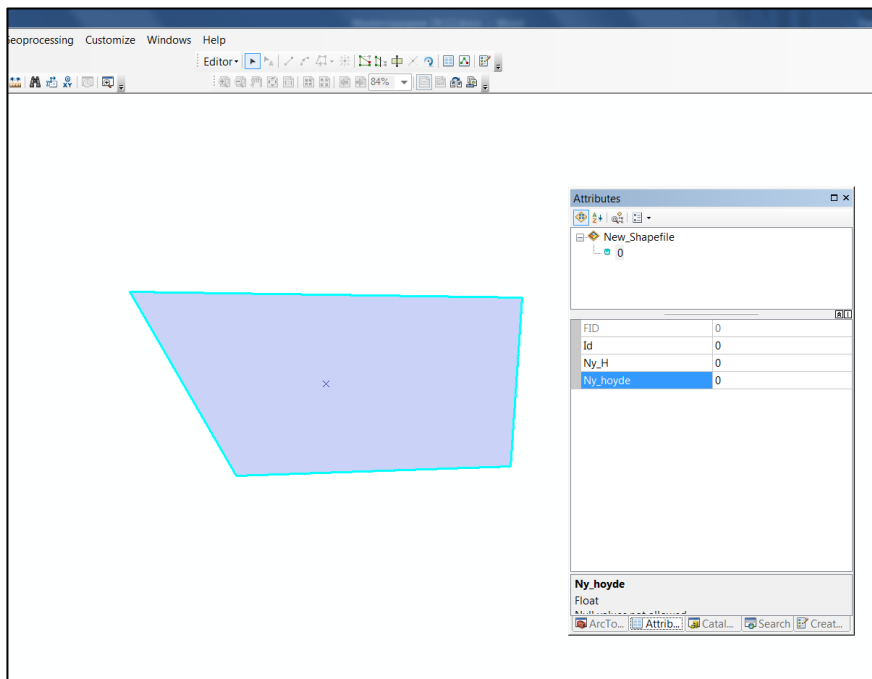
Under «Fields» og «Field Name» skrives navnet på en ny “Field”, i dette eksempelet «Ny_hoyde». «Data type» settes til «Float». Deretter dras den nye shapefilen over til «Table of Contents» med musepekeren. For å begynne å tegne polygoner, høyreklikk på shapefilen og velg «Start Editing», som vist under.



For å tegne et nytt polygon, åpnes «Create Features» i verktøylinjen øverst. Shapefilen skal vises i dette vinduet. Klikk på shapefilen og deretter «Polygon», som vist under.

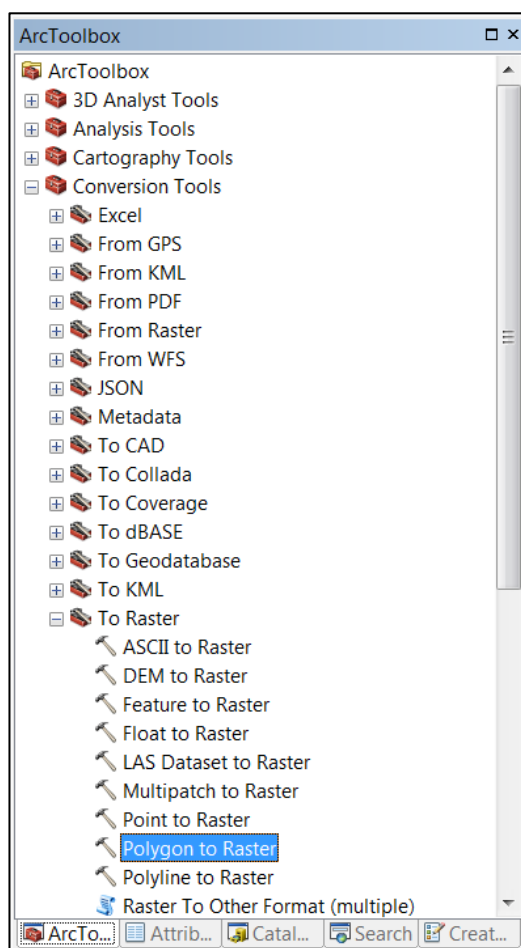


For å sette høyde på et polygon, merk polygonet og åpne «Attributes». Her skrives høyden inn bak «Ny_hoyde», som vist under. Polygoner kan deles i to og endres ved hjelp av verktøy i verktøylinjen øverst.

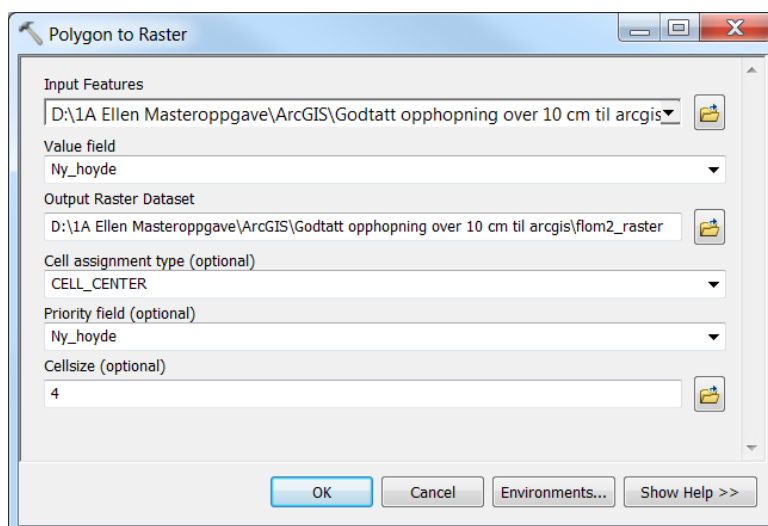


C2 Å legge nye høyde inn i terrengmodellen

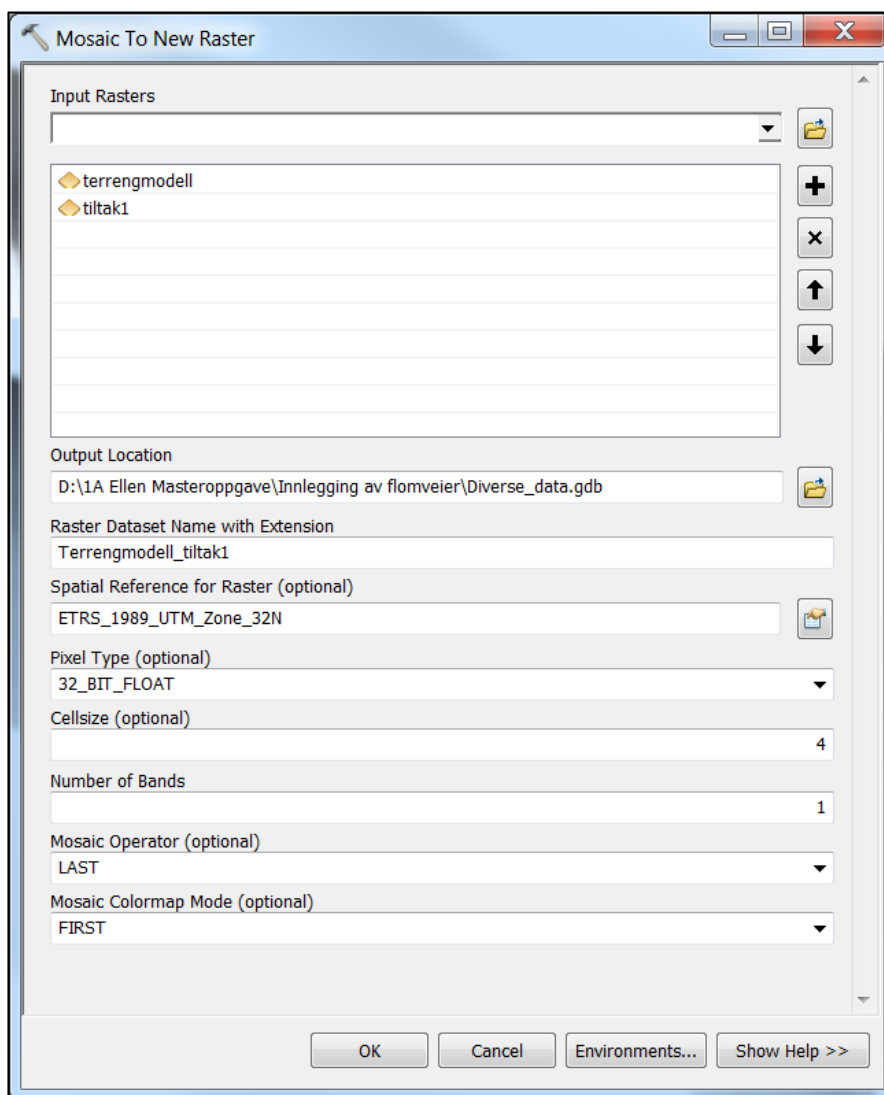
For å erstatte eksisterende terrenghøyder med høydene på de konstruerte polygonene, åpnes ArcTools fra verktøylinjen øverst. Her velges Conversion Tools -> To Raster -> Polygon to Raster, som vist under.



Det kommer deretter opp et vindu og det settes inn verdier som vist under.



Rasteret legges over terrenngmodellen ved bruk av verktøyet «Mosaic To New Raster». Dette finnes under ArcToolbox -> Data Management Tools -> Raster -> Raster Dataset. Rasteret for eksisterende terrenng og rasteret med polygoner dras over fra «Table of Contents og slippes under Input Rasters med musepekeren. Deretter velges samme verdier som vist nedenfor. Cellsize bestemmes utfra ønsket størrelse på hver celle og «Spatial Reference for Raster» bestemmes utfra datum og projeksjon til eksisterende terrenngmodell.



Metoden er tidkrevende og vanskelig å utføre nøyaktig. Den anbefales derfor kun å bruke ved svært enkle endringer i terrenngmodellen. Et bedre alternativ er å benytte et godt tegneprogram, eksempelvis Autocad Civil 3D, til å endre deler av terrenngmodellen og deretter følge oppskriften i del 2 i dette vedlegget. En annen mulighet er å laste opp hele terrenngmodellen inn i et tegneprogram, tegne inn ønskede endringer, og deretter konvertere til et raster i ArcGIS.



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway