



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Modellering av urban overvannsfloam – En analyse av bruksområdet til MIKE FLOOD

Urban flood modelling – Analysing the applicability
of MIKE FLOOD

Runa Aarekol Mathisen og Maria Larsen Wigestrang
Vann- og miljøteknikk

Vann kan både bære og velte et skip.

Kinesisk ordtak

Forord

Denne masteroppgaven markerer avslutningen på vårt femårige studieløp innen vann- og miljøteknikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Oppgaven er utarbeidet våren 2020 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Hensikten med oppgaven har vært å utarbeide og analysere bruksområdet til en sammenkoblet flommodell, bestående av en endimensjonal ledningsnettmodell og en todimensjonal terrengmodell. Programvarene som benyttes i denne masteroppgaven er MIKE FLOOD, MIKE URBAN og MIKE 21 Flow Model. Programvarene er levert av DHI.

Vi vil rette en stor takk til vår hovedveileder, Vegard Nilsen, for god oppfølging og konstruktive tilbakemeldinger. Videre vil vi takke vår biveileder Marius Gulbrandsen, fra Asker kommune, for gode innspill til flomforebyggende tiltak og formidling av lokal kunnskap om analyseområdet. En stor takk til William Stott for gode råd, tålmodighet og opplæring i programvaren, samt Multiconsult for programlisens og lån av pc. Takk til Halvor Hardang, fra DHI Norge, for gode råd og innspill til MIKE FLOOD. Vi vil også rette en takk til Eivind Fredrik Dalevold, fra Asker kommune, for gode innspill om den tilsendte MIKE URBAN-modellen.

Til slutt vil vi takke NMBU for en begivenhetsrik studietid, den vil aldri bli glemt.

Ås, Mai 2020

Runa Aarekol Mathisen og Maria Larsen Wigestrاند

Sammendrag

Det forventes at klimaendringer og urbanisering vil medføre større og hyppigere urbane flommer. Økt skadeomfang på bygg og eiendom er en konsekvens av dette. Flommodeller er et hjelpemiddel for å vurdere utfordringer og tiltak ved overvannsflom. Ved å modellere flomforebyggende tiltak kan effekten av ulike løsninger synliggjøres, samt være tid- og kostnadsbesparende.

Hensikten med denne masteroppgaven er å utarbeide og analysere bruksområdet til en sammenkoblet MIKE FLOOD-modell for et flomutsatt område i Asker kommune. Den sammenkoblede modellen består av en MIKE URBAN 1D-modell og en MIKE 21 2D-modell. MIKE FLOOD kan simulere og beregne flomforløp på overflate og i rør. De sammenkoblede modellene kan kalibreres enkeltvis ved hydrologiske parametre, for korrekt simulert vannmengde. I denne studien er det valgt å kalibrere MIKE URBAN-modellen for et uvanlig område, et stort naturlig felt. Modellvalideringen viste god overensstemmelse ved målt og simulert avrenning, da modellen simulerte en uavhengig nedbørhendelse. Resultatet indikerte at MIKE URBAN kan simulere avrenning for et stort naturlig felt.

MIKE FLOOD-modellen ble videre benyttet til å simulere en 200 års flom som forekom 6. august 2016 på Askenga, analyseområdet, i Asker kommune. Modellen ble evaluert med dokumenterte kjelleroversvømmelser fra denne dagen. Simuleringene viste delvis overensstemmelse, som tilsier at MIKE FLOOD-modellen kan indikere kjelleroversvømmelser. Resultatet fra analyseområdets ledningsnett indikerte lav fyllingsgrad. Årsakene til kjelleroversvømmelsene antas å være overflateavrenning og terrengutforming. MIKE FLOOD kan delvis indikere årsak til kjelleroversvømmelsene som inntraff 6. august 2016.

For å undersøke om programmet er egnet til å vurdere flomforebyggende tiltak, ble det forsøkt å implementere to ulike tiltak ved hjelp av ArcGIS. Begge tiltakene hadde positiv innvirkning på flomutbredelsen. Resultatet indikerer at modellen kan være egnet til å vurdere flomforebyggende tiltak for 6. august-hendelsen. Dette arbeidet viser at MIKE FLOOD er et nyttig verktøy for å fremstille flomutbredelse i urbane områder, der vannutveksling mellom rør og overflate inkluderes.

Summary

Climate change and urbanization are expected to result in larger and more frequent urban floods. Increased damage to buildings and properties is a consequence of this. Flood models are a tool for assessing flood challenges and flood reducing measures. By modelling flood prevention measures, the effect of different solutions can be visualized, time and cost can be saved.

The purpose of this master thesis is to develop and analyze the usefulness of a coupled MIKE FLOOD model for a flood-exposed area in Asker municipality. The coupled model consists of a MIKE URBAN 1D model and a MIKE 21 2D model, and can be calibrated individually by hydrological parameters for a correct simulated flow. MIKE FLOOD can simulate and calculate flow both in the storm sewer system and on the terrain surface. In this thesis the MIKE URBAN model is calibrated for a non-urban area. The validation result, for an independent rainfall event, indicated good correlation between measured and estimated runoff and indicated that MIKE URBAN can simulate runoff for a non-urban area.

The MIKE FLOOD model simulated a 200-year precipitation event that occurred on August 6. 2016 at the study area Askenga. The model was evaluated by comparing simulated results with reported basement floodings that occurred this day. The simulations indicate that the MIKE FLOOD model can identify basement flooding. The results showed that the storm sewer system had ample capacity, and the basement floodings are assumed to be caused by the surface runoff and terrain design. MIKE FLOOD can partly indicate the cause of the basement floods that occurred on August 6. 2016.

To determine if the program is suitable for suggesting flood prevention measures, two different measures were implemented in the surface model using ArcGIS. Both measures simulated improvement in the flood model. The results indicate that the model can be used to model flood prevention measures for the August 6th event. The results showed that MIKE FLOOD is a useful tool in simulating flood inundation and flood extent in urban areas, and showed the importance of including interaction between sewer and surface system.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	v
Summary	vii
Innhold	ix
Figurer	xv
Tabeller	xvii
Forkortelser	xix
1 Innledning	1
1.1 Problemstilling	2
2 Bakgrunn	3
2.1 Overvannsskader	3
2.1.1 Kjelleroversvømmelse	4
2.1.2 Lokal overvannsdiskonering	5
2.1.3 Beregning av avrenning	6
2.1.4 Geografiske informasjonssystemer	8
2.2 Modelling av urbane pluviale flommer	9
2.2.1 Ledningsnettmodell	11
2.2.2 Overflatemodell	12
2.2.3 Sammenkoblede modeller	12
2.2.4 Modellgyldighet	13
2.2.5 Modellusikkerhet	14
2.2.6 Tidligere studier	15
2.3 MIKE FLOOD 1D-2D-modell	16
2.3.1 MIKE URBAN 1D-modell	17
2.3.2 MIKE 21 - 2D-modell	18
2.3.3 Sammenkobling av modellene	19
3 Metode	21
3.1 Analyseområdet	21

3.2	Innsamling av data	27
3.2.1	Nedbørmåler	28
3.2.2	Vannføringsmåler	28
3.2.3	Datagrunnlag	28
3.3	MIKE URBAN 1D-modell	29
3.3.1	Hydrologisk oppsett	29
3.3.2	Kalibrering av MIKE URBAN 1D-modell	33
3.4	MIKE 21 2D-modell	37
3.4.1	Utforme terrengmodell i ArcMap	37
3.4.2	Opprette MIKE 21-modell	38
3.5	Utarbeidelse av MIKE FLOOD 1D-2D-modell	41
3.5.1	Begrensinger og antakelser	43
3.5.2	Utførelse av følsomhetsanalyse	44
3.5.3	Modellvalidering og evaluering	44
3.6	Tiltak og gjennomføring	45
3.6.1	1. tiltak - forbedre eksisterende bekkeløp	45
3.6.2	2. tiltak - fordrøyningsbasseng og kantstein	46
4	Resultater	49
4.1	Følsomhetsanalyse - kalibrering	49
4.2	Kalibrering av MIKE URBAN-modellen	51
4.2.1	Endelige kalibreringsparametre	51
4.2.2	Kalibreringsresultat	54
4.3	Flomutbredelse 6. august 2016	57
4.4	Følsomhetsanalyse - Terrengmodell	61
4.5	Validering og evaluering av flommodell	64
4.5.1	Validering av flommodellen	64
4.5.2	Evaluering av simulert resultat	64
4.6	Implementering av tiltak	66
4.6.1	Tiltak 1	66
4.6.2	Tiltak 2	69
5	Diskusjon	71
5.1	Validering av rådata	71
5.2	Følsomhetsanalyse	72
5.3	Flommodellen	72
5.3.1	Utarbeidelse av flommodell	72
5.3.2	Modellvalidering og evaluering	74
5.3.3	Flomutbredelse 6. august 2016	75
5.4	Vurdering av tiltak	76

5.5	Anbefalinger og videre arbeid	77
6	Konklusjon	79
	Referanser	81
	Vedlegg A Valgte RDI parametre i MIKE URBAN	85
	Vedlegg B Kalibreringsresultat	87

Figurer

2.1	Kjelleroversvømmelse kategori 2	4
2.2	Tre trinnstrategien for lokal overvannsdistribusjon	6
2.3	Raster fremstilt av laserdata	9
2.4	Modelleringsprosedyre	10
2.5	Overflatemodell med 0.25 x 0.25 meter romopløsning	12
2.6	Oversvømmelse grunnet fullt ledningsnett	13
2.7	Sammenkobling av MOUSE-modellene i MIKE URBAN	17
2.8	Delfelt med tilknyttede noder	18
2.9	Batymetri fra en MIKE 21-modell	19
2.10	Sammenkobling av terreng- og ledningsnettmodell	19
3.1	Analyseområdet med overvannsnett og åpne bekkeløp	21
3.2	Soneinndeling i nedbørfeltet	22
3.3	Nedbørfeltets høydeprofil	23
3.4	Plassering av nedbørfeltets høydeprofil	23
3.5	Løsmassekart av analyseområdet	24
3.6	Nedbørstasjoner i nærhet til analyseområdet	25
3.7	IVF-kurve for Sem nedbørstasjon i Asker kommune	26
3.8	Bekkeinntak vest i analyseområdet	26
3.9	Bekkeinntak øst i analyseområdet	26
3.10	Øvrig ledningsnett i analyseområdet	27
3.11	Cellestrukturen som benyttes i tid-areal-beregninger, der hvert midtpunkt symboliserer utløpet i hvert delfelt	30
3.12	De tre ulike tid-areal-kurvene gitt i MOUSE, samt formen på tilhørende delfelt	31
3.13	Den hydrologiske modellen kombinert med RDI-modulen	32
3.14	Kalibreringsmetode; Grønn graf indikerer den simulerte vannføringen i utløpet, og den blå indikerer målt vannføring i utløpet	33
3.15	Nedbørhendelsen 15.10.2019 benyttet til kalibrering	35
3.16	Soneinndelingen ved kalibrering	36

3.17	Konvertering av shapefil til rasterfil	37
3.18	Dfs2-fil med manningstall for ruhet	38
3.19	Sammenkobling av MIKE UBRAN og MIKE 21	42
3.20	Bildet til venstre viser ledningsnettets ved kalibrering og til høyre vises ledningsnettets etter sammenkobling	42
3.21	Koblingspunkter i form av inntak, utløp og kummer	43
3.22	Overvannsledninger og åpne bekkeløp	45
3.23	Tiltak 1; utvidelse av bekkeløpet	46
3.24	Tiltak 2; fordrøyningsbasseng og kantstein	47
4.1	Resultat før justering av parameteren CQOF	49
4.2	Resultat etter justering av parameteren CQOF	50
4.3	Resultat før justering av parameteren impermeabilitet	50
4.4	Resultatet etter justering av parameteren impermeabilitet	51
4.5	Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 1	55
4.6	Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 2	56
4.7	Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 3	56
4.8	Simulert flomutbredelse ved 6. august-hendelsen	57
4.9	”Problemområdene” ved 6. august-hendelsen	57
4.10	Flomutbredelsen ved hovedbekkeløpet	58
4.11	Flomutbredelsen ved sidebekkeløpet	58
4.12	Sammenkobling av åpne og lukkede bekketraseer	59
4.13	Simulert vanddybde i det lukkede hovedbekkeløpet	59
4.14	Simulert vanddybde i lukket sidebekkeløp	60
4.15	Tidsserie av flomforløpet som inntraff ved 6. august-hendelsen	60
4.16	Flomutbredelsens endring i tidsrommet 10:15 til 10:45	61
4.17	Batymetri med 0.5 x 0.5 meter i romoppløsning	61
4.18	Batymetri med 1 x 1 meter i romoppløsning	61
4.19	Simulert flomutbredelse ved romoppløsning 1 x 1 meter	62
4.20	Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsninger i terrenngmodellen	62
4.21	Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsninger for sidebekkeløpet	63
4.22	Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsninger for hovedløpet	63
4.23	Simulert og målt vannføring for den uavhengige nedbørhendelsen	64
4.24	Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse	65
4.25	Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse	65
4.26	Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse	66
4.27	Simulert flomutbredelse med rapportert overflatevann på eiendom	66
4.28	Flomutbredelse etter implementert tiltak 1	67
4.29	Flomutbredelse ved sidebekkeløpet etter implementert tiltak 1	67

4.30	Flomutbredelse med ukorrekt plassering av hovedbekkeløpets inntak . . .	68
4.31	Flomutbredelse ved tiltak 1 og 6. august-hendelsen	68
4.32	Hovedbekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 1	69
4.33	Sidebekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 1	69
4.34	Flomutbredelse etter implementert tiltak 2	70
4.35	Flomutbredelse ved det implementerte fordrøyningsbassenget	70
4.36	Flomutbredelse ved tiltak 2 og 6. august-hendelsen	70
4.37	Hovedbekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 2	70
4.38	Sidebekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 2	70
B.1	Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 1	87
B.2	Estimert mot målt vanndybde ved kalibreringsresultat for nedbørshen- delse 1	87
B.3	Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 2	88
B.4	Estimert mot målt vanndybde ved kalibreringsresultat for nedbørshen- delse 2	88
B.5	Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 3	89
B.6	Estimert mot målt vanndybde ved kalibreringsresultat for nedbørshen- delse 3	89

Tabeller

2.1	Anbefalt avrenningsfaktor C med returperiode på 10 år	7
3.1	Beskrivelse av benyttet grunnlagsdata	28
3.2	Funksjonsbeskrivelse av ulike parametre som inngår i tid-areal-metode . .	30
3.3	Funksjonsbeskrivelse av grensebetingelsene	33
3.4	Funksjonsbeskrivelse av benyttede kalibreringsparametre	34
3.5	Funksjonsbeskrivelse av viktige parametre i MIKE 21	39
3.6	Valgte parameterverdier for funksjonsoppsettet i MIKE 21	40
3.7	Funksjonsbeskrivelse av ”alternativ for urbane ledninger”	41
3.8	Valgte parameterverdier for MIKE FLOOD	42
4.1	Kalibrerte RDI-verdier for sone 1	52
4.2	Kalibrerte parameterverdier for sone 1	52
4.3	Kalibrerte RDI-verdier for sone 2	53
4.4	Kalibrerte parameterverdier for sone 2	53
4.5	Kalibrerte RDI-verdier for sone 3	54
4.6	Kalibrerte parameterverdier for sone 3	54
A.1	Startbetingelser for RDI parametre	85
A.2	Terskelverdier for RDI parametre	85
A.3	Grunnvannsverdier for RDI parametre	86

Forkortelser

DHI	Danish Hydraulic Institute
DOM	Digital overflatemodell
DTM	Digital terrengmodell
FKB	Felles kartdatabase
GIS	Geografiske informasjonssystemer
IVF	Intensitet-varighet-frekvens
LIDAR	Light detection and ranging
NEVINA	Nedbørfelt- og vannføringsindeksanalyse
NGU	Norges geologiske undersøkelse
NOU	Norges offentlige utredninger
RDI	Rainfall Dependent Inflow and Infiltration
ROS-analyse	Risiko- og sårbarhetsanalyse
SWMM	Storm water management model
UTM	Universal transverse mercator
LOD	Lokal overvannsdiskonering
MOUSE	Model for Urban Sewers

1. Innledning

I fremtiden forventes et villere og våtere klima. Dette innebærer hyppigere og intense regnskyll som resulterer i tilhørende overvannsflommer (Hanssen-Bauer mfl., 2009). Urbanisering har endret hydrologien i byer og tettsteder ved å erstatte grøntareal med tette flater, samt bidratt til økt avrenning. Fra tidligere århundre ble overflatevann håndtert ved å lede vannet ved hjelp av rør og sluk. Urbaniseringen og klimaendringene utgjør årsaken til at flere overvannsledninger i dag er underdimensjonerte og skadeomfanget grunnet flom øker (Lindholm mfl., 2008; Niemczynowicz, 1999).

I 2014 ble det utbetalt 750 millioner kroner i erstatning som følge av overvannsskader på bygninger. I løpet av de neste 40 årene antydes kostnadene til å være i størrelsesorden 45 til 100 milliarder kroner, dersom forebyggende tiltak ikke iverksettes. Et av regjeringens mål for fremtidens overvannshåndtering er å forebygge skader på byggverk. I NOU 2015:16, Norges offentlige utredninger om overvann i byer og tettsteder, frarådes oppdimensjonering av eksisterende overvannsnett. Det anbefales å infiltrere og fordrøye overvannet lokalt for deretter å lede avrenningen trygt til resipient (NOU, 2015).

Denne masteroppgaven er skrevet i samråd med Asker kommune. Den 6. august 2016 opplevde kommunen et intenst regnskyll, som resulterte i store materielle skader inkludert kjelleroversvømmelser. Et av områdene som ble hardest rammet var boligområdet Askenga, som er analyseområdet i denne oppgaven. Området er modellert ved bruk av analyseverktøyet MIKE FLOOD for å fremskaffe kunnskap om bruksområdet til modelleringsverktøyet.

Flere verktøy kan modellere overflateavrenning og strømning i rør enkeltvis, men få modeller kan presentere det totale strømningsbildet. I en 1D-2D flommodell, som MIKE FLOOD, kan flom vekselvis opptre i rør og på overflate. Ved dette skapes et tilnærmet realistisk bilde av faktiske flomforløp. En slik fremstilling kan være et hjelpemiddel til forebygging av flomskader. Ved å benytte en flommodell i prosjektering kan kostnader grunnet overprosjektering reduseres ved å analysere modellerte tiltak.

Målet med denne masteroppgaven er å vurdere om MIKE FLOOD-modellen kan benyttes til å analysere årsaken til skadene som inntraff ved 6. august-hendelsen, samt predikere flomutbredelse ved flomforebyggende tiltak.

1.1 Problemstilling

Denne masteroppgaven skal svare på følgende problemstillinger:

- Hvor godt stemmer simulert avrenning i MIKE URBAN mot målt avrenning fra nedbørfelt med stor andel naturlige felt?
- Kan MIKE FLOOD benyttes til å vurdere årsaken til kjelleroversvømmelsene som inntraff 6. august 2016 på Askenga?
- Kan MIKE FLOOD brukes til å vurdere flomforebyggende tiltak for overvannsfloppen som inntraff 6. august 2016 på Askenga?

2. Bakgrunn

I dette kapitlet presenteres teori som er grunnleggende for valg gjort i analysen. Kapitlet er inndelt i tre delkapitler, der viktige komponenter tilhørende flommodellen er vektlagt tyngst. I denne masteroppgaven er ArcGIS benyttet til å fremstille figurer, der bakgrunnskartet er hentet fra kartverkets database og er et basiskart inneholdene Norges kommuner.

2.1 Overvannsskader

I den vitenskapelig rapporten utgitt av Hanssen-Bauer mfl. (2009) fremkommer det at Norge har hatt en økning i årsnedbør på ca. 18 % de siste 100 årene. I fremtiden kan det forventes kraftigere og hyppigere styrtregnhendelser. Regnflommer vil, som konsekvens av dette, inntreffe oftere og være større (Hanssen-Bauer mfl., 2009; Norges vassdrags- og energidirektorat, 2015). FNs klimapanel skriver i deres femte hovedrapport at menneskelig aktivitet er den viktigste årsaken til klimaendringer. Det fremkommer at menneskelig aktivitet har påvirket klimaet ved større klimagassutslipp og endring i bruk av landareal (IPCC, 2013). Sentralisering og tettere bebyggelse har erstattet naturlige landareal med bygg og tette flater, samt endret lokal hydrologi.

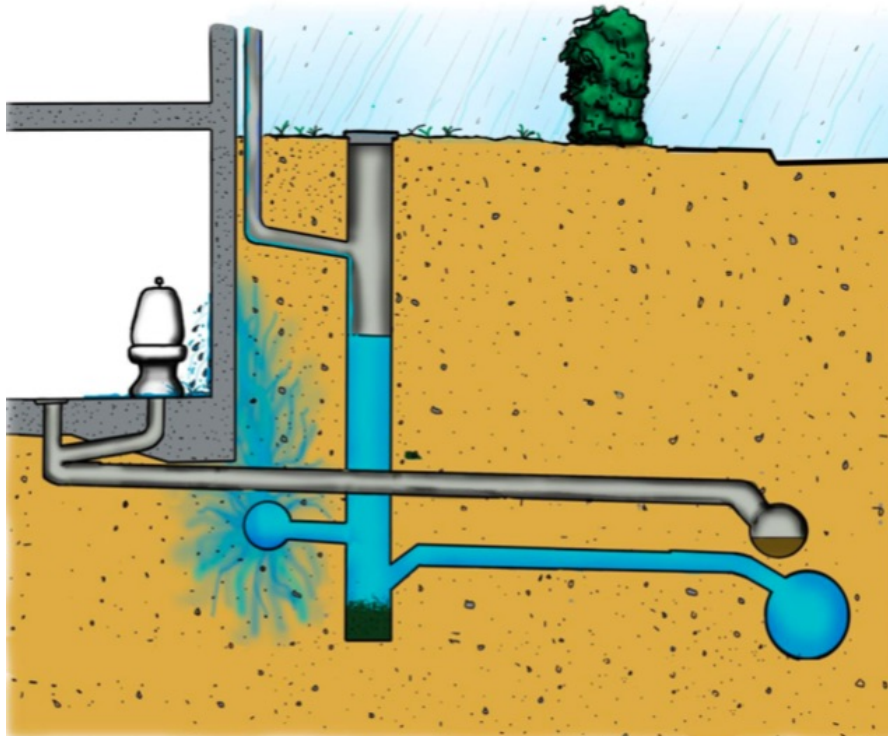
Urban hydrologi er vannets opptreden i byer og tettsteder, samt delen i vannets kretsløp som er i tilknytning av utbygde områder. Urbane områder kjennetegnes ved områder bestående av stor andel tette flater med redusert infiltrasjonsevne (Niemczynowicz, 1999). Den økte urbaniseringen kan dermed resultere i større overvannsmengder.

Overvann betegnes som avrenning fra tette overflater som veger, tak og lignende. Avrenningen kan skape store problemer ved mangelfull håndtering eller kapasitetsbegrensninger på ledningsnett. På 1900-tallet ble ledningsnett utbygd for å håndtere overvannsmengdene i byer og tettsteder. De hyppigere nedbørshendelsene med større intensitet har medført at flere ledningsnett i dag er underdimensjonert. Urbaniseringen har endret naturlige flomveger og er årsak til et stadig økende skadeomfang på bygg og eiendom (Lindholm mfl., 2008).

2.1.1 Kjelleroversvømmelse

Et av resultatene av u håndterlige mengder overvann er kjelleroversvømmelser. I følge Statistisk sentralbyrå ble det i Norge i 2016 rapportert 284 kjelleroversvømmelser, der kommunen har erstatningsansvar (SSB, 2016). Kjelleroversvømmelser kan medføre store materielle skader på bygg og eiendom. Det finnes ulike årsaker til kjelleroversvømmelser. Norsk vann har valgt å dele årsakene inn i fire kategorier (Norsk Vann. mfl., 2012).

1. Inntrenging av vann gjennom avløpssystemet
2. Inntrenging av vann gjennom kjeller-vegg eller gulv
3. Inntrenging av vann gjennom ytre åpninger
4. Lekkasje i vanninnstallasjon



Figur 2.1: Kjelleroversvømmelse kategori 2 (Norsk Vann. mfl., 2012)

1. Inntrenging av vann gjennom avløpssystemet

Dersom ledningsnettet er overbelastet kan det oppstå vanninntrenging i kjeller via avløpsinnstallasjoner som sluk, toalett eller dreneringsrør i vegg. Denne typen kjelleroversvømmelse oppstår typisk for eiendommer tilknyttet et fellesavløpssystem (Norsk Vann. mfl., 2012).

2. Inntrenging av vann gjennom kjellervegg eller kjellergulv

Det er flere årsaker til at det oppstår inntrenging av vann gjennom kjellervegg eller gulv (Norsk Vann. mfl., 2012). Kategori 2 illustreres i figur 2.1.

- Oppstuvning av vann via dreneringssystemet, der dreneringsledningen er koblet direkte til overvannsledningen.
- Tilstopping og skader på dreneringssystem og taknedløp.
- Høy grunnvannstand, der grunnvannets tilstrømning er større enn ledningsevnen til dreneringssystemet.
- Terrengutforming rundt bolig.

3. Inntrenging av vann gjennom ytre åpninger

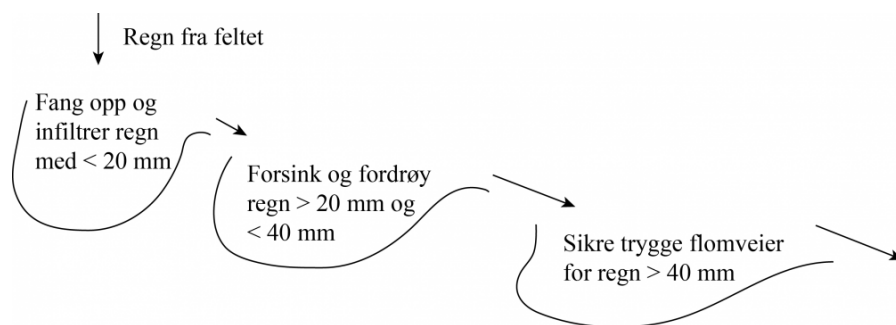
Lokal terrengkarakteristikk kan lede overvannet inn i boliger via kjellertrapp, garasje- nedkjørsler eller vinduer (Norsk Vann. mfl., 2012).

4. Lekkasje i vanninnstallasjon

Skader på vanninnstallasjoner, som vannledning eller oppvaskmaskin, kan føre til kjelleroversvømmelse (Norsk Vann. mfl., 2012).

2.1.2 Lokal overvannsdiskonering

I NOU 2015:16 frarådes oppdimensjonering av eksisterende overvannsnett. I fremtidens overvannshåndtering anbefales å infiltrere og fordrøye overvannet lokalt, før det deretter ledes trygt til resipient. Dette omtales som lokal overvannsdiskonering (LOD) og anses som forebyggende tiltak mot flomskader på bygg og eiendom. LOD er et begrep som omhandler å håndtere overvannet åpent i tre ulike trinn, vist i figur 2.2. I det første trinnet skal mindre regnhendelser infiltreres. Det andre trinnet omhandler å fordrøye større regnhendelser. Ved både trinn en og to er det ønskelig at overvannet forsinkes før det eventuelt går videre til overvannsnettet. Det tredje trinnet går ut på å sikre trygge flomveier for større regnhendelser som fordrøyning og infiltrasjon ikke er i stand til å håndtere (Lindholm mfl., 2008; Becker og Muthanna, 2016).



Figur 2.2: Tre trinnstrategien for lokal overvannsdponering (Lindholm mfl., 2008)

2.1.3 Beregning av avrenning

Avrenningen i et nedbørfelt avhenger av intensitet og varighet. Svært intense nedbørhendelser gir et større skadeomfang på bygg og eiendom. Dette grunnet at løsmassene evner å infiltrere mindre vannmengde på et kort og intenst regnskyll enn det motsatte (NOU, 2015). I dette delkapittelet presenteres ulike komponenter som inngår i beregning av avrenning.

Returperiode

Returperiode defineres som antall år i gjennomsnitt, mellom en flomvannføring eller en nedbørhendelse med en bestemt intensitet, inntreffer eller overskrides. Returperiode, også kalt gjentaksintervall, er statistiske vurderinger basert på innmålte nedbørsdata. For eksempel vil en nedbørhendelse med returperiode på 20 år inntreffe i gjennomsnitt hvert 20. år (Stenius mfl., 2015).

IVF-kurver

Intensitet-varighet-frekvens (IVF) er kurver som karakteriserer ulike regnintensiteter over ulike regnvarigheter. Ved hjelp av IVF-kurver kan gjentaksintervall for hendelser med bestemte intensiteter og varigheter estimeres. I Norge er IVF-kurver benyttet til å dimensjonere nedbørparametre for kortidsnedbør (Førland mfl., 2015).

Den rasjonale metode

Den rasjonale metode er empirisk fundert og benyttes til enkle overslag for dimensjonering i små urbane nedbørfelt. Metoden baseres på direkte sammenheng mellom målt nedbør og avrenning. Metoden finner maksimalavrenningen for et tidspunkt lik konsentrasjonstiden etter regnets start. Formelen er gyldig for felt mellom 2-5 km² (Statens Vegvesen, 2014). I følge Lindholm mfl. (2008) anbefales det at feltene ikke overskrider 0,2-0,5 km² og at konsentrasjonstiden er mindre enn 15 min.

Avrenningen Q [m^3/s] er gitt ved:

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (2.1)$$

C = Avrenningsfaktor [-]

i = Dimensjonerende nedbørintensitet [l/s ha]

A = Feltareal [ha]

Avrenningsfaktoren C er andelen avrenning fra nedbør som renner av en flate. Denne konstanten varierer med overflater og kan hentes for flere delfelt. Tabell 2.1 hentet fra Statens Vegvesen (2014) illustrerer aktuelle C -verdier.

Overflatetype	Avrenningsfaktor, C
Betong, asfalt, bart fjell og lignende	0.6 - 0.9
Grusveger	0.3 - 0.7
Dyrket mark og parkområder	0.2 - 0.4
Skogsområder	0.2 - 0.5

Tabell 2.1: Anbefalt avrenningsfaktor C med returperiode på 10 år (Statens Vegvesen, 2014)

Konsentrasjonstiden til et felt kan forklares som tiden overvannet bruker på å bevege seg fra det ytterste punktet i et nedbørsfelt til utløpet i feltet. Konsentrasjonstid for naturlige felt (likning 2.2) og urbane felt (likning 2.3) er gitt ved formel hentet fra Statens Vegvesen (2014).

$$t_k = 0.6 \cdot L_F \cdot \Delta h^{-0.5} + 3000 A_{SE} \quad (2.2)$$

$$t_k = 0.02 \cdot L_F^{1.15} \cdot \Delta h^{-0.39} \quad (2.3)$$

t_k = Konsentrasjonstid [min]

L_F = Lengde av feltet [m]

Δh = Høydeforskjellen i feltet [m]

A_{SE} = Effektiv sjøprosent, andel innsjø i feltet [-]

2.1.4 Geografiske informasjonssystemer

Geografiske informasjonssystem (GIS) er en programvare for innsamling, analysing, modellering, organisering og presentering av geografisk stedfestet informasjon (Ørstavik, 2015). GIS anvendes blant annet til planlegging av infrastruktur og areal og baseres på en forenklet terrengmodell av virkeligheten. Verktøyet kan forenkle prosesseringen av inputdata til en flommodell. En flommodell muliggjør analyser av flomforløp og aktuelle tiltak (Hunter og Bishop, 2001). Videre i delkapittelet presenteres ulike kartdata som inngår i utarbeidelsen av en flommodell.

Felles kartdatabase

Felles kartdatabase (FKB) er en samling av datasett med høy detaljeringsgrad som utgjør en sentral del av et grunnkart. Datasettene består av vektordata som er godt egnet til geografiske analyser og kartproduksjon. FKB data gir grunnleggende geografisk informasjon som er relevant ved flomanalyse og overvannshåndtering. Kartdata av vann- og avløpsledning, veger, jernbane og bygninger er avgjørende ved slik analyse (Statens kartverk, 2013).

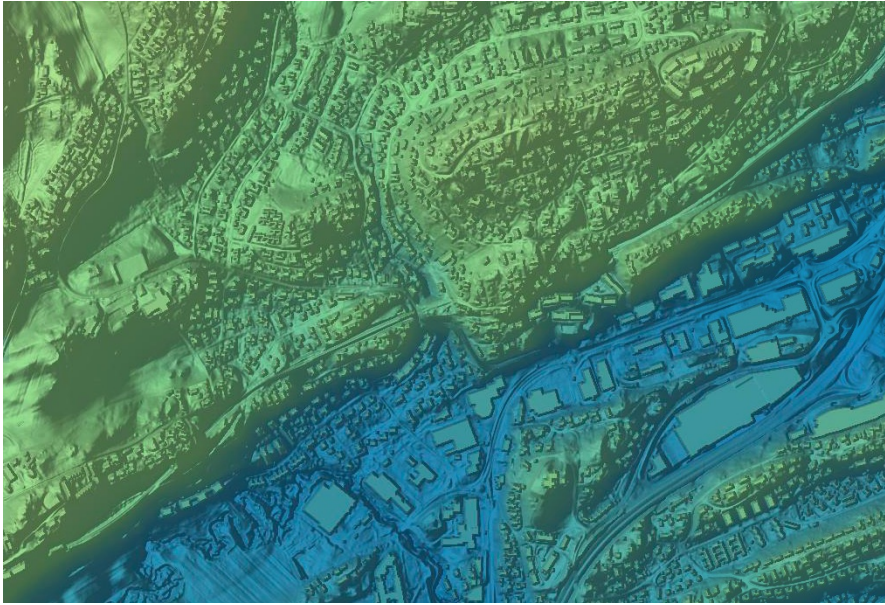
Vektor- og rasterdata

Raster- og vektordata er geografisk data som benyttes til modellering av terrengoverflate og batymetri (Kartverket, 2020). Rasterdata kan beskrives som et rutenett der hver rastercelle inneholder koordinater og en attributtverdi. For en detaljert fremstilling av terrenget bør rutestørrelsen være liten.

Ved vektordata kan objekter defineres ut fra punkter med tilhørende geografisk koordinater. Linjer kan trekkes mellom punktene, slik at objektene blir definert. På denne måten kan objekter som hus, veger eller vannflater presenteres av flere punkter som totalt gir en detaljert fremstilling. Et eksempel på vektordata er FKB (Hunter og Bishop, 2001).

Laserdata og høydesystem

Laserdata, også kalt LIDAR-data, er en optisk fjernmålingsteknikk der det benyttes laser til å produsere målinger av jordoverflaten, vist i figur 2.3. Teknikken produserer dataset med punktskyer bestående av nøyaktige x,y,z-målinger (ESRI, 2019). Punktskyen kan deretter benyttes til å etablere en digital terrengmodell (DTM) eller en digital overflatemodell (DOM). Her presenteres høydene til terrengoverflaten systematisk i et stort antall terrengpunkt. Forskjellen mellom modellene er at DOM inkluderer objekter, der DTM utelater objektene og interpolerer en jevn overflate. (Kartverket, 2013, 2009).



Figur 2.3: Raster fremstilt av laserdata (skjermdump fra SCALGO Live)

Euref89 er en regional referanseramme i Europa som ble tilgjengelig i Norge i 1997, der koordinater blir uttrykt i kartplanet (Kartverket, 2018). Euref89 er det offisielle referansesystemet i Norge og er et todimensjonalt koordinatsystem. I referansesystemet benyttes UTM (Universal transverse mercator) som egen kartprojeksjon, der sone 32 er gjeldende i sør-Norge. Høydesystemet NN2000 benyttes som vertikal referanseramme og ble fullført i 2018. Systemet kan tilpasses fremtidig landheving ved korrigerende teknologi og kan dermed brukes langt frem i tid (Kartverket, 2019; Engeland, 2018).

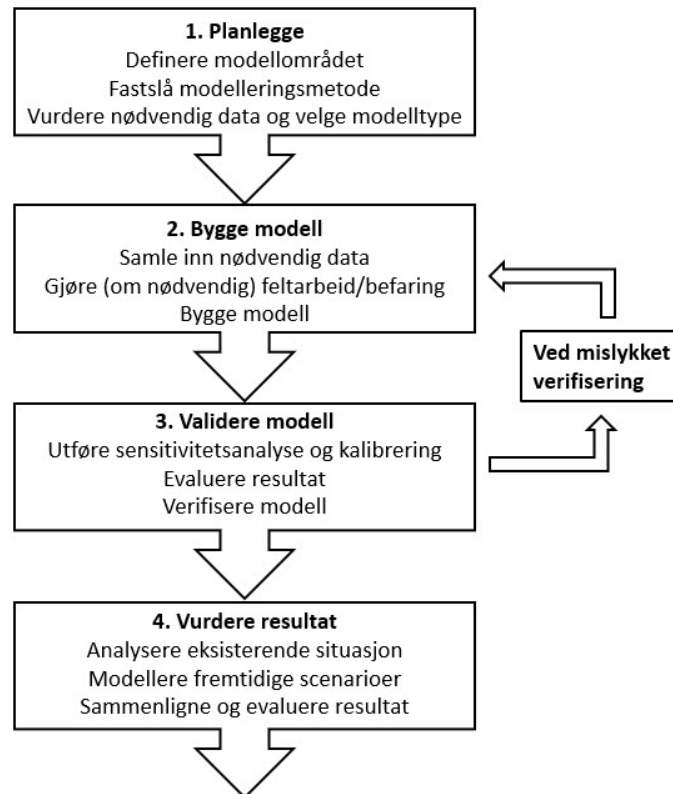
En terrengmodell består ofte av et rutenett, der størrelsen på hver enkelt rute representerer romoppløsningen i modellen. Ved en UTM oppløsning på 1, har hver rute en størrelse på 1 x 1 meter (Kartverket, 2016). Romoppløsningen til en digital terrengmodell vil påvirke nøyaktigheten til en overvannsmoell. I en terrengmodell med grov romoppløsning kan groper i overflaten og bygninger være udefinerte og medføre urealistiske resultater. Terrengmodeller med høy romoppløsning vil kreve mer tid og data, derfor bør formålet med modellen vurderes før grad av oppløsning velges (Vojinovic mfl., 2011).

2.2 Modellering av urbane pluviale flommer

Intense regnskyl i urbane områder, som hyppig fører til kapasitetsoverskridelse av ledningsnett, kategoriseres vanligvis som pluviale flommer. Regnskyl med sterk intensitet kan i tillegg føre til oversvømmelse forårsaket av vassdrag, og kategoriseres som fluviale flommer (Chen mfl., 2010). I denne studien modelleres urbane pluviale flommer i analyseområdet Askenga. Verktøy som er utviklet for flommodellering er blant annet

programvarene MIKE FLOOD og SWMM (Storm water management model). I programvarene benyttes 1D-modeller, 2D-modeller eller en kombinasjon av modellene.

Parkinson og Mark (1992) utarbeidet fire steg for å bygge en modell med god gyldighet. Figur 2.4 illustrer modelleringsprosedyren deres i hovedtrekk. Videre i dette delkapitlet blir hovedkomponentene for å bygge en realistisk flommodell presentert (steg 1), samt usikkerhetene som kan forekomme (Mark mfl., 2014; Parkinson og Mark, 1992).



Figur 2.4: Modelleringsprosedyre (Parkinson og Mark, 1992)

1D-modell

For å analysere flommer i kanaler eller ledningsnett benyttes vanligvis programvarer basert på de ikke-stasjonære en-dimensjonale ligningene, Saint Venants ligninger (Bates og De Roo, 2000). St. Venants ligninger gjengir prinsippene for bevaring av masser (kontinuitetsligningen) og bevaring av bevegelsesmengde (bevegelsesligningen). Av dette dannes det en en-dimensjonal dynamisk bølgeligning som løses numerisk (DHI, 2014c). 1D-modeller kan ha mangelfull overflatekarakteristikk og forenklede strømningsmønstre. Dette kan medføre beregningsproblematikk hvis vannet trenger ut av ledningsnett. For å simulere vannfordeling mellom kanal og terreng kan 2D-modeller benyttes (Bates og De Roo, 2000; Vojinovic og Tutulic, 2009).

2D-modell

To-dimensjonal modellering gir en detaljert presentasjon av overflatekarakteristikk og strømningsmønster (Vojinovic og Tutulic, 2009). Ved å benytte en forenklet versjon av Navier Stokes-ligninger, også kjent som St. Venants-ligninger for gruntvannsbølger, kan to/tre-dimensjonale modeller genereres ved numerisk løsning (DHI, 2018). Ved to-dimensjonal modellering benyttes tilgjengelige felldata som gjengir en detaljert geografisk presentasjon av flomutbredelse og overflatestrømning (Marks og Bates, 2000; Kourtis. I. M. mfl., 2017).

1D-2D-modell

I en 1D-2D-modell kobles ledningsnett- eller kanalmodell (1D) sammen med en overflatemodell (2D). Sammenkoblingen gir et realistisk bilde av en intens nedbørhendelse i urbane områder. 1D-2D-modellens resultatet kan indikere flomutbredelse, overflatevannets dybde, samt forhold i ledningsnett (Kourtis. I. M. mfl., 2017; Chen mfl., 2007).

I følge Kourtis. I. M. mfl. (2017) er hovedkomponentene for simulering av 1D-2D-modeller:

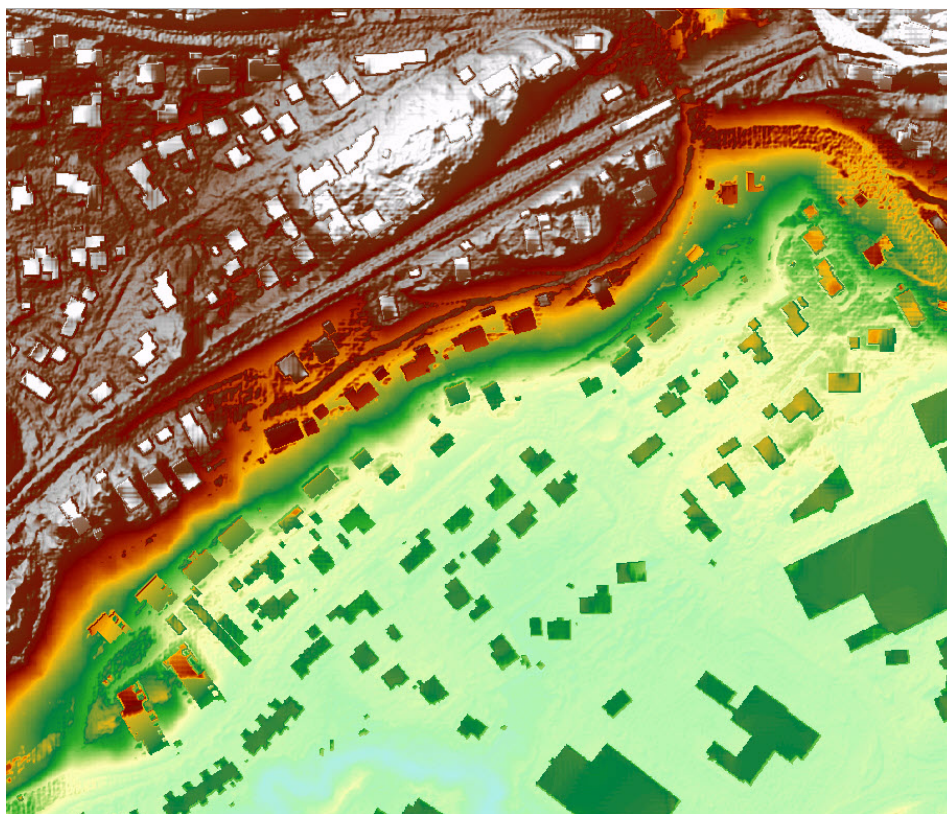
- Ledningsnettdata
- Digital høydemodell
- Avgrenset terrengmodell med definert celleoppløsning
- Startbetingelse for flom- og tørkedybde
- Koblingspunkter mellom 1D- og 2D-modell for vannfordeling

2.2.1 Ledningsnettmodell

Elementene i en ledningsnettmodell består hovedsakelig av knutepunkter (noder), ledninger og delfelt. Nodene symboliser vanligvis kummer, men kan presentere komponenter som utløp, sluk m.m. Ledningene kan bestemmes som lukkede rør eller åpne kanaler. Parametre som blant annet diameter, ruhet og lengde er med på å beskrive ledningskarakteristikken. Modellen kan også deles inn i flere delfelt som beskriver lokale parametre som permeabilitet og konsentrasjonstid. I modellen kan fysiske funksjoner som ventiler, stengeventiler, pumper og andre strømningsregulatorer også beskrives. Totalt uttrykker nodene og ledningene et realistisk ledningsnettverk. Ledningsnettmodeller presenterer grunnleggende endimensjonale strømningsmodeller (DHI, 2014c).

2.2.2 Overflatemodell

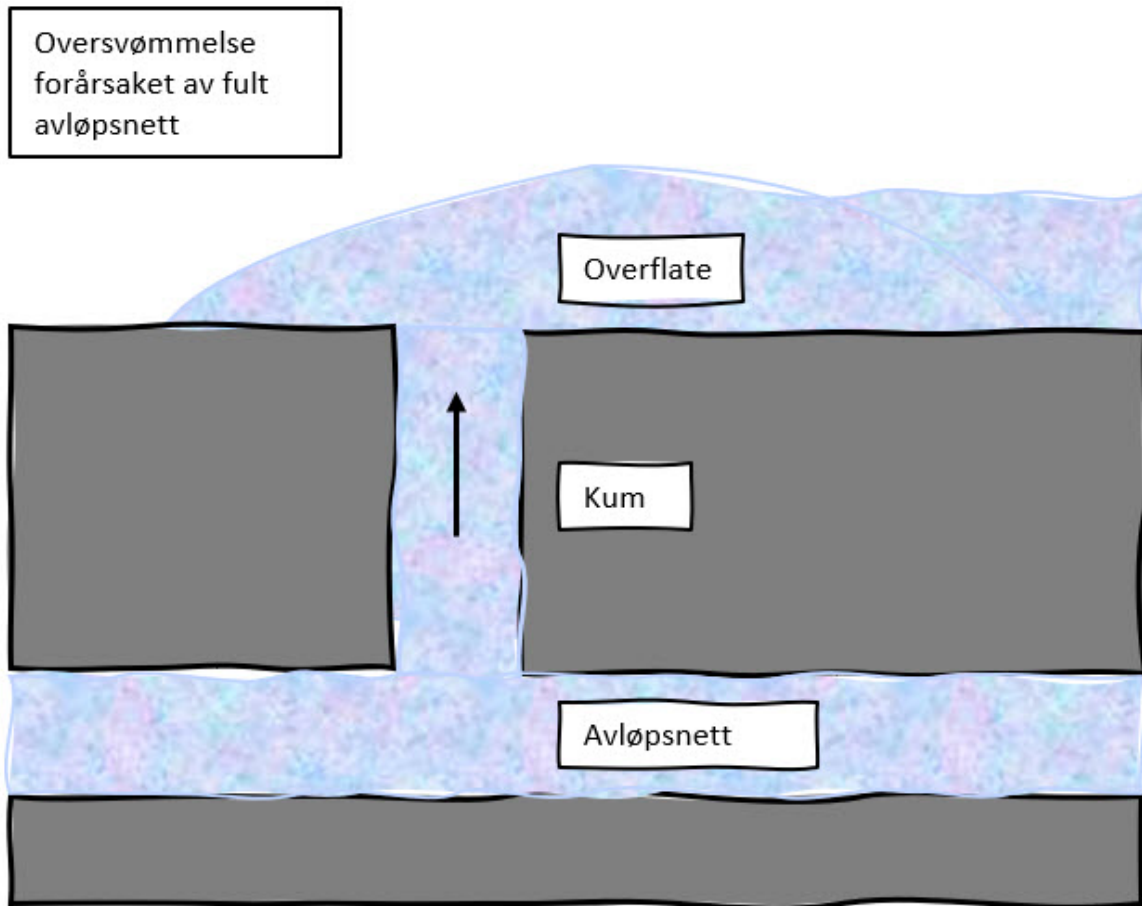
Kvaliteten på topografiske data i modelleringsområdet er avgjørende for en god overflatemodell (DHI, 2016). Overflatemodellen består i hovedsak av en batymetrimodell (figur 2.5), overflatekarakteristikk og nedbør. I overflatemodellen kan nedbør inkluderes og tilpasses, men også neglisjeres ved å tilkoble en ledningsnettmodell. Overflatemodeller fremstiller todimensjonale modeller med komplekse strømningsforhold (Chen mfl., 2007). Denne kompleksiteten medfører større usikkerhet i modellen som er viktig å ta hensyn til i resultatet.



Figur 2.5: Overflatemodell med 0.25 x 0.25 meter romoppløsning (skjermdump fra ArcGIS)

2.2.3 Sammenkoblede modeller

Ved å sammenkoble en ledningsnettmodell og en overflatemodell vil en detaljert urban flommodell genereres. De to uavhengige modellene kan sammenkjøres ved å koble enkelte noder fra ledningsnettmodellen med terrengoverflaten. Ved denne koblingen vil vann fra ledningsnettets kunne fylle kummer som deretter fordeles på overflaten eller det motsatte, illustrert i figur 2.6. Dersom overflatemodellen kobles til noder, fungerende som innløp eller utløp, kan terrenget benyttes som naturlig bekketrasé (DHI, 2017a).



Figur 2.6: Oversvømmelse grunnet fullt ledningsnett (DHI, 2017a)

2.2.4 Modellgyldighet

For å oppnå god modellgyldighet er det, i følge Mark mfl. (2014), ideelt å utføre en rekke vurderinger for å minimere usikkerhet mellom simulert resultat og observerte målinger. Videre presenteres metoder for å oppnå god modellgyldighet.

Følsomhetsanalyse

I følge Mark mfl. (2014) er følsomhetsanalyse utført for å bestemme hvilke modellparametre som har størst innvirkning på modellens resultat. Følsomhetsanalyse involverer å kjøre simuleringer med systematisk justering av modellparametre. Til slutt sammenlignes de ulike resultatene for å observere effekten endringen har på modellresultatet. Følsomhetsanalyse bør gjennomføres i forkant av en kalibreringsprosess. Analysen kan identifisere aktuelle justeringsparametre, slik at kalibreringstiden kan kortes ned betraktelig (Mark mfl., 2014). I denne analysen deles følsomhetsanalysen i to deler. Den første delen utføres i forkant av kalibreringen av ledningsnettmodellen for å finne parametre med størst innvirkning. Den andre delen utføres ved å endre terrengmodellens romoppløsning. Ved hver enkelt utførelse vil de resterende komponentene i modellen

forbli konstante slik at eventuell endring i resultatet synliggjøres.

Kalibrering

Modellkalibrering går ut på å justere inngangsparametre slik at modellens resultater samsvarer med observerte målinger. Dette kan være målinger av volumstrøm og vann- dybde i rør eller nedbørsmengde. For å oppnå et samsvarende resultat er det vanlig å justere modellparametre som permeabilitet, konsentrasjonstid og infiltrasjonskapasitet (Mark mfl., 2014).

Ifølge Vidal mfl. (2005) er det to hovedmetoder for å kalibrere en 1D-modell. Den første metoden går ut på å justere parametrene manuelt for best mulig overensstemmelse mellom simulert og målt resultat, også kalt ”prøve- og feilemetoden”. Fordelen ved denne metoden er at den er troverdig, men avhenger av brukerens programferdigheter. Den andre metoden kalles automatisk optimalisering. Ved denne metoden benyttes en automatisert algoritme som justerer parametrene automatisk mot målte verdier. Den største ulempen med denne metoden er at samme resultat kan oppnås av ulike kombinasjoner av parametrene. I denne masteroppgaven kalibreres kun deler av modellen, her er ”prøve- og feilemetoden” benyttet. Resultatet av kalibreringen skal også kontrolleres ved å simulere en uavhengig nedbørshendelse mot tilhørende målt vannføring.

Validering

Validering av en modell utføres ved å kontrollere at den tiltenkte bruken av modellen samsvarer med anvendelsen. Ved dette blir det kontrollert om modellens resultatet gir en realistisk fremstilling (Sargent, 2013). I dette arbeidet valideres modellen ved å simulere en uavhengig regnhendelse, som ikke inngår i kalibreringen.

2.2.5 Modellusikkerhet

Terrengmodellens detaljeringsgrad

I en analyse utført av Vojinovic mfl. (2011) ble terrengmodellens detaljeringsgrad og romoppløsning presentert som avgjørende for modellens stabilitet og nøyaktighet. Ved grovere romoppløsning forekommer også større usikkerhet i modellens resultat, forårsaket av gjennomsnittlig terrenghøyde i hver rute. Av dette kan modellen fremstille en feilaktig flomutbredelse som samsvarer dårlig med realiteten. Implementering av bygg i modellen er også avgjørende for detaljeringsgraden. Ved å heve alle bygg i modellen sikres det at flomveiene føres på terrenget og tilhørende usikkerhet minimeres.

Ledningsnettmodellens oppbygging

Mark mfl. (2004) undersøkte potensialet og utfordringene ved 1D-modellering av flomhendelser i urbane områder. Analysen fremstilte flombelagte rør som den største usikkerheten ved bruk av 1D-modellering. Ved flombelagte rør vil høy vannføring kunne flomme ut av kummen, vist i figur 2.6. Ved slike tilfeller vil endimensjonale likninger ikke være tilstrekkelig, da vannet i virkeligheten kan strekke seg til delfelt med annen permeabilitet, ruhet og infiltrasjonsevne. Ledningsnettmodellen har med andre ord utilstrekkelig beregningsgrunnlag for slike flomhendelser og medfører usikkerhet i modellens resultat.

Usikkerhet ved sammenkobling

I virkeligheten er det vanligvis sandfang og gatesluk som fører overvannet inn i ledningsnett. Det er ofte mangelfull geografisk data av sluk og sandfang som medfører usikkerheter i en sammenkoblet modell. Som forklart i kapittel 2.2.3 er kummene vanligvis koblingspunktene mellom overflatemodellen og ledningsnettmodellen. Sluk og sandfang er normalt plassert i lokale fordypninger der overvannet naturlig strømmer til. Ved utelukking av sluk i en sammenkoblet modell kan vannoppsamling oppstå feilaktig i terrenget ved at slukets funksjon neglisjeres (Chen mfl., 2007).

Drenering og taknedløp tilknyttet boliger kan ha innvirkning på total avrenning i ledningsnett. Dataen tilknyttet påkoblingen til ledningsnett er ofte mangelfull og medfører at drenering og taknedløp vanligvis ekskluderes fra en ledningsnettmodell. Ekskluderingen kan bidra til feilaktig estimering av flomtopp og ledningsnettets kapasitet. Inkludering av taknedløp og drenering i en modell vil gi mer realistiske resultater og årsaker til flomproblematikk kan tydeliggjøres. Årsak til kjelleroversvømmelse type 1 og 2, forklart i kapittel 2.1.1, kan være enklere å detektere i en modell som inkluderer tilkobling av boliger til ledningsnett (Chen mfl., 2007).

2.2.6 Tidligere studier

MIKE FLOOD er benyttet til å simulere oversvømmelse i flere studier. I 2008 ble det utført en studie av Mahandi-elven i India ved bruk av MIKE FLOOD. Resultatet fra studien viste at MIKE FLOOD gav tilfredsstillende resultater sammenlignet med observert hendelse. Den simulerte hendelsen viste mindre flomutbredelse enn den observerte hendelsen. I studien forklares dette ved at flere detaljer som veg, jernbane, kanaler og avløpsnett er utelatt fra terrengmodellen (Patro mfl., 2009).

Valg av modelleringsprogram kan ha innvirkning på flomanalysens resultat. Kourtis. I. M. mfl., 2017 har gjort en sammenligning av 1D-1D-modeller (1D ledningsnett og 1D overflate) og 1D-2D-modeller (1D ledningsnett og 2D overflate). I analysen ble SWMM benyttet som 1D-1D-modell og MIKE FLOOD benyttet som 1D-2D-modell. Analyseområdet var et lite og urbant nedbørsfelt i Athen sentrum, Hellas. I sammenligningen fremkommer det at 1D-2D-modellen gir en mer nøyaktig fremstilling av flommens omfang og utstrekning enn 1D-1D-modellen. 1D-1D-modellen resulterte med kortest kjøretid. En hendelse med 1 times varighet ble simulert i sammenligningen. Resultatet viste at 1D-1D-simuleringen benyttet 10 sekunder mens 1D-2D-simuleringen benyttet omtrent 4 timer på samme hendelse (Kourtis. I. M. mfl., 2017).

I en studie gjort av Chen mfl., 2007 ble det analysert en pluvial flomhendelse i et tettbebyggt område (Keighley) i England. Studien ble utført i etterkant av et intenst regnskyll, som førte til kapasitetsoverskridelse i byens ledningsnett. Analysen ble utført i en 1D-2D-modell med romopløsning på 2x2 m. Koblingspunktene mellom de to modellene hadde uoverensstemmelse mellom den gjennomsnittlig terrenghøyden i rutenettet (terrengmodell) og overflatehøydene i nodene (ledningsnettmodell). Ved slik unøyaktighet kunne terrenget uttrykkes feil (for høyt eller lavt) i modellen og medføre usikkerhet i resultatet av flomutbredelsen til den koblede modellen.

Valg av romopløsning, inkludering av elementer, samt valg av friksjonskoeffisienter påvirker en 1D-2D-modell. En studie gjennomført av Vojinovic mfl., 2011 viser at ulik romopløsning kan resultere med 30 % forskjell i simulert vanddybde og hastighet ved ekskludering av bygninger og veger. Studien konkluderer med at grovere romopløsning gir større spredning av vannet og lavere dybder. Finere romopløsning gir det motsatte, da flere lokale nedsenkninger inkluderes i terrengmodellen. Ved å heve bygg og senke veger i terrengmodellen, ble forskjellen i flomomfang nærmere 50 % ved ulik romopløsning. I analysen ble også friksjonstallet undersøkt. Dette ved å analysere endring i flomomfang ved bruk av 20 eller 30 i manningstall. Manningstallet påvirket resultatet i mindre grad enn romopløsningen. På det meste viste resultatet 5 % forskjell i flomomfang. Studien konkluderer med at nøyaktigheten til modellen påvirkes mest av romopløsningen, deretter av geometriske detaljer og til slutt friksjonstall.

2.3 MIKE FLOOD 1D-2D-modell

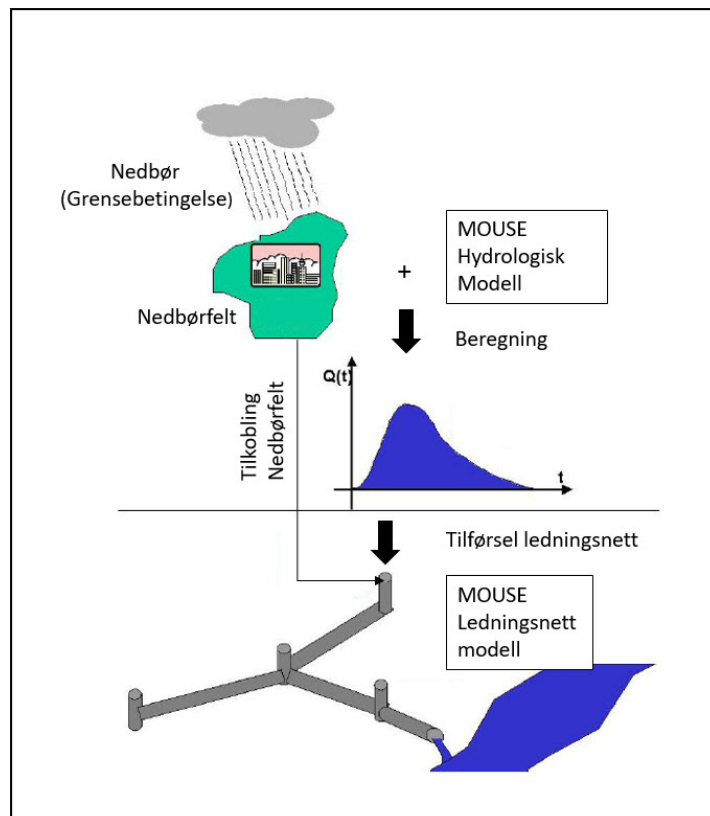
MIKE FLOOD er et simuleringsprogram for flom som kobler 1D-modeller med 2D-modeller. En MIKE FLOOD-modell kan simulere og beregne flomforløpet på overflaten og i rør. Ved å koble de to modellene sammen kan vann overføres mellom modellene og fremstille et realistisk flomscenario i urbane områder (DHI, 2017a). I dette arbeidet er MIKE URBAN benyttet som ledningsnett- og 1D-modell, samt MIKE 21 benyttet som

terreng- og 2D-modell. Videre vil de to ulike modellene og sammenkoblingen av dem forklares.

2.3.1 MIKE URBAN 1D-modell

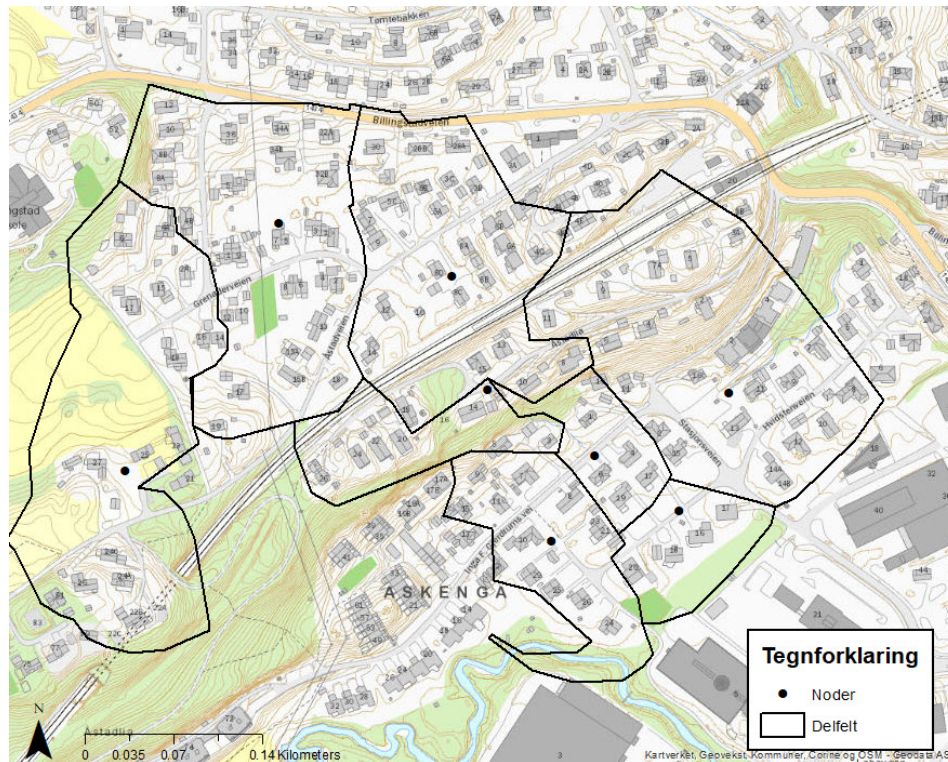
MIKE URBAN er et GIS-basert modelleringssystem som kan benyttes til å modellere og designe vanddistribusjonssystem, avløpssystem eller overvannsledninger. En MIKE URBAN-modell kan inneholde flere komponenter som for eksempel kummer, nedbørfelt og pumper slik at modellen kan fremstille realistiske rørsystem. For å modellere overvannssystem benytter MIKE URBAN en programpakke med navn ”Model for urban sewers”, forkortet til MOUSE. MOUSE består av to uavhengige verktøy, en hydrologisk modell og en rørmodell (DHI, 2014c).

For rørmodellen benytter MOUSE St. Ventants likninger for å beregne ikke-stasjonær strømning. Likningene bestemmer variasjon i vanddybde og strømningshastighet i rør eller kanaler utfra definerte start- og grensebetingelser (DHI, 2014c). I denne oppgaven er det ikke benyttet grensebetingelser for ledningsnett. Ved overvannssystem benyttes den hydrologiske modellen i MOUSE slik at vann tilføres ledningsnett. Figur 2.7 illustrerer koblingen av de to MOUSE-modellene. De neste avsnittene vil beskrive den hydrologiske modellen nærmere.



Figur 2.7: Sammenkobling av MOUSE-modellene i MIKE URBAN (DHI, 2014b)

I den hydrologiske modellen i MOUSE defineres modellområdet av delfelt, som totalt utgjør et nedbørsfelt. Delfeltene benyttes til å fordele overvann til ledningsnett. I denne prosessen blir det generert et delfelt til hver enkelt node. Denne oppdelingen muliggjør ulik grad av bidragende areal for hvert delfelt, altså vil mengde avrenning variere fra delfelt til delfelt. Dette er gjeldene ettersom implementert nedbør fordeles likt over hele modellområdet. Det er derfor ingen geografisk forskjell i nedbørsforløpet for en gitt regnhendelse (DHI, 2017b). Delfeltene illustreres i figur 2.8.

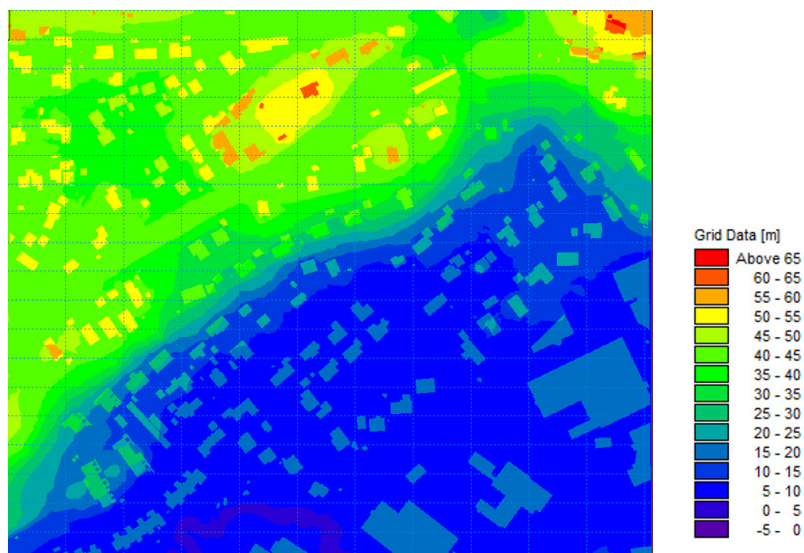


Figur 2.8: Delfelt med tilknyttede noder

2.3.2 MIKE 21 - 2D-modell

MIKE 21 Flow Model, også kalt MIKE 21, er en dynamisk overflatemodell som beregner todimensjonale likninger for frispeilstrømning. Programmet benyttes til å simulere hydrauliske og andre miljørelaterte fenomen i innsjøer, vassdrag, hav- og kystområder. Den dynamiske modellen kan simulere variasjoner i både vannivå og vannføring på terrengoverflaten. Resultatet kan i stor grad overstyres, dette ved at brukeren regulerer en rekke parametre med stor innvirkning på programmets beregninger (DHI, 2016).

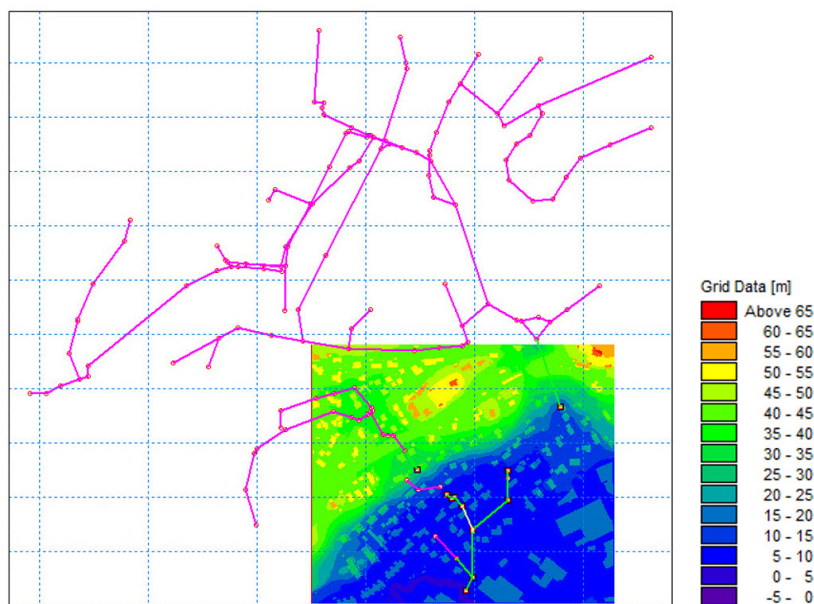
En realistisk MIKE 21-modell er utformet av en detaljert batymetri. Batymetri betegnes som topografisk data av terrenget i sjø- og havbunn (Ørstavik, 2015). Ifølge DHI (2003) er batymetrien den viktigste inngangsparameteren i modellen, dette etterfulgt av de overstyrende parametrene og til slutt kalibreringsparametrene. Figur 2.9 viser batymetri fra en MIKE 21-modell.



Figur 2.9: Batymetri fra en MIKE 21-modell

2.3.3 Sammenkobling av modellene

Ved å bygge en MIKE FLOOD-modell kobles MIKE URBAN og MIKE 21-modellene sammen, vist i figur 2.10. Dette gjøres ved å implementere modellene, samt justere på enkelte funksjoner og parametre i programoppsettet tilhørende MIKE FLOOD. I MIKE FLOOD presenteres flomutbredelsen på overflaten og flomforløp i ledningsnettet i to uavhengige resultatfremstillinger, tilhørende hver av modellene (DHI, 2017a).



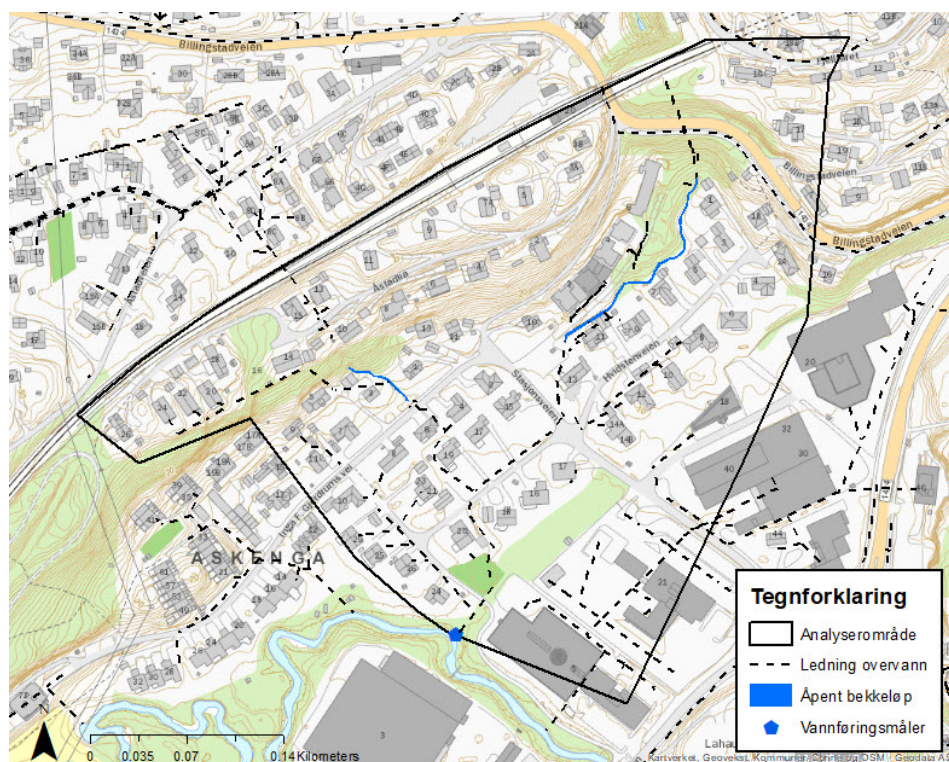
Figur 2.10: Sammenkobling av terreng- og ledningsnettmodell

3. Metode

I metodekapittelet presenteres analyseområdet, aktuelle data for modelleringen, samt oppbygningen av hver enkelt modell og tilhørende gyldighet. Avslutningsvis beskrives metodikken til de valgte flomforebyggende tiltakene for analyseområdet.

3.1 Analyseområdet

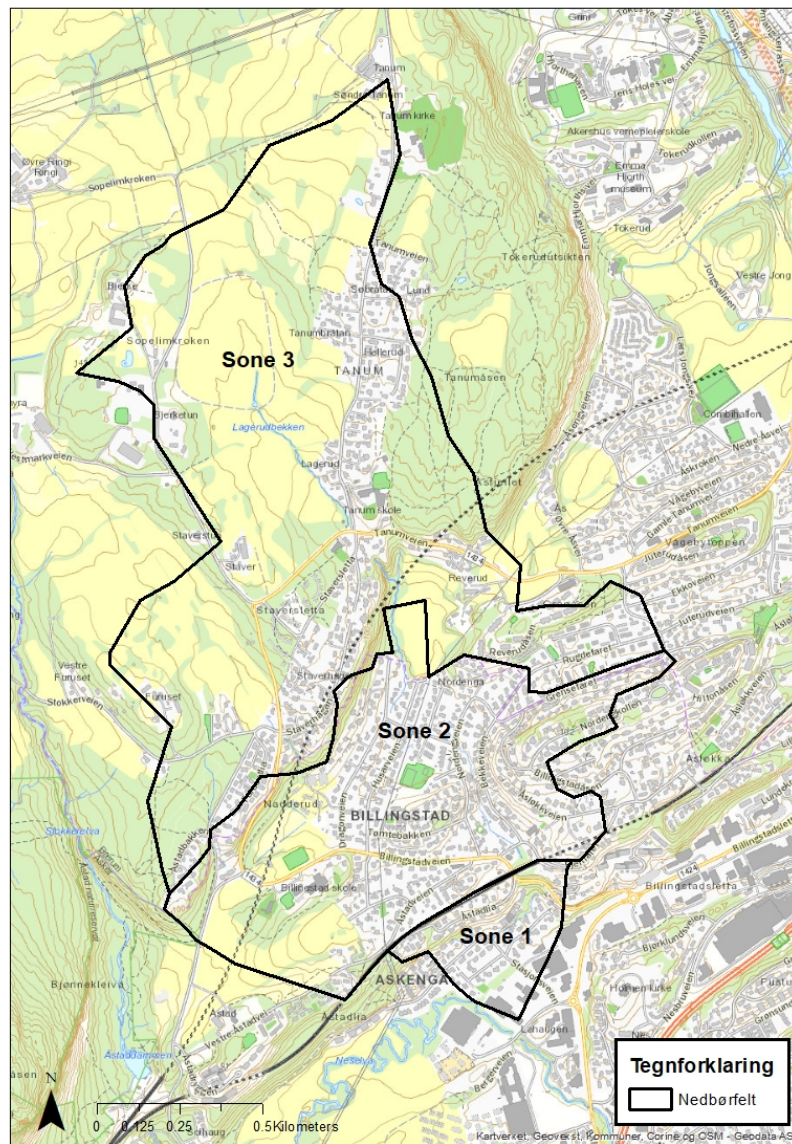
I samråd med Asker kommune er analyseområdet i denne oppgaven boligområdet Askenga, illustrert i figur 3.1. Analyseområdet er lokalisert øst for Asker sentrum, på grensen til Bærum kommune. Ved flomværsdagen 6. august 2016, hadde Askenga tilfeller av kjelleroversvømmelser med ukjent årsak (Paus, 2017).



Figur 3.1: Analyseområdet med overvannsnett og åpne bekkeløp

Nedbørfelt

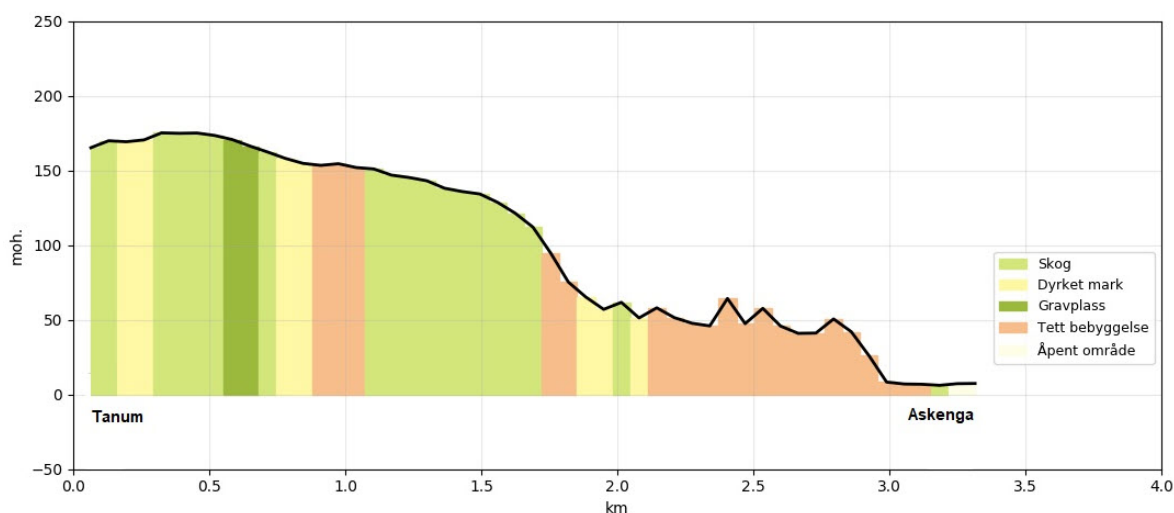
Nedbørfeltet tilhørende analyseområdet ligger både i Bærum og Asker kommune. Ved bruk av NEVINA og erfaringsbaserte korreksjoner av Marius Guldbrandsen, ansatt i Asker kommune, er nedbørfeltet fastsatt. Store deler av feltet består av naturlige overflater som skog og dyrket mark. Størrelsen på feltet er i underkant av 3 km², der området hovedsakelig drenerer til to åpne bekker som møtes og blir til et bekkeløp. Bekkeløpet er lagt i rør enkelte steder i boligfeltene. Nedbørfeltet er delt inn i tre soner for å presisere terrengkarakteristikk i modellen. Sone 1 presenterer analyseområdet, området med størst andel tette flater. Resterende nedbørfelt er delt inn i to soner. Sone 2 består av både naturlige og urbane felt, og sone 3 har overvekt av naturlig terrengkarakteristikk. De tre sonene illustreres i figur 3.2.



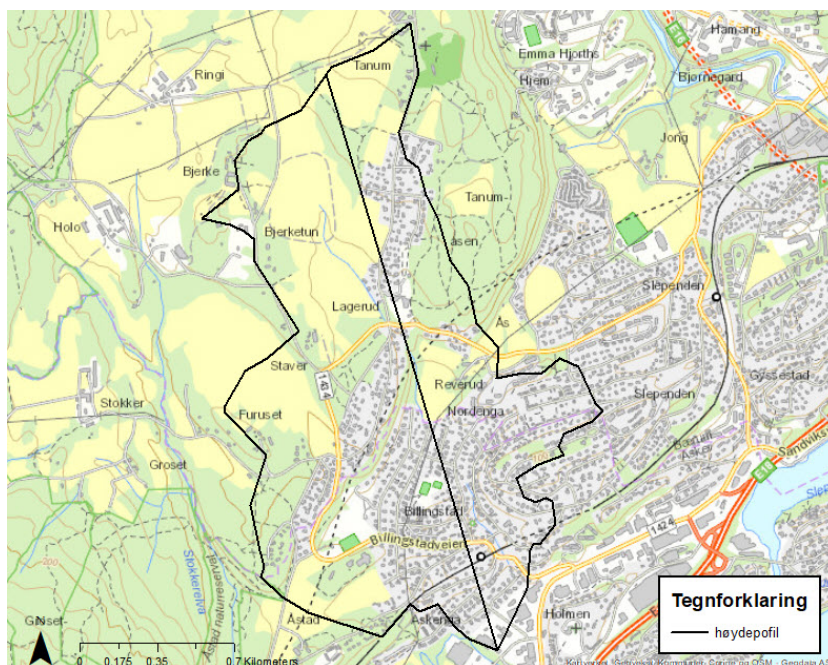
Figur 3.2: Soneinndeling i nedbørfeltet

Høydeprofil

Figur 3.3 illustrer høydeprofilen fra Tanum, øverst i nedbørfeltet, til Neselva ved Askenga der vannføringsmåleren er utplassert. Høydeforskjellen i nedbørfeltet er omtrent 170 meter. Figuren synliggjør at analyseområdet Askenga er flatt. I tillegg viser høydeprofilen bratte partier i nedbørfeltet, der jernbanen ligger på høyden i forkant av Askenga. I figur 3.4 illustreres høydeprofilen i plan.



Figur 3.3: Nedbørfeltets høydeprofil (NGU, 2020)

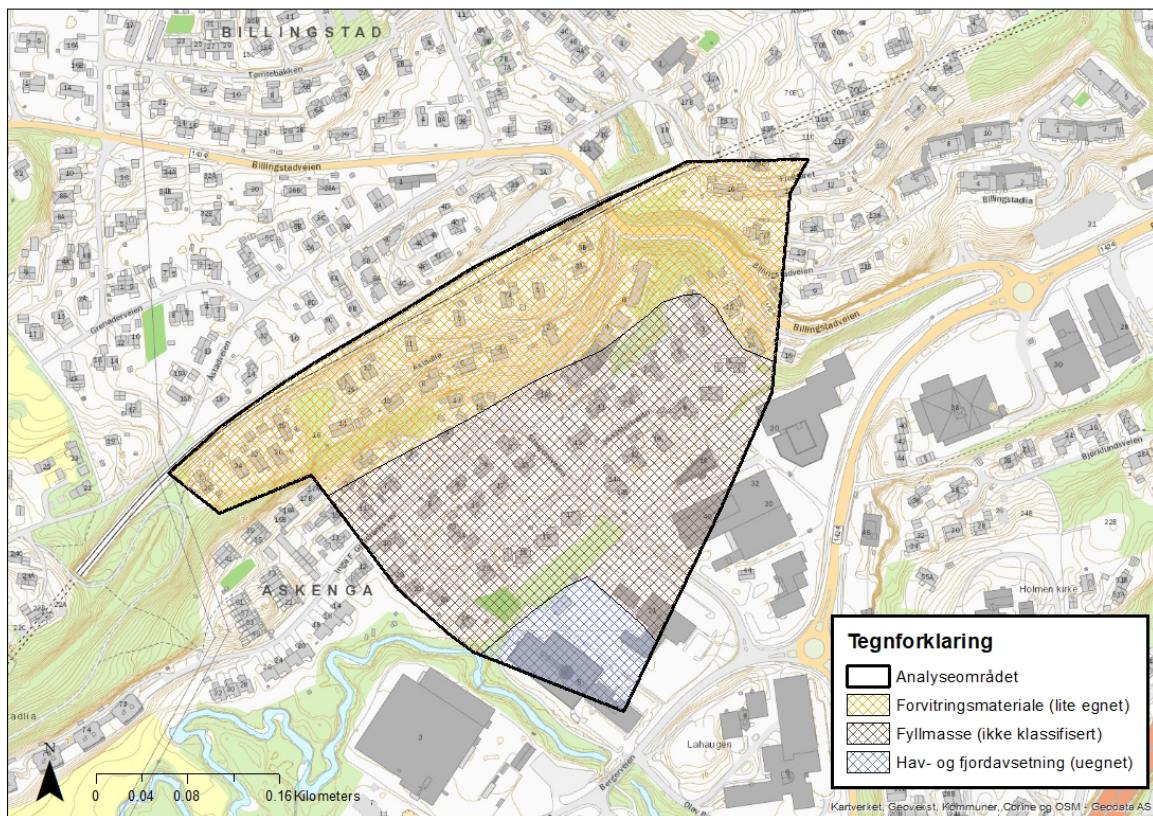


Figur 3.4: Plassering av nedbørfeltets høydeprofil

Geologisk bakgrunn

For å definere terrengkarakteristikken i nedbørfeltet benyttes løsmassekart utviklet av Norges geologiske undersøkelser (NGU). Figur 3.5 illustrerer at sone 1 hovedsakelig består av løsmassene fyllmasser og forvittringsmateriale. Fyllmasser benyttes i urbane områder og er et antropogent materiale. Infiltrasjonsevnen i sone 1 er klassifisert som ”uegnet” og ”lite egnet”. Fyllmasser uten klassifisering av infiltrasjon antas å være av liten betydning, da området består av stor andel tette flater (NGU, 2015).

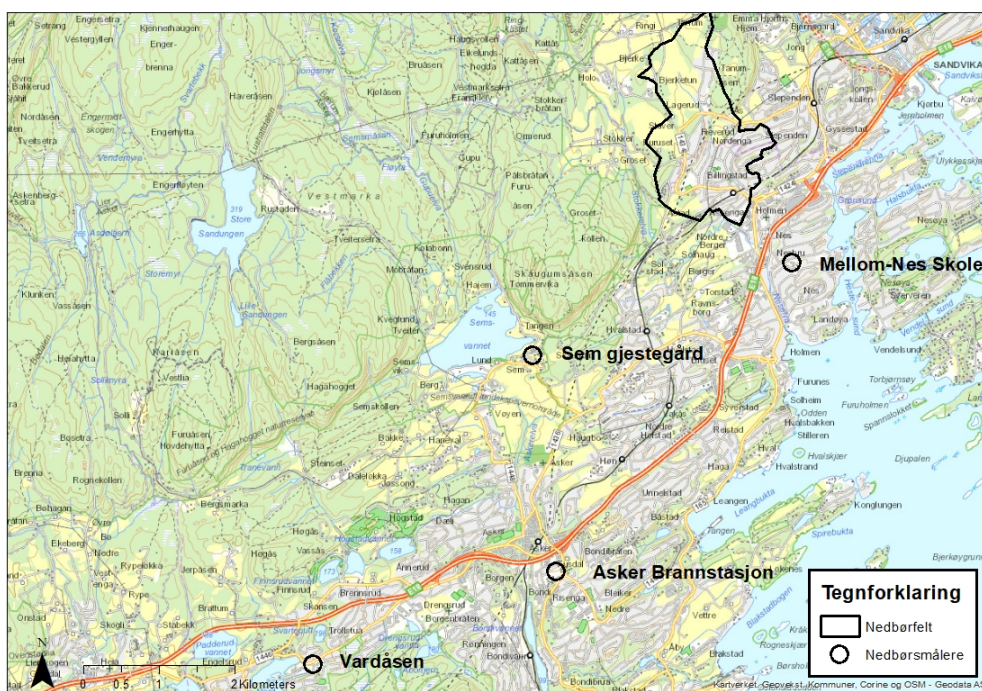
Asker kommune fremstilte i 2018 et aktsomhetskart for kvikkleire og ras i kommuneplanen 2018-2030 (Asker Kommune, 2018b). Fremstillingen er gjort ved løsmassekart produsert av NGU, samsvarende med figur 3.5. Løsmassekartet illustrerer at Askenga har en liten andel hav- og fjordavsetninger. Andelen består av finkornige løsmasser, marine avsetninger som silt og leire, inklusivt soner med kvikkleire. I de resterende sonene, sone 2 og 3, er det større variasjon av løsmasser. Her finnes forvittringsmateriale, tynt torvdekke, marin strandavsetning og hav- og fjordavsetning. Infiltrasjonsevnen i dette området er klassifisert som ”uegnet” og ”middels egnet”. (NGU, 2015)



Figur 3.5: Løsmassekart av analyseområdet (NGU, 2015)

Nedbørmålere

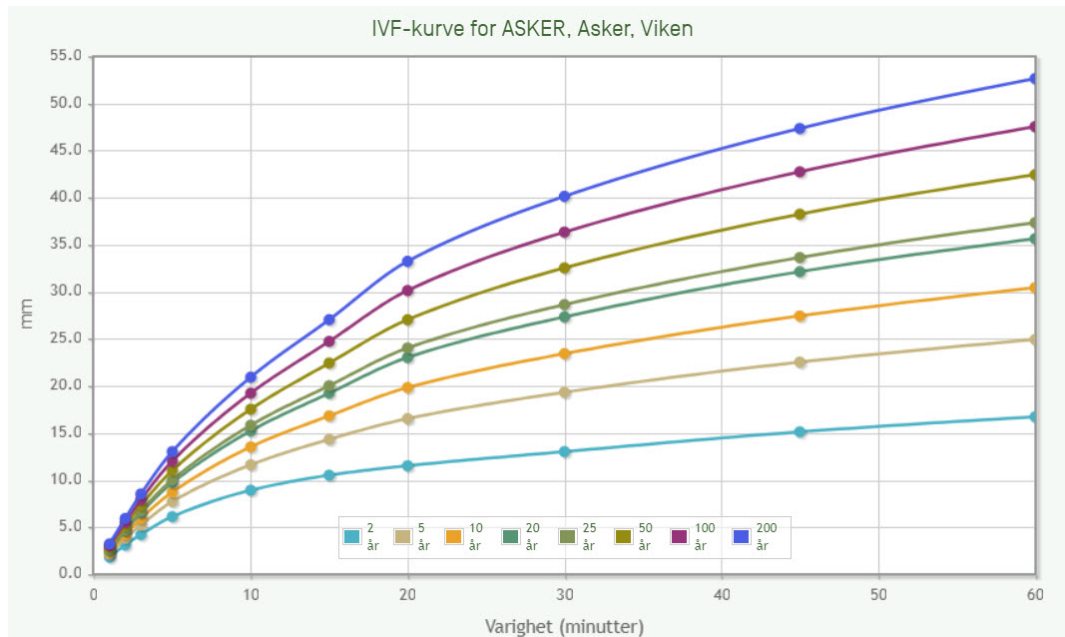
Asker kommune har fem ulike nedbørmålere, figur 3.6 viser plasseringen til fire av dem. Data fra nedbørmålerne kan lastes ned, for registrerte brukere, fra regnbygge.no. Dette er en portal for overvåkning og varsling av nedbør som er utviklet av Rosim AS (RO-SIM, 2020). Ledningsnettmodellen benyttet i denne masteroppgaven må kalibreres mot innmålte data. Det er valgt å benytte data fra ”Mellom-Nes skole”, nedbørstasjonen nærmest analyseområdet. For å bestemme gjentaksintervallet til kalibreringsdataen er IVF-kurven for Sem i Asker kommune benyttet, vist i figur 3.7.



Figur 3.6: Nedbørstasjoner i nærhet til analyseområdet

6. august 2016

Lørdag morgen 6. august 2016 ble Asker kommune utsatt for en kraftig regnhendelse. Regnet startet ca. klokken 04.00 og varte omtrent 6 timer. Regnhendelsen er karakterisert som kraftige byger, med kort varighet og høy intensitet. Hendelsen er registrert med 200 års returperiode på 4 av 5 av Asker kommunes nedbørstasjoner. 75 % av total nedbørsmengde inntraff i tidsrommet 06.00-10.00, av dette inntraff 28 % i tidsrommet 06.00-07.00. I hovedsak ble Asker kommune hardest rammet, samt enkelte områder langs kysten vest for Oslo. Det ble målt 101,9 millimeter nedbør iløpet av 6 timer ved målestasjonen Mellom-Nes skole, målestasjonen som målte størst nedbørsmengder denne dagen. Billingstad, som inkluderer Askenga, er ett av områdene som ble hardest rammet i følge Asker kommune (Paus, 2017).



Figur 3.7: IVF-kurve for Sem nedbørstasjon i Asker kommune (Norsk Klimaservicesenter, 2020)

Ledningsnett

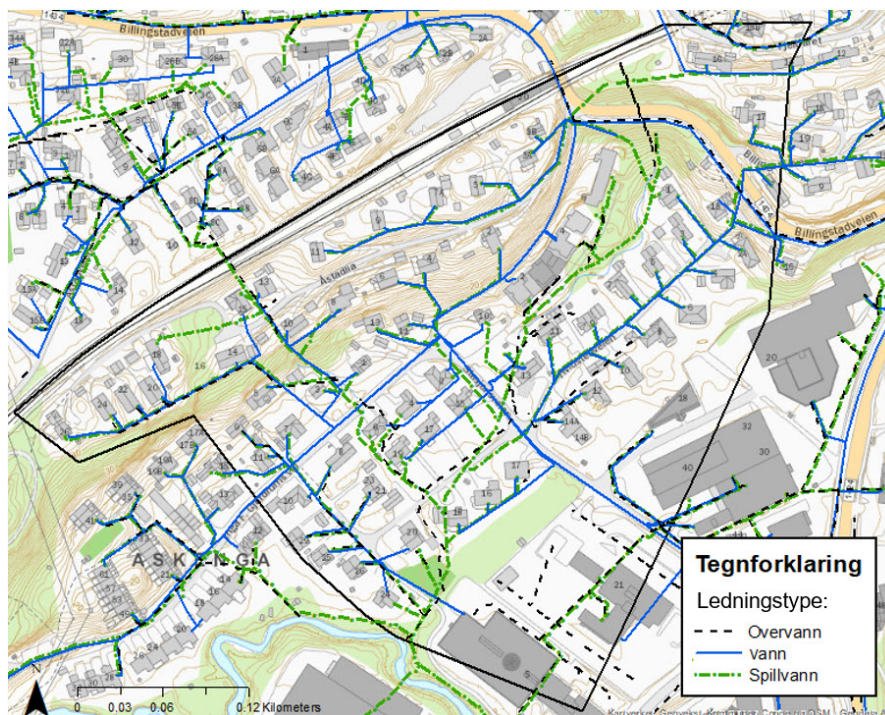
I analyseområdet er det to bekkeløp. Bekkene er hovedsakelig lukket i rør, men har to strekk med åpne traseer. De åpne bekkeløpene har bekkeinntak som er utformet med rist for å sperre for greiner og gjenstander, samt fungere som sikkerhetstiltak. Bekkeinntakene er illustrert i figurene 3.8 og 3.9. Rørene til bekkeløpene består av betong, der diameteren til hovedbekkeløpet er 1170 millimeter og sidebekkeløpet 600 millimeter. Hovedbekkeløpet og sidebekkeløpet er fra 1964 og 1975. Sidebekkeløpet møter hovedbekkeløpet ca. 170 meter fra bekkeløpets utløp til Neselva, der vannet fraktes videre til Oslofjorden. Figur 3.10 viser analyseområdets ledningsnett.



Figur 3.8: Bekkeinntak vest i analyseområdet



Figur 3.9: Bekkeinntak øst i analyseområdet



Figur 3.10: Øvrig ledningsnett i analyseområdet

Kommunedelplan Vann

Asker kommunes kommunedelplan vann 2018-2029 inneholder flere målsetninger. Kommunen har som mål å unngå kjelleroversvømmelser forårsaket av regnhendelser med returperiode mindre eller lik 50 år (Asker Kommune, 2018a). Kommunens VA-norm anbefaler å bruke minst 50 års returperiode ved dimensjonering av nye anlegg, og at bruk av mindre returperiode skal spesielt begrunnes. For å sikre nye anlegg mot fremtidens regnhendelser er det bestemt en klimafaktor på 1.2 for elvene i kommunen, samt 1.5 på overvannsystemer. Dette i henhold til NVE sine anbefalinger, samt rapporten "Klimaprofil i Oslo og Akershus" av Norsk Klimaservicesenter (Asker kommune, 2020). Kommunen har gjennomført en risiko- og sårbarhetsanalyse (ROS-analyse) der bekkeinntak og flomutsatte områder, tilknyttet ledningsnett med begrenset kapasitet, anses som spesielt kritiske. Bekkeinntakenes utforming kan skape uheldige flomsituasjoner, spesielt ved større regnhendelser (Asker Kommune, 2018a; Norsk Klimaservicesenter, 2017).

3.2 Innsamling av data

I denne oppgaven er en MIKE URBAN-modell kalibrert og en MIKE 21-modell utarbeidet for å totalt fremstille en MIKE FLOOD-modell. Til å fremstille modellene er det benyttet data fra en vannføringsmåler utplassert i felt, lokal nedbørdata, samt grunnlagsdata motatt fra Asker og Bærum kommune.

3.2.1 Nedbørmåler

Nedbørdataen tilhørende analyseområdet er hentet fra målestasjonen ”Mellom-Nes skole”, måleren med størst innmålte nedbørdata for 6. august-hendelsen. Nedbørmåleren som ble benyttet er en NIVUS RM202, og kan registrere høyde, mengde og nedbørintensitet. Vippekammer-metoden er måleprinsippet NIVUS RM2020 benytter. Nedbørmåleren har en oppsamlingsflate på 200 cm² og vippekammerets målevolum er på 2 cm³. Kammeret vippes når volumet er oppfylt, et vipp tilsvarende 0.1 mm nedbør. En sensor registrerer tiden mellom hver gang kammeret vippes, og nedbørintensiteten blir registrert (Thies, 2010).

3.2.2 Vannføringsmåler

Vannføringsmåleren ble utplassert i ledningsnettets utløp ved Neselva på Askenga 03.10.2019. Måleren er levert av ROSIM og kalles for PCM 4 som vanligvis benyttes ved høyere vannstand og større ledningsdimensjon. Ultrasonisk krysskorelasjon er måleprinsippet for vannføringsmåleren. Prinsippet baseres på å generere et ekkomønster i vannet. Ekkomønsteret dannes i flere lag, ved små tidsvariasjoner og ultrasonisk impuls skanning. Av dette skapes en reel hastighetsprofil, samt inkluderer vanndybde og vannføring (NIVUS, 2016).

3.2.3 Datagrunnlag

Grunnlagsdata (tabell 3.1) ble benyttet til å generere og kalibrere MIKE URBAN-, MIKE 21- og MIKE FLOOD-modellene.

Grunnlag	Leverandør	Dato
Ledningsnettmodell	Asker kommune	Oktober 2019
FKB	Asker kommune	Januar 2020
Nedbørdata	Asker kommune og regnbygge.no	Desember 2016 og januar 2020
Registrerte flomhendelser på Askenga 6. august 2016	Asker kommune	Mai 2017
Høydedata	Asker kommune	Laserdata fra 2010
Temperaturdata	Asker kommune	Desember 2015
Evapotranspirasjonsdata	Asker kommune	Desember 2015

Tabell 3.1: Beskrivelse av benyttet grunnlagsdata

3.3 MIKE URBAN 1D-modell

Fra tilsendt MIKE URBAN-modell fra Asker kommune ble det utarbeidet og kalibrert en gjeldende modell for analyseområdet Askenga. Den tilsendte modellen ble først utarbeidet i 2014, og var ikke kalibrert i analyseområdet. Ledningene i modellen var geografisk plassert ut fra data fra felles kartdatabase (FKB), tilsendt fra Asker kommune, og plassert to meter under terrengoverflaten. Åpne bekkeløp ble modellert som 1000 millimeter betongrør. Utarbeidelsen av den gjeldende modellen bestod av befaring, der enkelte nedmål av kummer ble utført, samt å oppdatere og korrigere modellen. Ledningsnettmodellen ble utarbeidet i samsvar med de eksisterende innmålingene hentet fra GEMINI-portal for Asker kommune. Den tilhørende hydrologiske modellen ble tilpasset grensebetingelser og korrigert ved kalibrering.

3.3.1 Hydrologisk oppsett

Det hydrologiske oppsettet er avgjørende for korrekt simulert volumstrøm ut av rørmodellen. Videre utdypes funksjonene til den hydrologiske modellen i MOUSE.

Tid-areal-metoden

I MOUSE må det velges en avrenningsmodell som bestemmer avrenningsmønsteret til nedbørfeltet. De tre ulike modellene baseres på tid-areal-metoden, Kinematisk-bølge-likning eller en lineær magasineringsmetode. I denne oppgaven er det valgt å benytte tid-areal-metoden, også kalt tid-areal-kurve, for å inkludere overflateavrenning. I metoden bestemmes delfeltets avrenningen av tre komponenter; størrelsen på det bidragende arealet, det konstante hydrologiske tapet og det innledende tapet ved en regnhendelse (DHI, 2017b). Aktuelle parametre for metoden utdypes i tabell 3.2.

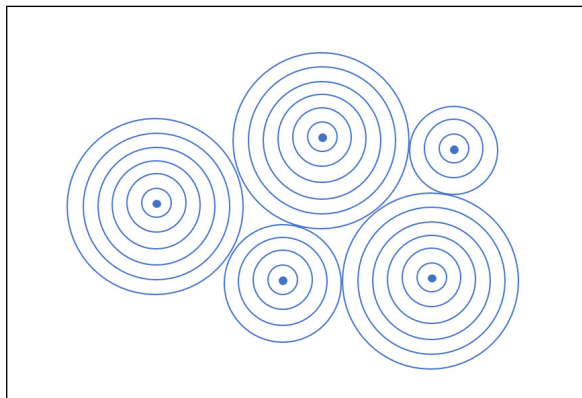
Metoden genererer hydrogram for hvert delfelt. Hydrogrammene bestemmer avrenningsforløpet til nodene. Formen på hydrogrammet blir bestemt av delfeltens konsentrasjonstid og tid-areal-kurven. Totalt vil nevnte parametre beskrive responstiden i ledningsnettet, samt nedbørfeltets form. Uavhengig av valgt avrenningsmodell må størrelsen og lokasjonen til nedbørfeltet defineres (DHI, 2017b).

MIKE URBAN beregner avrenningen til et nedbørfelt med antakelse om konstant avrenningshastighet. Hvert delfelt består av celler, i form av konsentriske sirkler, der vannet har utløp i midtpunktet av hver celle. Figur 3.11 viser oppsettet av cellestrukturen i MIKE URBAN med konsentriske sirkler. Antall celler avhenger av konsentrasjonstid og simuleringens tidssteg. Arealet til hver enkelt celle blir beregnet ut fra valgt tid-areal-kurve. Totalt impermeabelt areal, spesifisert for hvert delfelt, tilsvarer nodens tilknyttede totale celleareal. I tid-areal-metoden er det kun impermeabelt areal som benyttes til å

beregne avrenning, og metoden egnest best for urbane områder med tette flater og kort responstid (DHI, 2017b).

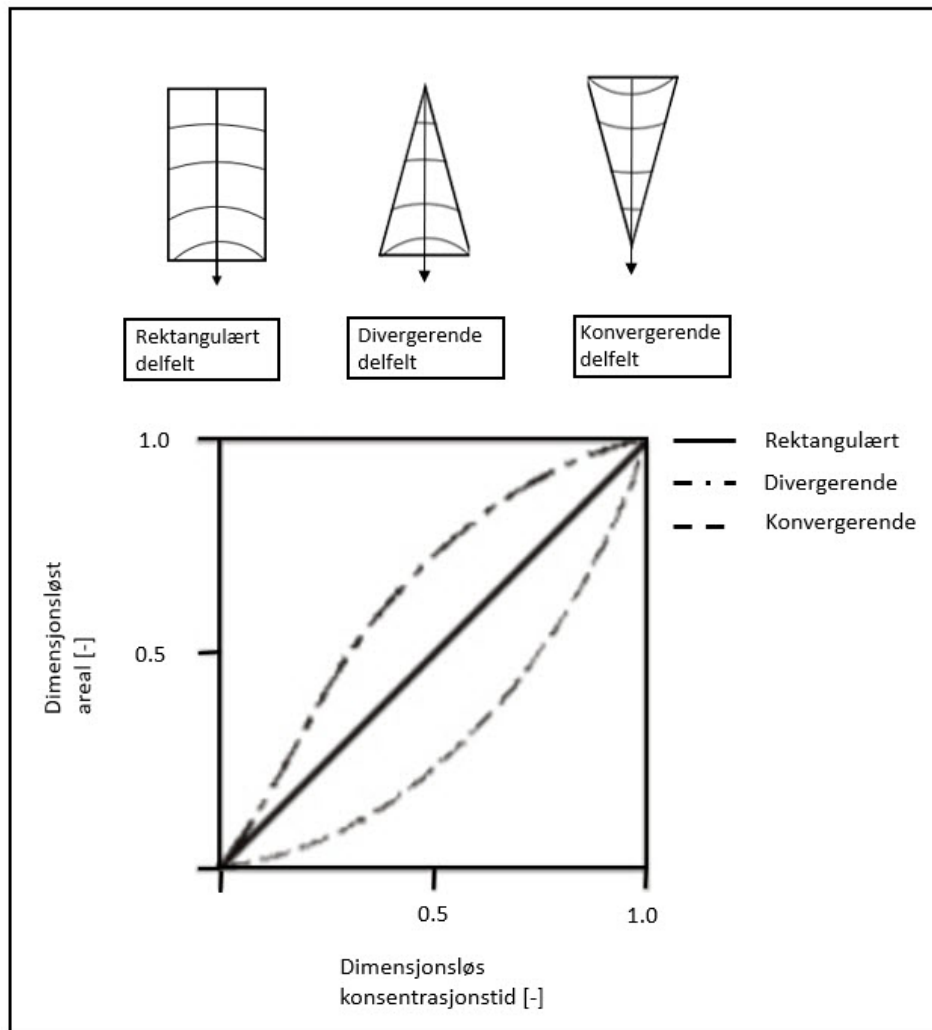
Parameter	Funksjon	Enhet	Anbefalt verdi
Innledende tap	Indikerer nedbørhøyde som kreves for å starte overflateavrenningen.	[m]	6×10^{-4}
Hydrologisk reduksjonsfaktor	Reduksjonsfaktor for avrenning. Redegjør for tap forårsaket av evapotranspirasjon og feilaktig impermeabilitet i bidragende areal.	[-]	0.9
Tid-areal-kurve	Redegjør for delfeltets form som bestemmes av valgt tid-areal-kurve. De tre mulige kurvene er: TACurve1 - rektangulært delfelt TACurve2 - divergent delfelt TACurve3 - konvergent delfelt	[-]	TACurve1
Konsentrasjonstid	Angir tiden overvannet bruker på å bevege seg fra det fjerneste punktet i delfeltet til utløpet.	[min]	7
Impermeable flater	Angir prosent tettet flater av delfeltets areal.	[%]	-

Tabell 3.2: Funksjonsbeskrivelse av ulike parametre som inngår i tid-areal-metoden (DHI, 2017b)



Figur 3.11: Cellestrukturen som benyttes i tid-areal-beregninger, der hvert midtpunkt symboliserer utløpet i hvert delfelt

Tid-areal-kurven spesifiserer formen på nedbørfeltet i modellen. Formen på hvert enkelt delfelt har innvirkning på avrenningsforløpet i modellområdet. I MOUSE er det gitt tre mulige former på delfelt tilhørende tid-areal-metoden. Delfeltene kan settes til rektangulærform, divergerende- eller konvergerende trekantform. De ulike kurvene illustreres i figur 3.12 og nevnes i tabell 3.2.



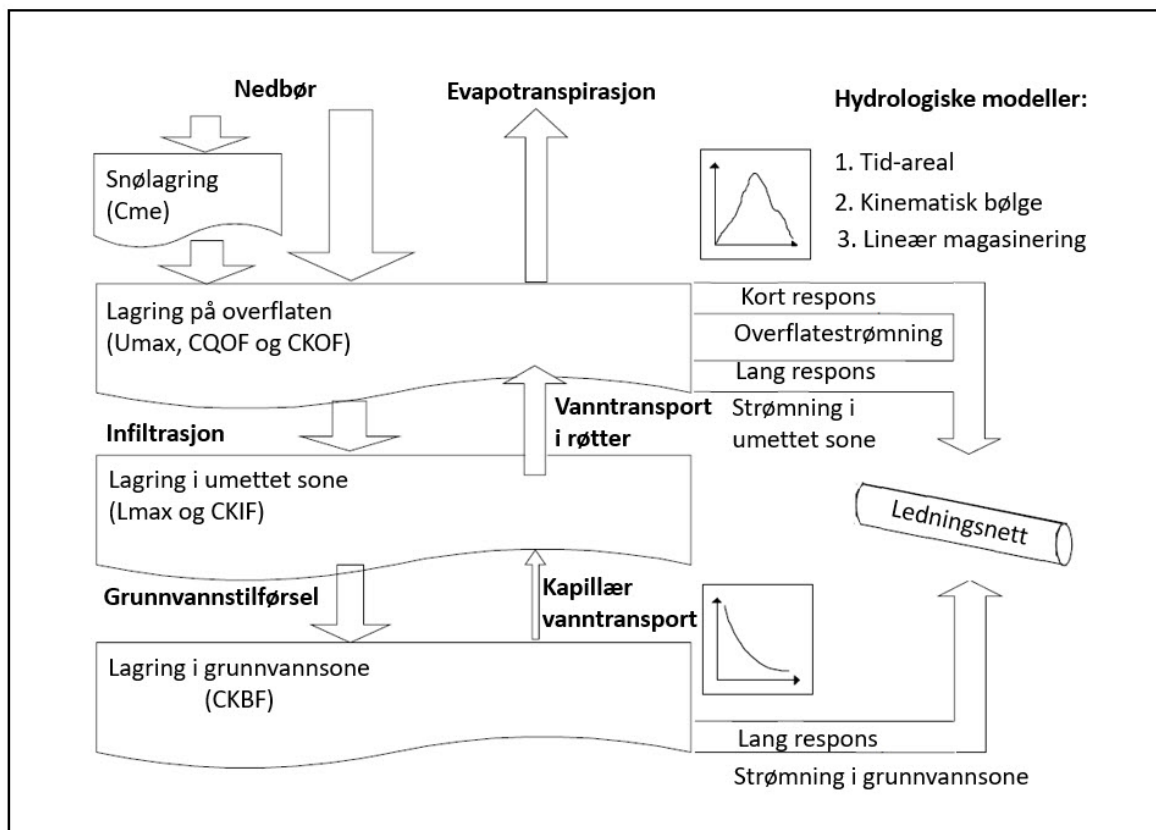
Figur 3.12: De tre ulike tid-areal-kurvene gitt i MOUSE, samt formen på tilhørende delfelt (DHI, 2017b)

RDI-modulen

Avrenningsmodellene tid-areal-kurve og kinematisk bølgelikning kan kombineres med en RDI-modul som øker avrenningsforløpets detaljeringsgrad. RDI står for "Rainfall dependent inflow and infiltration", og modellen bruker forenklede matematiske uttrykk til å beskrive det hydrologiske kretsløpet på jordoverflaten. I virkeligheten lagres nedbør i snø, overflate, umettet sone og grunnvannssone. I RDI-modulen angis ulike parametre relatert til lagringssone, og simuleringen kan beregne tilstrømning og infiltrasjon til ledningsnett. En avrenningsmodell kombinert med RDI-modulen kan beregne snøsmelting og evapotranspirasjon, altså andel avrenning i vannets kretsløp med lang responstid (DHI, 2014d). I denne oppgaven består modellområdet av stor andel naturlige felt, derfor er det valgt å kombinere RDI-modulen med tid-areal-metoden.

I RDI-modulen kan historiske data for temperatur og evapotranspirasjon, vist i tabell 3.1, bli implementert i beregningene. Data benyttet i denne modellen er beskrevet i tabell 3.1. Temperaturen regulerer formen på nedbørhendelsen og avgjør når snøsmelting inntreffer. Evapotranspirasjon regulerer mengden vann på overflaten, samt fuktighet i umettet sone. Ved beregning av infiltrasjon benyttes parametre i RDI-modulen, samt andel permeable flater i hvert delfelt (DHI, 2014d).

RDI-modulen beregner total avrenning til et nedbørfelt som summen av overflateavrenning og infiltrasjon. Dette uttrykkes ved en rekke parametre, beskrevet i tabell 3.4. I tabellen illustreres anbefalte verdier gitt av Danish Hydraulic Institute, også kalt DHI. I RDI-modulen kan det opprettes parametersett for soner med ulike grunnforhold, som kan benyttes til kalibrering. (DHI, 2014d).



Figur 3.13: Den hydrologiske modellen kombinert med RDI-modulen (DHI, 2008)

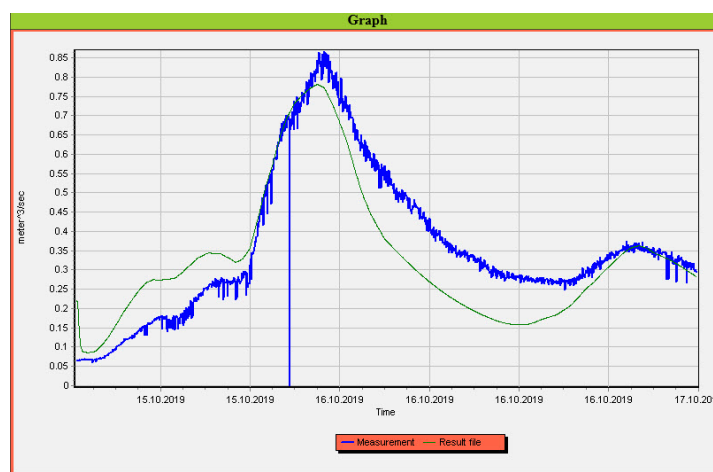
Avrenningen i nedbørfeltet avhenger av både RDI-modulen og valgt avrenningsmodell. For den hydrologiske modellen i MOUSE defineres grensebetingelser for temperatur, evapotranspirasjon og nedbør. Funksjonen til grensebetingelsene er definert i tabell 3.3. Totalt genereres et hydrogram for hvert delfelt der avrenningen tilføres tilhørende noder som videre leder vannet inn på ledningsnettet (DHI, 2014b). Avrenningsforløpet for MIKE URBAN illustreres i figur 3.13 (DHI, 2014b).

Grensebetingelse	Funksjon	Enhet
Evapotranspirasjon	Benyttes til å gjøre hydrologiske beregninger i RDI-modulen.	mm
Temperatur	Benyttes til å beregne snøsmelting.	°C
Nedbør	Benyttes til å beregne avrenningsforløpet i modellen.	mm

Tabell 3.3: Funksjonsbeskrivelse av grensebetingelsene (DHI, 2014d,c)

3.3.2 Kalibrering av MIKE URBAN 1D-modell

Kalibreringen av MIKE URBAN-modellen ble utført ved bruk av ”prøve- og feilemetoden”. I forkant av kalibreringen ble det gjennomført en følsomhetsanalyse, forklart i 3.5.2, for å finne de aktuelle parametrene med innvirkning på kalibreringens resultat. Metoden går ut på å justere enkelte parametre til simulert resultat samsvarer med målte verdier, vist i figur 3.14 Dette ble utført sekvensielt for hver sone ved at kun en parameter ble justert av gangen, og at resterende parametre forble uendret. I dette tilfellet ble det simulert mot målt vanndybde, volumstrøm og hastighet i ledningsnett.



Figur 3.14: Kalibreringsmetode; Grønn graf indikerer den simulerte vannføringen i utløpet, og den blå indikerer målt vannføring i utløpet

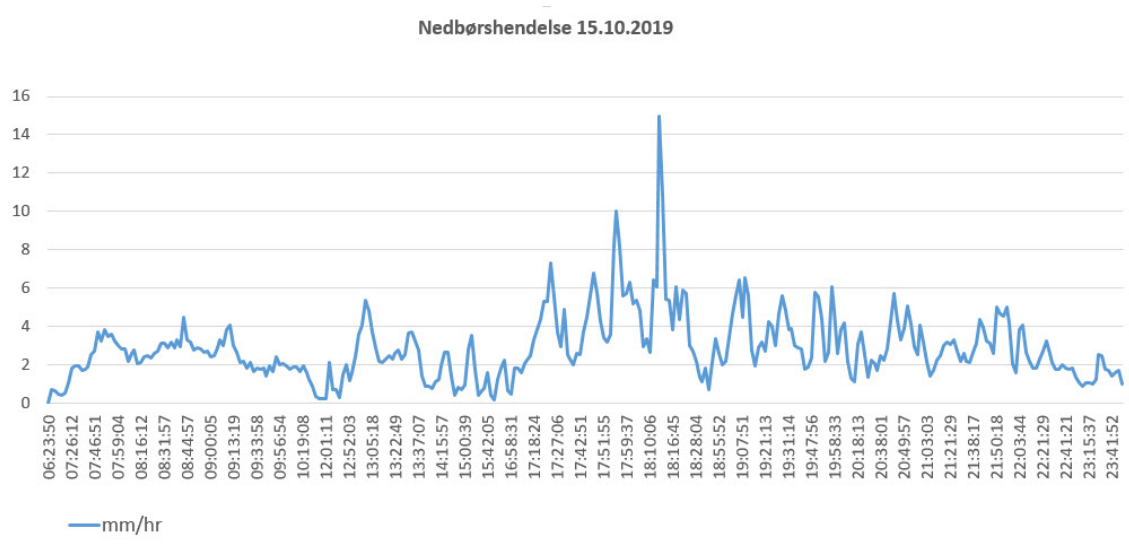
I denne masteroppgaven er det valgt å kalibrere MIKE URBAN med hydrologiske parametre tilhørende programpakken MOUSE. Av de hydrologiske parametrene har permeable- og impermeable flater, konsentrasjonstid og RDI-parametrene hatt størst innvirkning på kalibreringen. Enkelte av de hydrologiske parametrene har ikke gjort utslag under kalibreringen og presenteres i vedlegg A. Tabell 3.4 viser de mest benyttede parametrene ved kalibrering av 1D-modellen. I figur 3.13 illustreres kombinasjonen av RDI-modulen og de hydrologiske modellene, samt de nevnte parametrenes plassering i modulen.

Parametre	Funksjon	Enhet	Anbefalt verdi
RDI-areal (permeable flater)	Angir prosent permeable flater av delfeltets areal.	[%]	-
Lagring på overflate (U _{max})	Definerer maksimalt vanninnhold i overflaten.	[mm]	10
Lagring i rotsone (L _{max})	Definerer maksimalt vanninnhold i rotsonen.	[mm]	100
Koeffisient for volumstrøm på overflate (CQOF)	Definerer forholdet mellom overflatevann og infiltrert vann.	[-]	0.3
Tidskonstant for volumstrøm på overflate (CKOF)	Definerer overvannets responstid på regnet.	[time]	20
Tidskonstant for volumstrøm i umettet sone (CKIF)	Bestemmer andel strømming i umettet sone, varierer med U _{max} .	[time]	500
Tidskonstant for volumstrøm i grunnvannssone (CKBF)	Bestemmer andel tørrværsavrenning.	[time]	2000
Konstant for snøsmelting (C _{me})	Bestemmer smelteraten til snø og is. Snøsmelting oppstår når temperaturer stiger over 0 °C.	[mm/°C/dag]	3

Tabell 3.4: Funksjonsbeskrivelse av benyttede kalibreringsparametre (DHI, 2014d)

Før kalibreringsprosessen startet ble grensebetingelsene for modellen satt. Tabell 3.3 viser de benyttede grensebetingelsene. Historisk data ble benyttet for temperatur og evapotranspirasjon. For måleperioden ble regndata hentet fra målestasjonen ”Mellom-Nes skole”. Det ble plukket ut tre nedbørhendelser med ulike intensiteter og varigheter fra måleperioden 03.10.2019 til 15.01.2020. I denne måleperioden var det lite variasjon i nedbørhendelsene. Blant annet er det ikke blitt kalibrert mot en kort intens nedbørhendelse. Den korteste hendelsen modellen ble kalibrert mot var på omtrent 7 timer og forekom 14. oktober 2019. Varigheten til det lengste regnskyellet var 17.5 timer og forekom 15.-16. oktober 2019. Den siste hendelsen modellen er kalibrert mot var på 8.5 timer, denne hendelsen hadde større intensitet enn 14. oktober hendelsen og inntraff 20. oktober 2019.

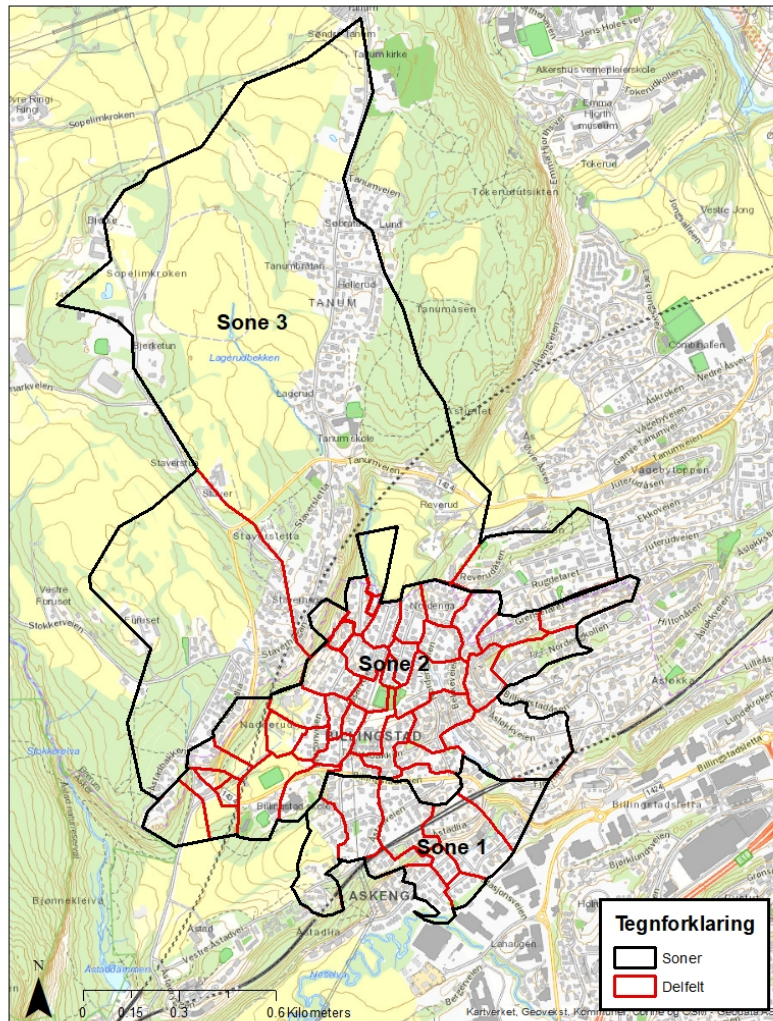
Modellen er kalibrert mot alle de tre regnhendelsene. Intensiteten og varigheten på regnskyllene var avgjørende for å bestemme den viktigste hendelsen og kalibrere modellen mot. Første prioriterte regnhendelse ble regnskylllet med størst likhet til 6.augusthendelsen, hendelsen 15.-16. oktober, som vises i figur 3.15. Videre ble regnhendelsen som inntraff 20. oktober prioritert, etterfulgt av det minste regnskylllet som forekom 14. oktober.



Figur 3.15: Nedbørhendelsen 15.10.2019 benyttet til kalibrering

Nedbørfeltet er delt inn i tre soner, nevnt i kapittel 3.1, slik at hver sone har et sett med kalibreringsparametre. Sonene er videre delt inn i underliggende delfelt vist i figur 3.16. Delfeltene er benyttet til å skille mellom naturlige og urbane felt i hver enkelt sone. I kalibreringsprosessen har hovedfokus vært å kalibrere parametrene for det store naturlige feltet, betegnet som sone 3. For denne sonen var ”prøve- og feilemetoden” aktuell, da det ikke er funnet anbefalte parameterverdier for naturlige felt i MIKE URBAN. I den minste urbane sonen nærmest vannføringsmåleren, sone 1, er det benyttet anbefalte verdier vist i tabell 3.4. I sone 2 er det benyttet en kombinasjon av anbefalte verdier og kalibrerte verdier ved ”prøve- og feilemetoden”.

Konsentrasjonstid for naturlige og urbane felt er funnet ved bruk av likninger beskrevet i kapittel 2.1.3. I sone 1 og 2 er likning (2.3) benyttet, da sonene har høy andel tette flater. I sone 3 er det stor andel naturlige felt og likning (2.2) ble benyttet. I kalibreringsprosessen fremkom det at simulert responstid i utløpet var for kort. Konsentrasjonstiden ble dermed forlenget i de tre sonene for å forsinke responstiden i utløpet. Endelige valgte verdier presenteres i resultatkapittelet. Verdier for permeabilitet ble regulert etter grunnkartet illustrert i figur 3.5, samt av befaringer gjort i analyseområdet. I tillegg er ”prøve- og feilemetoden” benyttet i tilfeller der verdiene ikke gav tilfredsstillende resultat.



Figur 3.16: Soneinndelingen ved kalibrering

Antakelser ved kalibrering

For å få modellens simuleringer til å overensstemme med vannføringsmålingene ble det gjort en rekke antakelser.

- Kalibreringens soneinndeling gir gyldig kalibreringsresultat
- Regnskylllet 15. oktober er den viktigste kalibreringshendelsen
- ”Prøve- og feilemetoden” gir gyldig resultat
- Regndata fra Mellom-Nes skole nedbørsstasjon er representativ for analyseområdet
- Korrekt fremstilling av ledningsnettets romlige plassering
- 1000 millimeter betongrør er representativ for et åpent bekkeløp
- Historiske meteorologiske data er gyldige for simuleringstiden

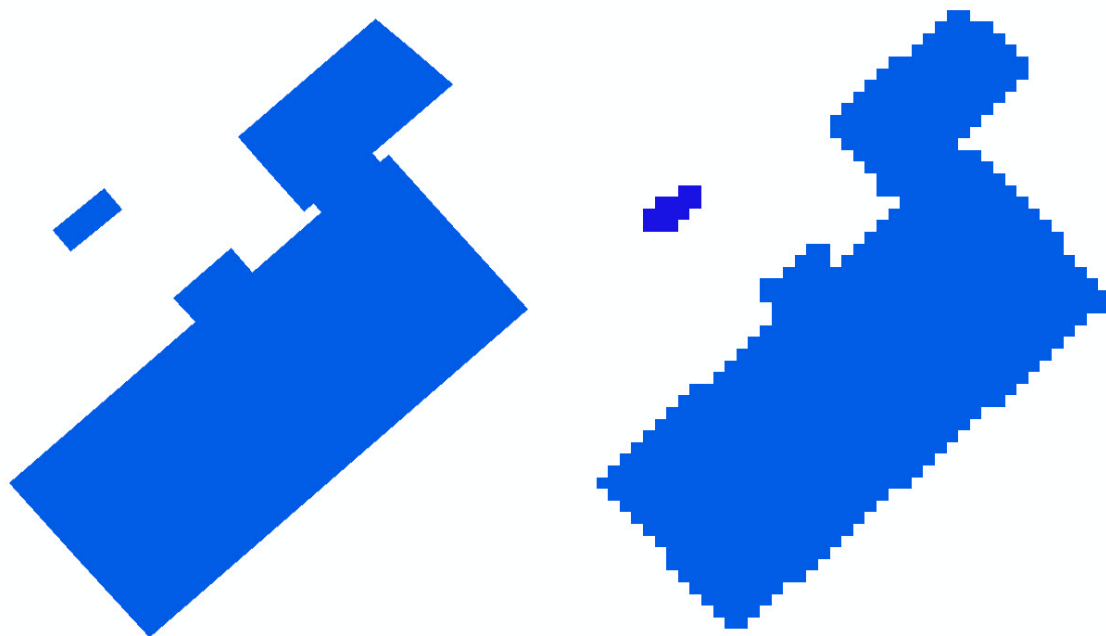
3.4 MIKE 21 2D-modell

MIKE 21 2D-modellen ble utarbeidet av laserdata lastet ned fra nettsiden høydedata.no. På nettsiden ble modellområdet definert og avgrenset. Figur 3.1 illustrer valgt modellområde. Nedlastingen ble hentet inn i ArcMap for videre bearbeiding og utforming.

3.4.1 Utforme terrengmodell i ArcMap

For å generere en terrengmodell i MIKE 21, ble det først opprettet en terrengmodell i ArcGIS. Dette ved bruk av laserdata med punkttetthet på 2 punkt pr m² og romoppløsning 0.5 meter. Terrengmodellen ble fremstilt i koordinatsystem EUREF 89, sone 32 og med høydesystem NN2000. Data benyttet er levert av Rambøll Mapping og produsert i 2010.

I ArcMap ble terrengmodellen tilpasset analyseområdet. Shapefiler (filformat i ArcMap) av bygg og veger, levert av Asker og Bærum kommune, ble også begrenset og tilpasset det aktuelle analyseområdet. For å kunne modellere en terrengmodell i MIKE 21 er det viktig med riktig filformat. Derfor ble shapefilene først konvertert til raster-filer (vist i figur 3.17) og deretter til et gridet tekstformat, også kalt ascii-fil som leses av MIKE 21.

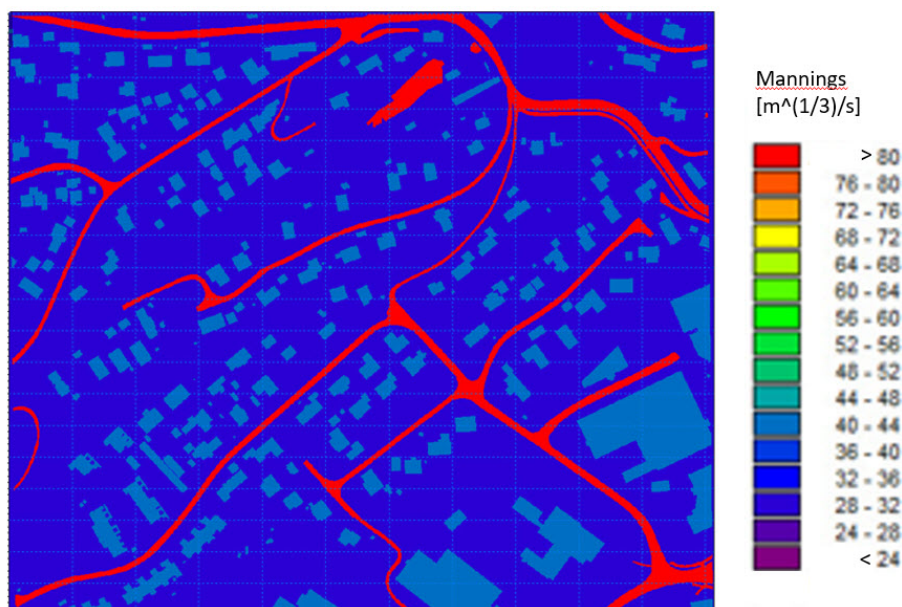


Figur 3.17: Konvertering av shapefil til rasterfil

3.4.2 Opprette MIKE 21-modell

Fra terrenngmodellen opprettet i ArcMap genereres det en batymetri i MIKE ZERO, program for analyse og bearbeidelse av data, ved at ascii-filen ble konvertert til en dfs2-fil (tekstfil med todimensjonal rutenett). Terrenghøydene i batymetrien ble deretter vurdert og modifisert. Bygninger ble lagt inn i batymetrien ved å heve terrenghøyden med 10 meter i celler, ved plassering av eksisterende bygg. For å fremstille ruhet i modellen ble det generert en dfs2-fil med manningstall, vist i figur 3.18. Veg, hustak og terreng fikk spesifiserte verdier, hentet fra Chin mfl. (2013) og vist i tabell 3.6.

For å tilpasse modellen til nedbørfeltet ble modellområdet avgrenset. Avgrensingen ble utført ved å lage en ramme rundt batymetrien, der cellene i rammen ble satt til største terrenngverdi (70 moh). Dette for å hindre vannet å renne ut av modellen under simulering. For å sikre den naturlige vannføringen i Neselva ble det satt en åpning i rammen. Åpningen er lokalisert helt nedstrøms i Neselva.



Figur 3.18: Dfs2-fil med manningstall for ruhet

Da batymetrien var ferdigstilt i MIKE ZERO ble en MIKE 21-modell opprettet og batymetrien implementert. Ved opprettelsen av MIKE 21-modellen måtte flere parameterverdier settes. Verdiene har overstyrende effekt på simuleringen. I denne prosessen ble det valgt å ekskludere regntilførsel, da sammenkoblingen av modellene i MIKE FLOOD vil koble regnhendelsen fra MIKE URBAN til MIKE 21-modellen.

I tabell 3.5 presenteres en kort funksjonsbeskrivelse av utvalgte parametre med betydelig innvirkning på modellens resultat, samt anbefalt eller nødvendig data.

Parameter	Verdi/funksjon	Anbefalte verdi/funksjon
Valg av modul	Aktiverer ønskede funksjoner i modellen.	For urbane områder aktiveres ”urban oversvømmelse”
Batymetri	Betegnes i sammenheng med MIKE 21 som terrengmodell av overflaten.	Ofte fremstilt med laserdata
Grensebetingelser	Beskrivelse av vannstand og vannføring ved grensene til terrengmodellen.	Ved åpne grensebetingelser anbefales funksjonen ”program detected”
Flom og tørke	Verdi på vanndybde som beskriver flom og tørke i hver enkelt rute/celle i modellen.	tørkedybde: 0.001 - 0.02 flomdybde: 0.002 - 0.05. (flomdybde < tørkedybde)
Eddy-viskositet	Ved funksjonen ”urban oversvømmelse”, beskrives konstanten for viskositet E.	$E = 0.02 \cdot \Delta x^2 / \Delta t$ (3.1) Δx : rasterbredde/høyde Δt : tidssteg
Infiltrasjon	Betegner enten ingen infiltrasjon, netto infiltrasjon eller infiltrasjonskapasitet.	Spesifisere netto infiltrasjonsrate
Ruhet	Betegner overflateruhet i terrengmodellen.	Manningstall
Startbetingelser	Angir vannivået ved start av simuleringen.	konstant verdi eller batymetri som refereansepunkt
Simuleringsperiode	Betegnes ved tidssteg og tidsintervaller som avgjør stabiliteten til modellen. Dette vises ved Courant-Friedrich-Lewy-tallet. (CFL)	$0 < CFL < 1$

Tabell 3.5: Funksjonsbeskrivelse av viktige parametre i MIKE 21 (DHI, 2016, 2003)

I parameteroppsettet tilhørende MIKE 21 er valgte verdier fremstilt i tabell 3.6. Tabellen viser benyttede parameterverdier med begrunnelse. Tabell 3.5, som illustrerer anbefalte verdier og fremgangsmåter, er benyttet som utgangspunkt for parametervalg.

Parameter	Valgt verdi/funksjon	Enhet	Begrunnelse
Valg av modul	"Urban oversvømmelse"	[-]	Analyseområdet er urbant
Grensebetingelser	"Program detected", 1	[-]	1 grensebetingelse nederst i Neselva (opprettholde naturlig vanntransport)
Flom og tørke	Tørkedybde: 0.005 Flomdybde: 0.01	[m]	Lave verdier for større nøyaktighet
Eddy-viskositet	0.1	[m ² /s]	Benyttet formel (3.1) i tabell 3.5
Infiltrasjon	Ingen infiltrasjon	[-]	- Lite analyseområde - Intens nedbørhendelse - Stor andel tette flater
Ruhet (Manningstall)	Hustak: 40 Terreng: 30 Veg: 83	[m ^{1/3} /s]	Hentet fra Chin mfl. (2013)
Startbetingelser	Konstant verdi: 2.9	[moh]	Terrenghøyden til utløpet i Neselva

Tabell 3.6: Valgte parameterverdier for funksjonsoppsettet i MIKE 21

Simuleringsperioden

Simuleringstid avhenger av tidssteg og tidsintervaller satt i modellen, samt batymetriens romoppløsning. Ved en fin romoppløsning, krever modellen et lavt tidsintervall for å unngå "kræsj" i simuleringen. Dette kan kontrolleres ved det såkalte "Courant-Friedrichs-Lewy-tallet" (CFL), som uttrykker antall celler informasjonen forflyttes per tidssteg. For at modellen skal være stabil må dette tallet være mellom 0 og 1 (DHI, 2016). Fra denne MIKE 21-modellen fremkom CFL-tallet som 0.14, da tidsintervallet satt til 0.05 sekunder og antall tidssteg er satt til 504 000. Ved dette valget ble simuleringstiden på 7 timer. Simuleringen var satt til å starte 06.08.2016 klokken 03:45 og slutte 10:45. Tidsforbruket, eller modellens kjøretid, for denne simuleringen var på omtrent 36 timer.

Antakelser

Følgende antakelser ligger til grunn ved fremstilling av MIKE 21-modellen:

- Ingen infiltrasjon
- Nedbørtilførsel kan ekskluderes fra modellen
- Romoppløsningen gir detaljert fremstilling av terrenget

3.5 Utarbeidelse av MIKE FLOOD 1D-2D-modell

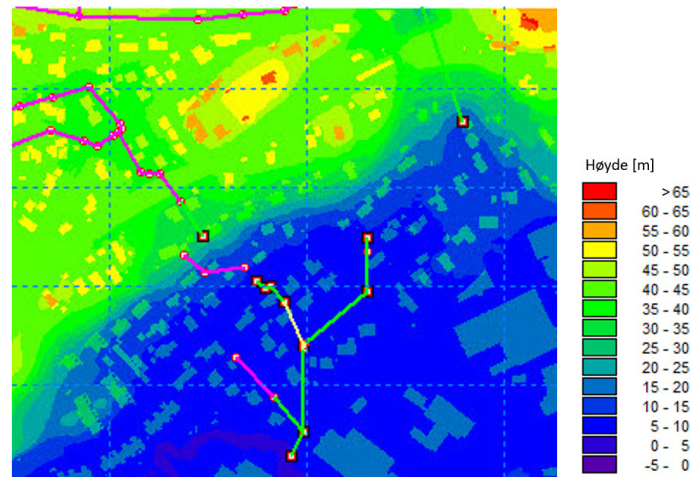
Ved å implementere MIKE 21-modellen og MIKE URBAN-modellen i MIKE FLOOD ble det utarbeidet en 1D-2D-modell. MIKE FLOOD består av et parameteroppsett, liknende MIKE 21, som kan overstyre mengde vann som sendes mellom de to modellene. I denne oppgaven er det kun benyttet to parametersett ved sammenkoblingen av modellene. De to parametersettene ”alternativ for urbane ledninger” og ”spesifiserte ledninger” ble benyttet i sammenkoblingen av modellen. I funksjonen for ”spesifiserte ledninger” kobles terrengpunkter i MIKE 21 til utvalgte noder i MIKE URBAN. Parameteren ”alternativ for urbane ledninger” består av flere parametervalg og er listet opp i tabell 3.7.

Parameter	Verdi/funksjon	Enhet	Anbefalte verdi/funksjon
Type koblingspunkt	Bestemmer om valgte koblingspunkt sender vannet inn i eller ut av MIKE 21- (M21) modellen	[-]	Kummer: M21 til innløp Bekkeinntak: M21 til innløp Utløp: M21 til utløp
Maks volumstrøm	Setter maksverdi for volumstrøm i koblingspunktet.	[m ³ /s]	0.1
Innløpsareal	Bestemmer innløpsarealet til koblingspunktet.	[m ²]	0.16
Utslippskoeffisient	Benyttes for å skalere volumstrømmen i koblingspunktet.	[-]	0.98

Tabell 3.7: Funksjonsbeskrivelse av ”alternativ for urbane ledninger” (DHI, 2017a, 2014a)

De to uavhengige modellene ble sammenkjørt ved å koble 12 noder fra ledningsnett tilhørende MIKE URBAN til batymetrien i MIKE 21-modellen. Sammenkoblingen illustreres i figur 3.19. Ved denne koblingen føres vannet mellom de to modellene. Ved hjelp av funksjonen ”Alternativ for urbane ledninger”, beskrevet i tabell 3.7, ble de ulike nodene spesifisert til å enten sende vannet inn eller ut av MIKE 21-modellen.

Ved sammenkoblingen ble det valgt å fjerne modellerte rør som representerte åpne bekkeløp, illustrert i figur 3.20. Dette for å lede vannet på terrengoverflaten i de eksisterende åpne bekkeløpene. Ved denne endringen ble det satt inn to utløp på ledningsnett i MIKE URBAN med hensikt å føre vannet på terrengoverflaten. Nederst i de åpne bekkeløpene ble det plassert to noder representerende to bekkeinntak. Figur 3.21 viser plasseringen av utvalgte koblingspunkter, utløp og bekkeinntak. Dette lar vannet renne naturlig mellom åpen og lukket løsning, samsvarende med faktisk situasjon.



Figur 3.19: Sammenkobling av MIKE UBRAN og MIKE 21

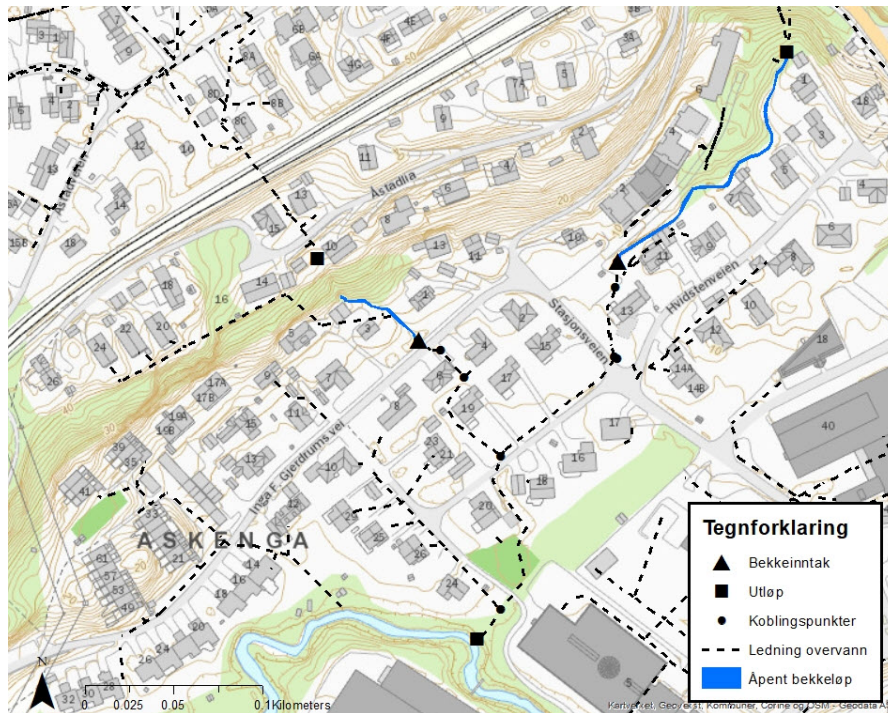


Figur 3.20: Bildet til venstre viser ledningsnettets ved kalibrering og til høyre vises ledningsnettets etter sammenkobling

Tabell 3.8 viser valgte parameterverdier for MIKE FLOOD-modellen. For å ikke overstyre den faktiske kapasiteten til bekkeinntakene i MIKE URBAN, er det valgt større verdier for maksimal volumstrøm og innløpsareal enn i kummene (Hardang, 2020).

Parameter	Valgt verdi/funksjon	Enhet	Begrunnelse
Maks volumstrøm	Kummer: 0.1 Inntak: 1.5	[m ³ /s]	Anbefalt verdi
Innløpsareal	Kummer: 0.16 Inntak: 2	[m ²]	Anbefalt verdi
Utslippskoeffisient	0.98	[-]	Anbefalt verdi

Tabell 3.8: Valgte parameterverdier for MIKE FLOOD



Figur 3.21: Koblingspunkter i form av inntak, utløp og kummer

Simuleringstiden til MIKE FLOOD-modellen ble bestemt av definert simuleringstid i MIKE 21, og simulert nedbørhendelse ble bestemt av definert hendelse i MIKE URBAN. MIKE FLOOD benytter grensebetingelsene for nedbørfelt og meteorologiske betingelser (forklart i tabell 3.3) satt i MIKE URBAN. Dette medfører at MIKE 21-modellen ikke mottar nedbør direkte, og vann mottas kun fra MIKE URBAN i gitte punkter (koblingspunktene). MIKE 21 modellerer hovedsakelig strømning i bekkeløp, og ikke direkte nedbør på terrengoverflaten, ved valgt nedbørtilførsel. Resultatene av simuleringen ble lagret i filer tilhørende den enkelte modell.

3.5.1 Begrensinger og antakelser

For å kunne simulere MIKE FLOOD-modellen for 6. august-hendelsen er det gjort følgende antakelser.

- Terrengmodellen gir en korrekt fremstilling av åpne bekkeløp
- Simuleringstiden inneholder maksimal flomutbredelse for 6. august-hendelsen
- 12 koblingspunkter er tilstrekkelig for korrekt fremstilling av flomutbredelsen

3.5.2 Utførelse av følsomhetsanalyse

Denne følsomhetsanalysen deles, beskrevet i bakgrunnskapittel 2.2.4, i to deler; valg av avgjørende parametre for kalibrering av ledningsnettmodell og endring av romoppløsning. Dette er gjort grunnet flommodellens to uavhengige modeller.

Før kalibreringen startet ble det utført en analyse av de hydrologiske parametrene i MIKE URBAN. Analysen innebar å justere en og en parameter samtidig som resterende parametersett forble uendret, slik at endring i resultat ble synliggjort. Målet for analysen var å finne parametrene med størst innvirkning på kalibreringen. Dette ble parametrene som gav størst utslag ved justert verdi, beskrevet i kapittel 3.3. I denne analysen ble følsomheten av enkelte parametervalg testet, ved å observere endring i simulert resultat. Ved å endre romoppløsningen i terrengmodellen fra 0.5 m x 0.5 m til 1 m x 1 m, ble terrengmodellens følsomhet testet. Følsomheten ble analysert ut fra forskjellen i flomutbredelsens omfang.

3.5.3 Modellvalidering og evaluering

Modellvalidering

I denne masteroppgaven ble modellen validert ved å simulere MIKE URBAN-modellen mot en uavhengig regnhendelse, nevnt i kapittel 2.2.4. Denne regnhendelsen inngikk ikke i kalibreringen av modellen. Valgt regnhendelse for validering inntraff 19. oktober 2019. Regnhendelsen er karakterisert som et lengre regnskyll med 12 timers varighet og moderat intensitet. Det var lite nedbør dagene i forkant av regnhendelsen og maks intensitet var 10,9 mm per time. Valideringen av modellen gikk ut på å sammenligne simulert resultat mot målt data. Dersom kalibreringen av modellen er godt utført burde avviket mellom simulert avrenning og målt avrenning være minimalt.

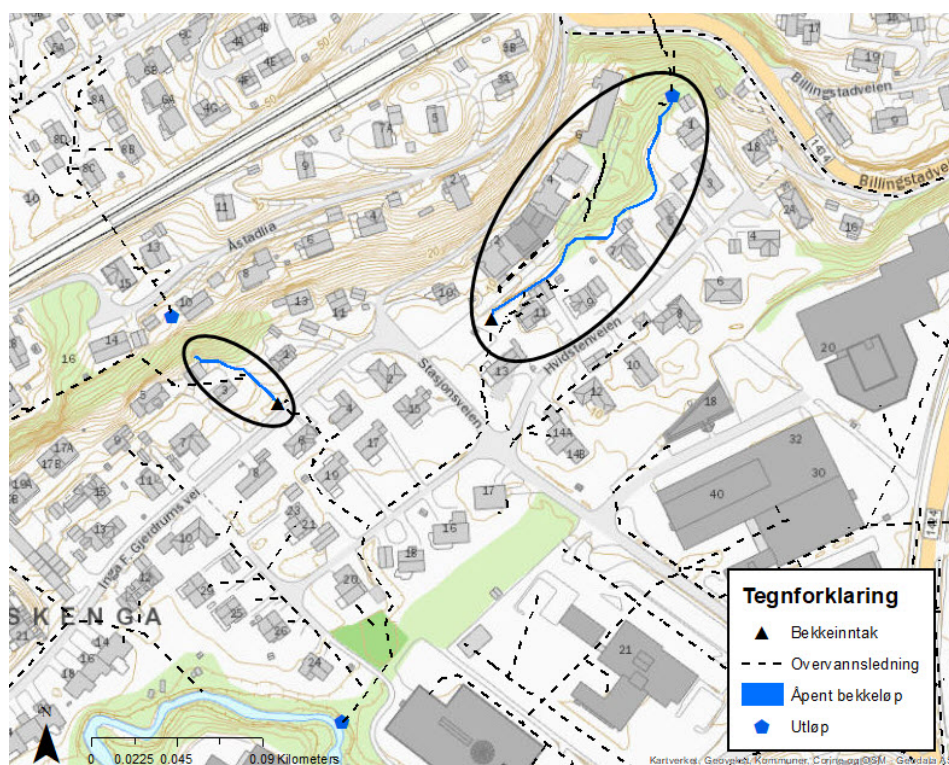
Modellevaluering

For å evaluere flommodellen ble dokumenterte kjelleroversvømmelser, forårsaket av 6. august-hendelsen, sammenlignet med simulert resultat fra modellen. De observerte kjelleroversvømmelsene er hentet fra data tilknyttet rapporten av Paus (2017) der enkelt-hendelser er dokumentert fra denne dagen. Enkelthendelsene er klassifisert i to typer oversvømmelse; "kjelleroversvømmelse" og "overflatevann på eiendom". Plasseringene til de rapporterte oversvømmelsene ble sammenlignet med flomutbredelsen fra MIKE FLOOD-modellen, steg fire i figur 2.4.

3.6 Tiltak og gjennomføring

I denne oppgaven er det valgt å prøve ut to flomforebyggende tiltak for 6. augusthendelsen. Tiltakene er planlagt i samråd med Asker kommunes ønsker og retningslinjer. Videre følger en beskrivelse av tiltakene med illustrasjon, samt hvordan tiltakene ble implementert i modellen.

3.6.1 1. tiltak - forbedre eksisterende bekkeløp



Figur 3.22: Overvannsledninger og åpne bekkeløp

De åpne bekkeløpene som er i analyseområdet har partier med innsnevring og utilstrekkelig kapasitet. I figur 3.22 illustreres de to åpne bekkeløpene og tilhørende overvannsnett. I dette tiltaket ble eksisterende bekkeløp gjort bredere og dypere. Tiltaket ble implementert i modellen ved å addere 0.5 meter i hver side av eksisterende bekkeløp (illustrert i figur 3.23), samt senke vassdraget med 1 meter. Terrenghøyden til koblingspunktene valgt i MIKE FLOOD ble beholdt uendret. Dette med unntak av inntaket og utløpet til hovedbekkeløpet, samt inntaket til sidebekkeløpet, vist i figur 3.21. Ved avvik større enn 10 centimeter vil MIKE FLOOD gi en feilmelding og kreve samsvarende terrenghøyde i koblingspunktene.

Utvidelsen av bekkeløpet medførte at inntak og utløp ble nedjustert i MIKE URBAN, til nærliggende rastercelle. Sidebekkeløpets utløp ligger ikke i selve bekkeløpet og krevde derfor ingen endring. Justeringene av bekkeløpet ble utført ved bruk av verktøy i ArcMap

og deretter konvertert og implementert til en ny batymetri i MIKE 21. Utgangspunktet for den nye batymetrien var den opprinnelige batymetrien benyttet ved simulering av 6. august-hendelsen.

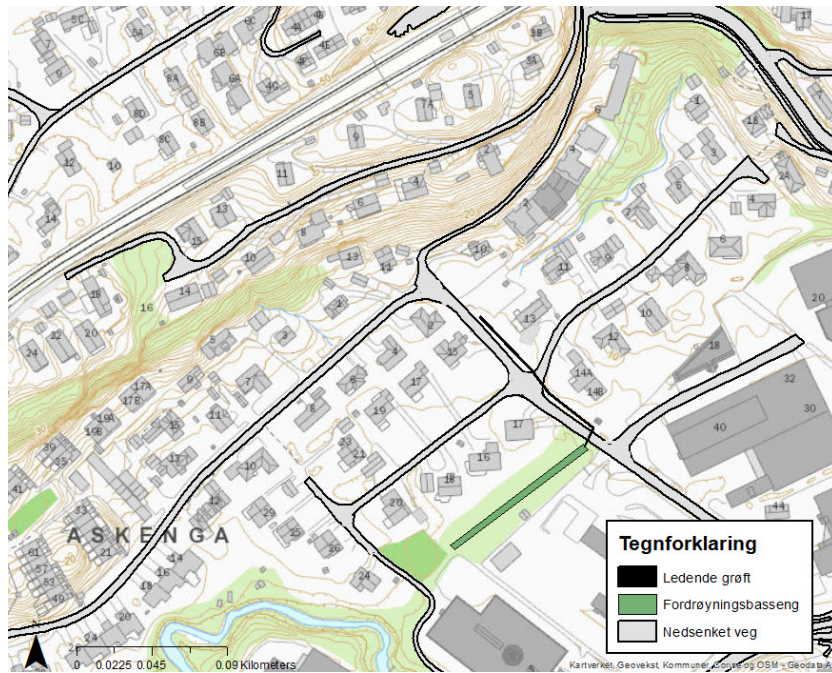


Figur 3.23: Tiltak 1; utvidelse av bekkeløpet

3.6.2 2. tiltak - fordrøyningsbasseng og kantstein

I analyseområdet eksisterer et større grøntareal, lokalisert ved illustrert fordrøyningsbasseng i figur 3.24. I det andre tiltaket er det ønskelig å se effekten av å implementere et fordrøyningsbasseng på Askenga. For at fordrøyningen skal fungere best mulig er det også valgt å legge en ledende grøft, illustrert i figur 3.24, for å lede vannet som flommer over i hovedbekkeløpet til fordrøyningsmagasinet. I tillegg til fordrøyning og ledende grøft er det valgt å implementere kantstein langs gatene for å lede vannet bort fra hus og eiendom. Tiltaket ble implementert i MIKE 21-modellen ved bruk av metoden beskrevet i tiltak 1. Infiltrasjon er ekskludert fra terrenngmodellen og fordrøyningsbassenget er modifisert i terrenget.

Fordrøyningsbassenget er dimensjonert med bredde på 4 meter, lengde på 100 meter og dybde på 2 meter. Dimensjonen utgjorde et totalt fordrøyningsvolum på omtrent 800 m³. Valgt dimensjon er basert på resultatene fra simuleringen av 6. august-hendelsen. I resultatene ble endelig vannvolum i modellområdet, oppgitt som vannbalansen i MIKE 21-modellen, benyttet. Den ledende grøften er dimensjonert med bredde på 0.5 meter, lengde på omtrent 110 meter og dybde på 0.5 meter. I følge Norem mfl. (2018) bør kantstein være 16-18 cm høye, men i gater med saktegående trafikk kan høyden reduseres med 4-10 cm. For å implementere effekten av kantstein i modellen ble alle markerte vegger i figur 3.24 senket med 15 cm fra opprinnelig terrenghøyde i batymetrien.



Figur 3.24: Tiltak 2; fordrøyningsbasseng og kantstein

Vurdering av tiltak

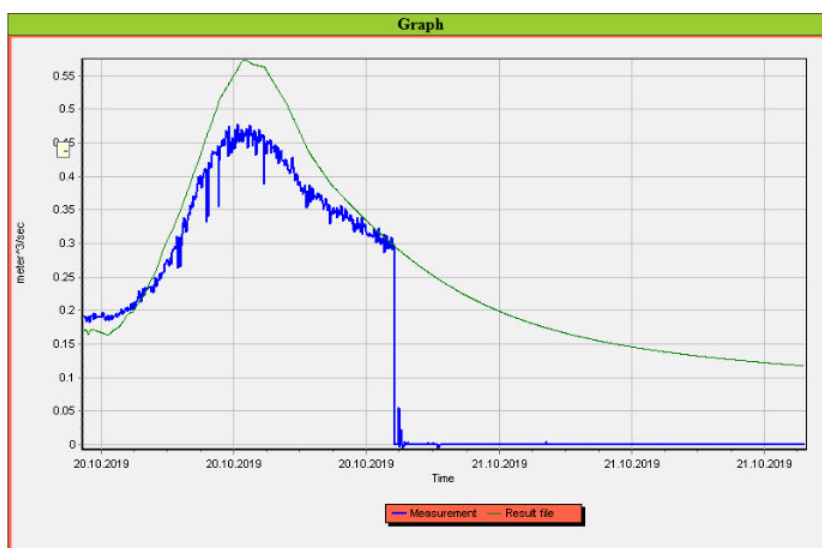
Tiltakene ble vurdert ved å sammenligne flomutbredelsen fra simulering av 6. august-hendelsen mot simulert resultat ved implementert tiltak. I resultatkapittelet fremstilles endring av flomdybde og flomomfang.

4. Resultater

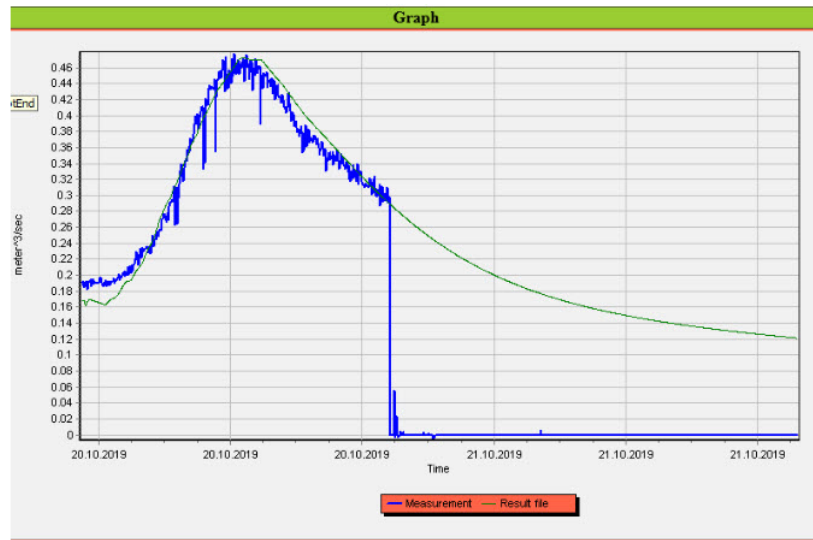
I dette kapittelet fremstilles resultater av flommodellen, implementerte mulige tiltak, modellgyldighet og følsomhetsanalysen. ArcMap er benyttet til å analysere resultatfilene, samt til å fremstille illustrasjoner. Flomutbredelsen presenteres ved maksimal flomdybde over terrengoverflaten i hendelsesforløpet 6. august 2016. Maksimal dybde er ikke et øyeblikksbilde, men illustrerer største flomdybde iløpet av hendelsesforløpet. I resultatet fremstilles største flomdybde som minimum 5 centimeter.

4.1 Følsomhetsanalyse - kalibrering

Kalibreringens følsomhet presenteres ved fire figurer som illustrerer endring i estimert kurve før og etter justert parameterverdi. Figurene fremstiller justering av RDI-parameteren "CQOF", også kjent som koeffisient for volumstrøm på overflate, og parameteren permeabilitet. Figur 4.1 viser estimert kurve før justering av RDI-parameteren CQOF for sone 3 og figur 4.2 viser resultatet. I dette tilfellet ble verdien for CQOF endret fra 0.75 til 0.6. Resultatet viser at justeringen av parameteren gav et stort utslag på den simulerte flomtoppen.

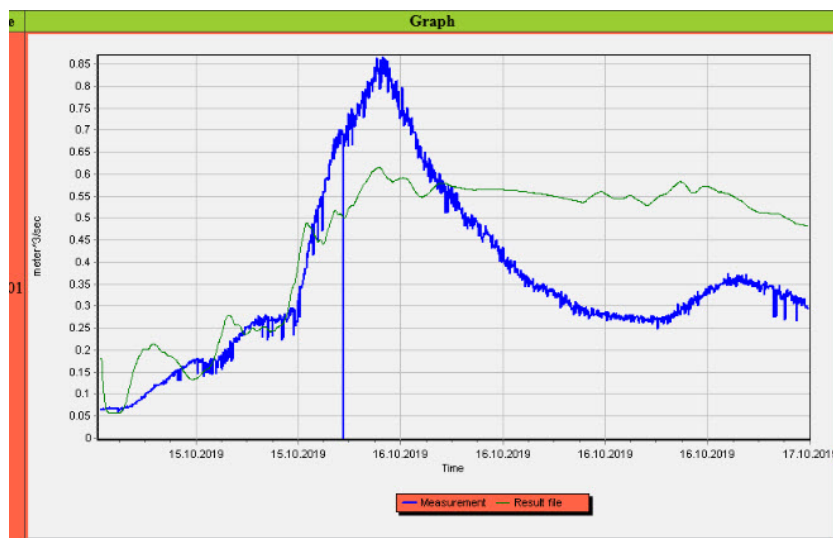


Figur 4.1: Resultat før justering av parameteren CQOF

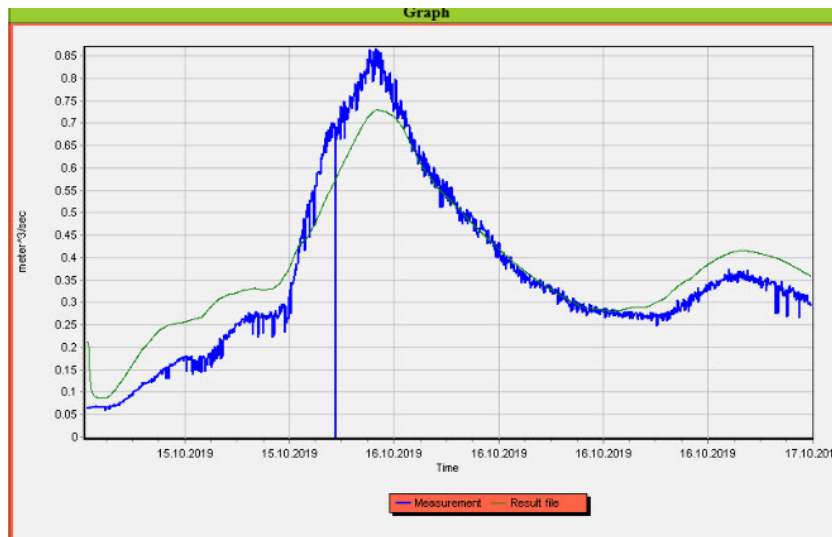


Figur 4.2: Resultat etter justering av parameteren CQOF

Figur 4.3 viser estimert kurve før justering av parameteren impermeabilitet og figur 4.4 viser resultatet. I dette tilfellet ble verdien for impermeabilitet justert fra 20 % til 2 % i sone 1 og 2. Resultatet viser at nedjusteringen har endret den estimerte kurvens form og gjort den jevnere, samt at kurvene korrelerer i større grad.



Figur 4.3: Resultat før justering av parameteren impermeabilitet



Figur 4.4: Resultatet etter justering av parameteren impermeabilitet

4.2 Kalibrering av MIKE URBAN-modellen

4.2.1 Endelige kalibreringsparametre

Resultatene som følger viser til endelige kalibreringsresultater gjort i MIKE URBAN, ved å justere hydrologiske parametre beskrevet i metodekapittel 3.3.1. Resultatene presenteres etter soneinndelingen vist i figur 3.2, der hver sone har et parametersett og tilhørende kalibreringsresultat. Sonene ble kalibrert sekvensielt, der sone 3 hadde størst innvirkning på estimert kurve. Endelige valgte verdier presenteres i tabeller. Parameterverdier uten signifikant innvirkning er lagt i vedlegg A. For alle resultatene som følger er ”prøve og feilemetoden” benyttet, samt anbefalte verdier presentert i tabell 3.4. Funksjonsbeskrivelse av parametrene finnes i tabell 3.4.

Kalibreringsparametre sone 1

Tabell 4.1 viser kalibrerte RDI-parameterverdier benyttet for sone 1. Sonen er sentrert på Askenga, beskrevet i metodekapittel 3.1, den minste sonen i nedbørfeltet med størst andel tette flater.

RDI-parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Lagring på overflate (U _{max})	[mm]	10
Lagring i rotsone (L _{max})	[mm]	100
Koeffisient for volumstrøm på overflate (CQOF)	[-]	0.3
Tidskonstant for volumstrøm på overflate (CKOF)	[time]	20
Tidskonstant for volumstrøm i umettet sone (CKIF)	[time]	500
Tidskonstant for volumstrøm i grunnvannsone (CKBF)	[time]	2000
Konstant for snøsmelting (C _{me})	[mm/°C/dag]	-

Tabell 4.1: Kalibrerte RDI-verdier for sone 1

I tabell 4.2 fremstilles resterende kalibrerte parameterverdier i sone 1. Det synliggjøres i begge tabellene at anbefalte parameterverdier, vist i tabell 3.4, var tilfredsstillende for kalibrering av denne sonen.

Parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Permeable flater	[%]	25
Impermeable flater	[%]	2
Konsentrasjonstid	[min]	20

Tabell 4.2: Kalibrerte parameterverdier for sone 1

Kalibreringsparametre sone 2

Sone 2 har blitt karakterisert med både urbane og naturlige felt som resulterte i et nytt sett med parameterverdier. Endelige kalibrerte RDI-parameterverdier for denne sonen illustreres i tabell 4.3.

RDI-parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Lagring på overflate (U _{max})	[mm]	10
Lagring i rotsone (L _{max})	[mm]	100
Koeffisient for volumstrøm på overflate (CQOF)	[-]	0.3
Tidskonstant for volumstrøm på overflate (CKOF)	[time]	20
Tidskonstant for volumstrøm i umettet sone (CKIF)	[time]	40
Tidskonstant for volumstrøm i grunnvannsone (CKBF)	[time]	600
Konstant for snøsmelting (C _{me})	[mm/°C/dag]	-

Tabell 4.3: Kalibrerte RDI-verdier for sone 2

I tabell 4.4 fremstilles resterende kalibrerte parameterverdier i sone 2. Det fremkommer i tabell 4.3 og 4.4 at endelige valgte parameterverdier samsvarer med deler av de anbefalte verdiene gitt i tabell 3.4.

Parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Permeable flater	[%]	25
Impermeable flater	[%]	2
Konsentrasjonstid	[min]	60

Tabell 4.4: Kalibrerte parameterverdier for sone 2

Kalibreringsparametre sone 3

I sone 3 ble et utradisjonelt område kalibrert i MIKE URBAN, altså et område karakterisert med stor andel naturlige felt. Tabell 4.5 viser kalibrerte RDI-parameterverdier for sone 3.

RDI-parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Lagring på overflate (U _{max})	[mm]	1
Lagring i rotsone (L _{max})	[mm]	10
Koeffisient for volumstrøm på overflate (CQOF)	[-]	0.6
Tidskonstant for volumstrøm på overflate (CKOF)	[time]	4
Tidskonstant for volumstrøm i umettet sone (CKIF)	[time]	30
Tidskonstant for volumstrøm i grunnvannsone (CKBF)	[time]	25
Konstant for snøsmelting (C _{me})	[mm/°C/dag]	-

Tabell 4.5: Kalibrerte RDI-verdier for sone 3

Tabell 4.6 illustrerer resterende kalibrerte parameterverdier for sone 3. I tabellen vises tre ulike konsentrasjonstider. Konsentrasjonstidene er tilhørende tre underliggende del-felt, vist i figur 3.16, og representerer endelige parametervalg. Tabellene fremstiller at enkelte av parameterverdiene kalibrert for sone 3 samsvarer med de anbefalte parameterverdiene.

Parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Permeable flater	[%]	87
Impermeable flater	[%]	0
		200
Konsentrasjonstid	[min]	130
		60

Tabell 4.6: Kalibrerte parameterverdier for sone 3

4.2.2 Kalibreringsresultat

Endelige kalibreringsresultat, oppbygd av parametersettene presentert i forrige delkapittel, fremstilles ved tre figurer. Figurene illustrerer en blå og en grønn kurve som korrelerer. Den grønne kurven illustrerer estimert vannføring og den blå kurven viser

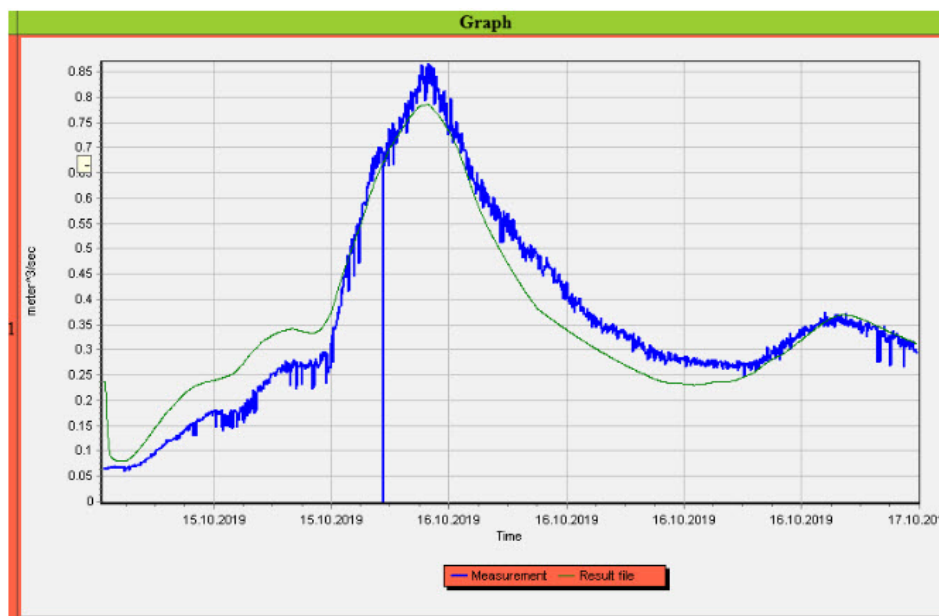
målt vannføring. De tre nedbørhendelsene modellen er kalibrert mot er klassifisert som nedbørhendelse 1, 2 og 3. Varigheten tilhørende hendelsene er lengre enn konsentrasjonstiden til det totale nedbørfeltet, vist i tabell 4.6. Konsentrasjonstiden er gitt som lengste kalibrerte konsentrasjonstid og er anslått til 200 minutter.

Nedbørhendelse 1

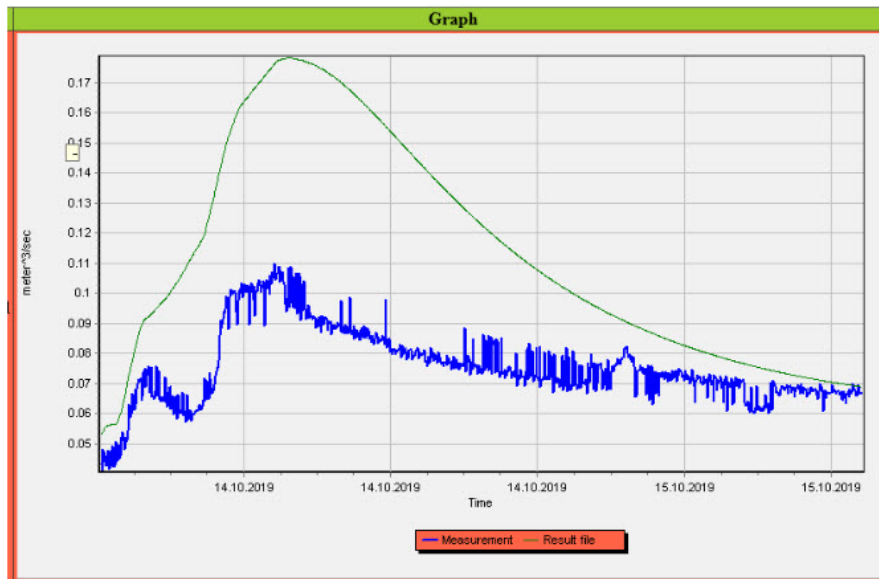
Nedbørhendelse 1 fremstiller kalibreringsresultatet av regnskylllet som inntraff 15. - 16. oktober 2019. Hendelsen på 17.5 timer, ble i metodekapittel 3.3.2 presentert som den lengste og mest intense regnhendelsen modellen ble kalibrert mot, illustreres i figur 4.5. Den simulerte kurven er overestimert i første del av regnhendelsen frem mot flomtoppen. Flomtoppen og den etterfulgte nedgangen viser en underestimerte kurve. I siste del av resultatet vises god korrelasjon mellom estimert og målt kurve.

Nedbørhendelse 2

Nedbørhendelse 2 er betegnet som det korteste regnskylllet med lavest intensitet i metodekapittel 3.3.2, og opptrådte 14. oktober 2019 med varighet på 7 timer. I figur 4.6 fremstilles korrelasjonen mellom målt og estimert vannføring. Den simulerte kurven er overestimert gjennom hele nedbørhendelsen. Sammenlignet med kalibreringen for nedbørhendelse 1 er avviket mellom estimert og målt flomtopp samsvarende. Resultatet viser også at formen på kurvene er mindre overensstemmende enn ved nedbørhendelse 1.



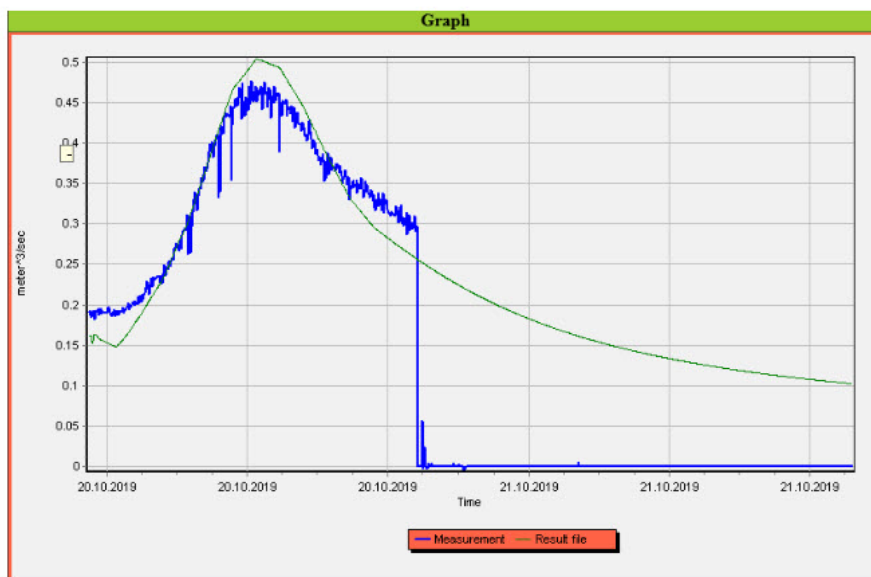
Figur 4.5: Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 1



Figur 4.6: Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 2

Nedbørhendelse 3

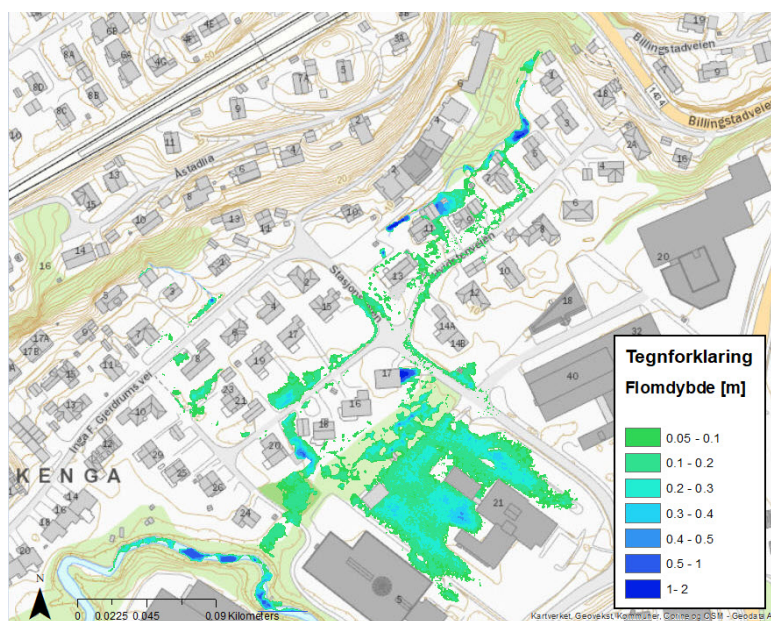
Nedbørhendelse 3 viser samsvaret mellom målt og estimert vannføring den 20. oktober 2019. Figur 4.7 illustrerer at regnskylllet har lengre varighet, 8,5 timer, og større intensitet enn regnskylllet i nedbørhendelse 2. Figuren viser en målefeil som forekom omtrent 6 timer etter flomtoppen. Den simulerte kurven har en overestimert flomtopp og er underestimert ved regnhendelsens start og slutt. Målt og simulert kurve korrelerer godt i tidsrommet før flomtoppen inntreffer, formen på kurvene er også av god overensstemmelse.



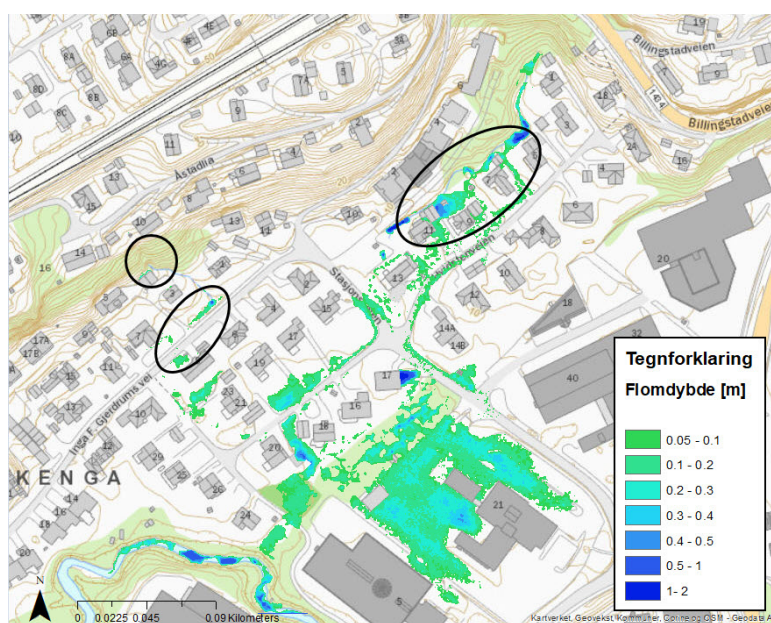
Figur 4.7: Estimert og målt vannføring for nedbørhendelse 3

4.3 Flomutbredelse 6. august 2016

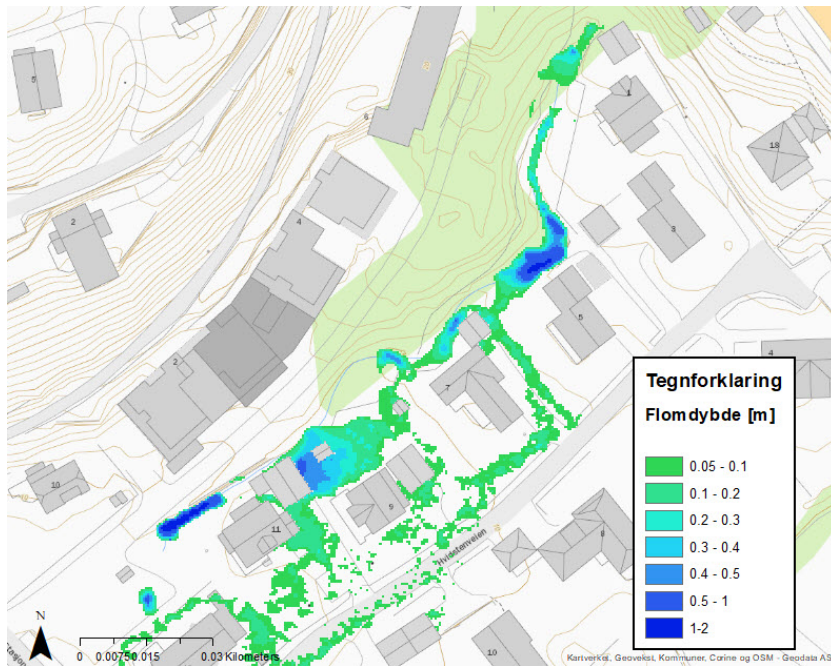
Figur 4.8 illustrer den modellerte flomutbredelsen ved simulering av 6. august-hendelsen. Figuren viser at flere eiendommer på Askenga er berørt av modellens simulerte resultat. I figur 4.9 synliggjøres enkelte "problemområder" markert med svarte sirkler, som indikerer kildene til flomutbredelsen. Hovedvassdraget, nordøst på analyseområdet og vist i figur 4.10, er tydelig hovedkilden til flomutbredelsen og forårsaker de største flomdybdene. Sidevassdraget, nordvest på analyseområdet og vist i figur 4.11, er kilden til flomutbredelsen tilknyttet Inga F. Gjerdrums vei.



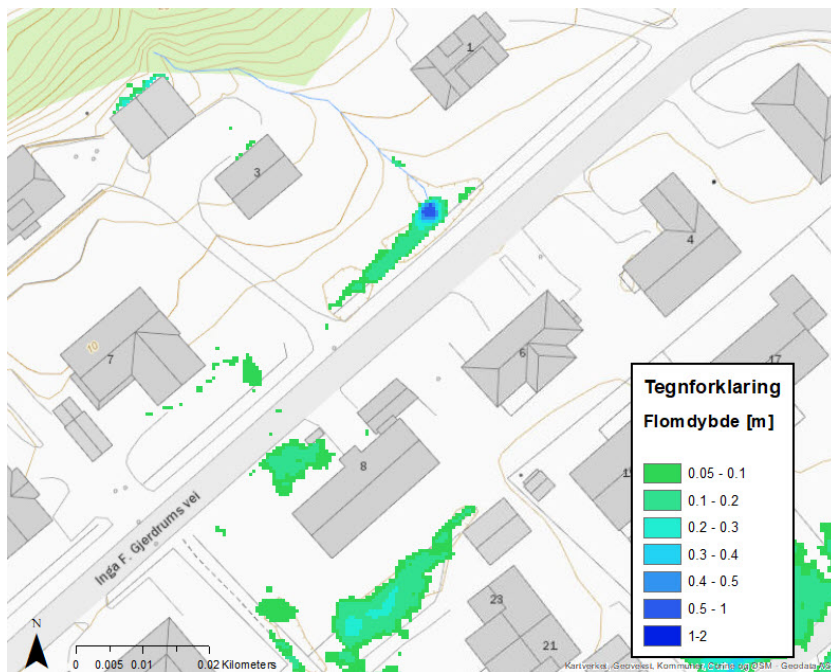
Figur 4.8: Simulert flomutbredelse ved 6. august-hendelsen



Figur 4.9: "Problemområdene" ved 6. august-hendelsen

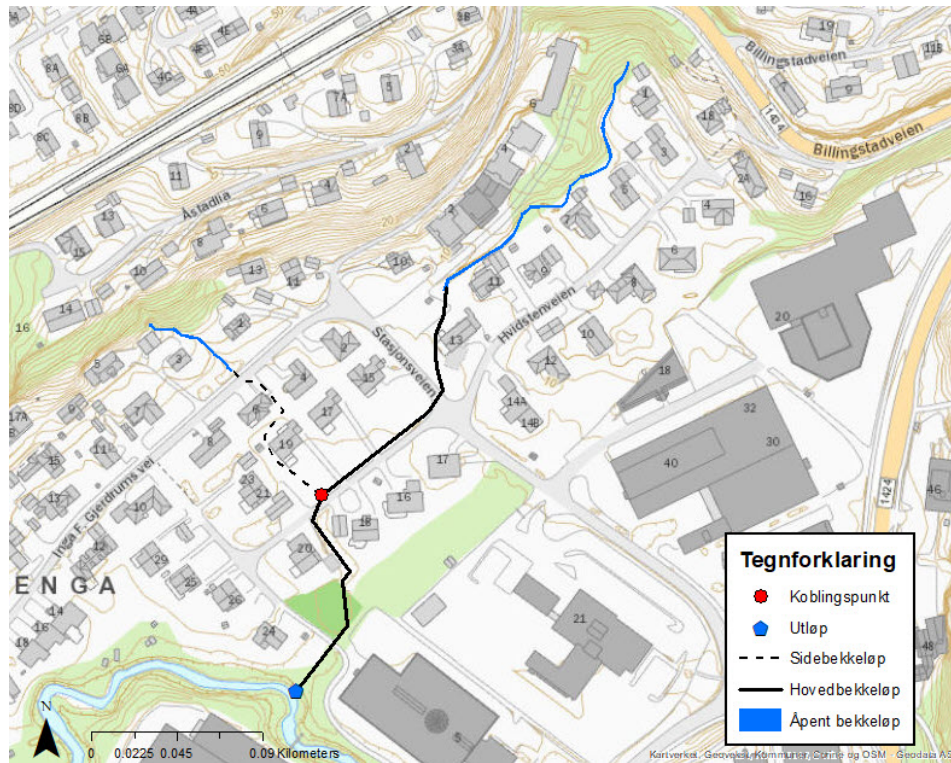


Figur 4.10: Flomutbredelsen ved hovedbekkeløpet



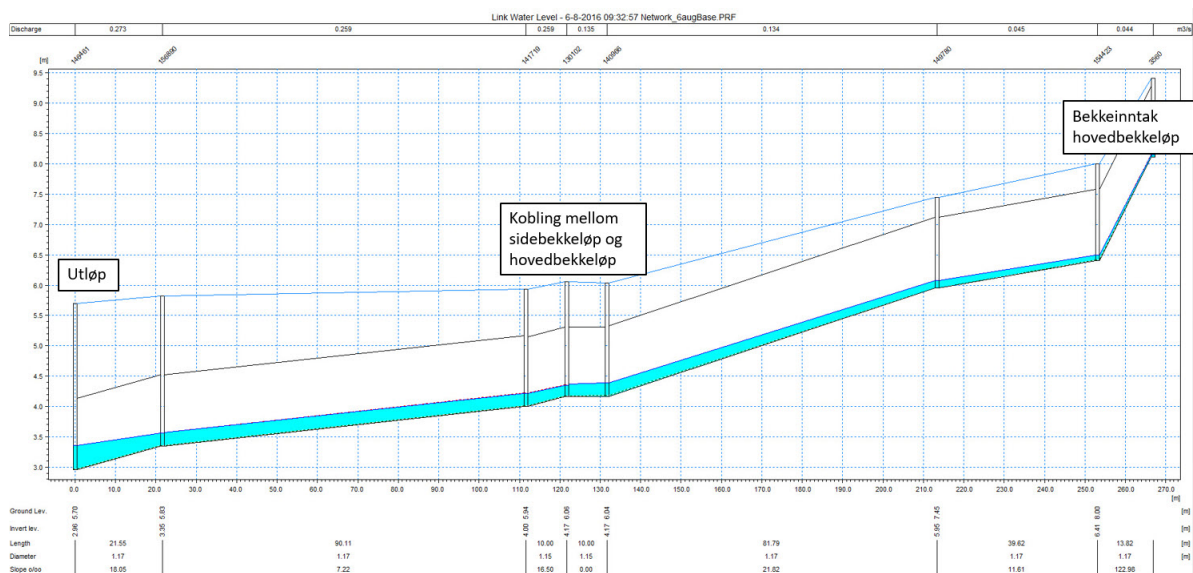
Figur 4.11: Flomutbredelsen ved sidebekkeløpet

I figur 4.12 illustreres hoved- og sidebekkeløpet med både åpne og lukkede bekketraser. Figuren illustrer et koblingspunkt, der de to lukkede bekkene sammenkobles til en ledning.

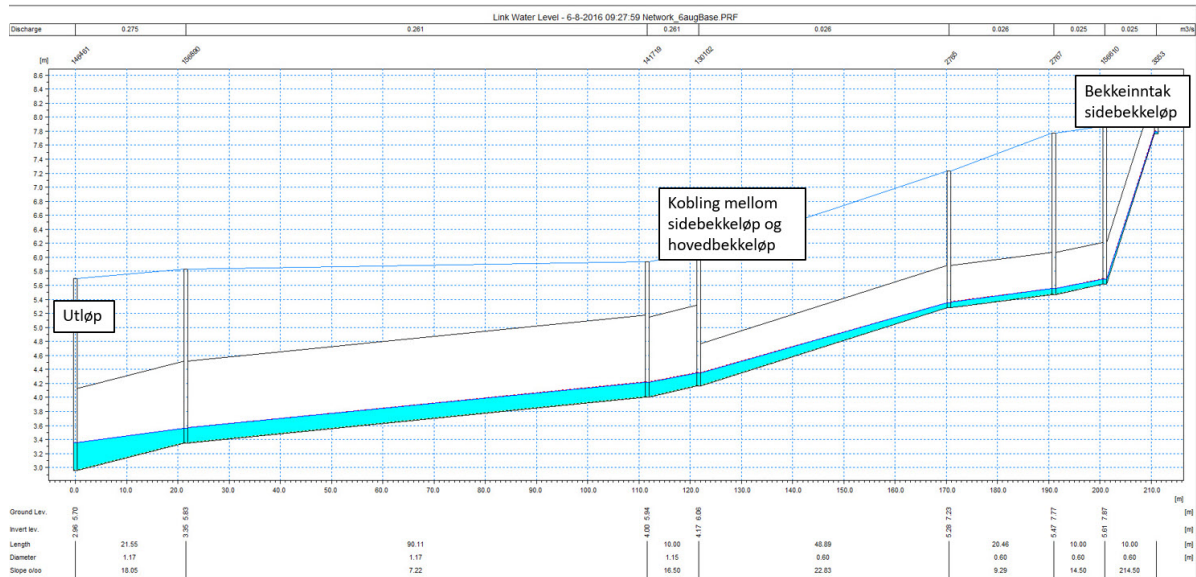


Figur 4.12: Sammenkobling av åpne og lukkede bekketraseer

Figurene som følger viser lengdeprofil for de to lukkede bekketraseene, markert i figur 4.12. Figur 4.13 og figur 4.14 viser lengdeprofilen ved maksimal vannstand i hoved- og sidebekkeløp med tilknyttet utløp. Modellens resultat viser at de lukkede bekkeløpene har god kapasitet og at ingen av rørene er fulle ved simulering av 6. august-hendelsen.

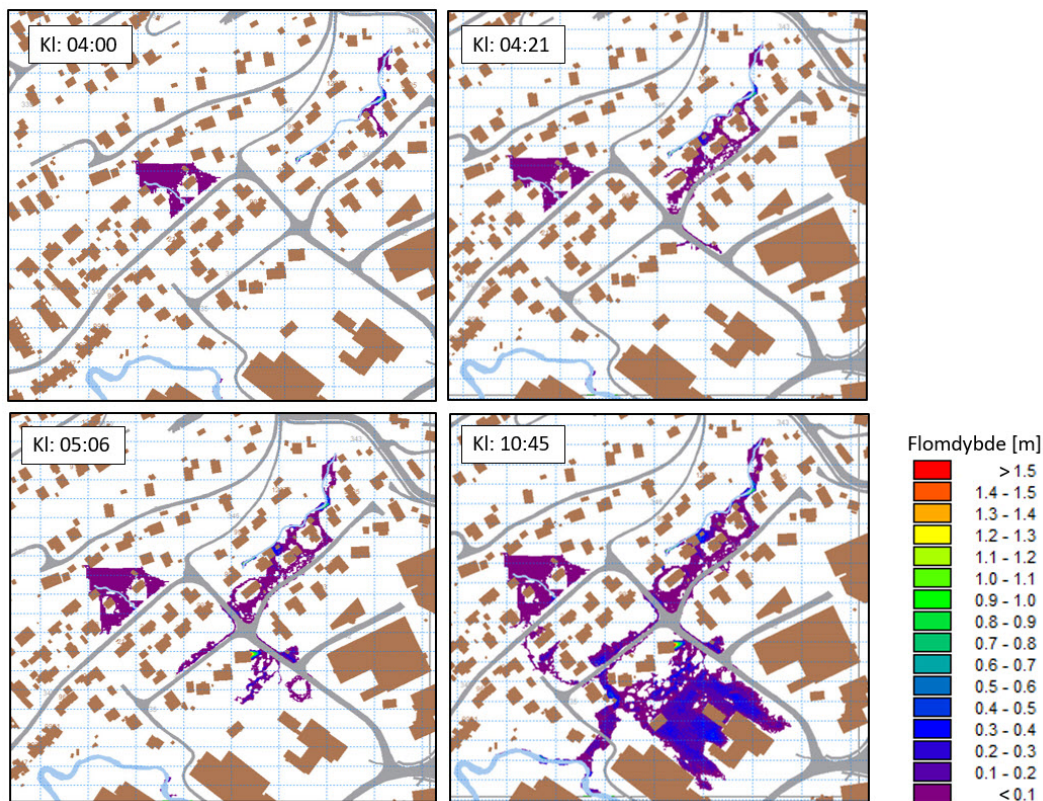


Figur 4.13: Simulert vanddybde i det lukkede hovedbekkeløpet



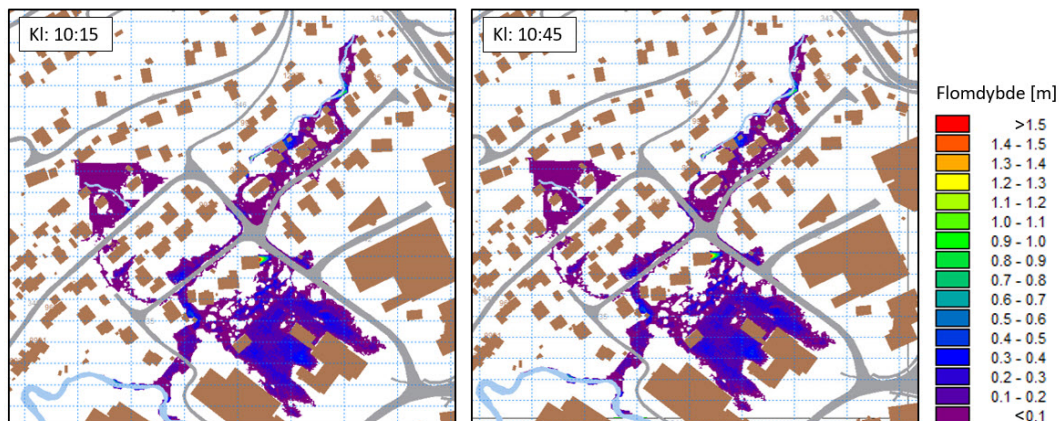
Figur 4.14: Simulert vanndybde i lukket sidebekkeløp

Bildeserien illustrert i figur 4.15 viser en tidsserie av flomforløpet som inntraff 6. august 2016. Flomforløpet illustreres med fire øyeblikksbilder mellom start- og sluttidspunktet i simuleringen, 03:45 og 10:45. Ved øyeblikket 04:21 og 05:06 illustreres utviklingen av flomforløpet. For å se sammenhengen i flomutviklingen er det i figur 4.15 valgt å inkludere flomdybder under 5 centimeter.



Figur 4.15: Tidsserie av flomforløpet som inntraff ved 6. august-hendelsen

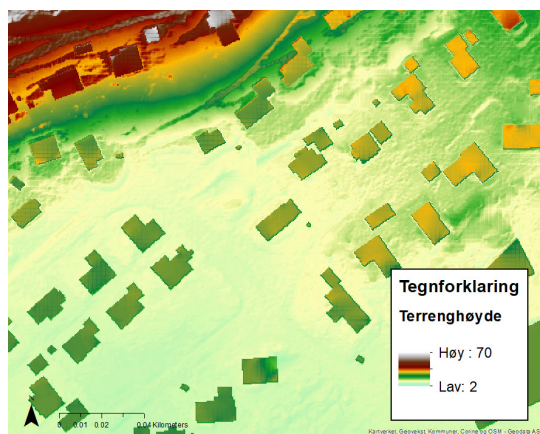
Figur 4.16 viser endringen i flomutbredelse fra klokken 10:15 til 10:45, ingen endring observeres i dette tidsrommet.



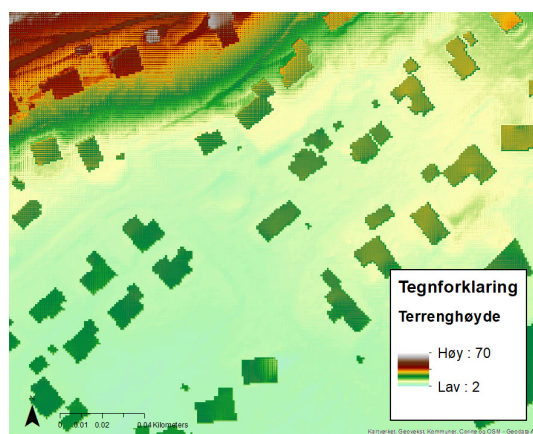
Figur 4.16: Flomutbredelsens endring i tidsrommet 10:15 til 10:45

4.4 Følsomhetsanalyse - Terrengmodell

Terrengmodellens følsomhet ble undersøkt ved å justere på romoppløsningen i modellen, nevnt i metodekapittel 3.5.2. Figur 4.17 og 4.18 fremstiller forskjellen i romoppløsning mellom den opprinnelige batymetrien fra 6. august-hendelsen (0.5 x 0.5 meter) og den justerte batymetrien (1 x 1 meter).

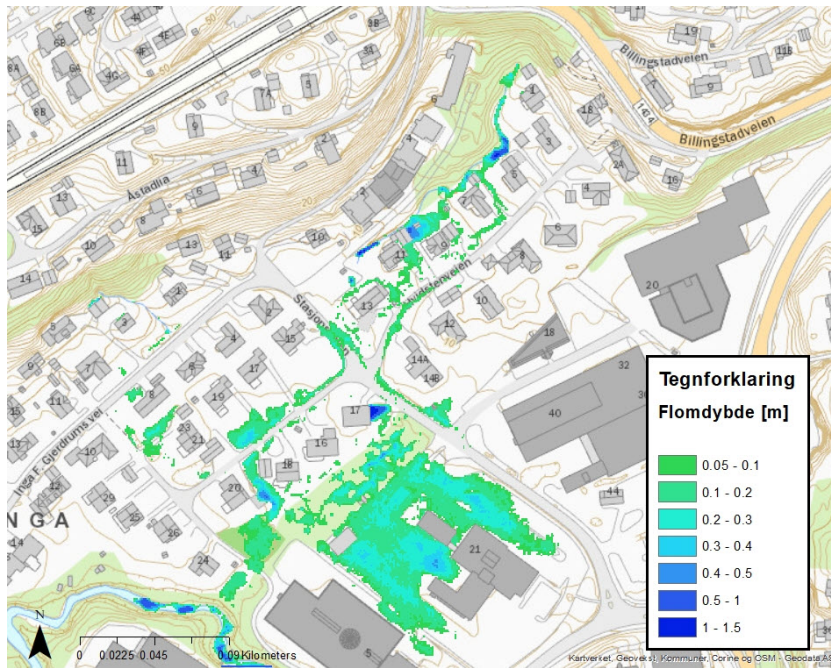


Figur 4.17: Batymetri med 0.5 x 0.5 meter i romoppløsning



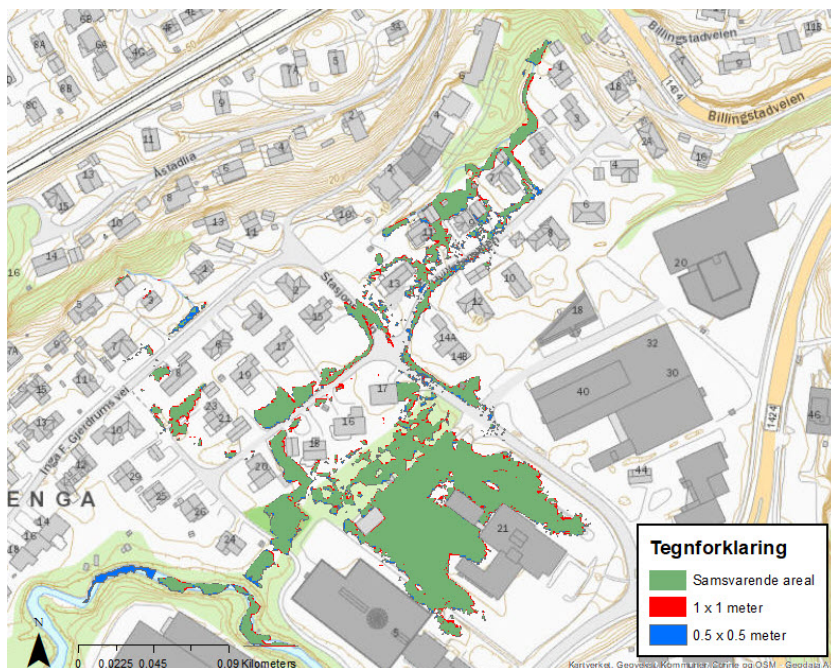
Figur 4.18: Batymetri med 1 x 1 meter i romoppløsning

I figur 4.19 fremstilles resultatet av flomutbredelsen tilhørende batymetrimodell med 1 x 1 meter i romoppløsning. Generelt presenterer figuren litt lavere flomdybder enn simuleringen for 6. august-hendelsen, figur 4.8.

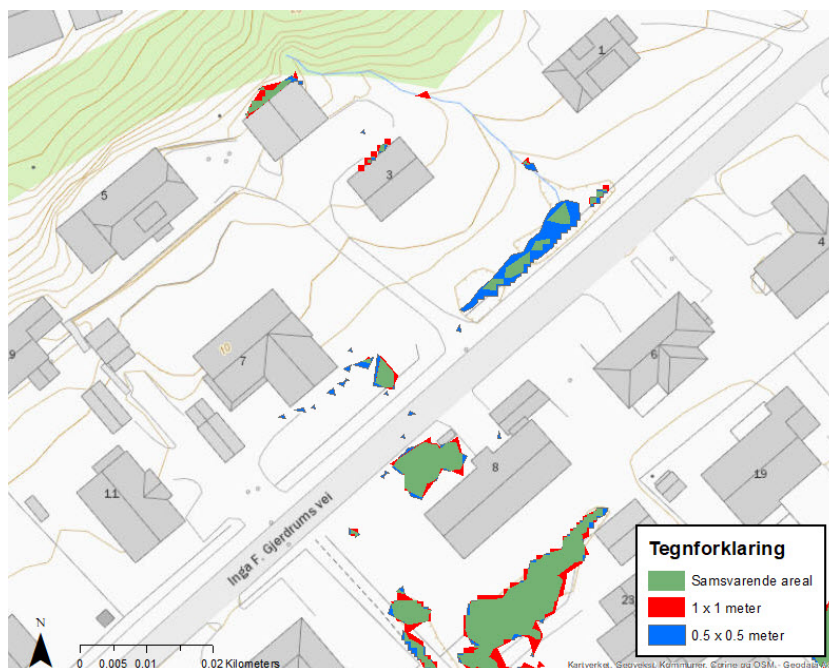


Figur 4.19: Simulert flomutbredelse ved romoppløsning 1 x 1 meter

Figur 4.20 illustrerer endring i flomutbredelse ved den opprinnelige modellen for 6. august-hendelsen mot den justerte modellen med grovere romoppløsning. Forskjellen i flomutbredelse ved bruk av de to romoppløsningene er liten. Ved beregning av flomutbredelsens areal, utført i ArcGIS, fremkom at den opprinnelige modellen hadde omtrent 120 m² større flomutbredelse enn modellen med grovere romoppløsning. Avviket utgjør 1 % av flomutbredelsen tilhørende romoppløsningen med 0.5 x 0.5 meter.

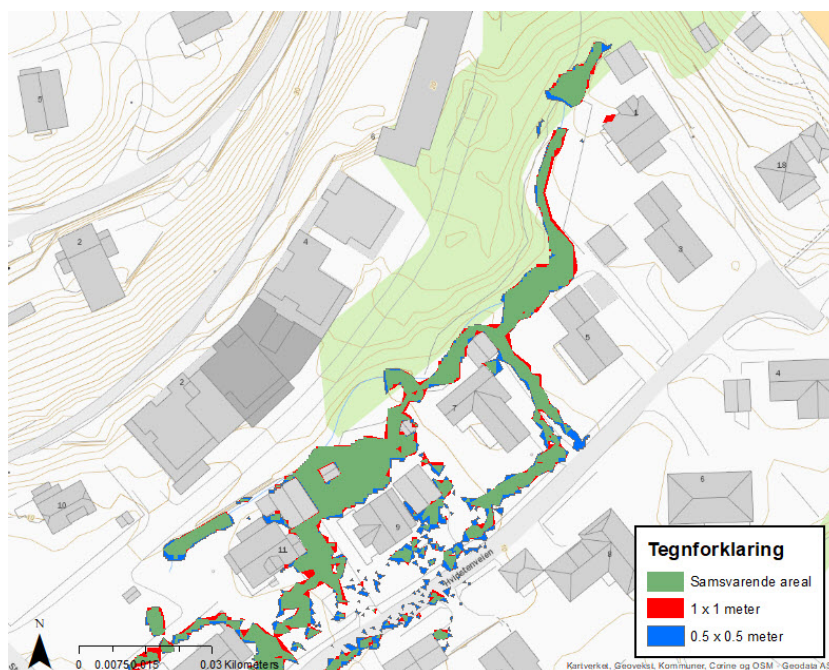


Figur 4.20: Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsninger i terrenngmodellen



Figur 4.21: Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsning for sidebekkeløpet

I figurene 4.21 og 4.22 vises forstørrede bilder av endring i flomutbredelse med ulike romoppløsning for hoved- og sidebekkeløpet. Generelt fremkommer større flomutbredelse ved finere romoppløsning i begge figurene.



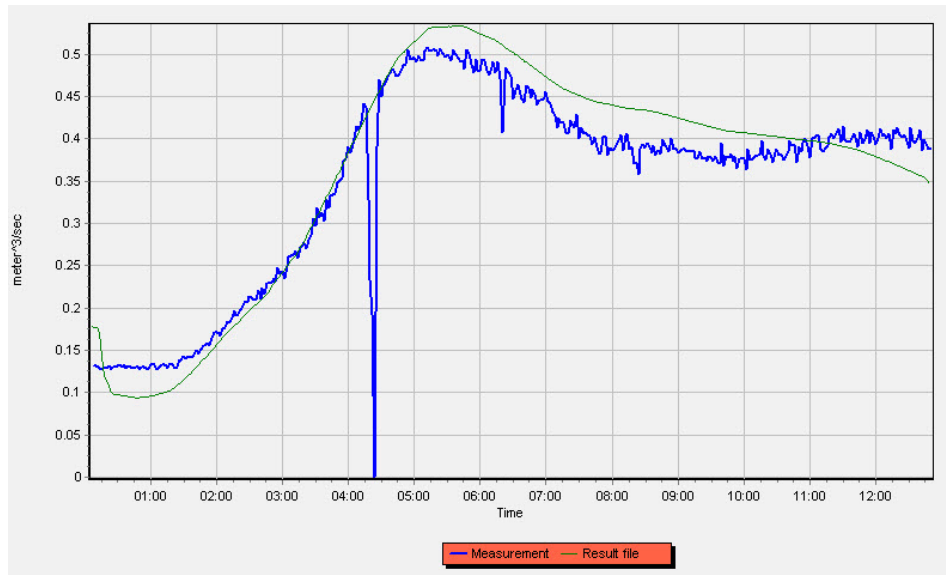
Figur 4.22: Sammenligning av flomutbredelse ved ulike romoppløsning for hovedløpet

4.5 Validering og evaluering av flommodell

I dette kapittelet presenteres resultater som benyttes til å evaluere og validere flommodellen. Utførelsen er tidligere beskrevet i metodekapittelet 3.5.3.

4.5.1 Validering av flommodellen

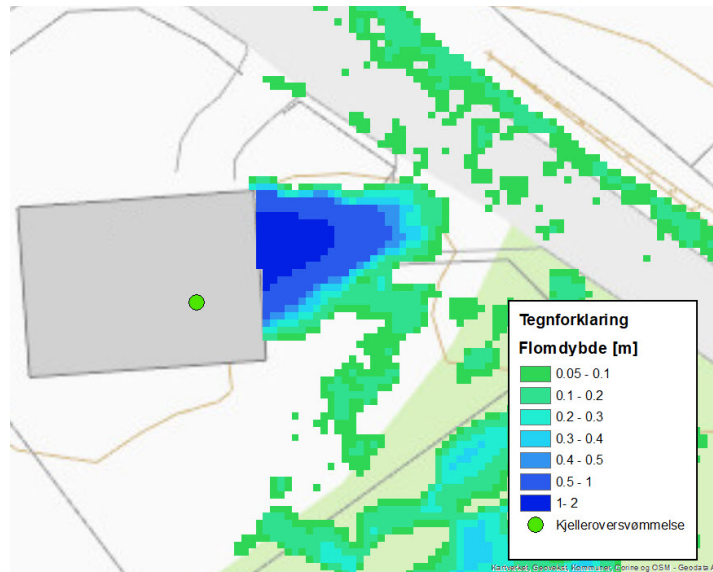
For å validere flommodellen ble det utført en kontroll av modellens kalibrering. I valideringen ble en uavhengig nedbørhendelse simulert i MIKE URBAN og kalibrerte parametersett testet. Figuren 4.23 viser simulering av nedbørhendelsen 19.10.2019, samt illustrerer korrelasjonen mellom estimert og målt vannføring. De to kurvene korrelerer godt i tidsrommet 03:00-05:00. Den modellerte flomtoppen, samt de 5 påfølgende timene, har en overestimert kurve. Ved de to første og siste timene av regnhendelsen er kurven underestimert. Figuren illustrerer en tydelig målefeil i tidsrommet 04:00-05:00.



Figur 4.23: Simulert og målt vannføring for den uavhengige nedbørhendelsen

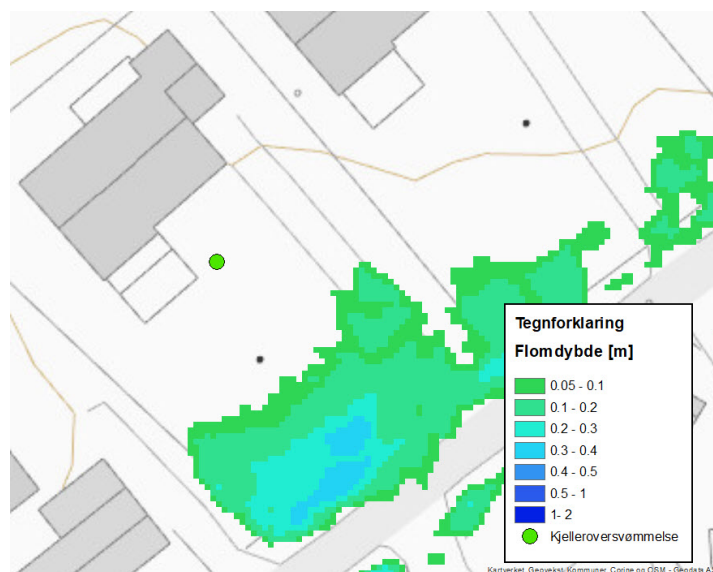
4.5.2 Evaluering av simulert resultat

Resultatene videre fremstiller evalueringen av modellen, steg 4 i modellprosedyren i figur 2.4. Figurene viser nærbilder av hus og tilhørende eiendom, der kommunen har dokumentasjon på overvannsflom forårsaket av 6. august-hendelsen. Hus og eiendom med dokumentert overvannsflom er markert og klassifisert. De to klassene av dokumenterte oversvømmelser er "kjelleroversvømmelse" og "overflatevann på eiendom". Figurene 4.24, 4.25 og 4.26 illustrerer de tre ulike tilfellene av dokumenterte kjelleroversvømmelser. Den simulerte vann dybden i figur 4.24 er på det dypeste 1-2 meter, samt synliggjør en tydelig vannopsamling inn mot husvegg.



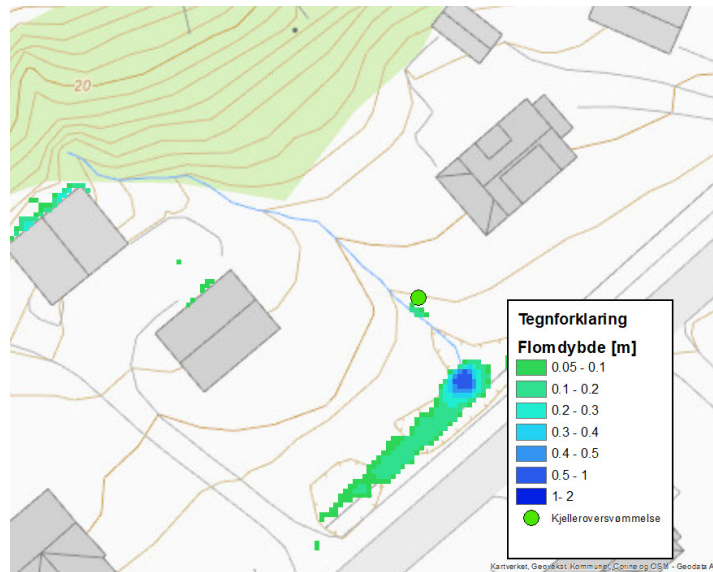
Figur 4.24: Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse

Figur 4.25 fremstiller en maksimal flomdybde på 30-40 centimeter. Den simulerte flomutbredelsen er kun lokalisert på nedre del av eiendom og berører ikke husvegg.

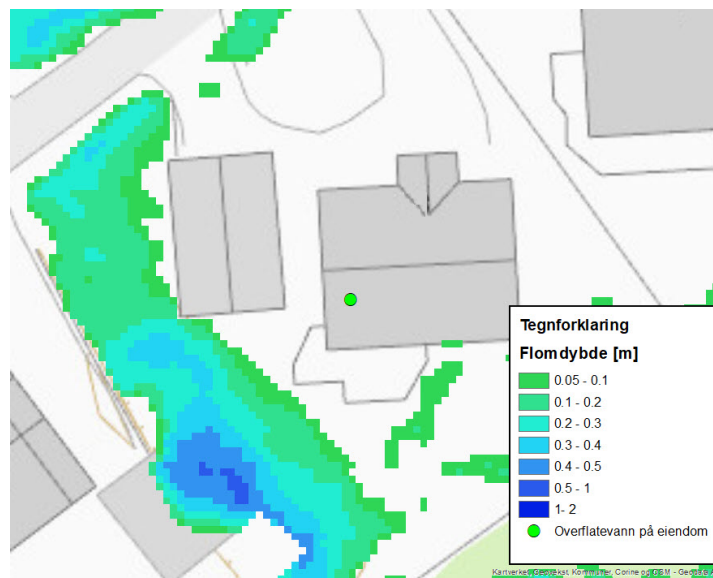


Figur 4.25: Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse

Figur 4.26 fremstiller at to bygninger har vannoppsamling inn mot vegg, der maksimal vanddybde er 20-30 centimeter. Figur 4.27 illustrer simulert flomutbredelse ved den rapporterte hendelsen "overvannsflom på eiendom". Den modellerte flomutbredelsen har en maksimal flomdybde på 0.5-1 meter. Flomutbredelsen berører tre bygninger og store deler av eiendom.



Figur 4.26: Simulert flomutbredelse med rapportert kjelleroversvømmelse



Figur 4.27: Simulert flomutbredelse med rapportert overflatevann på eiendom

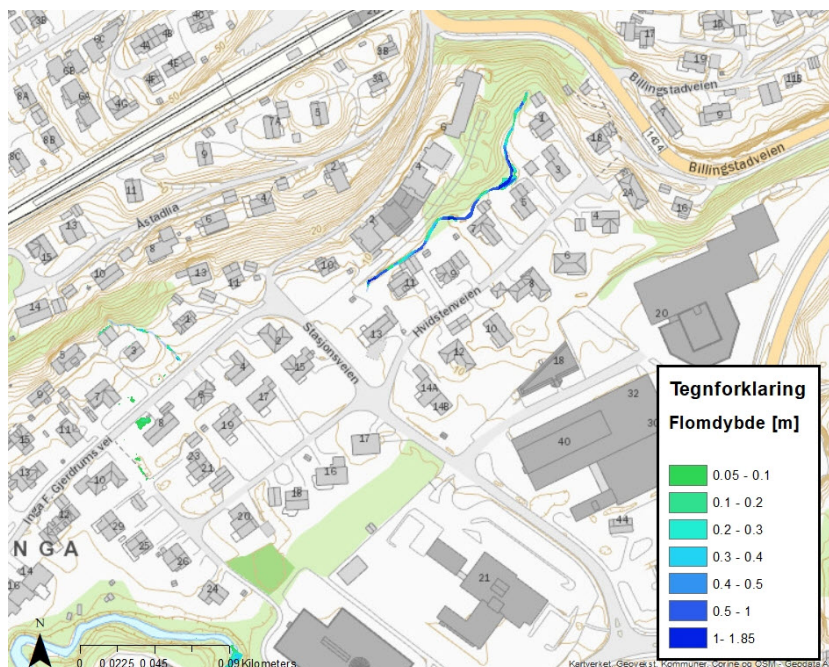
4.6 Implementering av tiltak

Resultatene som følger dette kapittelet fremstiller flomutbredelser etter implementerte tiltak, med hensikt å redusere flomutbredelse og flomdybde i analyseområdet. Effekten av de flomforebyggende tiltakene illustreres ved å sammenligne resultatene med 6. august-hendelsen.

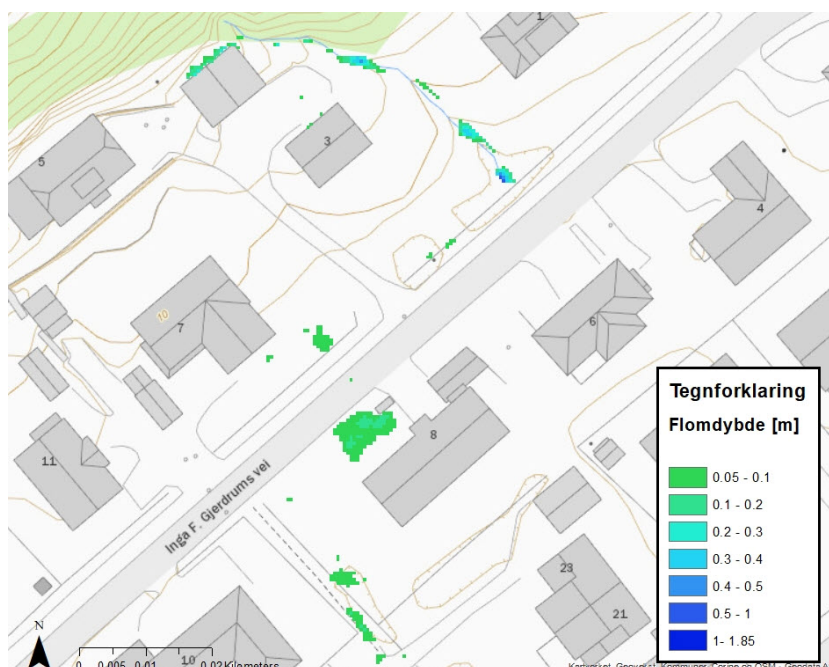
4.6.1 Tiltak 1

I det første tiltaket ble de to eksisterende åpne bekkeløpene i analyseområdet utbedret, beskrevet i metodekapittel 3.6.1. Figur 4.28 viser flomutbredelse etter implementert

tiltak. Figuren fremstiller en markant mindre flomutbredelse enn ved 6. august-hendelsen, samt større flomdybder i hovedbekkeløpet. Figur 4.29 viser nærbilde av flomutbredelse ved implementering av tiltak 1 tilknyttet Inga F. Gjerdrums vei. Figuren synliggjør lite endring av flomutbredelse sammenlignet med 6. august-hendelsen.



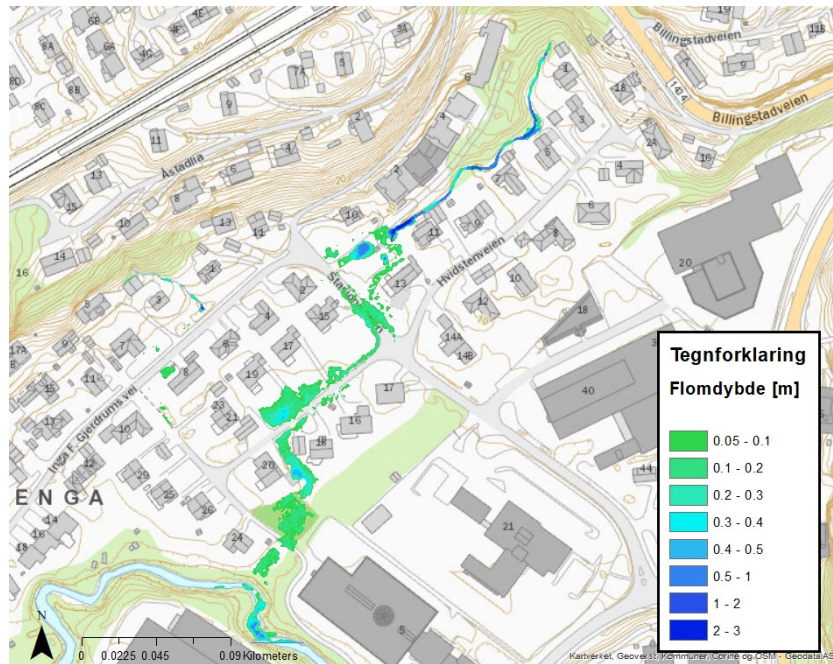
Figur 4.28: Flomutbredelse etter implementert tiltak 1



Figur 4.29: Flomutbredelse ved sidebekkeløpet etter implementert tiltak 1

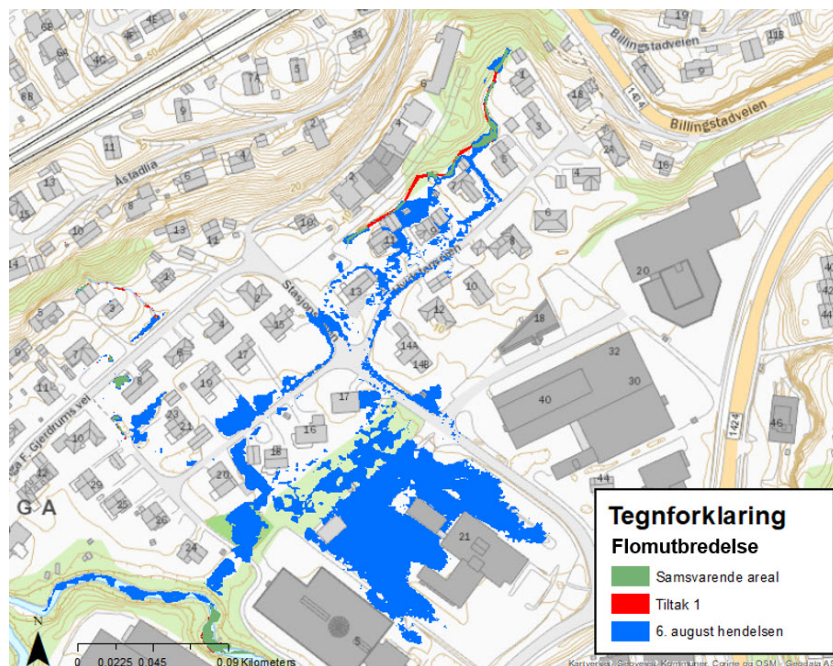
Første simulering av tiltak 1 ble gjennomført uten å nedjustere bekkeinntaket, tilhørende hovedbekkeløpet, til celle med lavest terrengverdi. Figur 4.30 viser flomutbredelsen ved

feilplassert bekkeinntak. I figuren fremkommer tydelig større flomutbredelse enn ved simuleringen med korrekt justert bekkeinntak.



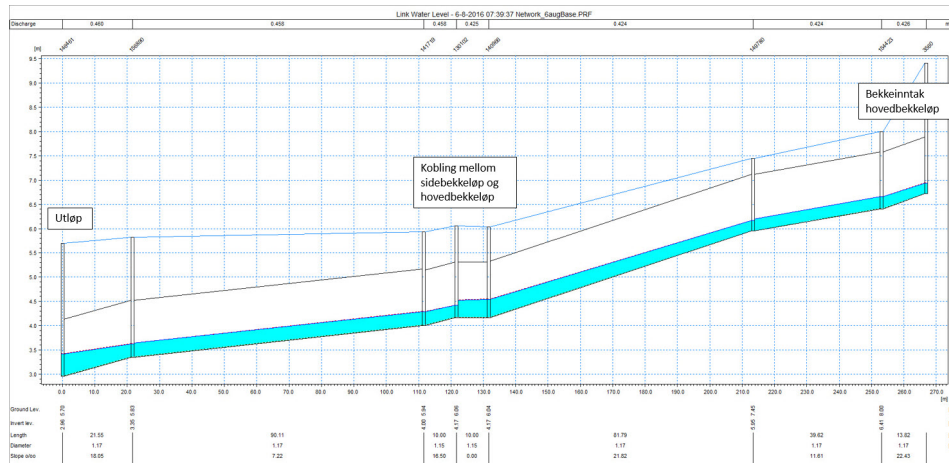
Figur 4.30: Flomutbredelse med ukorrekt plassering av hovedbekkeløpets inntak

I figur 4.31 blir flomutbredelsen fra 6. august-hendelsen sammenlignet med flomutbredelsen tilhørende tiltak 1. Det er lite samsvar mellom de to hendelsene, med unntak av enkelte områder nærliggende bekkeløpene. Det er tydelig at vannet følger hovedbekkeløpet, ved implementering av tiltak 1, bedre enn ved 6. august-hendelsen.

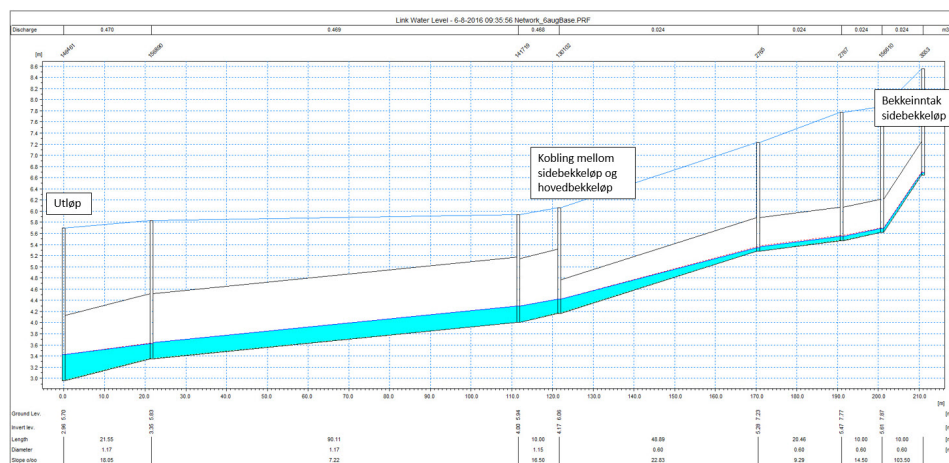


Figur 4.31: Flomutbredelse ved tiltak 1 og 6. august-hendelsen

Figurene 4.32 og 4.33 fremstiller fyllingsgraden i lengdeprofilene tilhørende hoved- og sidebekkeløpet, markert i figur 4.12. Koblingspunktet, der de to lukkede bekkene sammenkobles til en ledning, er markert. Resultatet viser at begge ledningene har fremdeles god kapasitet og rørene er mindre enn halvfulle.



Figur 4.32: Hovedbekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 1

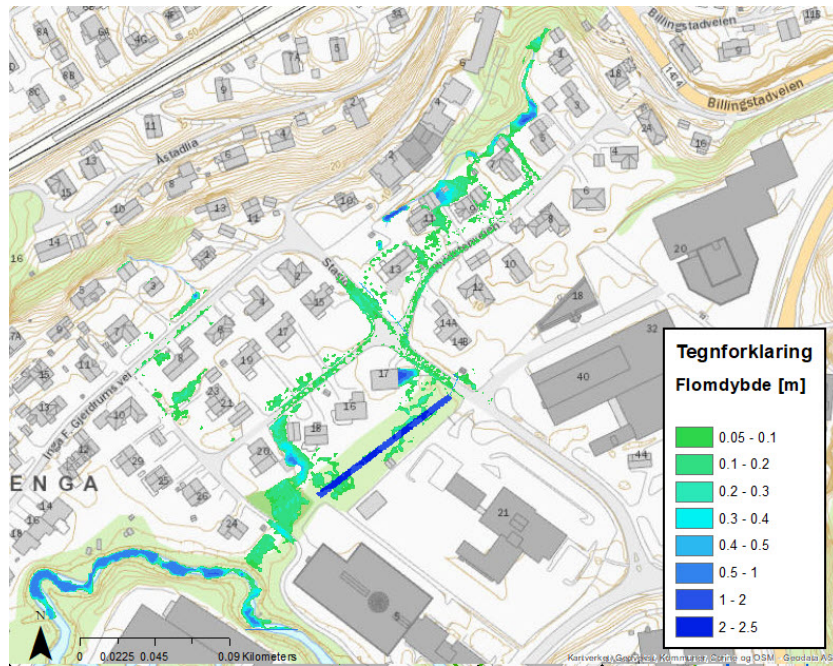


Figur 4.33: Sidebekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 1

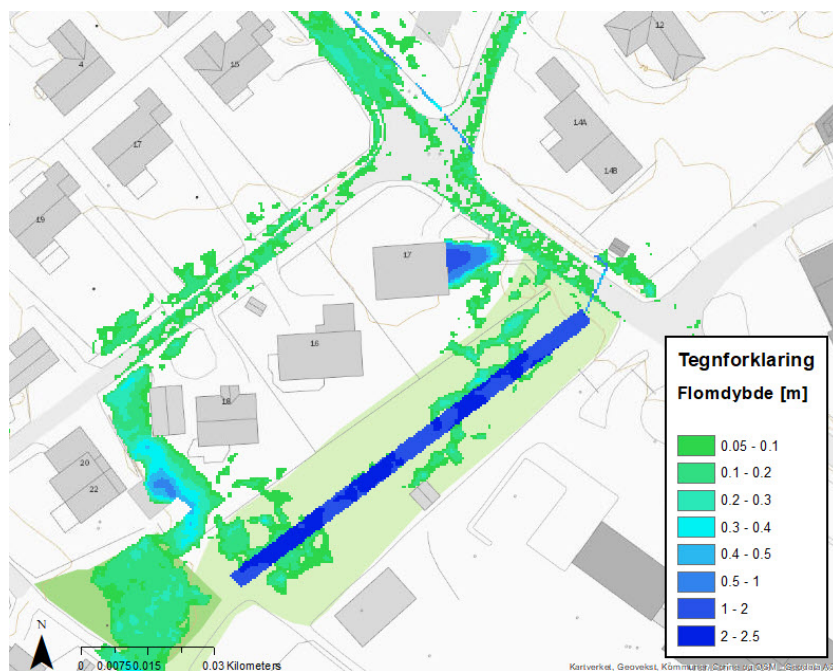
4.6.2 Tiltak 2

I tiltak 2 ble det implementert et fordrøyningsbasseng, tilhørende veggrøft og kantstein langs alle veger, beskrevet i metodekapittelet 3.6.2. Figur 4.34 og 4.35 fremstiller flomutbredelsen i analyseområdet etter implementert tiltak, samt synliggjør økt flomdybde og redusert flomomfang. Det fremkommer at største flomdybde i modellen, tilhørende fordrøyningsbassenget, er mellom 2-2.5 meter. Det synliggjøres signifikant reduksjon av flomomfang sørøst for bassenget.

Figur 4.36 synliggjør at flomutbredelsen tilhørende tiltak 2 leder vannet langs veg og til modellert fordrøyningsbasseng. Flomomfanget sørøst i området er signifikant mindre, men tiltaket har minimal effekt på dokumenterte oversvømmelser.

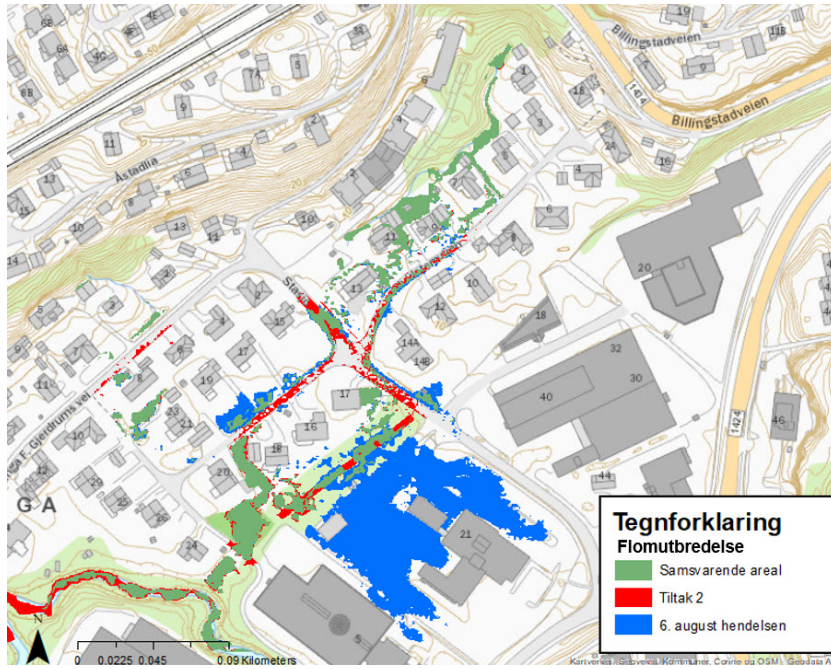


Figur 4.34: Flomutbredelse etter implementert tiltak 2

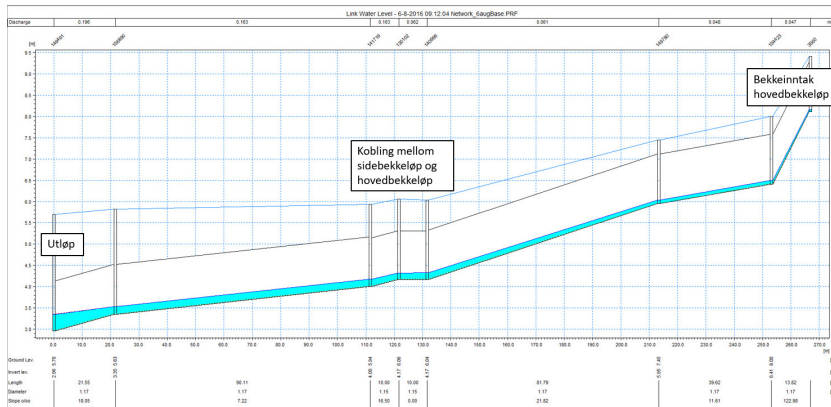


Figur 4.35: Flomutbredelse ved det implementerte fordrøyningsbassenget

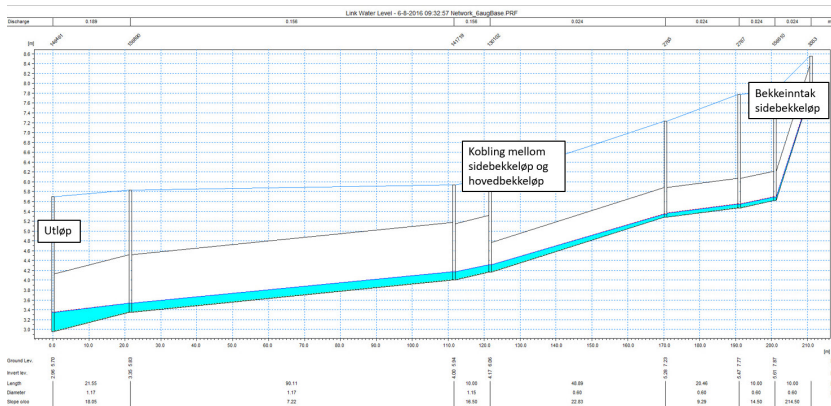
Figurene 4.37 og 4.38 illustrerer fyllingsgraden i lengdeprofilene tilhørende hoved- og sidebekkeløpet, markert i figur 4.12. Det fremkommer i figurene at ledningsnettets har god kapasitet ved implementert tiltak.



Figur 4.36: Flomutbredelse ved tiltak 2 og 6. august-hendelsen



Figur 4.37: Hovedbekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 2



Figur 4.38: Sidebekkeløpets fyllingsgrad etter implementert tiltak 2

5. Diskusjon

Dette kapittelet vil referere til resultatene fremstilt i resultatkapittel 4. I hovedsak vil modellens oppbygging og tilhørende analyser diskuteres. MIKE FLOOD består av to underliggende modeller og det er viktig å få frem usikkerhetene, tilknyttet hver enkelt modell, for å kunne tolke modellens gyldighet og resultat.

5.1 Validering av rådata

Målefeilene observert i resultatene, figur 4.7, antas å være forårsaket av vannføringsmåleren. Vannføringsmåleren er plassert ved enden av et utløp, som indikerer fare for turbulens. Målemetoden er basert på ultrasonisk krysskorrelasjon, og teorien tilsier at denne metoden kan være ømfintlig for turbulens som medfører usikkerhet (Strunz mfl., 2003). Dette anses som en mulig årsak til målefeilene i resultatet.

Beliggenheten til valgt nedbørmåler anses som representativ for analyseområdet. Nedbørmåleren har de største målingene for 6. august-hendelsen i Asker kommune, og tilsier at nedbørmengden kan være overestimert. Dette anses som bedre enn underestimerte data, da modellen kan gi bedre overensstemmelse med fremtidens regnskyll og tilhørende tiltak. Data for evapotranspirasjon og temperatur er ikke oppdatert. Dette kan medføre usikkerhet, da det er antatt at data fra 2015 er gyldige for 6. august-hendelsen og kalibreringen.

Benyttet laserdata til utarbeidelse av terrengmodellen kan være utdatert. Dette kan medføre at grøfter og terrengkarakteristikk ikke stemmer med eksisterende situasjon. En stor usikkerhet er laserdataens utforming av bekkeløpet. Det er usikkert om laserdataen fremstiller terrenghøyden i bekkeløpets bunn eller vannspeil. Dersom sistnevnte er gjeldende kan bekkeløpets dybde være uoverensstemmende med faktisk dybde, og medføre større simulert flomutbredelse.

5.2 Følsomhetsanalyse

Kalibreringsparametre

Det kommer tydelig frem fra resultatene at valg av parametre for kalibrering er avgjørende for tilfredsstillende resultat. I denne oppgaven ble parameteren koeffisient for volumstrøm på overflate, vist i figurene 4.1 og 4.2, en avgjørende parameter for å justere flomtoppens høyde. Denne parameteren utgjorde kun utslag ved justering av parametersettet tilhørende sone 3, den avgjørende sonen å kalibrere. Justering av impermeabiliteten i sone 1 og 2 gav utslag ved å endre form på estimert kurve. Dette indikerer at de to nevnte sonene hadde lite bidragende areal, samt at de urbane områdene var av liten betydning for videre kalibrering.

Terrengmodellens følsomhet

I bakgrunnskapittel 2.2.6 presenteres terrengmodellens romoppløsning som avgjørende for modellens resultat, der grovere romoppløsning medfører større flomutbredelse og lavere vanndybde. Resultatet i figur 4.20 viser samsvarende flomutbredelse ved grovere romoppløsning, dette motsier nevnt teori. Resultatet viser at modellen med finere romoppløsning gir større flomutbredelse, vist i figurene 4.21 og 4.22. Dette kan skyldes lite variasjon i cellenes gjennomsnittlige terrenghøyde ved valgte romoppløsninger. I den finere modellen kan terskler fremkomme og føre til oppstuvning i bekkeløpene, samt større flomdybder, dette samsvarer med teorien. I resultatfilene tilhørende de to simuleringene ble det observert forskjell i totalt vannvolum på overflaten, der volumstrømmen i ledningsnettene forble uendret. Dette anses som en stor svakhet med MIKE FLOOD, da det synliggjøres uoverensstemmelse i totalt vannvolum i modellen ved de to simuleringene av 6. august-hendelsen.

5.3 Flommodellen

5.3.1 Utarbeidelse av flommodell

MIKE URBAN 1D-modell

For å kalibrere modellen er altså ”prøve- og feilemetoden” benyttet. Ved å bruke denne metoden kan flere parametersett gi samme resultat, og medfører usikkerhet tilknyttet hver enkelt parameterverdi. I denne oppgaven er det benyttet tre uavhengige parametersett for kalibrering av den hydrologiske modellen, og dette gir større usikkerhet. Det fremkom i følsomhetsanalysen at nedbørfeltets store naturlige felt var avgjørende for kalibreringen. Et slikt felt er uvanlig for MIKE URBAN å kalibrere, da flomtappen

forsinkes og anbefalte verdier gir feilestimert kurve.

Kalibreringsresultatene, vist i figurene 4.5, 4.6 og 4.7 indikerer at kombinasjonen av valgte parametersett viser tildels overensstemmelse med målte data, men parametersettene kan kalibreres ytterligere. Avviket ved flomtopp mellom estimert og målt kurve er tilsvarende likt for regnhendelsene. Nedbørhendelse 1 var regnhendelsen med størst likhet til 6. august-hendelsen, derav den viktigste hendelsen å kalibrere modellen mot. IVF-kurven for Asker, figur 3.7, estimerer gjentaksintervallet for nedbørhendelse 1 til mindre enn 2 år. Etersom 6. august-hendelsen hadde 200 års gjentaksintervall, er det mulig at modellen ikke er tilpasset hendelser av denne størrelsen.

Det modellerte ledningsnett kan være mindre virkelighetsnært grunnet utilstrekkelig modellteknisk kompetanse, feilaktige mål og mangelfull data. Ved dette kan det simulerte resultatet gjengi for stor eller lav hastighet og være utslagsgivende på flomtoppen. De åpne bekkeløpene, modellert som 1000 millimeter betongrør, gir trolig for høy hastighet i modellen ved at bekkeløpets ruhet, terskler og innsnevring er neglisjeres. Forenklingen er gjort grunnet høy hastighet i de eksisterende åpne bekkeløpene, samt at kapasiteten i de modellerte ledningene (1000 millimeter) er god. Stikkledninger er ekskludert fra modellen og kan vanskeliggjøre verifisering av årsak til de dokumenterte kjelleroversvømmelsene. Ekskluderingen kan medføre at vannføringen i ledningsnett underestimeres.

MIKE 21 2D-modell

Teorien nevnt i bakgrunnskapittel 2.2.5 tilsier at batymetri med finere romopløsning fremstiller resultat med større presisjon, og utgjorde dermed bakgrunnen for valg av romopløsning. Det fremkom i følsomhetsanalysen at grovere romopløsning ville gitt tilstrekkelig resultat. Dette ville redusert modellens kjøretid fra 36 timer til 14 timer.

Valget å ekskludere regn i MIKE 21-modellen, medfører at overflateavrenningen i terrenget er tilført fra ledningsnett i MIKE URBAN. Dette innebærer at regnet ikke fordeles naturlig på terrengoverflaten og kan i enkelte tilfeller gi underestimerte resultater. Ekskluderingen kan gjøre at flomforløp og påfølgende kjelleroversvømmelser, utover flom forårsaket av bekkeløp, ikke synliggjøres i modellen. I MIKE 21-modellen er infiltrasjon ekskludert, dette kan resultere i overestimert flomdybde. Hendelsen 6. august hadde svært høy intensitet og kort varighet, og infiltrert vannmengde anslås dermed som begrenset og kan neglisjeres.

MIKE FLOOD 1D-2D-modell

Det antas at de 12 koblingspunktene er tilstrekkelige for flomutveksling mellom 1D- og 2D-modellen for analyseområdet. Dette fremkommer i resultatet, figurene 4.13 og 4.14, der bekkeinntakene og ledningene ikke utgjør en begrensende faktor ved vannføring inn eller ut av koblingspunkt. Vannføringen i de lukkede bekkene er omtrent $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ og tilsier at modellteknisk valg ikke begrenser bekkeinntaket. Resultatene synliggjør at de lukkede bekkeløpene har god kapasitet og lav fyllingsgrad. Dette tydeliggjør at kjelleroversvømmelsene trolig ikke er forårsaket av fulle rør.

Simuleringsperioden er begrenset av modellens kjøretid. Det ble derfor valgt å ikke simulere regnhendelser med kjøretid lengre enn 48 timer. Simuleringstiden på 7 timer antas som tilstrekkelig, samt at 6. august-hendelsens flomtopp er inkludert. Dette antas ut fra kalibrert konsentrasjonstid, samt at den mest intense timen inntraff mellom klokken 6 og 7, omtrent 2 timer etter simuleringsstart. Antakelsen kan føre til feilestimering, da nedbørfeltets flomtopp kan være forsinket. I denne oppgaven styres modellert nedbør i MIKE FLOOD fra MIKE URBAN. Dette er en sentral kilde til usikkerhet ettersom nedbør i MIKE FLOOD også kan styres fra MIKE 21. Valg av modellert nedbør er avgjørende for modellens flomforløp. Ulempen ved valget er at simuleringen ekskluderer uniform fordeling av nedbør på terrengmodellen, og medfører at enkelte lokale flomforløp ikke vil synliggjøres i resultatet.

Fordeler ved å modellere nedbør i MIKE URBAN er at terrengmodellens størrelse kan minimeres for å unngå lang kjøretid. Ved dette kan avrenning fra hele nedbørfeltet være inkludert, selv for større nedbørfelt. Metoden muliggjør å implementere en god hydrologisk modell med infiltrasjon, der evapotranspirasjon og temperatur inkluderes. Den hydrologiske modellen har vært avgjørende for et godt kalibreringsresultat, samt for valg av nedbørmetode. Det er mulig å implementere infiltrasjon i MIKE 21. Dette ved egenutviklet infiltrasjonsmodell i MIKE URBAN, som ikke baseres på anerkjente modeller som Horton og Green-Ampt. Modellen er basert på konstant infiltrasjon som manuelt defineres cellevis over et område. I denne oppgaven, grunnet utdatert ledningsnettmodell, ble det valgt å vektlegge kalibrering i MIKE URBAN og tilhørende hydrologisk modell.

5.3.2 Modellvalidering og evaluering

I resultatet av modellvalideringen, figur 4.23, fremstilles god overensstemmelse mellom estimert og målt kurve. Dette antyder en tilstrekkelig kalibrering. Flomtoppen er noe overestimert, men avviket er mindre enn i kalibreringsresultatet. Resultatet indikerer at MIKE URBAN kan fremstille overensstemmende resultat av simulert og målt avrenning, selv for nedbørfelt med stor andel naturlige områder.

Simuleringen av 6. august-hendelsen indikerer at kjelleroversvømmelsene som inntraff ikke skyldes fulle overvannsledninger. Kategori 2 og 3, klassifisert og nevnt i bakgrunnskapittel 2.1.1, kan ansees som aktuelle årsaker for de rapporterte kjelleroversvømmelsene i modellevalueringen.

De markerte hendelsene i figurene 4.24, 4.25, 4.26 og 4.27 har rapporterte ”kjelleroversvømmelse” og ”overflatevann på eiendom”. Generelt indikerer modellens resultat overensstemmelse med de rapporterte hendelsene. Flomutbredelsen varierer i omfang, men i alle tilfellene er overvannsflom observert på aktuelle eiendommer. I denne oppgaven blir kjelleroversvømmelser antatt i tilfeller med simulert vannoppsamling inn mot husvegg. Det antas modellfeil, der simulert resultat viser under- eller overestimert vannoppsamling på eiendom, som forårsakes av følgende:

- Ekskludert infiltrasjon i MIKE 21-modellen
- Modellert nedbør styres av MIKE URBAN og er ikke uniformt fordelt på terrengmodellen
- Utdatert laserdata i terrengmodellen
- Romopløsningen kan ekskludere små lokale variasjoner i terreng
- Stikkledninger og taknedløp er ekskludert fra modellen

I denne oppgaven antas de største feilkildene i MIKE FLOOD-modellen å være modellert nedbør, ekskludert infiltrasjon i terrengmodellen, kalibrering av ledningsnettmodellen og mangelfull laserdata. Evalueringen viser at MIKE FLOOD-modellen kan indikere overvannsflom og kjelleroversvømmelser ved 6. august-hendelsen. Dette bekreftes av de dokumenterte flomhendelsene på bygg og eiendom denne dagen. Modellen viser svakheter ved klassifisering av årsak til kjelleroversvømmelsene, men god kapasitet i ledningsnett indikerer at overflatevann er årsaken. Det tydeliggjøres at terrengutformingen er hovedkilden til vannoppsamlingen, samt antas å være årsaken til kjelleroversvømmelsene.

5.3.3 Flomutbredelse 6. august 2016

6. august-hendelsen indikerer at hovedbekkeløpet er kilden til flomutbredelsen sentrert på Askenga. Resultatene antyder at bekkeløpets dybde, form og svinger ikke er godt nok representert i terrengmodellen. Dette bekreftes ved ledningsnettes fyllingsgrad. Det er stor usikkerhet tilknyttet plasseringen av sidebekkens utløp, da drenskummer ikke kan modelleres realistisk. Den tilhørende modellerte overvannsflommen anses dermed som mindre virkelighetsnær, men gir en indikasjon på områdets flomforløp og vannoppsamling. Tidsserien, figur 4.15, tydeliggjør at flommen forårsakes av bekkeløpene, samt at

utløpene tilfører vann til terrengmodellen. Flomtoppen antas å være inkludert i valgt simuleringstid, da ingen flomendring oppstår i tidsrommet 10:15 til 10:45, figur 4.16.

5.4 Vurdering av tiltak

Metoden benyttet for implementering av tiltak i MIKE FLOOD, kan fremstille endring i overvannsflommen som inntraff 6. august 2016. Ekskludert infiltrasjon, utdatert laserdata og korreksjon av nodenes terrenghøyde anses som de største feilkildene ved simulering av tiltakene, samt MIKE FLOOD-modellens nevnte mulige feilkilder. Videre vil tiltakene gjort for flomforbedring diskuteres ytterligere.

Tiltak 1

Det modellerte tiltaket viser god flomforebyggende effekt, figur 4.31. Dette ved mindre flomutbredelse, samt større flomdybde i bekkeløpene. Ved første simulering av tiltaket, figur 4.30, var bekkeinntaket ikke plassert i lavestliggende celle. Bekkeinntaket ble nedjustert og nytt resultat, figur 4.28, viser at plasseringen er avgjørende for korrekt vannfordeling mellom ledningsnett og terrengoverflate. Bekkeinntakets nedjustering påvirker den tilkoblede ledningens fall, men som illustrert i figurene 4.32 og 4.33 har ledningene fremdeles riktig fallretning. Dette er et modellteknisk valg, og kan medføre utfordringer ved gjennomførelse i praksis. Det er ikke utført grunnundersøkelser utover løsmassekart, hentet fra NGU, som klassifiserer grunnen i området som fyllmasser av antropogent materiale. Bekkeinntakets utforming og fyllmassene i området bør undersøkes nærmere ved en eventuell iverksettelse av tiltaket.

Tiltak 2

Det simulerte tiltaket gir mindre flomforebyggende effekt enn tiltak 1, da flomutbredelsen er markant større. Ved implementert kantstein følger vannet vegene i større grad, vist i figur 4.36. I modellen tilegnes hele vegnettet kantstein, dette anses som lite gjennomførbart, da innkjørslene ikke er hensyntatt. Terrengets utforming var avgjørende for fordrøyningsbassengets effekt og resulterte i en uforventet stor flomutbredelse. Tiltaket kan forbedres ved å implementere utbedrende flomveger, samt inkludere infiltrasjon for realistisk fremstilling av fordrøyningsbassenget. Fordrøyningen har stor dimensjon for å visualisere tiltakets effekt, men mindre dimensjoner kan være hensiktsmessig. Figur 3.5 viser at grøntarealets grunnforhold kan inneholde kvikkleire, dette bør tas i betraktning. Fordrøyningsbassenget er modellert som en fordypning i terrenget. En stor svakhet ved den benyttede metoden er at vannføringen ut av bassenget og tilhørende utløpshydrogram ekskluderes. Modellert tiltak vil dermed ikke stemme overens med virkeligheten og bør vurderes ved eventuell iverksettelse.

5.5 anbefalinger og videre arbeid

Basert på resultatene fra flommodellen vil det nå komme anbefalinger til Asker kommune. Flommodellen indikerte tydelig at de åpne bekkeløpene var årsaken til flomutbredelsen på Askenga ved 6. august-hendelsen. Dette bekreftes av den gode kapasiteten til ledningsnett i analyseområdet. Modellen indikerte at flomforebyggende tiltak hadde innvirkning, spesielt de utbedrende bekkeløpene, derfor anbefales flomforebyggende tiltak 1. Før en eventuell iverksettelse, bør bekketraseen vurderes nærmere. Enkelte deler av bekketraseen har, i følge flommodellen, tilstrekkelig kapasitet og kan trolig bevares. Det kan være store kostnader tilknyttet en bekkeutvidelse, der hus og eiendom kan berøres, en nærmere vurdering kan minimere kostnadsutfallet.

Metoden for utarbeidelse av flomforebyggende tiltak, utført i ArcGIS og MIKE 21, har vist flere svakheter. Tredimensjonal prosjektering er blitt vanligere å benytte i VA-prosjektering. Det kunne derfor vært interessant å 3D-modellere tiltakene i programvarer som Revit eller BIM, for å videre synliggjøre effekten i MIKE FLOOD.

Følsomhetsanalysen indikerte liten endring av flomutbredelse ved bruk av romoppløsningene 1 x 1 meter og 0.5 x 0.5 meter. Ettersom kjøretiden avhenger av terrengmodellens romoppløsning, kunne det vært interessant å studere hvor grov romoppløsningen kan være før flomforløpet endres. En slik analyse kunne redusert modellens kjørtid betraktelig.

I MIKE FLOOD kan nedbør tilføres fra MIKE URBAN eller MIKE 21. I denne modellen er det valgt å benytte MIKE URBAN. Ved nedbørtilførsel i MIKE 21 kan et større avrenningsforløp på terrengoverflaten fremkomme. Det hadde derfor vært interessant å sammenligne flomutbredelsen i MIKE FLOOD, ved de to nedbørtilførslene.

6. Konklusjon

I denne masteroppgaven er en sammenkoblet MIKE FLOOD-modell utarbeidet, samt bruksområdet analysert. Analyseområdet Askenga, et boligområde i Asker kommune, utgjorde modellområdet. MIKE FLOOD-modellen er kalibrert, ved hydrologiske parametre i MIKE URBAN, mot innmålte vannføringsdata fra perioden oktober 2019 til januar 2020. Modellens nedbørfelt består av et stort naturlig felt og er uvanlig ved urban kalibrering. Validert resultat indikerte at MIKE URBAN kan benyttes til å simulere avrenning for et stort naturlig felt. Dette er tydeliggjort i resultatet, ved god overensstemmelse mellom målt og simulert avrenning.

For å analysere bruksområdet til modellen ble en 200-års flom, som inntraff 6. august 2016, simulert. Modellen ble evaluert mot dokumenterte kjelleroversvømmelser som forekom denne dagen. Evalueringsresultatene indikerte at årsakene til kjelleroversvømmelsene var overflateavrenning og terrengutforming, som bekreftes av den gode kapasiteten i ledningsnettet. Enkelte av de dokumenterte kjelleroversvømmelsene viste uoverensstemmelse med simulert resultat. Modellert nedbør, ekskludert infiltrasjon i MIKE 21, kalibrert MIKE URBAN-modell og mangelfull laserdata kan være feilkildene til uoverensstemmelsen. Dette tilsier at MIKE FLOOD tildels antyder årsak til kjelleroversvømmelsene som inntraff 6. august 2016.

Modellens bruksområde ble avslutningsvis analysert ved å implementere flomforebyggende tiltak. Tiltakene hadde en positiv innvirkning på flomutbredelsen, og resultatene tilhørende tiltak 1 indikerte færre av de dokumenterte kjelleroversvømmelsene. Ved å inkludere infiltrasjon i MIKE 21, oppdatere laserdata, implementere utløpshydrogram og beholde nodenes terrenghøyde i MIKE URBAN kan en mer virkelighetsnær flomforebyggende effekt fremstilles. Flomforbedringen i resultatet indikerer at modellen er egnet til å vurdere flomforebyggende tiltak for 6. august-hendelsen. Det anbefales, basert på erfaringer fra oppgaven, at tilfredsstillende modellering kan oppnås ved en grovere romopløsning enn 0.5 x 0.5 meter. Det anbefales også bruk av hydrologiske RDI-parametre ved kalibrering av en MIKE URBAN-modell med stor andel naturlige felt. Det konkluderes med at MIKE FLOOD er et godt verktøy for å fremstille virkelighetsnære flomforløp, samt kan være tid- og kostnadsbesparende ved prosjektering av overvannstiltak.

Referanser

- Asker Kommune (2018a). Kommunedelplan vann. (April). URL: <https://www.asker.kommune.no/vann-og-avlop/planer-for-vann-og-avlop/>.
- Asker Kommune (2018b). *Kommuneplan for Asker Aktsomhetskart for kvikkleire og ras*. URL: file:///C:/Users/Runa/Documents/5.%20Vann/Masteroppgave/Kilder/asker_kommune_kommuneplan_2018-2030_temakart_kvikkleire-og-ras.pdf.
- Asker kommune (2020). VA-Norm. (Februar). URL: <http://va-norm.no/pdf/0/all/7/>.
- Bates, P. D. og De Roo, A. P. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology* 236 (1-2): 54–77. DOI: [10.1016/S0022-1694\(00\)00278-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00278-X).
- Becker, A. M. A. og Muthanna, T. M. (2016). Trinn 1 : Reduser overvannet i avløpsnettets ved å frakoble taknedløp. (Desember): 359–369.
- Chen, A. S., Djordjević, S., Leandro, J. og Savić, D. A. (2010). An analysis of the combined consequences of pluvial and fluvial flooding. *Water Science and Technology* 62 (7): 1491–1498. DOI: [10.2166/wst.2010.486](https://doi.org/10.2166/wst.2010.486).
- Chen, A. S., Djordjević, S., Leandro, J. og Savić, D. A. (2007). The urban inundation model with bidirectional flow interaction between 2D overland surface and 1D sewer networks. *Novatech*: 465–472. DOI: [2042/25250](https://doi.org/10.2166/novatech.2007.25250).
- Chin, D. A., Mazumdar, A. og Roy, P. K. (2013). *Water-Resources Engineering*. third. Prentice Hall Englewood Cliffs: 495.
- DHI (2003). Mike 21 flow model - Hints and recommendations in applications with significant flooding and drying: 1–8.
- DHI (2008). MOUSE RDII User Guide: 11–13. URL: http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/US/MOUSE_RDII_UserGuide.pdf.
- DHI (2014a). MIKE FLOOD Training, Modelling of Urban Flooding: 1–34.
- DHI (2014b). MIKE URBAN Collection System User Guide: 19–263.
- DHI (2014c). MOUSE Pipe Flow Reference Manual. (1): 1–5. DOI: [10.1007/s13398-014-0173-7.2](https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2).
- DHI (2014d). Rainfall Dependent Inflow and Infiltration Reference Manual: 9–30.
- DHI (2016). MIKE 21 Flow Model User Manual: 47–120.
- DHI (2017a). MIKE FLOOD User Manual: 11–91.
- DHI (2017b). MOUSE - Runoff Reference Manual: 7–14. DOI: [10.1016/j.matchar.2009.10.005](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.005).
- DHI (2018). MIKE 21 FLOW MODEL FM, Reference manual: 1–2. URL: www.mikepoweredbydhi.com.

- Engeland, S. (2018). *Høydesystemet NN2000*. URL: <https://www.kartverket.no/geodataarbeid/Geovekst/Hoydegrunnlag/>.
- ESRI (2019). *What is lidar data?* URL: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm?fbclid=IwAR3PkWbsjMa0gK8BqaHQngyov3-T34WRymUTYuGR9DV1kTYWqZBxalouMXY>.
- Førland, E., Mamen, J., Dyrddal, A. V., Grinde, L. og Myrabø, S. (2015). *Dimensjonerende korttidsnedbør*: 27–48.
- Hanssen-Bauer, I., Førland, E., Haddeland, I., Hisdal, H., Mayer, S., Nesje, A., Nilsen, J., Sandven, S., Sandø, A., Sorteberg, A. og Ådlandsvik, B. (2009). Klima i Norge 2100. (2): 92–126. URL: www.miljodirektoratet.no/20804.
- Hardang, H. (2020). Samtale med DHI ansatt Halvor Hardang.
- Hunter, A. P. G. og Bishop, A. P. I. (2001). Introduction to GIS Definition of GIS. *Introduction to GIS*: 1–13. URL: <http://www.sli.unimelb.edu.au/gisweb/%0ADr>.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013*: 119–159. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf.
- Kartverket (2009). Kart og geodata: 9–41.
- Kartverket (2013). Produktspesifikasjon Nasjonal modell for høydedata fra laserskanning (FKB-Laser). (Version 2.0): 1–27.
- Kartverket (2016). *Produktark: DTM 10*. URL: https://register.geonorge.no/data/documents/Produktark_DTM%2010_v4_dtm10_.pdf.
- Kartverket (2018). *Referanserammer for Noreg*. URL: <https://www.kartverket.no/Posisjonstjenester/bruke-referanserammer/Referanserammer-for-Noreg/>.
- Kartverket (2019). *Kartprojeksjonar*. URL: <https://www.kartverket.no/Posisjonstjenester/Kartprojeksjoner/>.
- Kartverket (2020). Brukerveiledning om formater og programvare for kartdata. URL: <https://www.kartverket.no/data/brukerveiledning-for-kartdata/>.
- Kourtis, I. M., Bellos, V. og Tsihrintzis, V. A. (2017). Comparison of 1D-1D and 1D-2D urban flood models. (September): 1–6.
- Lindholm, O., Endresen, S., Thorolfsson, S., Sægrov, S., Jakobsen, G. og Aaby, L. (nov. 2008). A162 - Veiledning i klimatilpasset overvannshåndtering. *Norsk Vann Rapport* (162): 11–70.
- Mark, O., Hénonin, J., Domingo, N., Russo, B., Chen, A. og Djordjević, S. (2014). *Report and papers with guidelines on calibration of urban flood models*. Tekn. rapp.: 5–33. URL: <https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10871/21227>.
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B. og Djordjević, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of Hydrology* 299 (3-4): 284–299. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.08.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014).
- Marks, K. og Bates, P. (2000). Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes* 14 (11-12): 2109–2122. DOI: [10.1002/1099-1085\(20000815/30\)14:11/12<2109::AID-HYP58>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2109::AID-HYP58>3.0.CO;2-1).
- NGU (2015). *Nasjonal løsmassedatabase*. URL: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/>.
- NGU (2020). *Arealinformasjon - Norge og Svalbard med havområder*. URL: http://geo.ngu.no/kart/arealis_mobil/.
- Niemczynowicz, J. (1999). *Urban hydrology and water management present and future challenges*. Tekn. rapp.: 1–14.

- NIVUS (2016). *NIVUS - Produkter og Tjenester*. Tekn. rapp.: 7–27.
- Norem, H., Flesjø, K., Sellevold, J. og Lund, M. R. (2018). Lærebok Drenering og håndtering av overvann: 139–140.
- Norges vassdrags- og energidirektorat (2015). *NVEs KLIMA-TILPASNINGS-STRATEGI*: 12–33.
- Norsk Klimaservicesenter (2017). *Klimaprofil Oslo og Akershus*. Tekn. rapp.: 1–8.
- Norsk Klimaservicesenter (2020). *Nedbørintensitet*. URL: <https://www.klimaservicesenter.no/faces/desktop/idf.xhtml>.
- Norsk Vann., Finansnæringens Fellesorganisasjon., Huseiernes Landsforbund. og NBBL (2012). Viktig å vite om kjelleroversvømmelser: 5–11. URL: https://norskvann.no/images/elinr/Pdf/Informasjonsbrosjyre_kjelleroversvømmelser.pdf?fbclid=IwAR2WL_hodhBjZ2pbu-1-Pp2gWwvXDjhn4wwK4JewquFsZUdptUcxzC85rno.
- NOU (2015). Overvann i byer og tettsteder: som problem og ressurs. *NOU (Norges offentlige utredninger)* 16: 15–35.
- Parkinson, J. og Mark, O. (1992). *Management in Developing Countries*. Bd. 17. 2: 125–127. DOI: [10.5465/amr.1992.4279549](https://doi.org/10.5465/amr.1992.4279549).
- Patro, S., Chatterjee, C., Mohanty, S., Singh, R. og Raghuvanshi, N. S. (2009). Flood inundation modeling using MIKE FLOOD and remote sensing data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 37 (1): 107–118. DOI: [10.1007/s12524-009-0002-1](https://doi.org/10.1007/s12524-009-0002-1).
- Paus, K. (2017). *Evaluering av nedbørhendelse 6.august 2016 Asker kommune*. Tekn. rapp.: 2–32.
- ROSIM (2020). *Regnbygge.no*. URL: <http://web.rosim.no/index.php/produkter-2/web/regnbygge-no/>.
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation* 7 (1): 12–24. DOI: [10.1057/jos.2012.20](https://doi.org/10.1057/jos.2012.20).
- SSB (2016). *Statistikkbanken, kommunalt avløp (05455: I. Avløp - nøkkeltall)*. URL: <https://www.ssb.no/statbank/table/05455/tableViewLayout1/>.
- Statens kartverk (2013). SOSI Del 3 Produktspesifikasjon for Felles KartdataBase (FKB): 11–27.
- Statens Vegvesen (2014). *Vegbygging, Håndbok N200*: 141–142.
- Stenius, S., Glad, P. A., Wang, T. K. og Væringstad, T. (2015). Veileder for flomberegninger i små uregulerte felt: 25.
- Strunz, T., Wiest, A. og Fleury, A. (2003). Influence of turbulence on ultrasonic flow measurements. *VDI Berichte*: 101–107.
- Thies, A. (2010). *Precipitation Transmitter. GmbH & Co. KG*: 1–20.
- Vidal, J. P., Moisan, S., Faure, J. B. og Dartus, D. (2005). Towards a reasoned 1D river model calibration. *Journal of Hydroinformatics* 7 (2): 91–104. DOI: [10.2166/hydro.2005.0009](https://doi.org/10.2166/hydro.2005.0009).
- Vojinovic, Z. og Tutulic, D. (2009). On the use of 1d and coupled 1d-2d modelling approaches for assessment of flood damage in urban areas. *Urban Water Journal* 6 (3): 183–199. DOI: [10.1080/15730620802566877](https://doi.org/10.1080/15730620802566877).
- Vojinovic, Z., Seyoum, S. D., Mwalwaka, J. M. og Price, R. K. (2011). Effects of model schematisation, geometry and parameter values on urban flood modelling. *Water Science and Technology* 63 (3): 462–467. DOI: [10.2166/wst.2011.244](https://doi.org/10.2166/wst.2011.244).

Ørstavik, E. (2015). *Geografiske informasjonssystem*. URL: https://snl.no/geografisk_informasjonssystem.

Vedlegg A. Valgte RDI parametre i MIKE URBAN

I tabell A.1 presenteres startbetingelse for RDI parameterne benyttet til kalibrering. Parameterne er basert på anbefalte verdier gitt av DHI og er gjeldene for alle tre sonene.

Startbetingelse for RDI parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Lagring på overflate (Uinit)	[mm]	0
Lagring i rotsone (Linit)	[mm]	0
Volumstrøm på overflate (OF)	[mm/time]	0
Volumstrøm i umettet sone (IF)	[mm/time]	0
Grunnvannsnivå (CKBF)	[m]	10

Tabell A.1: Startbetingelser for RDI parametre

I tabellene A.2 illustreres benyttede terskelverdier for RDI parameterne. Parameterne er basert på anbefalte verdier gitt av DHI og er gjeldene for alle tre sonene.

Terskelverdier for RDI parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Overflate (TOF)	[-]	0
Umettet sone (TIF)	[-]	0
Grunnvann (TG)	[-]	0

Tabell A.2: Terskelverdier for RDI parametre

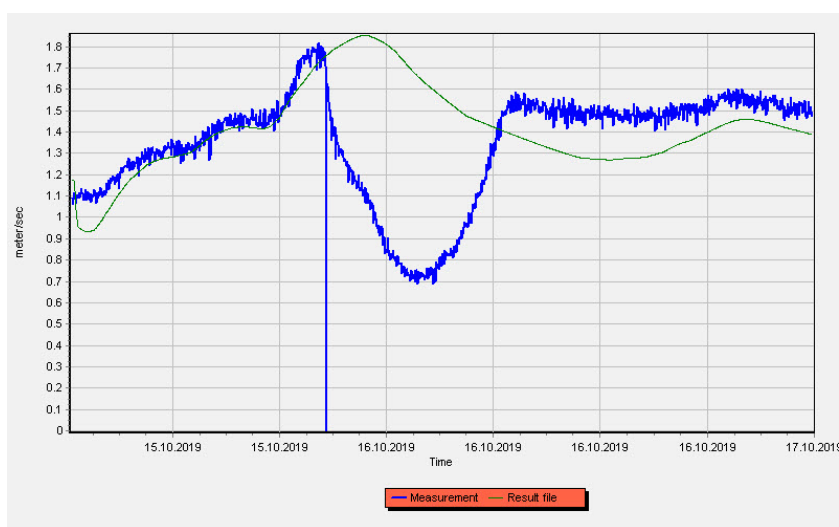
I tabell A.3 illustreres benyttede grunnvannsverdier for RDI parameterne. Parameterne er basert på anbefalte verdier gitt av DHI og er gjeldene for alle tre sonene.

Grunnvannsverdier for RDI parameter	Enhet	Kalibrert verdi
Spesifikt utbytte (Sy)	[-]	0.1
Minste grunnvannsnivå (GWLmin)	[m]	0
Maksimal grunnvannsnivå (GWLbf)	[m]	10
Grunnvannsnivå for kapillærstrømning (GWLfl)	[m]	0

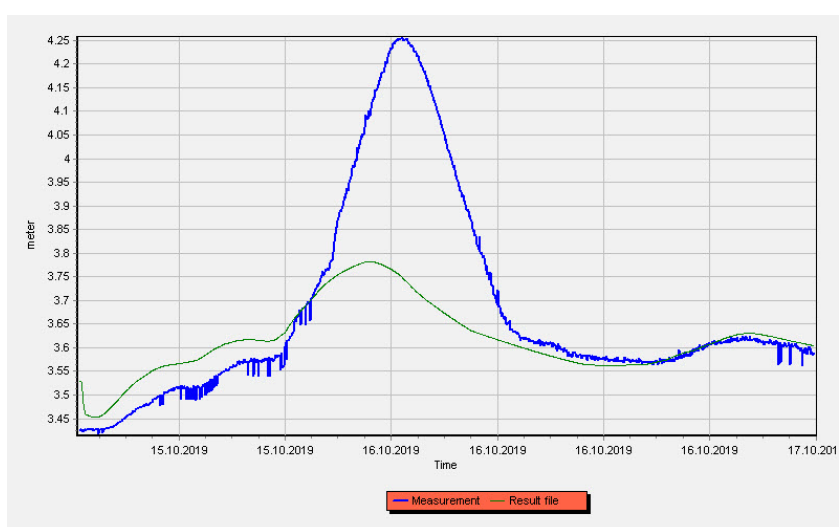
Tabell A.3: Grunnvannsverdier for RDI parametre

Vedlegg B. Kalibreringsresultat

Figur B.1 og B.2 illustrerer kalibreringsresultat av hastigheten og vann dybden for nedbørshendelse 1.

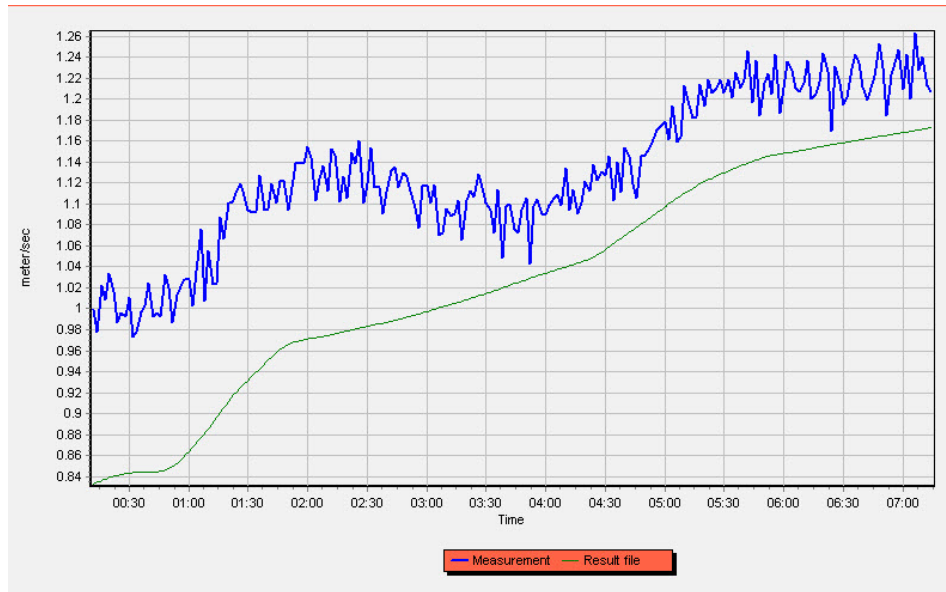


Figur B.1: Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 1

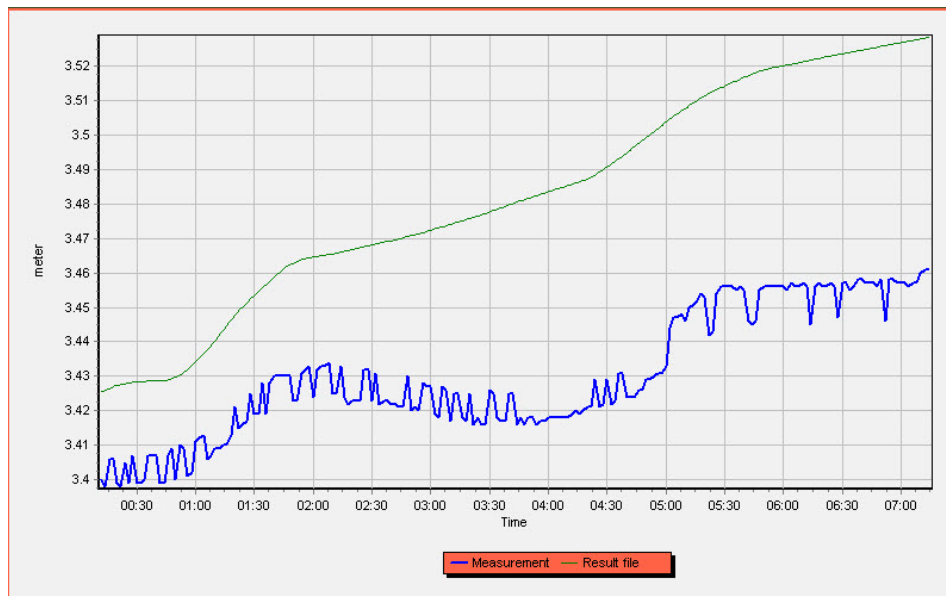


Figur B.2: Estimert mot målt vann dybde ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 1

Figur B.3 og B.4 illustrerer kalibreringsresultat av hastigheten og vann dybden for nedbørshendelse 2.

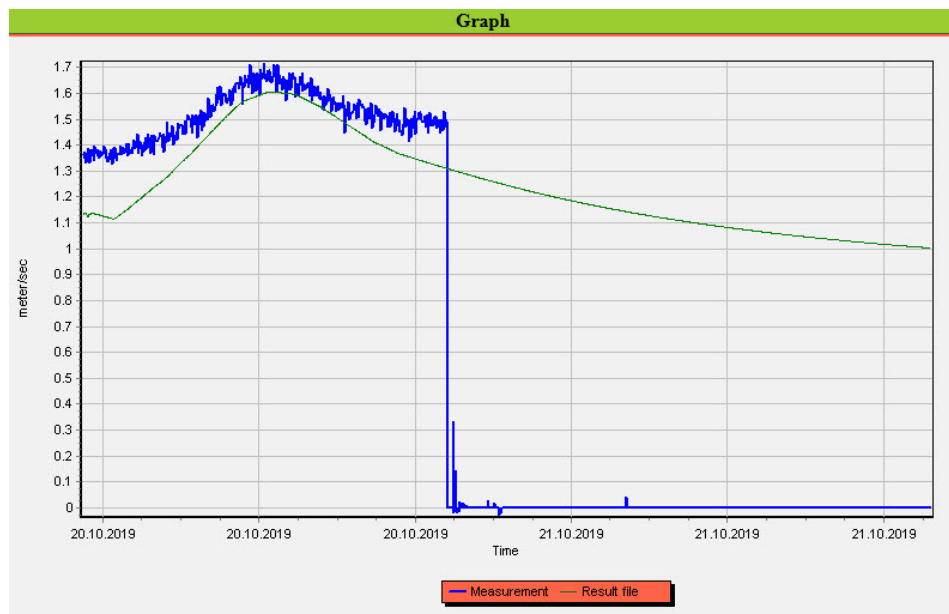


Figur B.3: Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 2

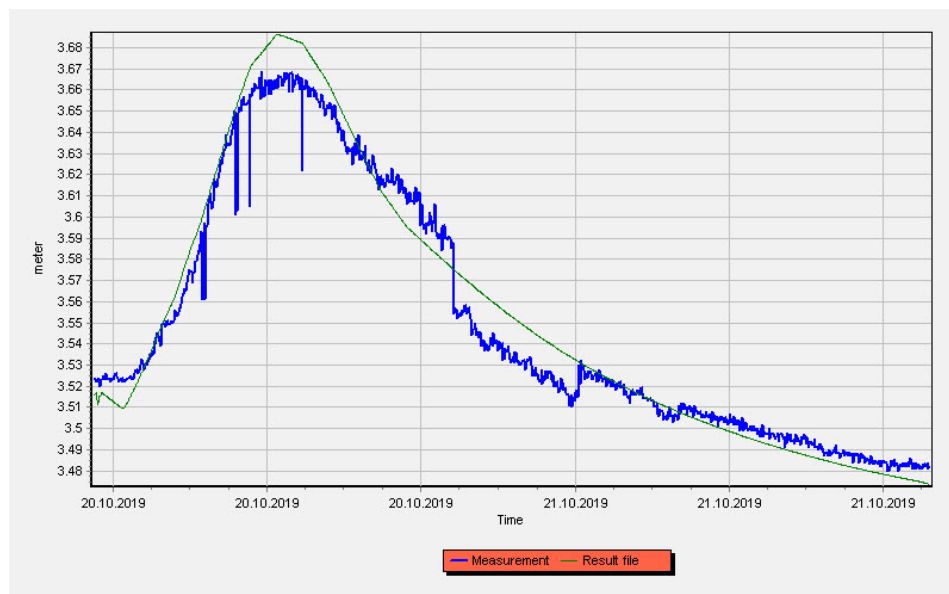


Figur B.4: Estimert mot målt vann dybde ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 2

Figur B.5 og B.6 illustrerer kalibreringsresultat av hastigheten og vann dybden for nedbørshendelse 3.



Figur B.5: Estimert mot målt hastighet ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 3



Figur B.6: Estimert mot målt vann dybde ved kalibreringsresultat for nedbørshendelse 3



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway