

Maia Gran Bjerknes

Hydrologisk modellering av overvann

En GIS-analyse av dreneringslinjer og
forsenkninger for Gulskogen, Drammen

Masteroppgave i Geografi

Veileder: Chantel Nixon

Mai 2022

Maia Gran Bjerknes

Hydrologisk modellering av overvann

En GIS-analyse av dreneringslinjer og forsenkninger
for Gulskogen, Drammen

Masteroppgave i Geografi
Veileder: Chantel Nixon
Mai 2022

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for samfunns- og utdanningsvitenskap
Institutt for geografi

Sammendrag

Fremtidige klimaendringer vil føre til økt andel nedbørhendelser med økt intensitet, noe som kan bidra til overflateavrenning i urbane områder. I kombinasjon med fortetting og urbanisering vil flere landarealer bli impermeable overflater, som videre fører til økt overflateavrenning. Fremtidige klimaendringer i kombinasjon med fortetting kan derfor føre til økt andel skader på bygninger, infrastruktur og landområder.

Områder som er utsatte for overvann bør kartlegges for å kunne forhindre skader fra overflateavrenning. Denne masteroppgaven tar derfor for seg kartlegging av dreneringslinjer og forsenkninger i terrenget ved bruk av GIS. Oppgaven diskuterer hvorvidt hydrologisk modellering kan visualisere bygninger som er utsatt for påvirkning av overvann, i tillegg til visualisering av sluk som er lokalisert i risikoområder for overvann. Studieområdet denne oppgaven er basert på er Gulskogen, en bydel i Drammen kommune. I tillegg vil oppgaven omhandle en diskusjon rundt modifisering og oppløsning av terrengmodell, og hvilken påvirkning dette kan ha på resultatene fra de hydrologiske analysene.

Resultatene har vist at hydrologisk modellering kan brukes til å indikere hvilke bygninger og sluk som er lokalisert i nærheten til risikoområder for overvann. Resultatene viser også at valg av oppløsning og modifisering av terrengmodell har påvirket resultatene i varierende grad. Terrengmodellen med grov oppløsning bidro til unøyaktige resultater uavhengig av modifisering, mens terrengmodellene med høyere oppløsning oppfattet terrengvariasjoner og menneskelige strukturer i større grad. Funnene i denne oppgaven har samtidig belyst usikkerhetsmomenter ved metodene som bør tas hensyn til, blant annet hydrologiske faktorer samt oppståtte feilkilder i dataen og under dataprosesseringen.

Abstract

Future climate changes will lead to increased precipitation events with increased intensity, which could contribute to surface runoff in urban areas. More land area will become impermeable surface due to a combination of densification and urbanization. This will lead to increased surface runoff because of the low infiltration ability. Future climate changes combined with densification can therefore cause increased damages to buildings, infrastructure and land area.

Areas exposed to surface water should be mapped to prevent damages by surface runoff. The thesis addresses mapping of flow lines and depressions in the terrain using GIS. It discusses how hydrological modeling can visualize buildings as exposed to surface water. Additionally, it visualizes sewage intakes that are localized in areas prone to surface water. The study area that the thesis is based upon is Gulskogen, which is a district in Drammen municipality. The thesis will also discuss modification and resolution of terrain models, and its impact on the results from the hydrological analysis.

The results shows that hydrological modeling can be used to indicate which buildings and sewage intakes are localized in areas exposed to surface water. The results also shows that choice of resolution and modification has impacted the results in varying degree. The terrain model with a coarse resolution contributed to inaccurate results independently by modification, while the terrain models with high resolution perceived differences in the terrain and man-made structures in a larger extent. The findings of this thesis have simultaneously showed uncertainties by the methods that should be taken into consideration. These are among others hydrological factors and source of error that occurred in the data and during the processing of the data.

Forord

Denne masteroppgaven markerer slutten på min studietid ved geografisk institutt ved NTNU. Arbeidsprosessen med masteroppgaven har til tider vært krevende og frustrerende, samtidig veldig lærerik. Det har vært svært givende å arbeide med en problemstilling som jeg synes både er aktuell og viktig med tanke på fremtidens klima.

Takk til veileder Chantel Nixon for gode samtaler og innspill.

Videre vil jeg rette en stor takk til geogjengen på kontoret for en fin tid på universitet. Spesielt takk til mine studievenner Mari Helland og Thale Dalbu for gode innspill og mental støtte under arbeidsprosessen. Til slutt vil jeg takke samboer for støtte gjennom alle fem år som student.

Innholdsfortegnelse

Figurer.....	xiv
Tabeller	xviii
Forkortelser	xix
1 Innledning.....	1
1.1 Drammen kommune	2
1.2 Problemstilling	3
1.3 Studiens avgrensing.....	3
2 Bakgrunn	4
2.1 Tidligere studier	4
2.2 Områdebeskrivelse	5
3 Teori.....	8
3.1 Klima.....	8
3.2 Overvann	9
3.2.1 Konsekvenser av overvann.....	11
3.3 Teknologi	13
3.3.1 LiDAR.....	13
3.3.2 Digital terrengmodell	14
3.4 Hydrologisk modellering.....	15
3.4.1 Dreneringsretning.....	15
3.4.2 Strømningsakkumulering	17
3.4.3 Forsenkninger.....	18
4 Data.....	20
4.1 Digital terrengmodell	20
4.2 Vektordata	21
4.2.1 Redigering av vektordata	23
5 Metode.....	25
5.1 Generering av studieområdet	25
5.2 Modifisering av terrengmodell.....	27
5.2.1 Bygninger.....	27
5.2.2 Fortauskanter.....	28
5.2.3 Kulverter og underganger.....	29
5.3 Hydrologisk modellering.....	32

5.3.1	Flomveisanalyse	32
5.3.1.1	Inngangsdata.....	34
5.3.1.2	Klassifisering og visualisering av drenslinjene	35
5.3.2	Forsenkningsanalyse	37
5.3.2.1	Inngangsdata.....	37
5.3.2.2	Forsenkningsanalyse del 1	38
5.3.2.3	Forsenkningsanalyse del 2	39
5.3.2.4	Forsenkningsanalyse del 3	40
5.3.2.5	Forsenkningsanalyse del 4	41
5.3.2.6	Forsenkningsanalyse del 5	43
5.3.2.7	Forsenkningsanalyse del 6	43
5.3.2.8	Oppfyllingsverdier til forsenkningene	44
5.3.2.9	Symbolisering av utsatte bygg og sluk.....	49
6	Resultat	51
6.1	Modifiserte og ikke-modifiserte dreneringslinjer og forsenkninger	51
6.2	Dreneringslinjer og forsenkninger basert på terrengmodeller med ulik oppløsning	53
6.3	Dreneringslinjer med åpne og lukkede kulverter	57
6.4	Utsatte bygg.....	58
6.4.1	Dreneringslinjer og utsatte bygg	59
6.4.2	Forsenkninger og utsatte bygg	62
6.5	Utsatte sluk.....	66
6.5.1	Forsenkninger og utsatte sluk.....	67
6.5.2	Dreneringslinjer og utsatte sluk.....	69
6.6	Overvannsområder med tilhørende løsmasser	71
7	Diskusjon	72
7.1	Utsatte bygg og sluk	72
7.2	Risikoområder for bygg og sluk.....	74
7.2.1	Sundland.....	75
7.2.2	Gulskogen vest	76
7.2.3	Gulskogen og omkringliggende områder	76
7.2.4	Pukerud.....	77
7.2.5	Industrielt område	78
7.2.6	Strømsgodset	78

7.3	Oppløsning av terrengmodell	79
7.3.1	Generering av drenslinjer basert på terrengmodell med ulike oppløsninger	79
7.3.2	Generering av forsenkninger basert på terrengmodeller med ulike oppløsninger	81
7.4	Modifisering av terrengmodell.....	84
7.4.1	Implementering av bygninger og vannområder	85
7.4.2	Implementering av fortauskanter	85
7.4.3	Implementering av underganger.....	87
7.4.4	Implementering av kulverter og stikkrenner	89
7.5	Usikkerhet med metodene	90
7.5.1	Oppfyllingsverdier	90
7.5.2	Infiltrasjon og løsmasser	91
7.5.3	Usikkerhet rundt generering av dreneringslinjer.....	92
7.5.4	Usikkerhet ved generering av forsenkninger	96
8	Avslutning	101
8.1	Konklusjon	101
8.2	Forslag til videre arbeid.....	102
	Referanser.....	104

Figurer

Figur 1: Observerte flomveier og utsatte områder for overvann på Gulskogen (Drammen kommune, 2015b).....	2
Figur 2: Oversiktskart over studieområdet.....	5
Figur 3: Arealbrukskart over studieområdet. WMS hentet fra GeoNorge.....	6
Figur 4: Kart over helningsgraden til terrenget innenfor studieområdet.....	7
Figur 5: Avrenning i ubebygde og bebygde områder (NOU 2015:16).....	10
Figur 6: Skader på bygninger i Mjøndalen sentrum etter Frida hendelsen i 2012 (NTB, 2012b).....	12
Figur 7: Intenst nedbør fra Frida førte til ødeleggelse i hus og hager (NTB, 2012a).	12
Figur 8: Returnerte signal fra LiDAR. Hentet fra Chauve et al. (2007)	13
Figur 9: Registrering av terrenghelning ved ulike oppløsninger (Hengl & Evans, 2009, s. 46)	14
Figur 10: Bestemmelse av dreneringsretning for en raster bestående av høydeverdier (Balstrøm & Crawford, 2018).....	16
Figur 11: Bestemmelse av strømningsakkumulering (Esri, u.å.-e).....	17
Figur 12: En profil av en forsenkning før og etter fyllingsverktøyet (Esri, u.å.-d).....	18
Figur 13: Forsenkning og dets tilhørende egenskaper (<i>Balstrøm, 2022</i>)	19
Figur 14: Utsnitt av en terrengmodell med fjellskygge der det er lokalisert en vei midt i bildet. Svart punkt representerer stikkrennepunkt, mens oransje linje representerer opptegnet stikkrenne. De svartstiplede områdene er områder med fluvial erosjon.	23
Figur 15: Utsnitt av en terrengmodell med fjellskygge. Svarte punkter representerer stikkrenner og oransje linjer representerer kulverter.....	24
Figur 16: Kartet viser en oversikt over omrisset av REGINE enheten til Gulskogen og studieområdet. Det viser også to genererte nedbørfelt symbolisert med ulike farger, med tilhørende dreneringspunkt.....	26
Figur 17: Terrengmodell uten bygg (a) og terrengmodell med implementerte bygg (b).....	28
Figur 18: Terrengmodell med implementerte bygninger (a) og terrengmodell med implementerte bygninger og fortauskanter (b).....	29
Figur 19: Figuren viser gjennomstrømming av vann gjennom en åpen kulvert (venstre), og hvordan vannet må ta alternative veier hvis en kulvert er blokkert med sedimenter (høyre) (Meiforth, 2013).....	29
Figur 20: Subtraksjon ved bruk av verktøyet "Minus" (Esri, u.å.-f).....	30

Figur 21: Terrengmodell uten kulverter (a). De svarte stiplede linjene representerer lokasjonen av en vei. Terrengmodell med implementerte kulverter (b). Kulvertene er lokalisert innenfor de gule stiplede linjene.....	31
Figur 22: Geoprosesseringsmodell for å lage drenslinjer.....	32
Figur 23: Generert raster som visualiserer dreneringsretning.....	33
Figur 24: Klassifisering av drenslinjer basert på terskelverdier (Meiforth, 2013).....	36
Figur 25: Tall for klassifisering hentet fra Bratlie (2015).....	36
Figur 26: Geoprosesseringsmodell for å lage forsenningsområder.....	37
Figur 27: Første del av forsenningsanalysen der verktøyene "Fill" og "Minus" ble brukt for å kunne kartlegge gyldige forsenninger.	38
Figur 28: Andre del av forsenningsmodellen der "Con", "Reclassify", "Minus" og "Region Group" blir brukt.	39
Figur 29: Forsenningsområder med vannområder fra FKB (a) og forsenningsområder uten vannområder fra FKB (b).....	40
Figur 30: Zonal statistics as Table ble brukt som verktøy i geoprosesseringsmodellen for å beregne volum til forsenningerne	41
Figur 31: Fjerde delen av forsenningsmodellen som inneholder informasjon om generering av nedbørfelt til hver enkelt forsennning	42
Figur 32: De kartlagte forsenningerne og deres tilhørende lokale nedbørfelt.....	42
Figur 33: Femte del av forsenningsmodellen med kalkulering av oppfyllingsverdi til hver forsennning.....	43
Figur 34: Siste del av geoprosesseringsmodellen der forsenningerne ble aggregert.....	44
Figur 35: Sikkerhetsklasser for bygninger i områder utsatt for overvann (Byggteknisk forskrift, 2017)	45
Figur 36: Tabell over klimapåslag for gjentakintervall større og mindre enn 50 år, og med ulik varighet (Klimaservicesenter, u.å.-b).....	46
Figur 37: Forsenninger med volum < 1 m ³ (mørkeblå) og forsenninger med volum > 1 m ³ (lyseblå).....	50
Figur 38: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på to ulike DTM. Blå linjer representerer dreneringslinjer fra modifisert DTM, mens lilla linjer representerer dreneringslinjer fra ikke-modifisert DTM.....	52
Figur 39: Kart som viser forsenninger som er basert på en DTM som ikke er modifisert. Bygningspolygonene er representert i grå.....	52

Figur 40: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på DTM med ulik oppløsning. Blå dreneringslinjer er basert på DTM med 1 meter oppløsning, mens lilla dreneringslinjer er basert på DTM med 25 cm oppløsning	53
Figur 41: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på DTM med ulik oppløsning. Blå dreneringslinjer er basert på DTM med 1 meter oppløsning, mens lilla dreneringslinjer er basert på DTM med 10 meter oppløsning	54
Figur 42: Kart som viser forsenkninger som er basert på ulike DTM. Forsenkninger basert på 25 cm oppløsning er øverste kartlag.	55
Figur 43: Kart som viser forsenkninger som er basert på ulike DTM. Forsenkninger basert på 1 m oppløsning er øverste kartlag.	55
Figur 44: Kart som viser forsenkninger som er basert på ulike terrengmodeller med 1 meter og 10 meter oppløsning	56
Figur 45: Kart over dreneringslinjer som representerer en åpen situasjon (blå dreneringslinjer) og en lukket situasjon (rød dreneringslinjer). Punktene symboliserer start- og slutt punkt for kulvertene.	57
Figur 46: Kart over dreneringslinjer og områder med utsatte bygg. Utsatte bygg er visualisert i oransje. Dreneringslinjene er visualisert i blå, der tykkelsen på dreneringslinjen representerer mengde vannføring.....	59
Figur 47: Kart over utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3	60
Figur 48: Kart over utsatte bygg innenfor område 4 og 5	61
Figur 49: Kart over forsenkninger og områder med utsatte bygg. Oppfyllingsverdiene er basert på en nedbørhendelse med varighet på 1 time.....	63
Figur 50: Kart over forsenkninger og områder med utsatte bygg. Oppfyllingsverdiene er basert på en nedbørhendelse med varighet på 24 timer	63
Figur 51: Utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3 i forbindelse med forsenkninger	64
Figur 52: Utsatte bygg innenfor område 4, 5 og 6 i forbindelse med forsenkninger	65
Figur 53: Kart over forsenkninger og områder med utsatte sluk	67
Figur 54: Kart over utsatte sluk i område 1 og 2.....	68
Figur 55: Kart over dreneringslinjer og områder med utsatte sluk	69
Figur 56: Kart som viser utsatte sluk og dreneringslinjer innenfor område 1, 2 og 3.....	70
Figur 57: Kart over forsenkninger og underliggende løsmasser i studieområdet.	
Bakgrunnskart hentet fra GeoNorge	71
Figur 58: drenslinjer basert på 10 m terrengmodell (oransje), drenslinjer basert på 1 m terrengmodell (blå) og drenslinjer basert på 25 cm terrengmodell (rosa).....	80

Figur 59: Drenslinjer basert på 10-m terrengmodell (oransje), drenslinjer basert på 1-m terrengmodell (blå) og drenslinjer basert på 25-cm terrengmodell (rosa). Svart linje representerer fortauskant.	81
Figur 60: (a) Liten forsenkning (blå) med tilhørende utsatt bygg (oransje, og (b) liten forsenkning (blå) og tilhørende utsatt sluk (rosa).	83
Figur 61: Drenslinjer basert på modifisert terrengmodell med fortauskanter (blå), og drenslinjer basert på original terrengmodell (rosa). Svart linje representerer fortauskant, mens hvit linje representerer vei. Område (a) og (b) viser to ulike eksempler på forskjellige drensløp.	86
Figur 62: To ulike dreneringsveier som drenerer på hver sin side av fortauskanten. Lilla representerer 25 cm oppløsning, blå representerer 1 meter oppløsning.	86
Figur 63: viser dreneringslinjer som går under eller rundt to forskjellige underganger; undergang (a) og undergang (b). Blå linje representerer en drenslinje basert på en modifisert terrengmodell. Lilla linje representerer en drenslinje basert på en original terrengmodell.	88
Figur 64: Utsnitt over forsenkning og drenslinjer ved Pukerud.	94
Figur 65: Utsnitt av en forsenkning og drenslinjer ved jordbruksarealet vest for Gulskogen Vest.	95
Figur 66: Utsnitt av en forsenkning og drenslinjer lokalisert på Sundland.	95
Figur 67: forsenkning (rød) som er lokalisert innenfor en bygningspolygon (grønn)	97
Figur 68: Forsenkning ved Strømsåstunnelen.	98
Figur 69: Lyseblå polygon representerer vannområder. Mørkeblå representerer kartlagt forsenkning.	98
Figur 70: Utsnitt over to forsenkninger lokalisert ved inn- og utgang i en undergang under jernbanen.	99
Figur 71: Forsenkninger lokalisert i skogsområder (a) og drenslinjer lokalisert i skogsområder (b)	100

Tabeller

Tabell 1: Terrengmodellene som har blitt brukt i de hydrologiske analysene, med beskrivelse av terrengmodellenes oppløsning og modifiseringer	35
Tabell 2: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 24 timer varighet	47
Tabell 3: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 12 timer varighet	47
Tabell 4: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 3 timer varighet	48
Tabell 5: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 1 time varighet.....	48
Tabell 6: Tabell over antall kartlagte forsenkninger ved bruk av terrengmodeller med ulike oppløsninger	57
Tabell 7: Tabell over antall utsatte bygg for dreneringslinjer og forsenkninger basert på ulike terrengmodeller	58
Tabell 8: Tabell over antall utsatte sluk ved dreneringslinjer og forsenkninger, basert på ulike terrengmodeller	67

Forkortelser

ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
DTM	Digital terrengmodell
FKB	Felles Kartdatabase
GIS	Geografiske informasjonssystem
IVF	Intensitet-Varighet-Frekvens
LiDAR	Light Detection and Ranging
NEVINA	Nedbørfelt- og vannføringsindeksanalyse
NOU	Norges offentlige utredninger
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat

1 Innledning

Drammen kommune og omegn har blitt utsatt for oversvømmelser i forbindelse med intense og kortvarige nedbørshendelser flere ganger i løpet av de siste årene. Et eksempel er stormen Frida i 2012 som etterlot seg store skader på bygninger og infrastruktur for flere millioner kroner (Johnsen, 2014). Kraftige byger bidro til nedbør på 70-130 mm i løpet av få timer, der det er antatt at 70 mm skal ha kommet i løpet av 40 minutter (Beldring et al., 2012; Olsen et al., 2015). Stormen Frida var kort og intens, noe som bidro til at vannet fant nye flomveier på grunn av menneskelige inngrep i form av infrastruktur og bebyggelse, i tillegg til høy sedimenttransport som tettet kulverter og stikkrenner (Olsen et al., 2015). Kommunen var ikke forberedt på omfanget av denne hendelsen, og hadde dermed ikke gjennomført nødvendige tiltak i forkant av stormen (Rustad & Hjardar, 2020). De totale kostnadene for ødeleggelsene etter Frida kom på omkring 460 millioner kroner (Olsen et al., 2015).

På grunn av klimaendringer vil korte og intense nedbørshendelser forekomme hyppigere og kraftigere i fremtiden (Masson-Delmotte et al., 2021). Fremtidige klimaendringer kan føre til økt fare for overvann i urbane områder, da økt fortetting bidrar til økt andel tette flater i byer og tettsteder (NOU 2015:16). Tette flater er spesielt utsatt for akkumulering av vann, noe som kan føre til oppsamling av vann og vann på avveie hvis overvannshåndteringen ikke er tilstrekkelig dimensjonert (NOU 2015:16). Dette kan videre resultere i økonomiske skadevirkninger med hensyn til bygg og infrastruktur. Bygg som er lokalisert i nærheten av risikoområder for overvann vil være utsatte for vannskader og erosjonsskader. I likhet med dette vil sluk som er lokalisert i risikoområder for overvann være ekstra viktige å renske i forkant av en nedbørhendelse, på grunn av dens evne til å drenere overvann (Norem et al., 2016).

Hydrologisk modellering ved bruk av geografiske informasjonssystemer (GIS) kan brukes til å forbedre sikkerheten med hensyn til flom og overvannsproblemer på kommunalt nivå (NOU 2015:16). Ved å kartlegge dreneringslinjer og forsenkninger i terrenget kan man visualisere lokasjoner med oppsamling av vann samt hvilken vei vannet vil drenere ved en kraftig nedbørshendelse (Balstrøm & Crawford, 2018; Meesuk et al., 2015). For å få et korrekt hydrologisk resultat er det nødvendig å implementere menneskelige konstruksjoner og strukturer som vil påvirke vannets drenering, inn i terrengmodellen (Balstrøm & Crawford, 2018). Modifisering og oppløsning av terrengmodell er derfor to faktorer som kan ha en påvirkning på resultatet av en hydrologisk modellering (Meesuk et al., 2015; Yang et al., 2014)

1.1 Drammen kommune

I dag er områdene rundt Oslofjorden og Sørlandskysten mest utsatt for intens bygenedbør (Hanssen-Bauer et al., 2015, s. 10). Drammen kommune er en del av Viken fylke (tidligere Buskerud fylke) og ifølge klimaprofilen for Buskerud vil årsnedbøren øke med 15% frem mot år 2100 (Klimaservicesenter, 2022). Som nevnt innledningsvis bidro stormen Frida til store skader i Drammen kommune i 2012 på grunn av overvannsproblemer og vann på avveie. Flere masteroppgaver fra NMBU (Norges Miljø- og biovitenskapelige universitet) omhandler overvann i Drammen kommune men har hovedfokus på Strømsø bydel, som er lokalisert 2 kilometer øst for Gulskogen (Johansen & Moldekleiv, 2016; Murtnes, 2016). Ingen av masteroppgavene fokuserte på bygg som kan være utsatt for overvann, heller ikke lokasjoner til sluk.

Figur 1 viser et område i Drammen som er utsatt for oversvømmelse ved ekstremnedbør, spesielt gjeldende for de uthevede områdene i blå (Drammen kommune, 2015b). Disse områdene er beliggende innenfor bydelen Gulskogen i Drammen, der de uthevede områdene er kjent som Gulskogen Vest og Sundland (Drammen kommune, 2015b). Kartet inneholder ikke beskrivende detaljer angående problemområdene, og viser ikke spesifikt hvilke bygninger som vil bli påvirket av overvann. På bakgrunn av manglende informasjon angående utsatte bygg og sluk i forbindelse med overvann, ble Gulskogen valgt som studieområdet.



Figur 1: Observerte flomveier og utsatte områder for overvann på Gulskogen (Drammen kommune, 2015b)

1.2 Problemstilling

Hydrologisk modellering i GIS kan brukes som et verktøy i forbindelse med overvannsproblematikk, spesielt sett i sammenheng med fremtidige klimaendringer (NOU 2015:16). I følge Drammen kommune (2015b) er Gulskogen et område som kan bli utsatt for overvann i fremtiden. Tidligere studier ikke har inkludert visualisering av bygg og sluk som er lokalisert i risikoområder for overvann. Problemstillingen min vil derfor være:

Er kartlegging av dreneringslinjer og forsenkninger en nyttig måte å identifisere utsatte bygninger og sluk innenfor Gulskogen i Drammen?

Med tilhørende underproblemstilling:

Hvilken påvirkning vil modifisering og oppløsning av terrengmodell ha for hydrologisk modellering av studieområdet?

Oppgaven vil ta for seg kartlegging av drenslinjer og forsenkninger ved bruk av programmet ArcGIS Pro, for deretter å undersøke om disse metodene kan brukes til å illustrere utsatte bygg og sluk. I denne sammenhengen vil utsatte bygg være bygg som kan bli påvirket av overvann ved vannskader eller erosjonsskader. Utsatte sluk er sluk som er lokalisert i risikoområder for overvann, og derfor vil være ekstra utsatt for blokkering grunnet sediment- og materialtransport. Det vil også bli brukt ulike terrengmodeller med ulike modifiseringer og oppløsninger som inngangsdata i de hydrologiske modellene, for å undersøke hvilken påvirkning dette vil ha på resultatene.

1.3 Studiens avgrensning

Denne studien har ikke inkludert andre hydrologiske faktorer, for eksempel infiltrasjon, erosjon og ruhet, enn dreneringsretning i analysen. Modellen tar utgangspunkt i et verst tenkelig scenario der infiltrasjon av vann er lik null, på grunn av mettet eller frossen jord og tette dreneringssystem. Ledningsnett til vann og avløp er derfor ikke inkludert i studien, med unntak av lokasjoner på sluk, kulverter og stikkrenner. Vann fra Drammenselva har heller ikke blitt inkludert i modelleringene. Det har ikke blitt brukt andre programmer enn ArcGIS Pro til å utføre analysene.

2 Bakgrunn

2.1 Tidligere studier

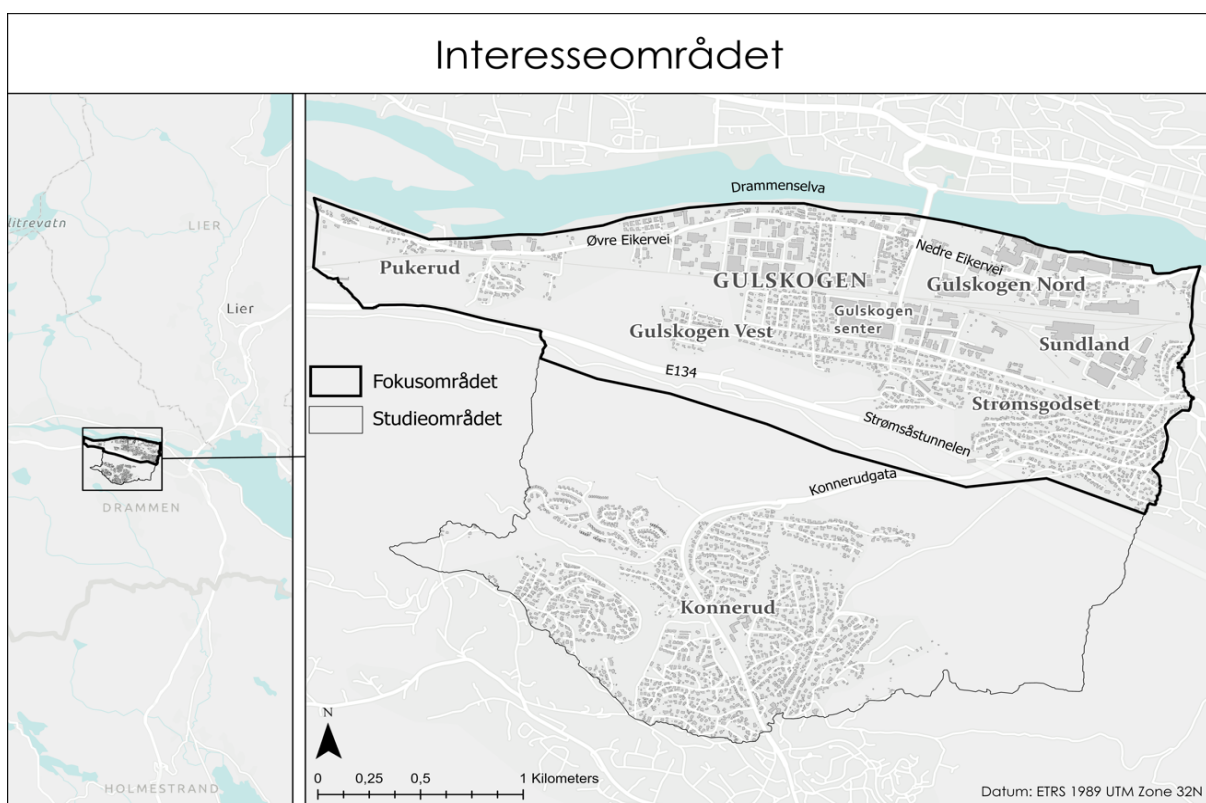
I et internasjonalt perspektiv har GIS ofte blitt brukt for å visualisere flomutsatte områder. Balstrøm og Crawford (2018) har utviklet en hydrologisk modell i GIS for å finne størrelsen og kapasiteten til forsengkninger i terrenget for et område nord for København i Danmark. Denne studien kartla forsengkninger ved å bruke en modifisert digital terrengmodell med 40 centimeter oppløsning som inngangsdata i analysen (Balstrøm & Crawford, 2018). Resultatene ble representert som vektoriserte data og geometriske nettverk, og inneholdt blant annet informasjon om oppfyllingsverdier og utsatte bygg. I likhet med dette kartla Di Salvo et al. (2017) pluviale flomsoner for Roma i Italia ved bruk av en terrengmodell med oppløsning på 2 meter. Videre ble forsengkningene rangert etter volum og inkorporert med data fra tidligere flomhendelser. Di Salvo et al. (2017) påpeker viktigheten rundt oppløsning av terrengmodeller for å generere hydrologiske korrekte resultat. Etter Balstrøm og Crawford (2018) har Albă et al. (2018) brukt GIS til å kartlegge forsengkninger i et område i Romania for å se hvilke områder og bygninger som vil bli påvirket av opphopning av overvann etter kraftig regnskyll. I likhet med Balstrøm og Crawford (2018) og Di Salvo et al. (2017) brukte Albă et al. (2018) en terrengmodell med implementerte bygninger som inngangsdata for analysen. Balstrøm og Crawford (2018) og Di Salvo et al. (2017) poengterte at modifisering av terrengmodellen er nødvendig for at resultatet skal bli hydrologisk korrekt.

Maksimović et al. (2009) brukte en hydrologisk modell til å kartlegge dreneringslinjer og forsengkninger for et område i England. I motsetning til Balstrøm og Crawford (2018) ble den hydrologiske modelleringen utført i et raster domene, noe som opptok lengre prosesseringstid. Murphy et al. (2008) har utført modellering av elvenettverk i Alberta i Canada ved bruk av digital høydemodell fra LiDAR og fotogrammetrisk høydemodell. Studien til Murphy et al. (2008) inkluderte nedsenkning av kulverter og underganger i terrengmodellen, for å kunne kartlegge realistiske vannveier. Murphy et al. (2008) konkluderte med at digitale høydemodeller basert på LiDAR data har stort potensial for å brukes til hydrologisk modellering. De tidligere studiene har brukt ulike hydrologiske verktøy i modelleringene, blant annet dreneringsretning og akkumulering av overflatestrømming (Balstrøm & Crawford, 2018; Maksimović et al., 2009; Murphy et al., 2008).

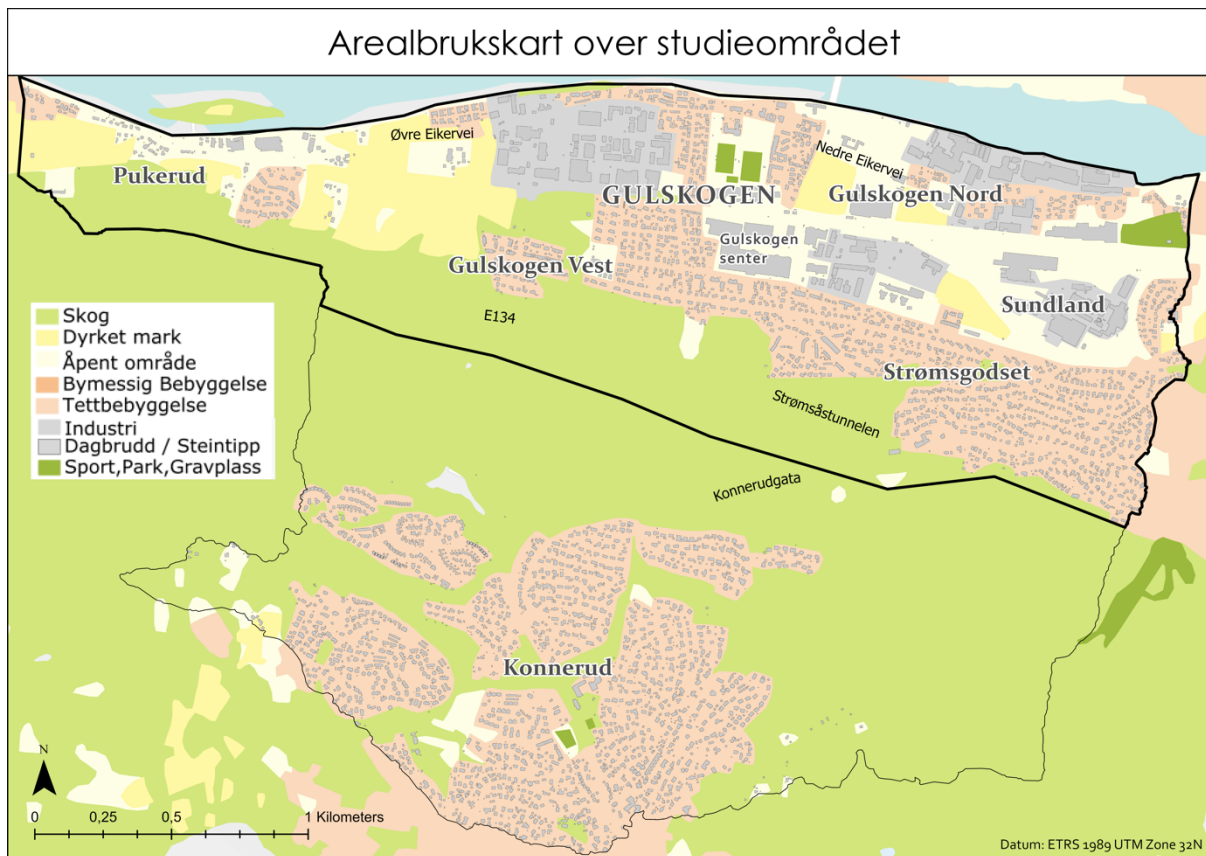
I et nasjonalt perspektiv har Meiforth (2013) og Bratlie (2015) vært med på å introdusere metodebruk for generering av flomveier i GIS til norske kommuner. Meiforth (2013) har kartlagt flomveier i Trondheim i forbindelse med et planleggingsprosjekt ved hjelp av GIS, og har satt terskelverdier for klassifisering av flomveier basert på kalkuleringer fra hydrologer. Bratlie (2015) utførte en hydrologisk analyse for tidligere Nedre Eiker kommune (dagens Drammen kommune), ved å bruke en terrengmodell og data fra FKB som inngangsdata. Meiforth (2013) og Bratlie (2015) skrev at bygninger bør heves, og at kulverter og underganger kan inkluderes i en modifisert terrengmodell hvis de har tilstrekkelig kapasitet. Resultatet for Bratlie (2015) ble kart over flomveier og alternative flomveier når et problempunkt oppstod, i tillegg til å visualisere utsatte områder for overvann.

2.2 Områdebeskrivelse

Gulskogen er en bydel i Drammen kommune som er lokalisert på den sørlige delen av Drammenselva som vist i Figur 2. Gulskogen og de omkringliggende områdene blir henvist i denne oppgaven som fokusområde, mens studieområdet er området analysene har blitt basert på. Skillet mellom fokusområdet og det resterende studieområdet går ved motorvei E134, som går inn i Strømsåstunnelen.



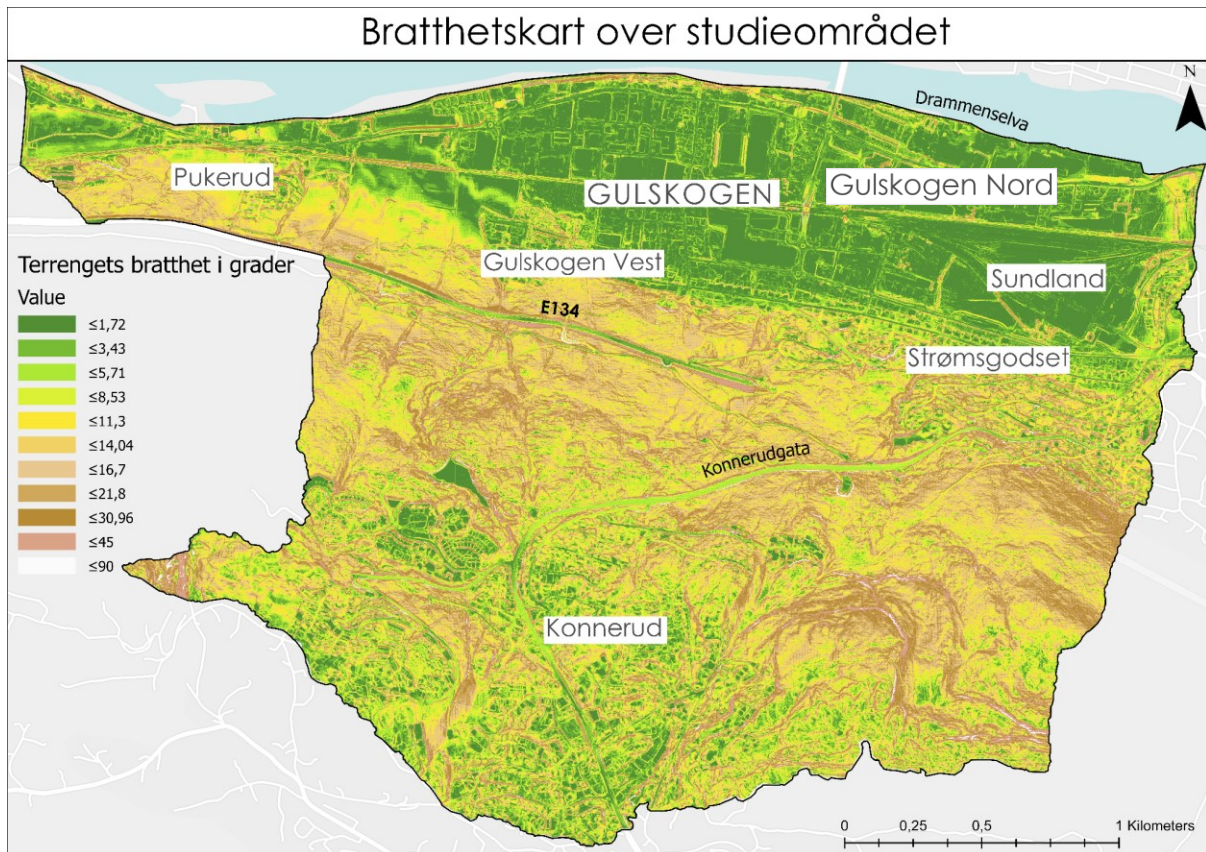
Figur 2: Oversiktskart over studieområdet



Figur 3: Arealbrukskart over studieområdet. WMS hentet fra GeoNorge.

Gulskogen er hovedsakelig bestående av industriområder, kommersielle bygg og boligområder. Fokusområdet er hovedsakelig av urban karakter på grunn av tettbebyggelse, åpne områder med asfaltering og industriområder, som vist i arealbrukskartet i Figur 3. Et sentralt bygg på Gulskogen er Gulskogen kjøpesenter, som er lokalisert i midten av Gulskogen som vist i Figur 3. Vest for Gulskogen er det et område som kalles Pukerud, som består av jordbruksarealer, åpne områder og noen få boligområder. Sundland er et område der jernbanens verksted er lokalisert, og blant annet et boligområde, en videregående skole, et dansestudio og en barnehage. Sundland og Gulskogen Nord består hovedsakelig av åpne arealer, industriområder og asfalterte områder. Strømsgodset ligger sør for Sundland og består av tettbebyggelse i form av boligområder. Et lignende område er Gulskogen Vest, som også består av boligfelt i tillegg til noen skogsområder og jordbruksarealer som vist i kartet. Konnerud er en bydel i Drammen kommune, som er lokalisert sør for Gulskogen. Bydelen befinner seg på toppen av den samme åssiden som Gulskogen, og er hovedsakelig bestående av boligfelt og skogsområder.

Når det gjelder løsmasser, består nedre del av studieområdet hovedsakelig av fyllmasse (NGU, u.å.). Det er også store områder som kategoriseres som hav- og fjordavsetninger – finkornete avsetninger hovedsakelig bestående av silt og leire (NGU, u.å.). I øvre del av studieområdet er det flere områder som kategoriseres som bart fjell, forvittringsmateriale eller humusdekke (NGU, u.å.). Figur 4 visualiserer helningsgraden til terrenget innenfor de ulike områdene i studieområdet. Kartet viser at Gulskogen er et område med lav helning, i motsetning til områdene mellom Konnerud og Gulskogen der det er høy helning.



Figur 4: Kart over helningsgraden til terrenget innenfor studieområdet

Drammen er et område med byutvikling, og kommer til å oppleve befolkningsvekst i årene fremover (Statistisk sentralbyrå, u.å.). Drammen er lokalisert innenfor et område som vil oppleve 26-31 % befolkningsvekst i fremtiden (NOU 2015:16). Dette vil skape mer fortetting, noe som kan påvirke overvann på grunn av økt andel tette flater og generelle arealbruksendringer. Kommuneplanens arealdel for Drammen viser at Gulskogen Nord er et fremtidig transformasjonsområde for byutvikling (Drammen kommune, 2015a). I likhet med dette er områdene ved Pukerud og Gulskogen Vest kartlagt som fremtidige boligområder med tilhørende anlegg (Drammen kommune, 2015a).

3 Teori

Dette kapitlet vil ta for seg teori om klima og overvann, i tillegg til begrep, prosesser og verktøy i geografiske informasjonssystemer som er knyttet til hydrologisk modellering. Første del av kapitlet omhandler klimaendringer globalt og lokalt, i tillegg til en beskrivelse av begrepet overvann. Klimaendringer medfører økt nedbør i fremtiden, noe som har en stor påvirkning på overvann i urbane områder. Andre del av kapitlet omfatter teori om digitale terrengmodeller og ulike verktøy som blir brukt i de hydrologiske analysene i masteroppgaven.

3.1 Klima

Klimaendringer som har oppstått på grunn av ubalanse i energiutvekslingen har forekommet til all tid, men siden 1950 er menneskelig aktivitet hovedårsaken til økt global temperatur (Hanssen-Bauer et al., 2015). I følge Masson-Delmotte et al. (2021) har menneskeskapte klimaendringer ført til en økning av ekstremværhendelser som tørke, hetebølger, tropiske sykloner og intens nedbør. Klimaendringene påvirker alle bebodde regioner i verden, og effekten av menneskeskapte klimaendringer vil øke i tiden fremover (Masson-Delmotte, 2021). I følge Masson-Delmotte et al. (2021) vil den globale temperaturen øke på grunn av menneskeskapte klimaendringer, noe som vil resultere i økt intensitet og hyppighet på fremtidige nedbørshendelser. Med utgangspunkt i et scenario med høyt utslipp av drivhusgasser, vil gjennomsnittlig nedbør på landområder øke med 1-18% sett i et globalt og årlig perspektiv (Masson-Delmotte et al., 2021).

Klimaendringene er allerede merkbare i Norge. I følge Hanssen-Bauer et al. (2015) er det forventet at årsnedbøren i Norge skal øke med 18% frem mot slutten av århundret. Denne framskrivingen er basert på utslippsscenario RCP 8,5, som er det høyeste utslippsscenarioet (Hanssen-Bauer et al., 2015). Episoder med styrtregn vil forekomme hyppigere og kraftigere, og antall dager med styrtregn vil forekomme dobbelt så ofte (Hanssen-Bauer et al., 2015). I tillegg til dette vil nedbørsmengden under en episode med styrtregn øke med 19% (Hanssen-Bauer et al., 2015). Styrtregn kan betegnes som intens nedbør som forekommer over en kort tidsperiode med kort responstid, noe som gjør det vanskelig å predikere i forkant (Dowell, 2015). Denne nedbørstypen er ekstra sårbar for små nedbørsfelt med bratt gradient, da de har lite plass til magasinering av vann (Dowell, 2015). Styrtflommer forekommer ofte ved

konvektive nedbørhendelser, også kalt bygenedbør, som er intenst og kortvarig nedbør som opptrer lokalt (Borga et al., 2011; Sulebak, 2007).

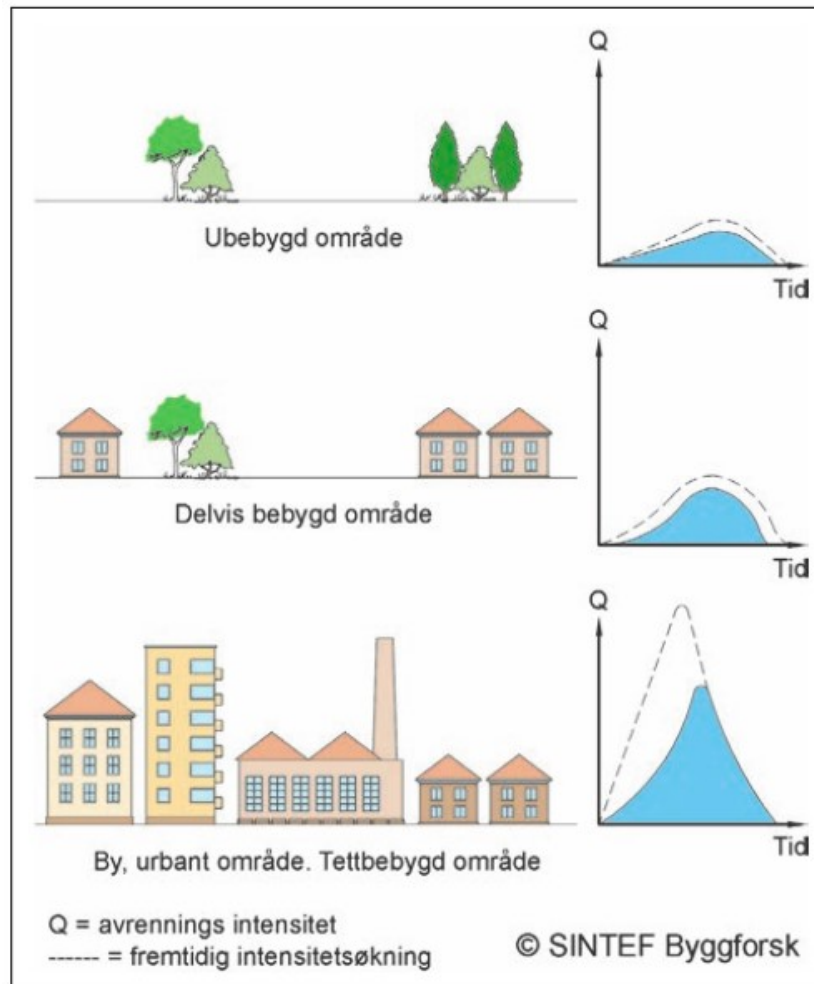
I Buskerud vil nedbøren bli kraftigere, mer intens og forekomme hyppigere (Klimaservicesenter, 2022). Det er forventet høyest økning i nedbørendring på vinteren med 30% og våren med 25% (Klimaservicesenter, 2022). Om vinteren vil mer av nedbøren komme som regn, og om våren vil snøsmeltingen skje tidligere enn i dag (Klimaservicesenter, 2022). For små og bratte nedbørfelt vil flomvannføringen øke med minst 20%, og det kan være fare for at små elver finner nye flomveier (Klimaservicesenter, 2022). I følge Hanssen-Bauer et al. (2015) er det usikkerhet rundt nøyaktigheten til tallene på grunn av uvisshet rundt fremtidige menneskeskapte utslipp, forenklinger i klimamodellene og naturlige variasjoner.

3.2 Overvann

Overvann betegnes som regnvann og smeltevann som renner av på overflaten (Miljødirektoratet, 2021). I følge (Bridge, 2003, s. 7) er overflateavrenning delt inn i to forskjellige typer; mettet overflateavrenning og Hortons overflateavrenning. Mettet overflateavrenning oppstår når bakken er mettet med vann og dens kapasitet er nådd (Bridge, 2003, s. 8). Hortons overflateavrenning oppstår når bakkens infiltrasjonskapasitet, altså kapasiteten bakken har til å infiltrere vann, blir oversteget av nedbørintensiteten (Knighton, 1998, s. 68). Dette oppstår ofte i områder med impermeable overflater, da bakken ikke rekker å infiltrere vannet på grunn av høy nedbørintensitet (Knighton, 1998, s. 68). Overvann kan derfor betegnes som vann som ikke blir infiltrert i bakken. Dette kan forekomme hvis jorden er mettet eller frosset, overflaten er tettet på grunn av asfaltering eller annen menneskelig konstruksjon.

Urbanisering er en drivfaktor for økt fortetting i byene og bidrar til økt andel med tette flater i byer og tettsteder (NOU 2015:16). Overvann kan oppstå i urbane områder som følge av tette flater og avløpsnett som har overgått sin kapasitet på grunn av styrtregn (Miljødirektoratet, 2021). Figur 5 viser forskjell på avrenning for et ubebygde område som består av grøntarealer, og for et urbant område med tette flater og tettbebygde områder. Figuren viser at avrenningens intensitet øker i takt med mengde bebygde områder. I følge Chen et al. (2009) vil urbane arealer redusere infiltrasjon og øke avrenning på overflaten, noe som bidrar til flomhendelser. Avrenningen vil være mer intens for parkeringsplasser, asfalterte gater og tak, sett i forhold til grøntarealer som parker, hager og naturlig terreng (NOU 2015:16). Dette på grunn av at

infiltrasjonsevnen til overflaten for tette flater er lavere enn for grønne områder (Zhang et al., 2012). Grøntarealer vil derfor bidra til å redusere overvannsproblemer i urbane områder på grunn av dets evne til å absorbere vann (Parsasyrat & Jamali, 2015).



Figur 5: Avrenning i ubebygde og bebygde områder (NOU 2015:16)

Overvannshåndtering og drenering av veier er viktig for å kunne redusere skader på infrastruktur (Norem et al., 2016). Sluk brukes til å lede overvannet bort fra veiene og inn i ledningsnett og bør derfor plasseres slik at overvannet blir drenert effektivt, ergo der vannstrømningen er størst (Norem et al., 2016). Videre bør slukene drenere bort vannet i tilstrekkelig tid før kapasiteten til slukene overgås av vannmengdene, eller at vannet drenerer til områder som kan gi store konsekvenser (Norem et al., 2016). I følge Norem et al. (2016) vil det være stor sannsynlighet for at sluk som er plassert i veibanen blir tettet igjen av sedimenter og løv, og gode driftsrutiner er derfor en nødvendighet for at slukene skal fungere optimalt.

3.2.1 Konsekvenser av overvann

I følge NOU 2015: 16 (s. 30) er det to faktorer som bidrar til overvann; intens nedbør og fortetting. Det er forventet at utfordringer i forbindelse med overvann vil øke i fremtiden, da kort og intens nedbør skaper flest skader i byer og tettbygde strøk (Hanssen-Bauer et al., 2015; Klimaservicesenter, 2022). Som en så ved stormen Frida i 2012 kan kraftig regnskyll gjøre enormt stor skade på bygg og infrastruktur hvis det ikke er tilrettelagt for overvannshåndtering. I følge NOU 2015:16 kan overvann gi direkte og indirekte skader. Direkte skader inkluderer vannskader på bygninger og inventar, skader på infrastruktur-anlegg, erosjonsskader på rekreasjonsområder og trafikkarealer, i tillegg til tap av kulturskatter (NOU 2015:16). Indirekte skader er blant annet forurensningsskader samt tap og kostnader grunnet overvannshendelser (NOU 2015:16).

Styrtregn kan bidra til utløsning av jordskred, noe som resulterer i løse sedimenter som kan bli transportert nedstrøms og gi store skadeeffekter (Vatne, 2013, s. 52). Avsetning av sedimenter i forkant eller på innsiden av kulverter kan føre til lavere kapasitet og dermed dannelse av alternative vannveier (Vatne, 2013, s. 53). Det er derfor viktig å finne en måte å dimensjonere infrastruktur og bygninger med hensyn til dagens og fremtidens klima, spesielt i forhold til nedbør (Hanssen-Bauer et al., 2015, s. 55). Privat eiendom kan bli påvirket av overvann ved at vannveiene finner nye løp og eroderer nye kanaler (Vatne, 2013, s. 54-55). Bygg som er lokalisert innenfor en forsenkning, eller i umiddelbar nærhet til en flomvei, kan derfor være utsatte for overvann og få skader på grunn av sedimenttransport, erosjon og vannskader. Nedenfor er det inkludert to eksempler over skadede bygg etter stormen Frida i 2012 i Mjøndalen, omtrentlig 10 kilometer fra studieområdet.

Figur 6 viser bygg som ligger innenfor en vannoppsamling, mens Figur 7 viser en flomvei som er lokalisert i umiddelbar nærhet til et hus, og som har erodert en del av hagen. I følge NOU (2015:16) bør kommunene ha en overvannshåndtering der målet er å forebygge skader på bygg, miljø og helse. Et mål for kommunene er å jobbe mot å fordøye overvannet lokalt ved infiltrering og magasinering (NOU 2015:16, s. 15). Dette fordi lukkede vannveier, altså elver som er lagt i rør, kan skape problemer med overvann fordi rørene ikke er dimensjonert for fremtidig nedbør (Aano et al., 2019). Det er derfor en forutsetning at gamle bekkeløp skal åpnes, slik at overvannet kan håndteres lettere (Aano et al., 2019). I følge NOU (2015:16) er det nødvendig med kunnskap om lokasjon av dreneringslinjer og skadeutsatte områder i kommunene for å kunne oppnå disse målene.



Figur 6: Skader på bygninger i Mjøndalen sentrum etter Frida hendelsen i 2012 (NTB, 2012b).



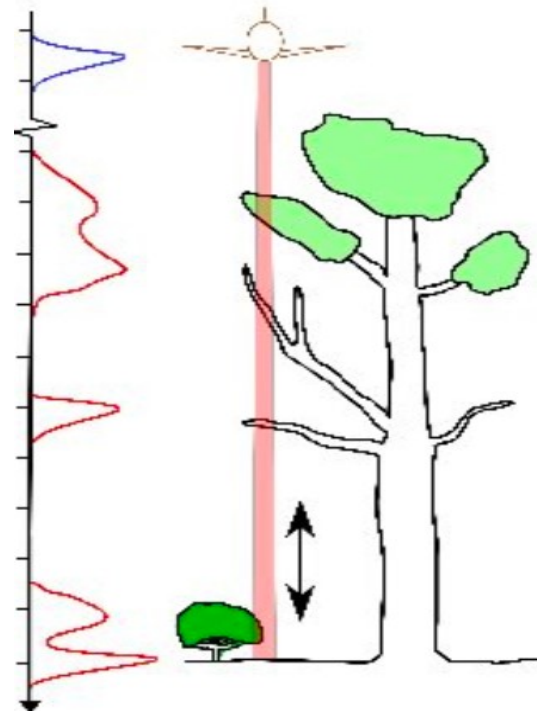
Figur 7: Intenst nedbør fra Frida førte til ødeleggelse i hus og hager (NTB, 2012a).

3.3 Teknologi

3.3.1 LiDAR

LiDAR er en forkortelse for *Light detection and ranging*, og er en fjernmålingsteknologi som bruker laser til å hente ut topografisk data for et landskap (Heywood et al., 2011, s. 61). Det er mange anvendelsesområder for LiDAR, men det vil bli valgt å fokusere på flybåren Lidar da det er relevant for oppgaven. Flybåren LIDAR er en aktiv fjernmålingsteknologi som kan måle vertikale og horisontale avstander ved å sende ut laserpulser med konstant hastighet mot overflaten (Rød, 2015, s. 101; Xiaoye, 2008). Når laseren treffer et objekt vil lyset reflekteres tilbake til sensoren i flyet (Rød, 2015, s. 101). Tidsforskjellen mellom tidspunktet laserpulsen ble utsendt og refleksjonen ble registrert av sensoren, vil gi informasjon om avstanden fra sensoren til bakken (Weitkamp, 2005; Xiaoye, 2008). Det kan komme flere retursignaler fra laserpulsene på grunn av halvgjennomtregelige objekt som er oppstikkende fra bakken (Rød, 2015, s. 101). Figur 8 viser et eksempel på returnerte signal.

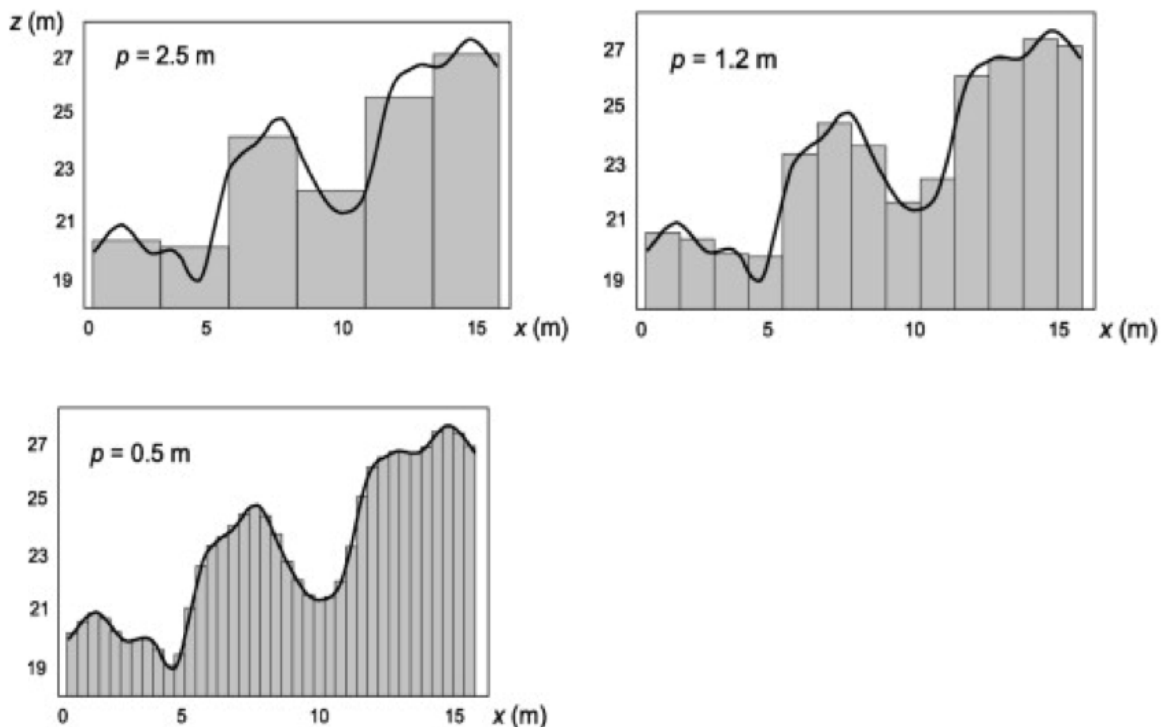
Figur 8 viser at en av de første returnerte laserpulser registrerte en vegetasjonstopp, mens den siste returnerte laserpulsen registrerte bakkenivå (Chauve et al., 2007). Disse punktene kan brukes til å lage henholdsvis overflatemodeller og terrengmodeller (Rød, 2015, s. 101). Punkttettheten til LiDAR-målinger varierer ut fra antall retursignaler som blir registrert (Rød, 2015, s. 102). Punkttetthet gir derfor informasjon om tettheten av datapunktene som blir generert fra LiDAR-skanningene, og høyere antall retursignaler fører til høyere punkttetthet (Rød, 2015, s. 102).



Figur 8: Returnerte signal fra LiDAR. Hentet fra Chauve et al. (2007)

3.3.2 Digital terrengmodell

En digital terrengmodell, også kalt DTM, blir produsert ved at et gitt antall observasjoner blir omgjort til en kontinuerlig overflate, der oppløsningen på høydemodellen er bestemt av antall observasjoner som er blitt gjort for det eksakte området (Heywood et al, 2011, s. 89 - 92). En høydemodell blir laget med datapunktene x , y og z , der x og y koordinatene sammenfatter horisontal plassering mens z koordinatene representerer høyde (Heywood et al, 2011, s. 92). Digitale terrengmodeller er bestående av rutenett der hver piksel inneholder informasjon om terrengets høyde (Heywood et al, 2011, s. 92). Nøyaktigheten for denne metoden avhenger av størrelsen på rutenettet, og om terrenget er komplekst eller flatt for det utvalgte område (Heywood et al, 2011, s. 92). En terrengmodell med høy oppløsning har lang prosesseringstid og opptar stor lagringsplass sett i forhold til en terrengmodell med lav oppløsning (Hengl & Evans, 2009, s.46). Figur 9 viser hvordan terrengvariasjoner i et landskap blir oppfattet med ulik detaljeringsgrad ved ulik oppløsning på terrengmodellene. En terrengmodell med lavere oppløsning har større piksler og er mindre detaljerte på grunn av generalisering (Hengl & Evans, 2009, s. 46). Figuren viser at en terrengmodell med høy oppløsning har små piksler som inneholder detaljert informasjon om det underliggende landskapet.



Figur 9: Registrering av terrenghelning ved ulike oppløsninger (Hengl & Evans, 2009, s. 46)

Under prosesseringen av digitale høydemodeller vil elementer som vegetasjon, bygninger og andre menneskeskapte strukturer bli utelukket fra høydemodellen (Polat & Uysal, 2015). Prosessen med å utelukke disse elementene fra en terrengmodell kalles filtrering, og resultatet vil være en høydemodell som kun inneholder informasjon om terrengets høyde (Polat & Uysal, 2015). I forbindelse med vei og jernbane vil det være lokalisert kulverter under terrengoverflaten som leder vannet gjennom konstruerte rør (Rød, 2015, s.171). Høydeverdiene for kulvertene vil ikke være inkludert i terrengmodellen fordi de er lokalisert under terrengoverflaten. Rasterbaserte terrengmodeller kan kun ha én verdi for hver piksel, derav årsaken til ekskluderingen av høydeverdiene for kulvertene (Rød, 2015, s. 171). For å gjenskape en realistisk vannstrømning ved en normalsituasjon med åpne kulverter, er det derfor nødvendig å implementere kulverter i en digital høydemodell.

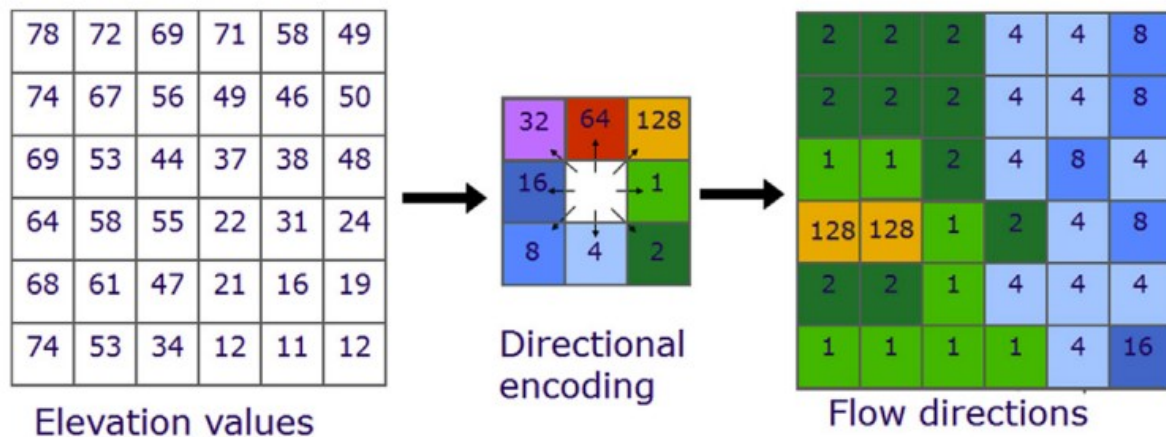
3.4 Hydrologisk modellering

Hydrologisk modellering brukes som metode for å kartlegge sannsynlige løp for overvann og akkumulering av overvann i terrenget (Rød, 2015, s. 239). I følge Gruber og Peckham (2009) vil vannbevegelse påvirkes av gravitasjonskraften, noe som kan analyseres ved bruk av en høydemodell. Dreneringslinjer, også kalt drenslinjer og flomveier, er veiene vannet vil renne ved en kraftig nedbørshendelse. Dreneringslinjer kan fremstilles i ArcGIS ved å bruke ulike hydrologiske verktøy som *dreneringsretning* (flow direction) og *akkumulering av overflatestrømning* (flow accumulation) (Rød, 2015, s. 239 - 246). Forsenkninger, også kalt *bluespots*, er forsenkninger i terrenget der det vil forekomme vannoppsamling ved nedbørhendelser (Balstrøm & Crawford, 2018). De ulike hydrologiske verktøyene blir presentert i avsnittene nedenfor.

3.4.1 Dreneringsretning

Dreneringsretningen kjennetegnes som retningen vannet vil renne fra en gitt piksel (Rød, 2015, s. 240). Det er allikevel flere måter å bestemme dreneringsretning på; D8 algoritmen, MFD (Multiple Flow Direction) algoritmen og D-uendelig algoritmen. D8 algoritmen bestemmer dreneringsretning ved å ta utgangspunkt i gradienten til de åtte omkringliggende nabopikslene til en gitt piksel - retningen til pikselen som har brattest gradient nedstrøms for den gitte pikselen vil bli angitt som dreneringsretning (Balstrøm & Crawford, 2018). D8 algoritmen tar derfor utgangspunkt i at vannet kun kan drenere i åtte ulike retninger (Jones, 2002, s. 1052). Videre

vil den bestemte dreneringsretningen bli kodet slik at pikselverdien representerer retningen. Som vist i Figur 10 er det åtte ulike verdier for de ulike retningene: 1 (øst), 2 (sør-øst), 4 (sør), 8 (sør-vest), 16 (vest), 32 (nord-vest), 64 (nord) og 128 (nord-øst). Den aktuelle pikselen vil bli kodet med en av disse verdiene, basert på dreneringsretningen i resultatrasteret, også kalt dreneringsrasteret (Rød, 2015, s. 240).



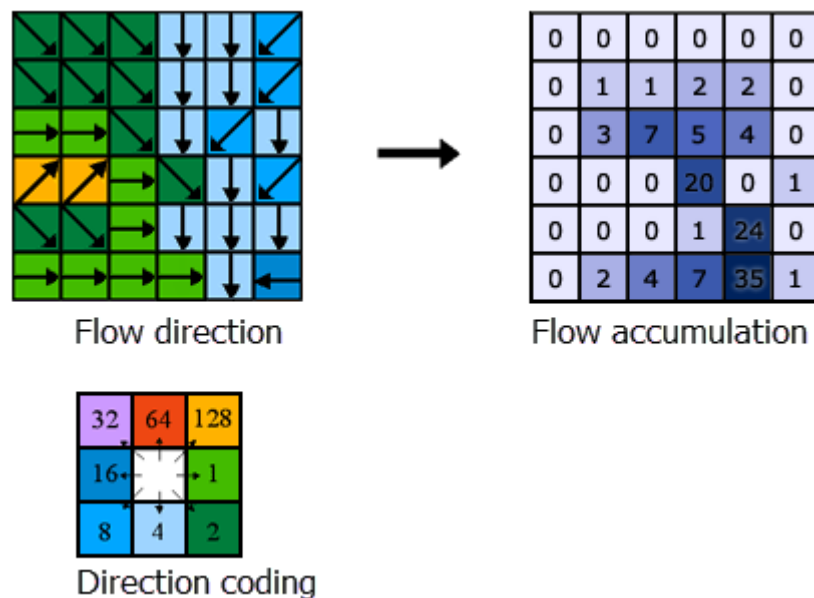
Figur 10: Bestemmelse av dreneringsretning for en raster bestående av høydeverdier (Balstrøm & Crawford, 2018)

D8 algoritmen kan kun modellere strømning konvergens og ikke divergens (Gruber & Peckham, 2009, s. 176). Konvergent strømning tilsvarer flere piksler som drenerer inn i én piksel, mens divergent strømning tilsvarer én piksel som drenerer inn i flere piksler (Gruber & Peckham, 2009, s. 176). Hvis to eller flere piksler nedstrøms for et punkt har samme høydeverdi, og er en del av en forsenkning, vil D8 algoritmen summere verdiene på retningene. Et eksempel på dette kan være hvis pikslene til høyre (verdi 1) og til venstre (verdi 16) for en piksel har samme z-verdi, noe som vil resultere i en dreneringsretning på $1 + 16 = 17$ (Esri, u.å.-b). Hvis pikselen ikke er en del av en forsenkning og flere av nabopikslene har samme z-verdi, blir dreneringsretningen bestemt ved å velge den mest sannsynlige veien (Esri, u.å.-b).

I flate områder vil D8 algoritmen lage urealistiske strømningsmønstre, siden alle retningene er av samme gradient (O'Callaghan & Mark, 1984, s. 334). D8 algoritmen er beregnet på små nedbørsfelt med bratt gradient (Jones, 2002, s. 1053). MFD og D-uendelig er algoritmer som tar mer hensyn til flate områder enn D8 algoritmen. MFD er en algoritme som identifiserer dreneringsretning basert på alle nabopiksler som er nedstrøms for en piksel, og ikke kun de åtte nærmeste (Qin et al., 2007). I likhet med dette kan D-uendelig algoritmen tilegne uendelige dreneringsretninger, der dreneringsretningen er flyttall (Al-Muqdad et al., 2011; Gruber & Peckham, 2009).

3.4.2 Strømningsakkumulering

Strømningsakkumulering, også kalt *flow accumulation*, gir informasjon om mengde vann som drenerer til en gitt piksel (Zhang et al., 2017). I følge Bridge (2003, s. 7) vil vann bli supplert til elver fra nedbør innenfor nedbørfeltet. Verdien til hver piksel i akkumuleringsrasteret representerer akkumulert tilrenningsareal oppstrøms for den bestemte pikselen (Rød, 2015, s. 245). Det akkumulerte tilrenningsarealet kan beregnes ved å multiplisere pikselstørrelsen i terrengmodellen med antall piksler som drenerer til den bestemte pikselen (Rød, 2015 s. 245). På grunn av dette er det viktig at hele nedbørsfeltet er inkludert i modelleringen, hvis ikke kan akkumulert tilrenningsareal oppstrøms bli feilkalkulert (Gruber & Peckham, s. 184). For å kunne lage et akkumuleringsraster av overflatestrømming er det nødvendig å bruke et raster over dreneringsretning som inngangsdata. Figur 11 er en illustrasjon over hvordan strømningsakkumulering baseres på dreneringsretningen.



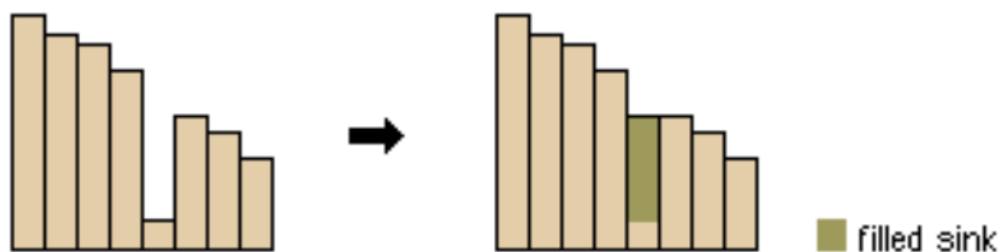
Figur 11: Bestemmelse av strømningsakkumulering (Esri, u.å.-e)

Piksler med høy strømningsakkumulering er områder der vann vil akkumulere, og piksler uten strømningsakkumulering er områder der vannet vil renne fra (Esri, u.å.-e). Figur 11 viser at pikslene som er kodet “0” ikke vil få tilrenning fra andre piksler, mens pikselen som er kodet som “35” vil få tilrenning fra pikslene oppstrøms. Dette stemmer overens med flyttrastet, som viser hvilken vei vannet vil drenere fra hver piksel. Vektraster kan bli brukt til å vektlegge hver piksel i et raster med en bestemt verdi. Et vektraster som representerer nedbør, et såkalt nedbørsraster, kan gi informasjon om nedbørsmengde for hver enkelt piksel i

rasteret (Rød, 2015, s. 245). Hvis det ikke benyttes vekttraster i analysen for strømningsakkumulering, vil alle pikslene i rasteret bli vektlagt verdien én (Esri, u.å.-e).

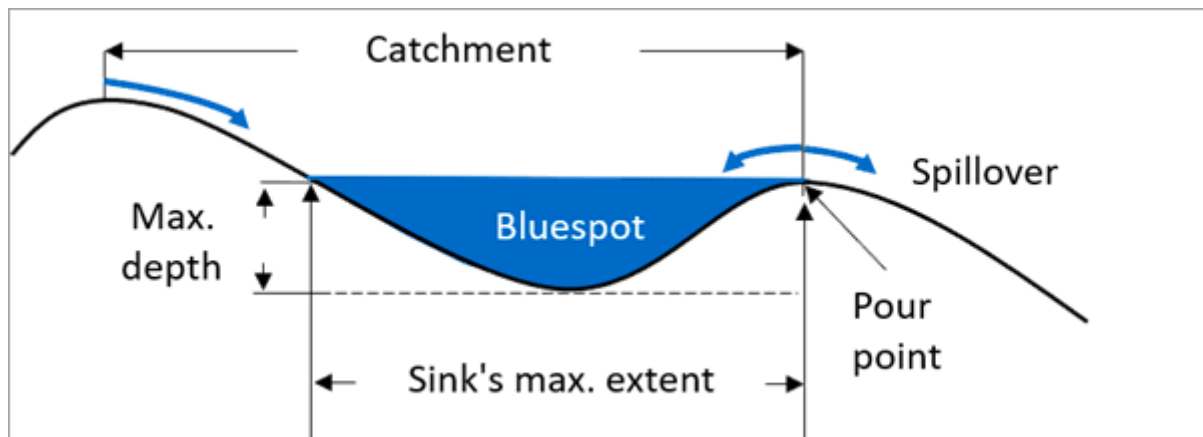
3.4.3 Forsenkninger

Forsenkninger kan betegnes som én piksel eller flere nabopikslers som har lavere høyde enn de omkringliggende pikslene i en høydemodell (Rød, 2015, s. 241). Sentrumpikslers i en forsinking vil ikke kunne bli tilordnet en dreneringsretning fordi pikselverdiene nedstrøms for sentrumpikselen er av høyere verdi (Di Salvo et al., 2017). Små forsinkninger er ofte feil i datagrunnlaget, og kan oppstå ved avrunding av høydeverdier eller dataens oppløsning (Esri, u.å.-d). Det er nødvendig å fjerne disse ugyldige forsinkingene som har oppstått i den digitale terrengmodellen, for å kunne utelukke videre feil i hydrologiske analyser (Maksimović et al., 2009). I følge Di Salvo et al. (2017) kan ugyldige forsinkninger bli fjernet ved å bruke det hydrologiske verktøyet *Fill*, også kalt fyllingsverktøy i denne oppgaven. I forbindelse med hydrologisk modellering er det nødvendig å fylle forsinkingene, slik at det ikke oppstår brudd i dreneringslinjene (Balstrøm, 2022). Figur 12 viser hvordan en forsinkningspiksel kan justeres, slik at pikselen får tilsvarende høydeverdi som den laveste nabopikselen (Rød, 2015, s. 242).



Figur 12: En profil av en forsinking før og etter fyllingsverktøyet (Esri, u.å.-d)

Forsinking kan også være en betegnelse på en grop i terrenget der oppsamling av overvann opptrer ved en nedbørshendelse. Forsinkninger kan derfor være områder som kommer til å bli oversvømt ved en flomhendelse, og som utgjør fare for omkringliggende infrastruktur og bygninger (Saeed et al., 2021). Størrelsen og dybden til en forsinking vil avhenge av ulike faktorer som for eksempel dets tilhørende nedbørsfelt, terrenghelning og nedbørintensitet (Balstrøm, 2022). Figur 13 viser det lokale nedbørsfeltet til en forsinking, og hvordan nedbøren blir transportert innad i nedbørsfeltet. Vannet innenfor nedbørsfeltet vil drenere ned til forsinkingen, og når forsinkingen har nådd sin kapasitet vil vannet drenere videre nedover til neste nedbørsfelt (Balstrøm, 2022). Punktet der vannet drenerer ut av forsinkingen og over til neste lokale nedbørsfelt kalles for *pour point* eller dreneringspunkt (Balstrøm, 2022).



Figur 13: Forsenkning og dets tilhørende egenskaper (Balstrøm, 2022)

Forskningsanalyser er basert på digitale terrengmodeller, og nøyaktigheten og påliteligheten til en digital terrengmodell er en avgjørende faktor for å kunne lage troverdige forskningsanalyser (Di Salvo et al., 2017). I følge Balstrøm og Crawford (2018) vil GIS identifisere forsengkninger som lavpunkter i terrenget som er omringet av piksler med høyere høydeverdi - pikselstørrelsen i høydemodellen bør være liten nok til at forskningspikslene blir oppdaget.

4 Data

Dette kapittelet omhandler informasjon om dataen som har blitt brukt i denne oppgaven. For å kunne lage gode hydrologiske modeller er det nødvendig med gode data, slik at modelleringen blir realistisk. Dataen som har blitt brukt til de hydrologiske analysene i denne kartleggingen har blitt hentet fra ulike kilder, noe som blir beskrevet senere i kapittelet. Programmet som har blitt brukt i forbindelse med modelleringen er ArcGIS Pro 2.8.3. Det ble brukt en tilleggspakke for ArcGIS Pro, *Spatial Analyst*, for å utføre de hydrologiske analysene.

4.1 Digital terrengmodell

For å kunne undersøke om oppløsning på terrengmodell er viktig for korrekt hydrologisk modellering var det nødvendig å lage tre ulike terrengmodeller med ulik oppløsning. Valg av oppløsning ble basert på tidligere studier gjort av Bratlie (2015) og Balstrøm og Crawford (2018). Bratlie (2015) genererte flomveier for tidligere Nedre Eiker kommune, og brukte 1 meters oppløsning for sin analyse som er på eiendomsnivå. Murphy et al. (2008) brukte også 1 meter oppløsning i sin modellering, noe som resulterte i valg av 1-meter terrengmodell for denne oppgaven. Balstrøm og Crawford (2018) gjorde en forsenkningsanalyse for København i Danmark, og brukte en DTM med oppløsning på 40 centimeter, noe som var den høyeste oppløsningen innenfor studieområdet. Innenfor studieområdet i denne oppgaven var den høyeste tilgjengelige oppløsningen 25 centimeter. Det var også ønskelig å se hydrologisk modellering utført på en grovere terrengmodell, noe som resulterte i et valg av 10-meter terrengmodell.

Det ble derfor lastet ned tre høydemodeller fra *hoydedata.no* i filformatet GeoTIFF - to nasjonale høydemodeller med oppløsning på 1 meter og 10 meter og én høydemodell fra et tidligere prosjekt “*Drammen Eiker 2015*” med oppløsning på 25 centimeter. Som avgrensning ble det brukt en REGINE enhet som omfattet studieområdet. REGINE er et register over nedbørfelt i Norge, og er en database fra NVE som omfatter avgrensning over ulike nedbørfelt (NVE, 2020). Omrisset av enheten ble eksportert som shapefil, og ble brukt som avgrensning for å hente DTM fra *hoydedata.no*. I ArcGIS ble det brukt *mosaic to new raster* for å lage en digital terrengmodell for alle høydemodellene. Koordinatsystemet ble satt til «ETRS 1989 UTM Zone 32N» da dette var mest egnet for studieområdet.

De vertikale nøyaktighetsverdiene for de ulike høydemodellene er den mulige feilkilden i høydedifferansen mellom høydeverdien til virkelig overflate og en modellert overflate (Heywood et al., 2011, s. 311). Den vertikale nøyaktighetsverdien er avhengig av punkttettheten til høydemodellen - nøyaktighetsverdien blir lavere hvis punkttettheten er høy. Den vertikale nøyaktighetsklassen for terrengmodellen med 1-meters oppløsning ble satt til 10 cm, fordi det var standarden i følge ASPRS, også kalt American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (American Society for Photogrammetry, 2014). Den vertikale nøyaktighetsverdien for den nasjonale høydemodellen med oppløsning på 10 meter er satt til 3 meter fordi det stod i beskrivelsen til datasettet fra GeoNorge. I følge American Society for Photogrammetry (2014) skal høydemodeller som har en punkttetthet på 2 angis en vertikal nøyaktighetsverdi på 10 centimeter, mens en punkttetthet på 8 gir en vertikal nøyaktighetsverdi på 5 centimeter. Høydemodellen fra prosjektet “*Drammen Eiker 2015*” hadde en punkttetthet på 5. Det ble derfor valgt å angi en vertikal nøyaktighetsverdi på 5 centimeter for denne høydemodellen, fordi dette samsvarer med standardiseringen fra ASPRS (American Society for Photogrammetry, 2014). I tillegg til dette bruker Balstrøm og Crawford (2018) den samme vertikale nøyaktighetsverdien for en høydemodell med oppløsning på 40 centimeter. I forbindelse med forsenkningsanalyse bør man ikke identifisere forsenkninger som har en dybde lavere enn den vertikale nøyaktighetsverdien til terrengmodellen som blir brukt (Balstrøm, 2022).

4.2 Vektordata

Som nevnt i avsnitt 3.3.2 har terrengmodellen gjennomgått en filtreringsprosess som har utelukket vegetasjon og menneskeskapte konstruksjoner, og det vil derfor være nødvendig å inkludere menneskeskapte konstruksjoner i terrengmodellen. Valget ble gjort basert på modifiseringer i tidligere studier (Balstrøm & Crawford, 2018; Meesuk et al., 2015; Murphy et al., 2008). Det ble derfor valgt å inkludere vektordata for vannområder, bygninger, fortauskanter, sluk, underganger, stikkrenner og kulverter i terrengmodellene. Vektordata er fenomener som representeres som enten punkt, linje eller polygon (Rød, 2015, s. 24).

Dataene for vannområder, bygninger og fortauskanter er hentet fra FKB (Felles kartdatabase). FKB dataene for vannområder ble hentet fra *fk_b_vann_område* og ble fremstilt som polygoner. FKB dataene for bygninger ble hentet fra *fk_b_bygning_område* og ble også fremstilt som polygoner. Det ble registrert 4332 bygg innenfor studieområdet, og 2206 bygg innenfor fokusområdet. FKB dataene for fortauskanter ble hentet fra *FKB_veg_kant*. Fortauskantene var

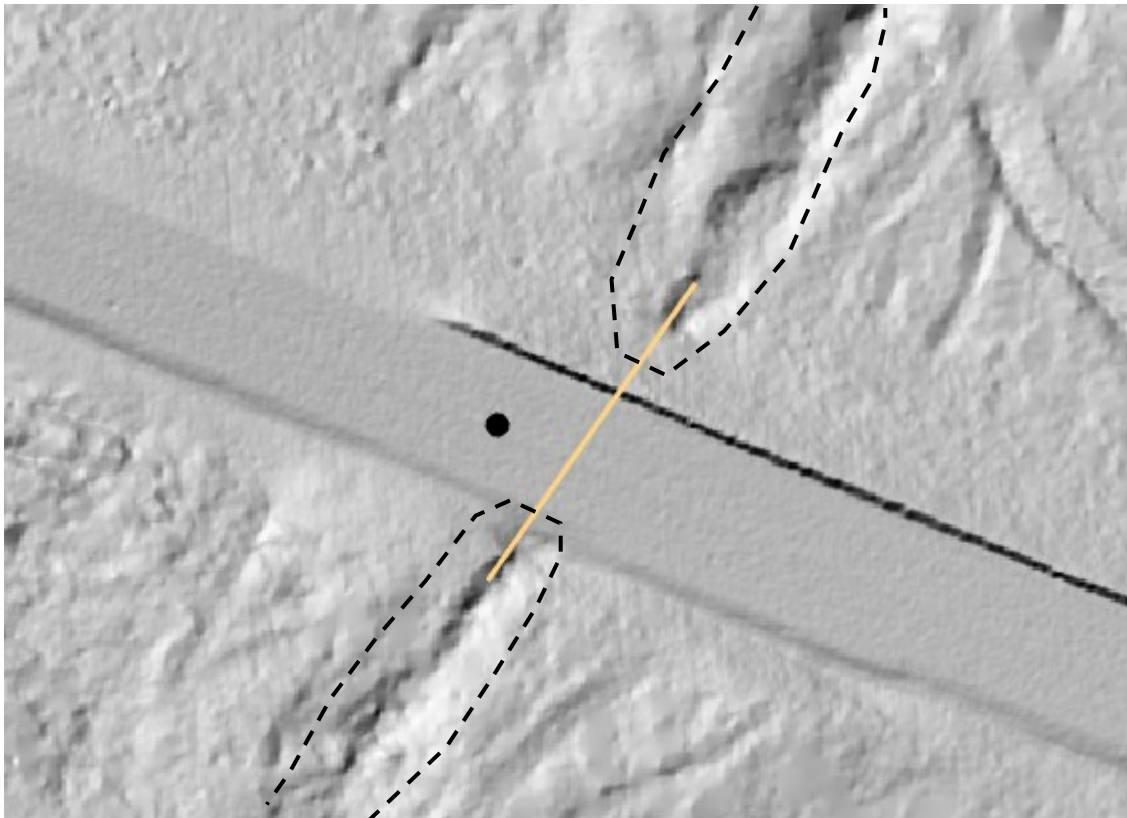
representert som linjer, der det var registrert 588 fortauskanter innenfor studieområdet og 504 innenfor fokusområdet. Attributt Tabellen inneholdt ikke informasjon om høyden til fortauskantene, så det ble tatt utgangspunkt i feltet *nøyaktighetHøyde* for å bestemme høydeverdiene for linjene. Innenfor fokusområdet var det tre fortauskanter som fikk verdien 5, mens de resterende fikk verdien 20. I etterkant av analysene ble det utført et feltarbeid der den reelle høyden til fortauskantene ble undersøkt. Høydene varierte mellom 6 cm, 10 cm og 12 cm for et utvalgt område ved Gulskogen senter, noe som viser at det er usikkerhet knyttet til den valgte høydeverdien for fortauskantene.

Data for lokasjonene til sluk ble tildelt av Drammen kommune. Datasettet inneholdt informasjon om ulike typer kumlokk og det ble valgt å kun innhente informasjon om objekttypen «*sluk*». Dette på grunn av dens mulighet til å drenere vann. Det er kartlagt 697 sluk innenfor studieområdet og 472 sluk innenfor fokusområdet. Lokasjon for underganger ble funnet ved å undersøke et kartlag med fjellskygge, og markere områder i kartet der det er synlige underganger. Dette ble gjort ved å lage et nytt datasett, hvor det ble tegnet opp linjer der start- og slutt punktet representerte inngang og utgang for undergangene. Det ble tegnet opp totalt seks underganger innenfor studieområdet, der én av undergangene var utenfor fokusområdet.

Data for kulverter og stikkrenner tilhørende veier har blitt tildelt fra Drammen kommune, som var hentet fra NVDB (Nasjonal vegdatabank). Kulvertene var representert som linjetema mens stikkrennene var representert som punkttema. Lokasjonen til stikkrennene som tilhørte jernbanen ble hentet fra banekart – kartløsningen til BaneNor. I tillegg til dette har det blitt inkludert kulverter og stikkrenner basert på visuelle observasjoner fra en terrengmodell over studieområdet med fjellskygge. Fjellskygge visualiserer dybden til terrenget ved hjelp av en hypotetisk lyskilde, der lyskildens posisjon er bestemt av asimut og solhøyde (Rød, 2015, s. 224). Generering av fjellskygge kan gjøres på to måter som inkluderer (1) tradisjonell metode som kun har lyskilde fra én retning, eller (2) flerveis metode som har lyskilder fra ulike retninger (Esri, u.å.-c). I denne kartleggingen har det blitt valgt å bruke tradisjonell metode for å kalkulere fjellskygge, fordi det ga tilstrekkelige resultater som kunne brukes til å identifisere fluvial erosjon.

4.2.1 Redigering av vektordata

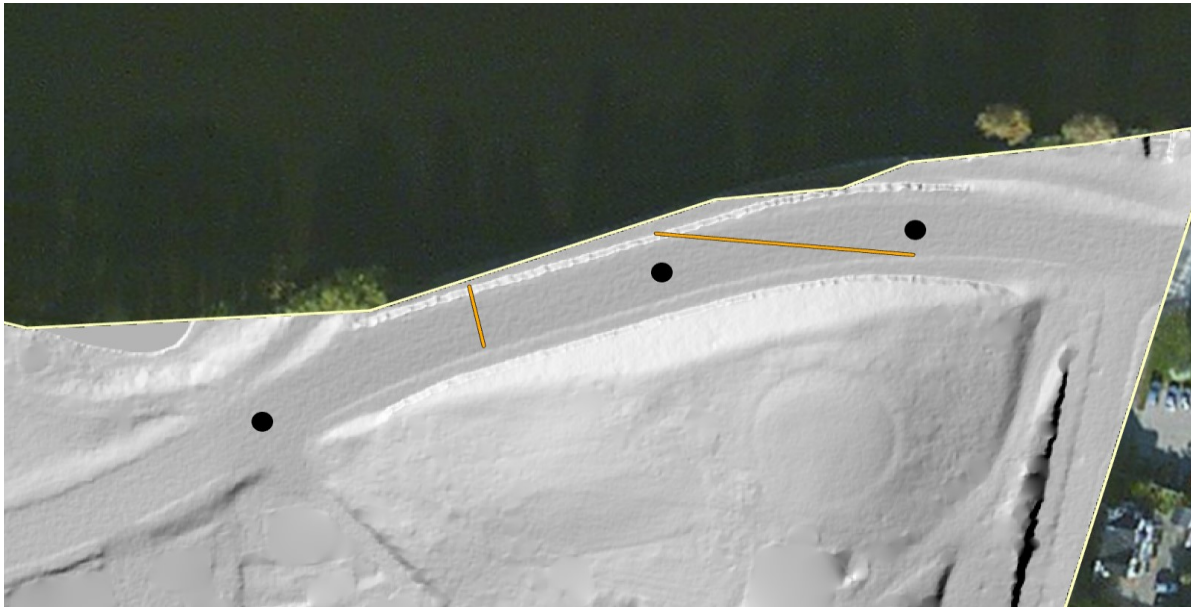
På grunn av fluvial erosjon vil det være mulig å se hvor vannet drenerer ved å undersøke fjellskyggen til en terrengmodell. Ved å sammenlikne lokasjonene for kulverter med den underliggende fjellskyggen, var det synlig at noen av kulvertenes lokasjoner ikke stemte overens med det underliggende terrenget. I disse tilfellene var det nødvendig å redigere vektordataen slik at kulvertene og stikkrennene ble lokalisert på riktig sted. Stikkrennene ble symbolisert som punkttema, og inneholdt derfor ikke informasjon om lokasjon på inngang- og utgang. Det ble derfor nødvendig å tegne opp linjer som representerte inn- og utgang på stikkrennene, ved å undersøke den underliggende fjellskyggen i disse områdene. Et eksempel på dette er vist i Figur 14 der det ble tegnet opp en linje som representerer inn- og utgang på stikkrennen, basert på visuelle observasjoner av fjellskyggen.



Figur 14: Utsnitt av en terrengmodell med fjellskygge der det er lokalisert en vei midt i bildet. Svart punkt representerer stikkrennepunkt, mens oransje linje representerer opptegnet stikkrenne. De svartstiplede områdene er områder med fluvial erosjon.

Figur 14 viser at det er fluvial erosjon i nærheten av stikkrennepunktet. Utklippet viser at stikkrennepunktet er plassert til venstre for selve stikkrenneløpet. I noen tilfeller var det verken mulig å se inn- eller utgang på kulvertene eller stikkrennene når fjellskyggen ble undersøkt visuelt, på grunn av mangel på fluvial erosjon. Disse kulvertene og stikkrennene ble markert

som *usikre*, fordi det er usikkert om disse lokasjonene er reelle. Et eksempel er stikkrennene i Figur 15 der det er vanskelig å se lokasjonene for inn- og utgang, fordi fjellskyggen ikke viser fluvial erosjon i nærheten av punktene. Alle stikkrennene og kulvertene som ikke hadde synlig inn- og utgang, som eksempelet i Figur 15, ble valgt å undersøkes nærmere i felt.



Figur 15: Utsnitt av en terrengmodell med fjellskygge. Svarte punkter representerer stikkrenner og oransje linjer representerer kulverter.

Innenfor studieområdet var det lokalisert totalt 31 stikkrenner og 12 kulverter. Av disse ble 26 stikkrenner og 4 kulverter markert som *usikre*. Alle de usikre stikkrennene og kulvertene ble undersøkt i felt, hvor det ble brukt applikasjonen *Field Collector* for å kartlegge nye punkt. *Field Collector* ble brukt til å kartlegge nye punkt i forbindelse med lokasjoner for stikkrenner og kulverter i virkeligheten. Under feltarbeidet ble det kartlagt flere stikkrenner langs Nedre Eikervei og Øvre Eikervei enn antall stikkrenner fra kommunens data, noe som kan være grunnet i at dataen fra kommunen ikke skilte mellom sluk, bekkeinntak og stikkrenner.

Det var ikke mulig å undersøke posisjonene til kulvertenes og stikkrennenes inngang og utgang langs E134 på grunn av viltgjerder og avsperringer. Lokasjonene for inngang og utgang for kulvertene ble derfor kun basert på tolkning av det underliggende terrenget ved å undersøke fjellskyggen. De opprinnelige stikkrennepunktene i Konnerudgata, Øvre Eikervei og Nedre Eikervei ble sammenliknet med punktene som ble kartlagt under feltarbeidet. Punktene som korrelerte med hverandre ble inkludert i senere analyser, mens de resterende punktene som ikke ble kartlagt i felt ble ekskludert fra analysen. Disse punktene ble ekskludert fordi de kan være en del av ledningsnettet, noe som ikke kan inkluderes i videre analyse. Videre ble disse punktene skissert opp som linjetema på samme måte som nevnt ovenfor.

5 Metode

For å kunne besvare problemstillingene: *Er kartlegging av dreneringslinjer og forsenkninger en nyttig måte å identifisere utsatte bygninger og sluk innenfor Gulskogen i Drammen?* og *Hvilken påvirkning kan modifisering og oppløsning av terrengmodell ha for hydrologisk modellering av studieområdet?* ble det valgt å utføre hydrologiske analyser i ArcGIS Pro. Dette kapitlet omhandler derfor ulike metoder i ArcGIS Pro som ble brukt for å utføre de hydrologiske analysene i masteroppgaven. I første del av kapitlet blir fremgangsmåten for generering av studieområdet beskrevet, i tillegg til ulike modifiseringer av digitale terrengmodeller. Dette fordi det er nødvendig å modifisere terrengmodellen som blir brukt i hydrologiske analyser for at resultatet skal bli mest mulig realistisk (Balstrøm & Crawford, 2018). I andre del av kapitlet blir fremgangsmåten til den hydrologiske modelleringen forklart – i første omgang analysen for dreneringslinjer og i andre omgang forsenkningsanalysen.

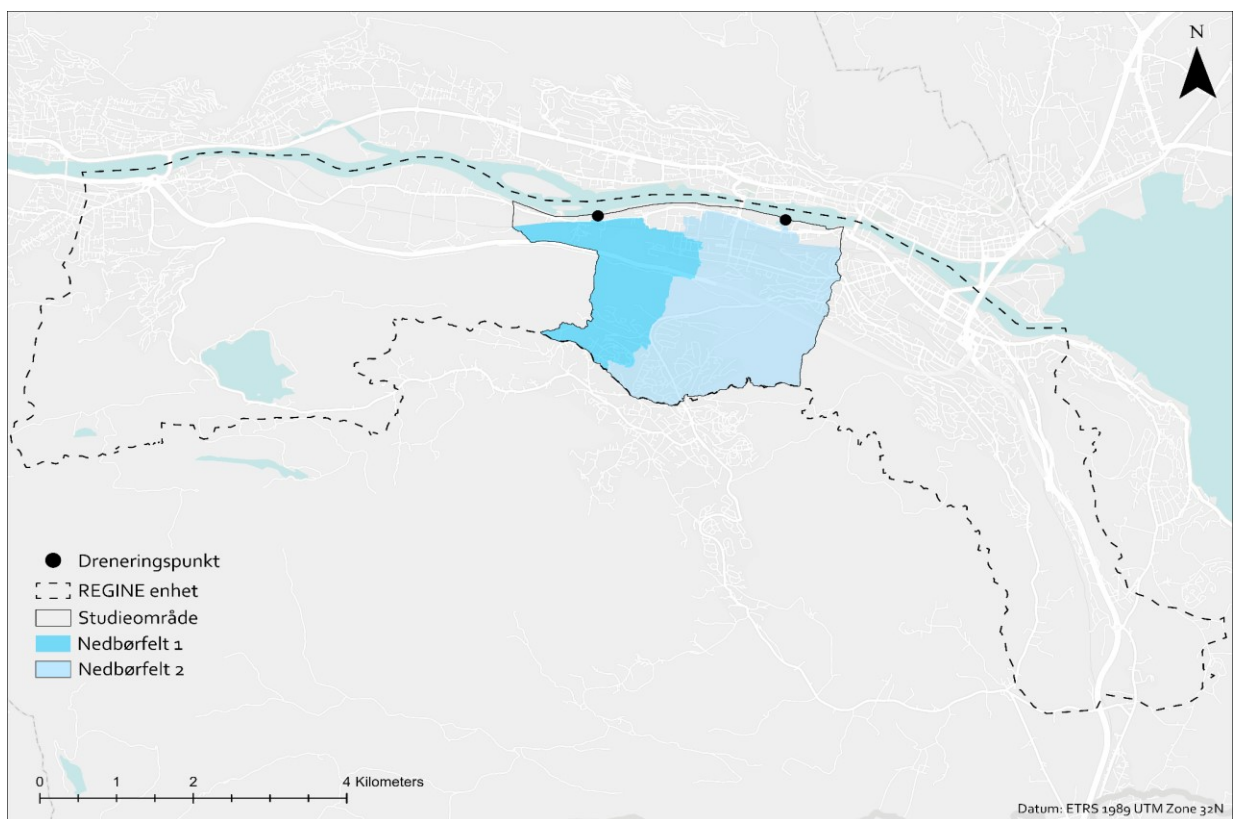
5.1 Generering av studieområdet

Dette delkapitlet forklarer prosessen med å avgrense studieområdet ved å ta utgangspunkt i Gulskogen og dets tilhørende nedbørfelt. For hydrologiske modelleringer er det nødvendig å bruke terrengmodeller som har samme omfang som ett eller flere nedbørfelt (Gruber & Peckham, 2009). Et nedbørfelt er definert som området som bidrar til sediment- og vannsupplering til et elvenettverk, og som er avgrenset av et vannskille – en grense som skiller nedbørfelt fra hverandre (Bridge, 2003, s. 1). For å finne hvilke nedbørfelt som omfattet Gulskogen og omkringliggende områder, ble det tatt utgangspunkt i en REGINE enhet. Som vist i Figur 16 var REGINE enheten avlang og strakte seg over flere byer, noe som indikerte at enheten var sammensatt av flere mindre nedbørfelt.

For å finne hvilke nedbørfelt som tilhørte Gulskogen ble det brukt verktøyet *nedbørfelt* som tar utgangspunkt i et utløp, og kalkulerer tilrenningsarealet oppstrøms for utløpet for å kunne avgrense nedbørfeltet (Esri, u.å.-h). Inngangsdataen til verktøyet er et D8 dreneringsretning raster og dreneringspunkt data, også kalt *pour point* (Esri, u.å.-h). Dreneringspunktene representerer pikslene med høyest drenering, og er lokalisert ved utløpet av et nedbørfelt (Esri, u.å.-g). For å kunne få et D8 dreneringsretning raster og dreneringspunkt ble det utført en flomveisanalyse for REGINE enheten. Flomveisanalyse blir mer detaljert beskrevet i avsnitt

5.3.1. Resultatet fra flomveisanalysen viste to utløp som var lokalisert innenfor det ønskede studieområdet. For å generere dreneringspunkt ble det markert et punkt i hvert utløp, som videre ble flyttet til pikslene med høyest strømningsakkumulering (Esri, u.å.-g).

Resultatene ble deretter brukt som inngangsdata i *Nedbørfelt* verktøyet. Det endelige resultatet er visualisert i Figur 16 som viser to nedbørfelt, et felt for hvert utløp med tilhørende dreneringspunkt. Grensene på de genererte nedbørfeltene ble deretter brukt som avgrensning av studieområdet, visualisert i Figur 16. Figur 16 viser at de genererte nedbørfeltene ikke inkluderer områdene som er beliggende i nærheten av Drammenselven. Det ble derfor valgt å tegne opp studieområdet slik at disse områdene ble inkludert, fordi det var ønskelig å gjennomføre analyser på disse områdene. Det avgrensede studieområdet ble brukt som avgrensning i senere analyser.



Figur 16: Kartet viser en oversikt over omrisset av REGINE enheten til Gulskogen og studieområdet. Det viser også to genererte nedbørfelt symbolisert med ulike farger, med tilhørende dreneringspunkt.

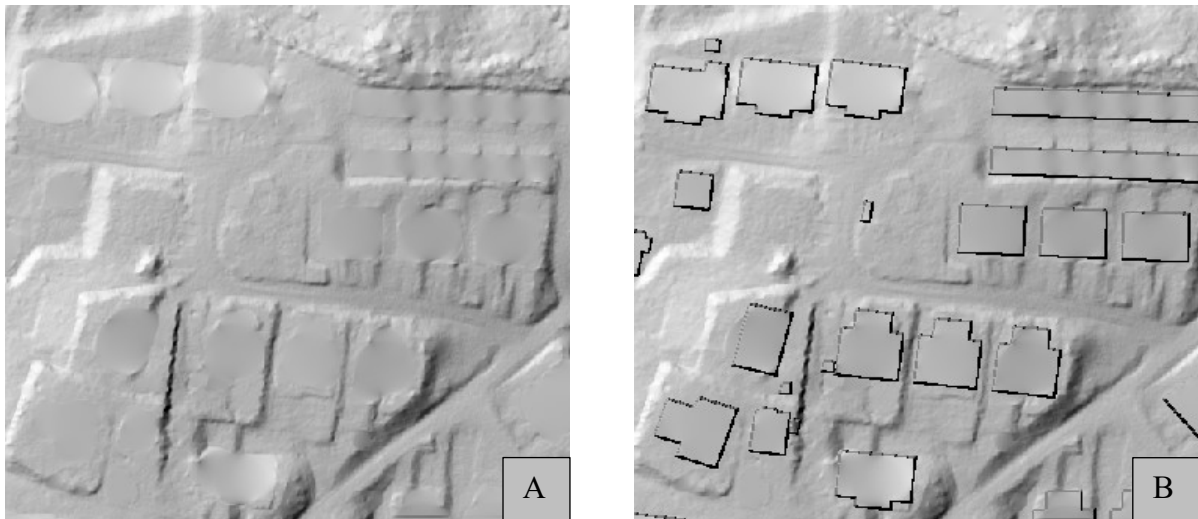
5.2 Modifisering av terrengmodell

De hydrologiske analysene som blir brukt i denne masteroppgaven er avhengige av detaljerte terrengmodeller for at resultatet skal bli realistisk (Bratlie, 2015). Terrengmodellene som har blitt brukt i analysene har blitt klippet til å kun omfatte studieområdet. Som nevnt tidligere i avsnitt 3.3.2 vil ikke terrengmodeller ta hensyn til menneskeskapte konstruksjoner som kulverter og underganger. Det er derfor nødvendig å modifisere terrengmodellene som skal brukes i hydrologiske analyser, slik at vannet drenerer basert på et realistisk terreng. Analysen har blitt kjørt på ulike terrengmodeller for å undersøke påvirkningen modifisering har på resultat fra hydrologiske analyser. Modifiseringene bestod av å implementere menneskeskapte konstruksjoner som bygninger, fortauskanter, underganger, stikkrenner og kulverter. Implementeringen av de ulike modifiseringene beskrives nedenfor.

5.2.1 Bygninger

En modifikasjon som er nødvendig i forbindelse med hydrologisk analyse er heving av høyden på bygninger (Meiforth, 2013). Heving av bygninger påvirker vannets dreneringsløp til å drenere rundt bygningene, og ekskluderer volumet til bygningene som er lokalisert innenfor forsengkingsområder (Balstrøm & Crawford, 2018). Dette er gjeldende for både forsengkinger og drenslinjer. Hvis bygninger ikke blir inkludert i terrengmodellen vil forsengkningenes kapasitet og volum bli feilkalkulert (Balstrøm, 2022). I studien til Balstrøm og Crawford (2018) ble bygninger hevet med 30 000 meter, mens Bratlie (2015) hevet bygningene med seks meter. Den eksakte høydeverdien på bygningene er ikke av høy relevans, så lenge høyden er tilstrekkelig i forbindelse med overvann. Det er kun for å symbolisere at det eksisterer bygninger i terrengmodellen, slik at vannet ikke kan renne gjennom bygningene. I første omgang ble det valgt å heve bygningene med seks meter, likt som Bratlie (2015), noe som resulterte i at drenslinjene drenerte gjennom bygningene. Det ble antatt at høydeverdien var for lav, og det ble derfor valgt å heve bygningene med 30 meter i stedet. I etterkant kan det antas at det oppstod en feil i programmet som førte til at høydeverdiene på bygningene ikke ble registrert, og at heving av bygninger med 6 meter er tilstrekkelig i forbindelse med hydrologisk modellering.

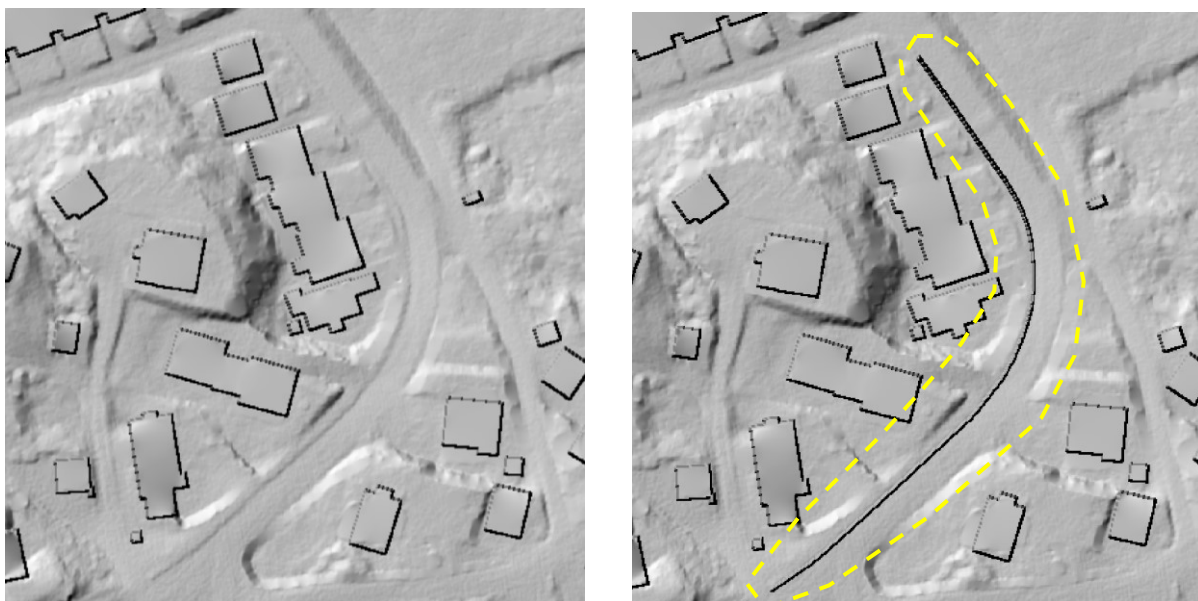
For å heve bygningene i terrenngmodellen ble bygningspolygonene angitt verdien 30. I følge Rød (2015) er det nødvendig å reklassifisere rasteret, for å utelukke fremtidige problemer med manglende data i terrenngmodellen. Pikslene som representerte bygninger ble kodet som 30, mens pikslene som representerte manglende data ble kodet som 0. Deretter ble rasteret implementert i den originale terrenngmodellen ved at høydeverdiene for bygningene ble addert på de originale høydeverdiene. Figur 17 viser hvordan terrenngmodellen ser ut etter at bygningene har blitt hevet 30 meter.



Figur 17: Terrenngmodell uten bygg (a) og terrenngmodell med implementerte bygg (b)

5.2.2 Fortauskanter

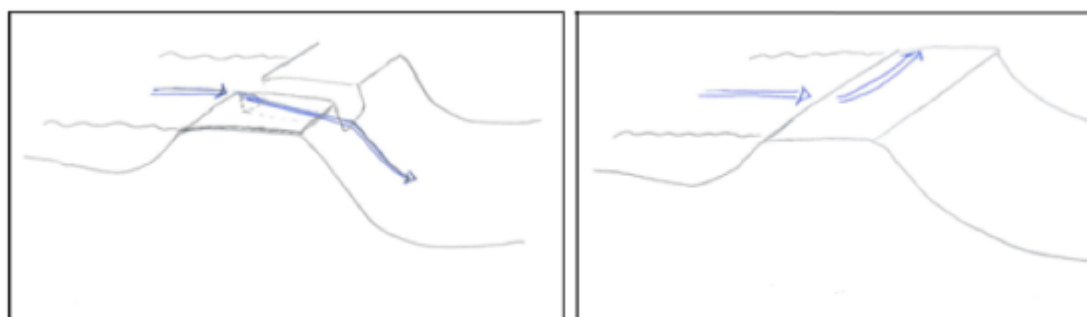
Det ble valgt å inkludere fortauskanter som vektordata i forbindelse med modifisering av terrenngmodellen. Fortauskanter kan fungere som blokkeringer for vannet blir at vannets dreneringsvei blir påvirket (Meiforth, 2013). Ved å implementere fortauskanter i terrenngmodellen vil det bli dannet en mer realistisk fremstilling av terrenget i virkeligheten, siden terrenngmodeller med grovere oppløsning ikke nødvendigvis oppfatter disse konstruksjonene på grunn av lav høydeforskjell. Fortauskantene ble implementert på samme måte som bygningene, men i stedet for å heve de med et tilfeldig tall er det tatt utgangspunkt i hver enkelt høydeverdi for hver enkelt fortauskant. Som nevnt i tidligere er den angitte høydeverdien for fortauskantene 5 eller 20 cm. Fortauskantene ble derfor hevet med 20 cm eller 5 cm, avhengig av hvilken høydeverdi de har blitt gitt i sin respektive attributtavbøll. Figur 18 viser terrenngmodellen etter at bygninger og fortauskanter har blitt implementert. Fortauskantene er representert som linjer.



Figur 18: Terrenngmodell med implementerte bygninger (a) og terrenngmodell med implementerte bygninger og fortauskanter (b).

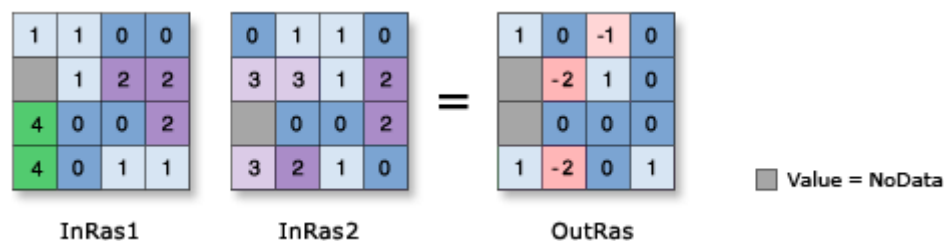
5.2.3 Kulverter og underganger

Det ble valgt å inkludere kulverter og stikkrenner i én av terrenngmodellene for å kartlegge dreneringslinjer ved en situasjon der kulvertene og stikkrennene er åpne og vannet drenerer gjennom konstruksjonene. Figur 19 viser hvordan en åpen situasjon leder vannet gjennom en konstruert gjennomgang, mens en lukket situasjon fører til alternative dreneringsveier for overvann. Det ble valgt å inkludere denne modifiseringen i analysene for å kunne sammenligne resultatene ved en åpen situasjon versus en blokkert situasjon, for dermed å undersøke om antall utsatte sluk og bygninger vil øke eller minske ved alternative dreneringslinjer. Kulvertene og stikkrennene ble derfor digitalisert som linjetema der start- og slutt punkt representerer innløp og utløp på kulvertene og stikkrennene.



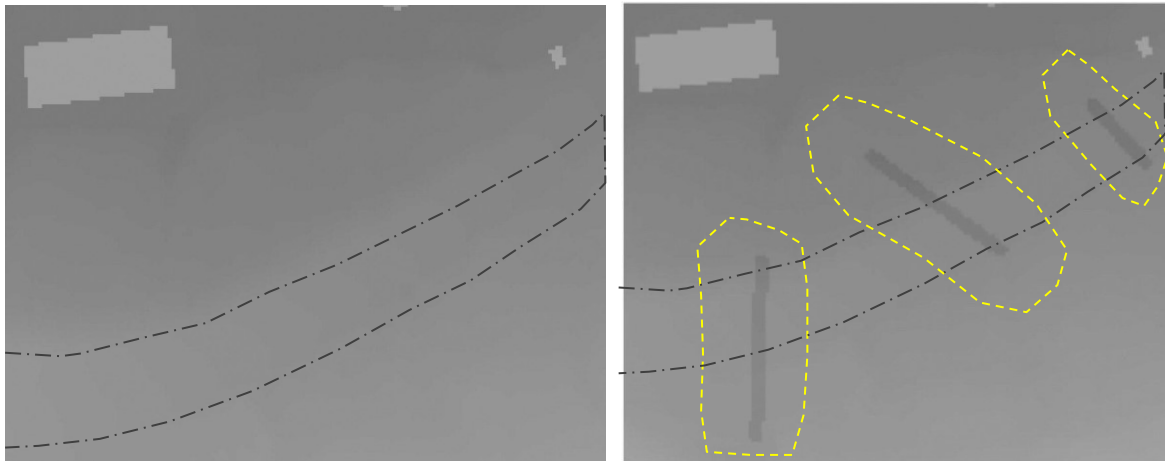
Figur 19: Figuren viser gjennomstrømming av vann gjennom en åpen kulvert (venstre), og hvordan vannet må ta alternative veier hvis en kulvert er blokkert med sedimenter (høyre) (Meiforth, 2013)

Murphy et al. (2008) sin studie omfattet kartlegging av elvenettverk innenfor et nedbørsfelt i Canada. For å få en korrekt hydrologisk modellering valgte Murphy et al. (2008) å korrigere høydemodellen ved å senke kulvertkryssningene som var lokalisert under veiene, med 15 meter. Det er verdt å nevne at den nøyaktige verdien som ble satt i forbindelse med nedsenkning av kulvert ikke er av betydelig karakter, så lenge verdien er tilstrekkelig i forbindelse med det omkringliggende området. Dette betyr at pikselverdiene for kulvertene må være lavere enn pikselverdiene for det omkringliggende området, slik at vannet drenerer gjennom kulvertene i stedet for andre områder. For å implementere kulverter og stikkrenner i terrengmodellen i denne masteroppgaven, ble infrastrukturkonstruksjonene senket med 15 meter ved å bruke verktøyet *Minus*. *Minus* er et verktøy som brukes for å subtrahere pikselverdier i et raster, noe som er visualisert i Figur 20.



Figur 20: Subtraksjon ved bruk av verktøyet "Minus" (Esri, u.å.-f)

Figur 20 viser at subtraksjonen forekommer ved å bruke to inngangsrastere, der pikselverdiene fra det andre inngangsrasteret blir subtrahert fra pikselverdiene fra det første inngangsrasteret (Esri, u.å.-f). Kulvertene og stikkrennene var illustrert som linjetema, noe som resulterte i at alle pikslene utenfor linjene ble kodet om til *Manglete data*. Rasteret ble reklassifisert slik at pikslene som manglet data fikk verdien 0. Etter implementeringen var terrengmodellen bestående av pikselverdier som tilsvarte høydeverdiene fra den opprinnelige terrengmodellen, bortsett fra pikselverdiene som samlokaliserte med kulvertene og stikkrennene som var bestående av høydeverdier som var senket med 15 meter. Figur 21 viser at pikselverdiene for kulvertrasteret har blitt subtrahert fra den originale terrengmodellen, og at kulvertene derfor ble implementert i terrengmodellen. Figuren viser tre kulverter som ble senket med 15 meter, mens de omliggende pikslene har verdier som tilsvarte høydeverdiene til den originale terrengmodellen.



Figur 21: Terrengmodell uten kulverter (a). De svarte stiplede linjene representerer lokasjonen av en vei. Terrengmodell med implementerte kulverter (b). Kulvertene er lokalisert innenfor de gule stiplede linjene.

I første omgang ble det valgt å ikke inkludere buffer på kulvertlinjene, noe som resulterte i at GIS ikke registrerte at det var en nedsenkning i dette området. Dreneringslinjene gikk ikke gjennom infrastrukturkonstruksjonene selv om områdene var nedsenket med 15 meter, men drenerte langs konstruksjonene eller over veien ved siden av konstruksjonene. Det ble derfor valgt å legge på en to meters buffer på vektorlinjene, slik at GIS skulle registrere at vann kan drenere gjennom de nedsenkede områdene. Det ble implementert underganger i terrengmodellen på samme måte som kulverter. Dette ble gjort fordi Murphy (2008) anbefalte å bruke samme metode for nedsenkning av kulverter, både på bruer og underganger.

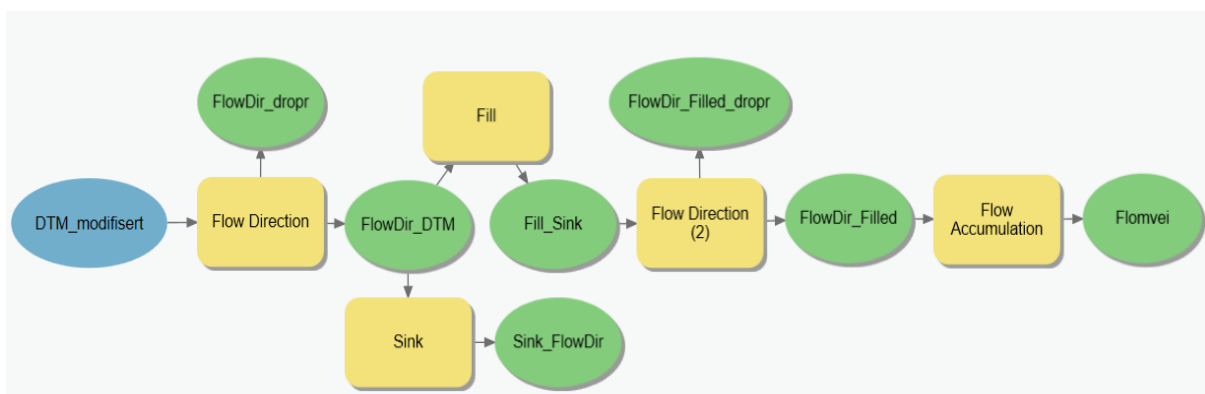
En annen metode for nedsenkning av kulverter og stikkrenner er å følge metoden til studien til Viréhn (2014). Viréhn (2014) skrev masteroppgave om hydrologisk modellering for tre områder i Gudbrandsdalen, der han blant annet kartla vannveier under en normalsituasjon. Viréhn (2014) fant det nødvendig å modifisere terrengmodellen slik at vannet drenerte gjennom infrastrukturkonstruksjonene. Modifiseringen bestod av å finne høydeverdiene til start- og sluttpunktene til kulverten, for deretter å bruke lineær interpolasjon til å finne høydeverdiene for punktene som befinner seg mellom endepunktene (Viréhn, 2014). De interpolerte høydeverdiene erstattet de originale høydeverdiene i terrengmodellen, med unntak av områdene som ikke var bestående av stikkrenner. I denne masteroppgaven ble det forsøkt å bruke denne metoden for nedsenkning av kulverter, men på grunn av tidsbegrensninger ble det valgt å gjennomføre nedsenkningen som beskrevet i avsnittet ovenfor.

5.3 Hydrologisk modellering

For å kunne besvare problemstillingene ble det valgt å utføre hydrologiske modelleringer for studieområdet. De hydrologiske modelleringene som ble brukt i denne oppgaven tar utgangspunkt i at overvann vil dreneres som Hortons overflateavrenning (Balstrøm & Crawford, 2018). De hydrologiske analysene er visualisert som geoprosesseringsmodeller i avsnittene nedenfor. De blå boksene representerer inngangsdata, de gule boksene representerer verktøy mens de grønne boksene representerer utgangsdata. Det ble brukt ModelBuilder for å automatisere analyseprosessene. Model Builder er et visuelt programmeringsspråk som brukes til å automatisere og dokumentere prosesser i ArcGIS (Esri, u.å.-i). I første del av dette delkapittelet vil geoprosesseringsmodellen samt fremgangsmåten for generering av drenslinjer bli gjennomgått, mens i andre del av delkapittelet vil geoprosesseringsmodellen for forsenkningsanalysen bli forklart.

5.3.1 Flomveisanalyse

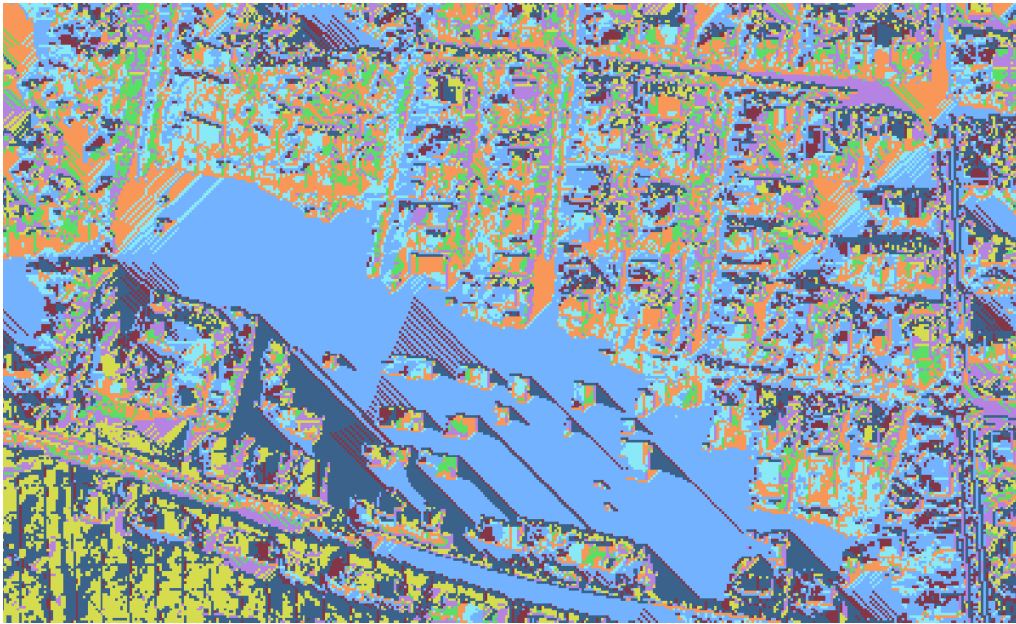
Flomveisanalysen genererte drenslinjer innenfor studieområdet, og er visualisert som en geoprosesseringsmodell i Figur 22. Inngangsdata for geoprosesseringsmodellen er en terrengmodell. Det ble valgt å bruke verktøyene i geoprosesseringsmodellen på bakgrunn av metodene fra tidligere studier (Balstrøm & Crawford, 2018; Maksimović et al., 2009; Murphy et al., 2008)



Figur 22: Geoprosesseringsmodell for å lage drenslinjer

Modellen viser at verktøyet for dreneringsretning ble kjørt to ganger, i første omgang på en terrengmodell uten fylte forsenkninger der pikslene har ubestemt dreneringsretning. I andre omgang ble verktøyet kjørt på en terrengmodell med fylte forsenkninger og dermed uten piksler med ubestemt dreneringsretning. I følge Rød (2015, s. 241) og Longley et al. (2015) er det

nødvendig å bruke en hydrologisk korrekt høydemodell som inngangsdata til verktøyet for akkumulert overflatestrømning. Dette er årsaken til at dreneringsretningsverktøyet ble kjørt to ganger, slik at inngangsrasteret i verktøyet for dreneringsretning er hydrologisk korrekt. Figur 23 viser utgangsdataen etter at verktøyet for dreneringsretning ble brukt på terrenngmodellen første gang. Som tidligere nevnt angir verktøyet åtte forskjellige verdier for ulike dreneringsretninger, noe som er visualisert som åtte forskjellige farger i Figur 23.



Figur 23: Generert raster som visualiserer dreneringsretning

Det ble valgt å bruke D8 algoritmen i forbindelse med dreneringsretning fordi den er anvendelig og tilgjengelig i verktøyene som ble brukt i modellen (Murphy et al., 2008), og på grunn av at nedbørfeltene som studieområdet er basert på, er relativt små. Dette stemmer overens med Jones (2002) og Yang et al. (2014) sine studier som sier at D8 algoritmen bør brukes på nedbørfelt som er små og bratte. Rasteret som er visualisert i Figur 23 var bestående av ugyldige forsenkninger som ble identifisert ved verktøyet *Sinks*. Ifølge Murphy et al. (2008) brukes fyllingsverktøyet for å unngå at dreneringsretningen blir påvirket av kunstige forsenkninger. Maksimović et al. (2009) fjerner ugyldige forsenkninger fordi det kan representere datafeil i terrenngmodellen. Maksimović et al. (2009) fjerner disse ved å sette en terskeldybde og fylle forsinkingene som er mindre enn denne verdien.

I denne oppgaven ble ikke Z-grensen i fyllingsverktøyet satt, noe som betød at alle forsenkningene ble fylt uavhengig av dybde for å unngå brudd i dreneringslinjene. Z-grensen i fyllingsverktøyet avgjør hvilke forsenkninger som vil bli fylt og hvilke forsenkninger som er gyldige forsenkninger (Esri, u.å.-d).

For å kunne identifisere dreneringslinjer ble verktøyet for strømningsakkumulering brukt på rasteret for dreneringsretning. Det ble valgt å ikke inkludere vektraster som inngangsdata i dette verktøyet på grunn av tidsbegrensning, i tillegg til at resultatene uten vektraster var tilstrekkelige i forbindelse med analysens formål. Når man ikke bruker vektraster kan man kun skille mellom områder som vil få mye overvann fra områder som vil få lite overvann.

5.3.1.1 Inngangsdata

Flomveisanalysen ble kjørt på forskjellige digitale terrengmodeller, med alle utgangspunkt i samme geoprosesseringsmodell som vist i Figur 22. De ulike terrengmodellene som har blitt brukt i analysene er fremstilt i Tabell 1. Det ble valgt å kjøre analysen på terrengmodeller med ulike modifiseringer, for å kunne diskutere påvirkningen modifisering kan ha på hydrologiske analyser. Terrengmodell 1 var ikke modifisert, mens terrengmodell 3 og 4 var modifiserte med hevede bygninger og fortauskanter og nedsenkede underganger. Terrengmodell 3 representerte en situasjon med blokkerte kulverter og har derfor ikke inkludert nedsenkede kulverter, mens terrengmodell 4 representerer en normalsituasjon med nedsenkede kulverter.

I tillegg til dette ble det valgt å kjøre analysen på terrengmodeller med ulik oppløsning for å kunne undersøke hvilke forskjeller ulike oppløsninger kan ha på hydrologiske analyser. Terrengmodell 5 har en oppløsning på 25 centimeter, mens terrengmodell 6 har en oppløsning på 10 meter. Resultatene fra terrengmodell 5 og 6 blir videre sammenliknet med resultatene fra terrengmodell 3. Disse terrengmodellene er modifiserte som vist i Tabell 1.

Tabell 1: Terrengmodellene som har blitt brukt i de hydrologiske analysene, med beskrivelse av terrengmodellenes oppløsning og modifiseringer

	Modifisering	Oppløsning
Terrengmodell 1	Ingen modifiseringer	1 meter
Terrengmodell 2	Hevede bygninger og fortauskanter	1 meter
Terrengmodell 3	Hevede bygninger og fortauskanter Nedsenkede underganger	1 meter
Terrengmodell 4	Hevede bygninger og fortauskanter Nedsenkede underganger, kulverter og stikkrenner	1 meter
Terrengmodell 5	Hevede bygninger og fortauskanter Nedsenkede underganger	25 centimeter
Terrengmodell 6	Hevede bygninger og fortauskanter Nedsenkede underganger	10 meter

5.3.1.2 Klassifisering og visualisering av drenslinjene

Etter at analysene ble kjørt var det nødvendig å klassifisere dreneringslinjene for å fremstille de i kart. I situasjonene der ulike dreneringslinjer skulle sammenlignes med hverandre ble det valgt å visualisere dreneringslinjene med én farge. Dette var gjeldende for dreneringslinjene basert på terrengmodeller med ulik oppløsning og med ulike modifiseringer. Terskelverdien for minimum tilrenningsareal for dreneringslinjene ble satt til 5000 m². Denne verdien ble valgt da Meiforth (2013) bruker denne verdien som lavest terskelverdi i sin studie. Det ble valgt å fokusere på lokasjonene til dreneringsløpene for disse terrengmodellene for å sammenligne eventuelle forskjeller.

For å visualisere hvilke bygg og sluk som vil påvirkes av overvann ble det valgt å klassifisere dreneringslinjene slik at det var mulig å se forskjell på drensløp med høy og lav vannføring. Resultatene fra terrengmodell 3 ble derfor benyttet til dette formålet. Bygg og sluk som er lokalisert i eller i nærheten av en dreneringslinje med høy vannføring er mer utsatt enn hvis de er lokalisert i dreneringslinjer med lav vannføring. Klassifiseringen ble basert på Meiforth

(2013) sine kalkulasjoner angående laveste terskelverdi for dreneringslinjer som kan gjøre skade. Disse er visualisert i Figur 24.

Start	End	New
0	5000	0
5000	25000	1
25000	50000	2
50000	100000	3
100000	250000	4
250000	500000	5
500000	4156666	6
NODATA	NODATA	NODATA

Figur 24: Klassifisering av drenslinjer basert på terskelverdier (Meiforth, 2013)

I følge Meiforth (2013) kan dreneringslinjer med et tilrenningsareal på 50 000 m² gjøre skade i urbane områder, mens dreneringslinjer med et tilrenningsareal på 25 000 m² kan gjøre skader i områder med grøntarealer. Det ble derfor valgt å klassifisere drenslinjene med minst vannføring som 5000 - 25 000 m². Resten av klassifiseringen er vist i Figur 24. For å kunne symbolisere dreneringslinjene ble det valgt å gjøre om rasteret til linjetema. På grunn av høye tall ble det valgt å reklassifisere verdiene til lavere tall, noe som er visualisert i Figur 24 under feltet “New”.

Bratlie (2015) mener at tallene for klassifisering bør være som nevnt i Figur 25. I følge Bratlie (2015) bør den laveste terskelverdien være et tilrenningsareal på 200 m², for å kunne sikre en tilstrekkelig overvannshåndtering. Bratlie (2015) mener at dreneringslinjer med et tilrenningsareal på 5000 m² bør inkluderes i kommunens byggesaksavdeling. Tallene fra tabellen i Figur 25 er basert på erfaringer fra stormen Frida i 2012 for tidligere Nedre Eiker kommune.

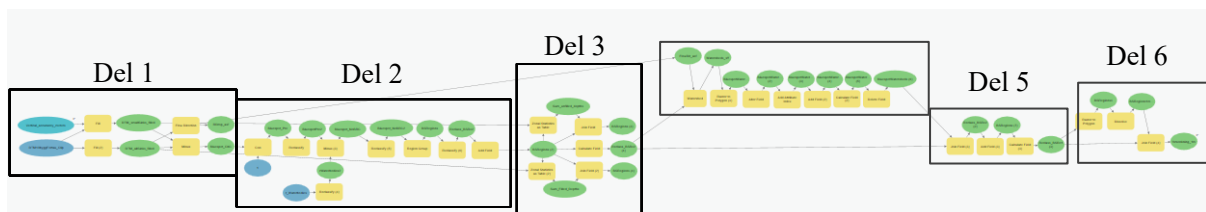
Akkumulert tilrenningsareal	Plannivå
Inntil 200 m ²	Den enkelte eiendomsbesitter
200 – 5 000 m ²	Kommunens byggesaksavdeling
5 000 – 50 000 m ²	Kommunens arealplanavdeling
Over 50 000 m ²	Kommuneplanprosessen i samarbeid med nasjonale og regionale myndigheter

Figur 25: Tall for klassifisering hentet fra Bratlie (2015)

Det ble forsøkt å klassifisere dreneringslinjene innenfor studieområdet etter terskelverdiene ifølge Bratlie (2015). Det ble valgt å ikke inkludere denne klassifiseringen i videre analyse fordi detaljnivået var for høyt i forhold til analysens hensikt. Det ble derfor valgt å ta utgangspunkt i Meiforth (2013) sine kalkuleringer for klassifiseringen av drenslinjene.

5.3.2 Forskningsanalyse

Forskningsanalysen genererte forskningsområder der overvann vil samle seg ved intense nedbørshendelser. Geoprosesseringsmodellen som ble laget i denne oppgaven er basert på modellen til Balstrøm og Crawford (2018), samt en forenklet modell som ble presentert i faget «GIS Tools For Climate Change» (GEOG3527) ved NTNU. Modellen i denne masteroppgaven er en kombinasjon av de to øvrige modellene, der det har blitt brukt noen ulike parametere. Begrunnelsen for valget av å lage en egen forenklet geoprosesseringsmodell var på grunn av ønsket om kortere prosesseringstid, i tillegg til et ønske om økt forståelse for de ulike segmentene av modellen. De ulike segmentene av geoprosesseringsmodellen blir forklart i underkapitlene. Sammenliknet med tidligere studier, har Albâ et al. (2018) også tatt utgangspunkt i geoprosesseringsmodellen til Balstrøm (2022). Den fullstendige geoprosesseringsmodellen som er brukt i denne oppgaven er visualisert i Figur 26, og den finnes i tillegg som vedlegg.



Figur 26: Geoprosesseringsmodell for å lage forskningsområder

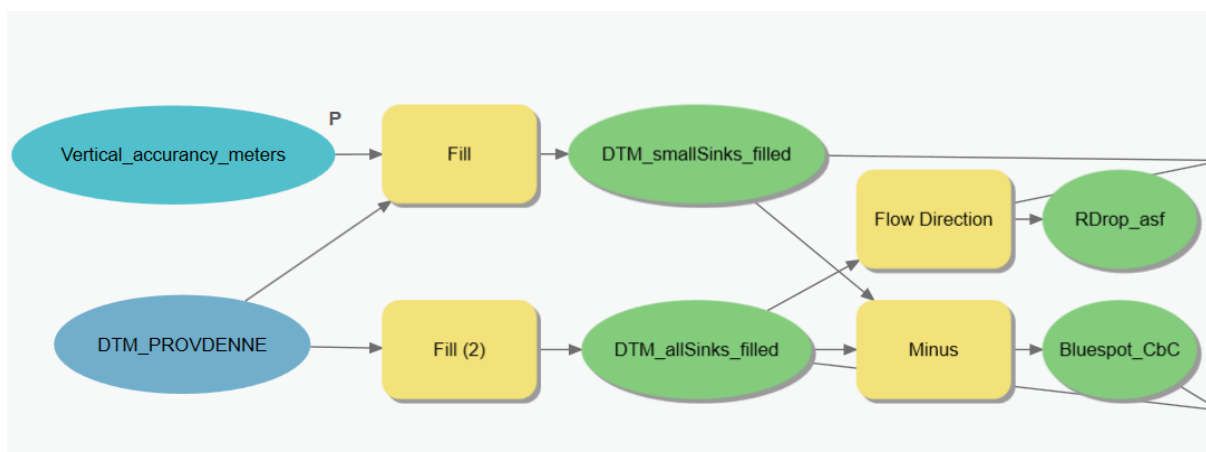
5.3.2.1 Inngangsdata

I likhet med flomveisanalysen har det blitt brukt ulike terrengmodeller med ulik oppløsning og ulike modifiseringer som inngangsdata for forskningsanalysen. I første omgang ble forskningsanalysen kjørt på terrengmodell 2, terrengmodell 5 og terrengmodell 6 for å kunne sammenlikne resultatene fra terrengmodeller med ulik oppløsning. I andre omgang ble forskningsanalysen kjørt på terrengmodell 1 og terrengmodell 2. Det er valgt å utelate nedsenkede kulverter og underganger i de modifiserte terrengmodellene som ble brukt i forskningsanalysene, siden kulvertene ble registrert som forskninger. Årsaken til dette er

at kulvertene ble senket med 15 meter i terrengmodellen, og konstruksjonene vil dermed bli oppfattet som forsenkninger i terrenget der vann vil oppsamle seg. Dette ville påvirket det endelige resultatet med høye verdier for forsenkningsvolum i disse områdene. Det hadde ikke gjenspeilet en realistisk situasjon, siden vann ikke vil oppsamle seg i infrastrukturkonstruksjonene i virkeligheten da vannet kun vil dreneres gjennom.

5.3.2.2 Forsenkingsanalyse del 1

Figur 27 viser begynnelsen av Model Builder prosessen, der fyllingsverktøyet har blitt brukt to ganger på den samme terrengmodellen. Som vist i geoprosesseringsmodellen har det blitt lagt til en vertikal nøyaktighetsverdi som z-grense på det ene fyllingsverktøyet. I følge (Balstrøm & Crawford, 2018) bør terskelverdien for minimum dybde til forsenkninger være den vertikale nøyaktighetsverdien til terrengmodellen som blir brukt i analysen. Den vertikale nøyaktighetsverdien for høydemodellen med oppløsning på 1 meter er 10 cm, høydemodellen med oppløsning på 10 meter er 2 meter, mens for høydemodellen med oppløsning på 25 centimeter er 5 cm. De gyldige forsenkningspikslene som er dypere enn den vertikale nøyaktighetsverdien vil ikke bli fylt. Siden Z-grensen enten ble satt til 0,1 m, 2 m eller 0,05 meter så ble alle forsenkningspikslene under disse verdiene fylt avhengig av hvilken vertikal nøyaktighetsverdi som ble satt.



Figur 27: Første del av forsenkningsanalysen der verktøyene "Fill" og "Minus" ble brukt for å kunne kartlegge gyldige forsenkninger.

Fyllingsverktøyet ble kjørt en ekstra omgang, der z-grensen ikke ble satt til en spesifikk verdi. Dette resulterte i at alle forsenkningene ble fylt uavhengig av dybde. Videre ble verdiene fra terrengmodellen der alle forsenkninger er fylt subtrahert med verdiene fra terrengmodellen der

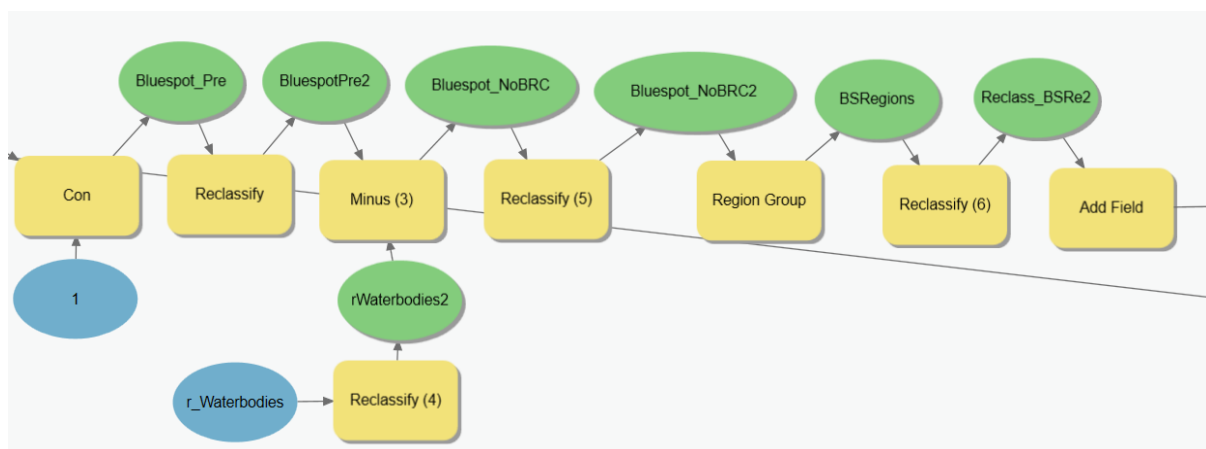
kun forsøkninger under den vertikale nøyaktighetsverdien er fylt. Utgangsdataen bestod dermed av forsøkninger som hadde en dybde på mer enn 5 cm, 10 cm eller 2 m, avhengig av hvilken terrengmodell som ble kjørt.

5.3.2.3 Forsøkningsanalyse del 2

Figur 28 viser at verktøyet *Con* har blitt brukt i begynnelsen av del to av geoprosesseringsmodellen. *Con* er et verktøy som utfører en evaluering av pikselverdiene til inngangs rasteret basert på en gitt betingelse (Esri, u.å.-a). Inngangsdataen til verktøyet ble brukt som et betingelses raster som skulle bestemme pikselverdiene på utgangsdataen. Verktøyet har blitt brukt for å tilegne alle forsøkningsområdene samme verdi, også kalt konstantverdi. Konstantverdien var satt til 1 og er vist som blå boks i Figur 28. Konstantverdien ble angitt som pikselverdien hvis betingelsen var sann (Esri, u.å.-a). For å kunne identifisere forsøkningsområdene ble det lagt til en betingelse i *Con*-verktøyet:

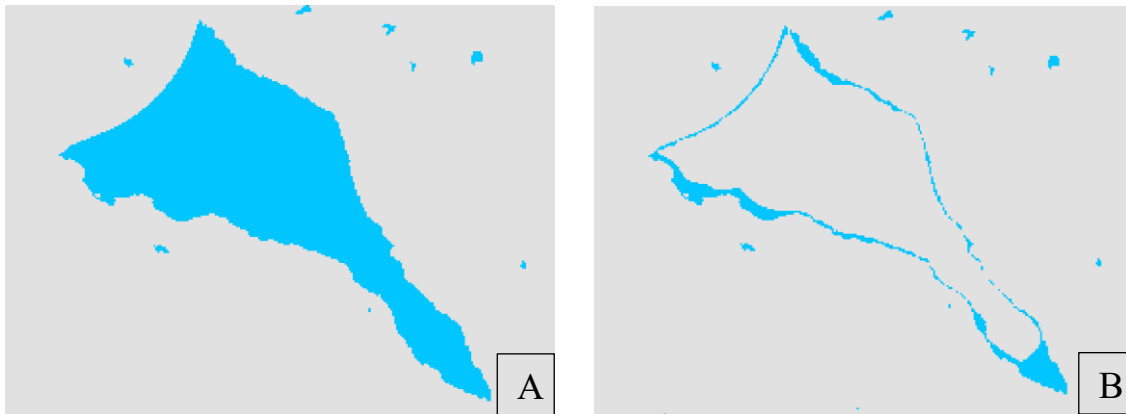
Where "VALUE" is less than "0".

Dette resulterte i at pikslene som hadde mindre høydeverdi enn 0 ble identifisert som forsøkningsområder. Forsøkningsområdene ble tilegnet konstantverdien 1 siden betingelsen var sann for de gjeldende pikslene, mens de resterende pikslene ble tilegnet verdien *Manglende data* fordi betingelsen var falsk. Rasteret ble deretter reklassifisert slik at områdene som hadde verdien *Manglende data* ble tilegnet verdien 0. Dette ble gjort for å lage et binært raster, der forsøkningsområdene fikk verdien 1 mens de resterende pikslene fikk verdien 0. Dette ble gjort for å unngå problemer i forbindelse med manglende data (Rød, 2015, s. 171).



Figur 28: Andre del av forsøkningsmodellen der "Con", "Reclassify", "Minus" og "Region Group" blir brukt.

Vannområdene som er hentet fra FKB ble subtrahert fra den nye terrengmodellen, og verdiene ble reklassifisert til 1 og 0. Dette ble gjort for at eksisterende vannområder, som for eksempel bekker, dammer og innsjøer, ikke skal klassifiseres som forsengkingsområder. Figur 29 viser hvordan denne prosessen har fjernet vannområdene.



Figur 29: Forsengkingsområder med vannområder fra FKB (a) og forsengkingsområder uten vannområder fra FKB (b).

Videre ble det tilegnet ulike regioner til forsengkingspikslene som er lokalisert i samme område. Dette ble gjort for å kunne generere ulike forsengkingsområder til å bruke i senere analyser. Det nye temalaget ble kalt for *BSRegions* (forkortelse for *Bluespot Regions*) også kalt forsengkingsområder. For å ekskludere områder som er lokalisert utenfor studieområdet ble rasteret reklassifisert. Dette ble gjort ved å tilegne verdien *Manglende data* til områder som er beliggende utenfor studieområdet.

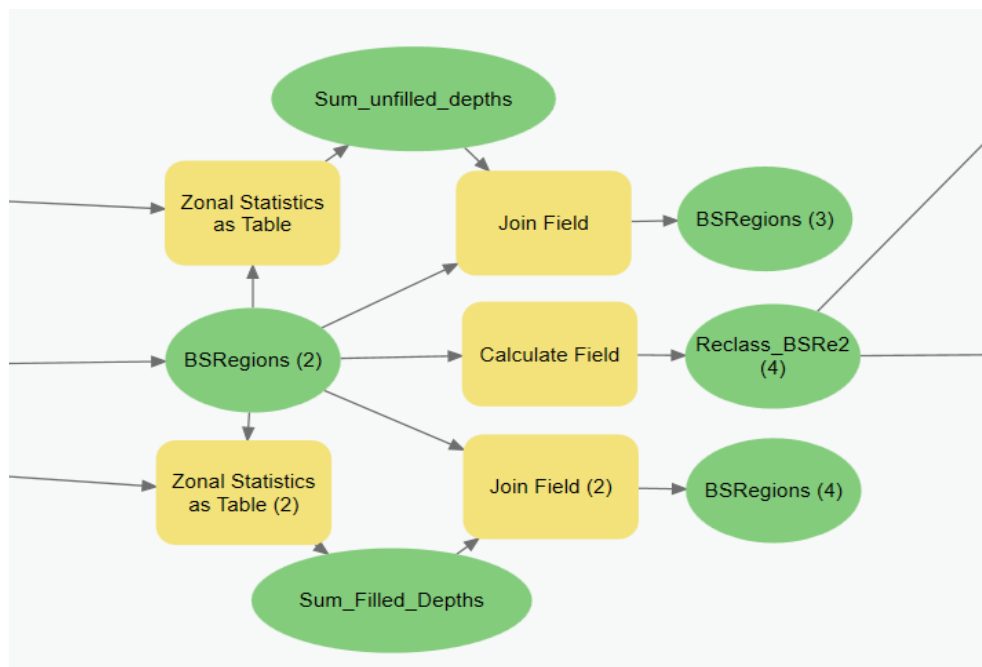
5.3.2.4 Forsengkingsanalyse del 3

I følge Balstrøm og Crawford (2018) kan volumet til forsengkningene kalkuleres ved å summere dybdeverdiene for pikslene innenfor forsengkingsområdene, for deretter å multiplisere verdiene med pikselstørrelsen opphøyd i andre. Verktøyet *Sonestatistikk som tabell* (*Zonal statistics as table*) ble brukt for å summere dybdeverdiene til forsengkningene. For å kunne beregne volum til hver forsengkning ble det valgt å bruke denne likningen:

$$1 * 1 * (!SUM_1! - !SUM!)$$

I første del av likningen multipliseres pikselstørrelse med pikselstørrelse, som i dette eksempelet er 1 meter. Dette gjøres for å finne arealet til pikselen. I andre del av likningen ble verdiene fra fylte forsengkninger subtrahert med verdiene fra de ugyldige fylte forsengkningene. Dette ble gjort for at resultatet skulle inneholde informasjon om volumet til forsengkningene som

var større enn z-grensen. *SUM_1* representerer dybden til alle forsenkninger, mens *SUM* representerer dybden til ugyldige forsenkninger. Til slutt ble arealet til pikselstørrelsen multiplisert med summen fra subtraksjonen, for å finne volumet til hver forsenkning. Figur 30 viser geoprosesseringsmodellen som visualiserer denne prosessen.

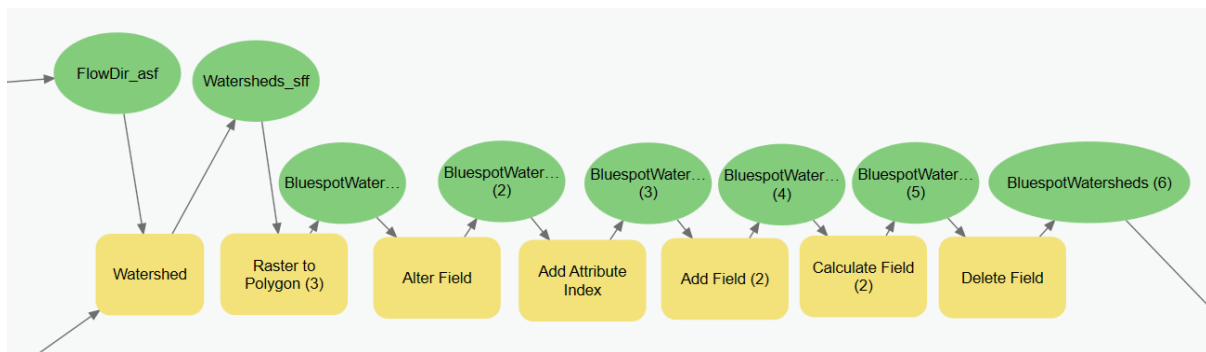


Figur 30: Zonal statistics as Table ble brukt som verktøy i geoprosesseringsmodellen for å beregne volum til forsenkningene

I etterkant av analysen ble det oppfattet at prosessen med å kalkulere volumet til forsenkningene kunne blitt gjort på en forenklet måte. I stedet for å ta utgangspunkt i subtraksjonen mellom verdiene fra fylte forsenkninger og verdiene fra små fylte forsenkninger, kunne man tatt utgangspunkt i verdiene til utgangsdataen fra minus-verktøyet som ble generert i første delen av geoprosesseringsmodellen. I denne oppgaven ble utgangsdataen kalt *Bluespot_CbC*, og er visualisert i Figur 27. Likningen kunne derfor vært skrevet som $1 * 1 * !SUM!$. Det ble valgt å ikke forandre på geoprosesseringsmodellen på grunn av tidsbegrensinger, og på grunn av like resultat.

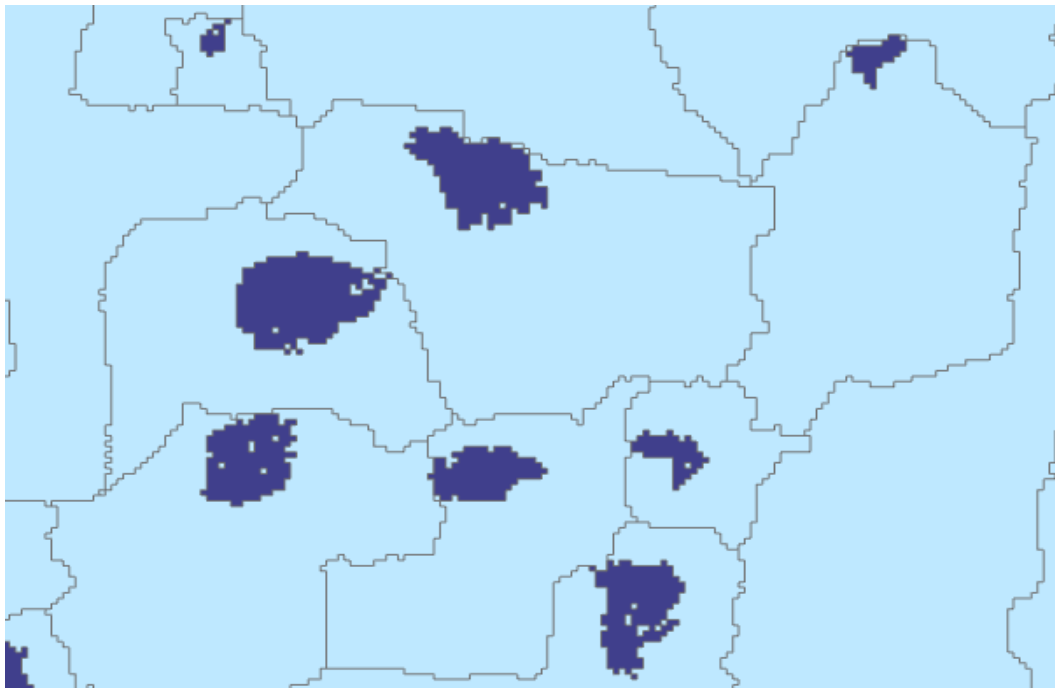
5.3.2.5 Forsenkingsanalyse del 4

For å beregne mengden nedbør som kreves for at en forsenkning skal fylles opp, er det nødvendig å tilegne nedbørfelt for hvert forsenkningsområde. Dette gjøres ved å bruke *Watershed* verktøyet, noe som er visualisert i Figur 31. Som tidligere beskrevet er det behov for et D8 dreneringsretning raster som inngangsdata i dette verktøyet, i tillegg til et inngangsraster, som i dette tilfelle var rasteret med forsenkningsområder kalt *BSRegions*.



Figur 31: Fjerde delen av forskningsmodellen som inneholder informasjon om generering av nedbørfelt til hver enkelt forsøkningsområde

Utgangsdataen ble kalt *BluespotWatersheds* og ble omgjort til polygoner. Nedbørfeltene som ble generert inneholdt informasjon om størrelsen på arealet tilhørende nedbørfeltene til de individuelle forsøkningsområdene. Figur 32 viser at hvert forsøkningsområde fikk tilegnet et eget nedbørfelt.



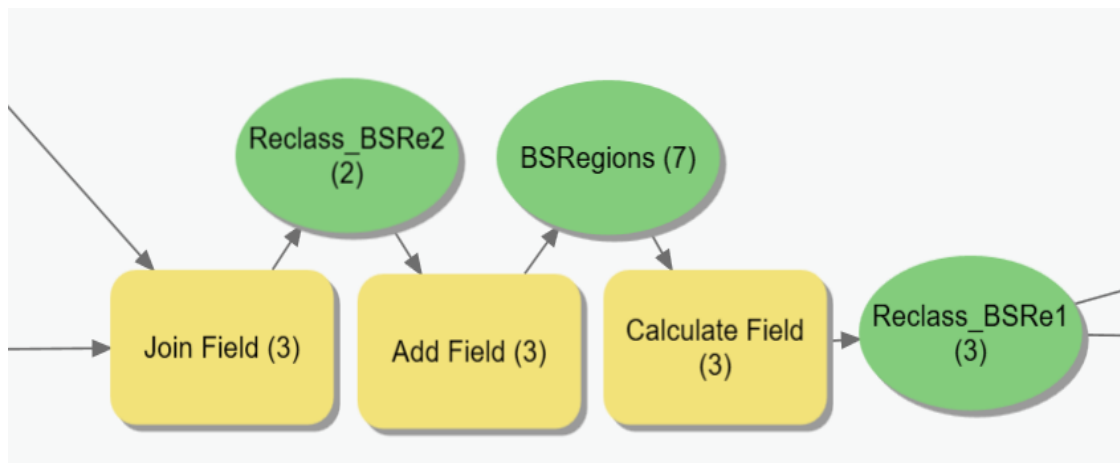
Figur 32: De kartlagte forsøkningsområdene og deres tilhørende lokale nedbørfelt

5.3.2.6 Forskningsanalyse del 5

Oppfyltingsverdien til hver forsøkningsanalyse illustrerer hvor mange millimeter med nedbør som trengs før forsøkningsanalysen er fylt. For å kalkulere denne verdien ble det tatt utgangspunkt i volumet til forsøkningsområdene og arealet til nedbørfeltene, noe som ble kalkulert i del 3 og 4 av geoprosesseringsmodellen. Oppfyltingsverdien ble kalkulert med denne likningen:

$$(!Volume! * 1000) / !WatershedArea!$$

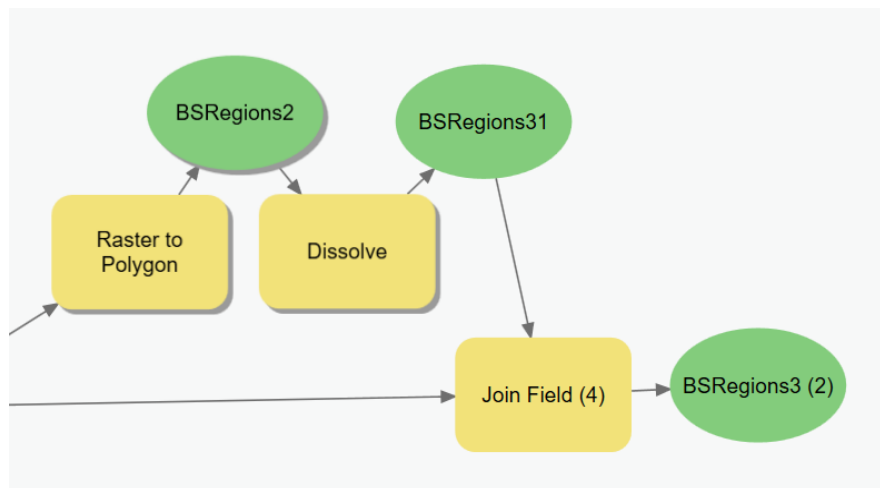
Volumet til forsøkningsområdene ble multiplisert med 1000 for at verdiene skulle bli representert i millimeter. Denne verdien ble deretter dividert med arealet for nedbørfeltene, som var representert i kvadratmeter. Denne prosessen er visualisert i geoprosesseringmodellen vist i Figur 33.



Figur 33: Femte del av forsøkningsmodellen med kalkulering av oppfyltingsverdi til hver forsøkningsanalyse

5.3.2.7 Forskningsanalyse del 6

For at forsøkningsanalysene skal bli behandlet som individuelle enheter senere i analysen var det nødvendig å omgjøre rasteret til polygoner. Dette er nødvendig for å kunne selektere individuelle forsøkningsanalyser videre i analysen, for eksempel i forbindelse med utsatte bygg og sluk. I dette steget ble det valgt å ikke bruke linjegenralisering på de genererte polygonene. Ifølge Rød (2015, s. 120) kan linjegenralisering føre til uønskede resultater i form av generering av små trekkanter for forsøkningsanalyser som omfatter enkeltpiksler. Figur 34 viser at forsøkningsanalysene ble aggregert slik at forsøkningsområdene ble sammensatt til større enheter, basert på om de har lik verdi. Videre ble informasjonen vedrørende volum og oppfyltingsverdi implementert i attributt Tabellen til forsøkningspolygonene.



Figur 34: Siste del av geoprosesseringsmodellen der forskningene ble aggregert.

BSRegions3 er sluttresultatet for geoprosesseringsmodellen og inneholder polygoner for forskninger og informasjon om volum og oppfyllingsverdi til hver forskning.

5.3.2.8 Oppfyllingsverdier til forskningene

Oppfyllingsverdier er som nevnt tidligere verdier på hvor mye nedbør som trengs før en forskning vil bli fylt, og er ofte oppgitt i millimeter. Oppfyllingsverdiene som ble benyttet i denne analysen er basert på IVF-kurver. IVF er en forkortelse for Intensitet-Varighet-Frekvens, og kan finnes på norsk klimaservicesenter sin hjemmeside (Klimaservicesenter, u.å.-b). IVF-kurver er kurver/tabeller som viser nedbørintensitet for nedbørshendelser for ulike returperioder og ulike tidsintervall. Det er knyttet usikkerhet rundt IVF-verdier for korte tidsserier og for lange gjentakintervall (Klimaservicesenter, u.å.-a). Årsaken til dette er at verdiene er basert på målinger fra pluviometre fra forskjellige værstasjoner (Klimaservicesenter, u.å.-a). Bygeaktivitet er ofte årsaken til kraftig og intens nedbør og forekommer svært lokalt og tilfeldig (Klimaservicesenter, u.å.-a). Nedbørmålingene vil kun være basert på mengde nedbør for den nøyaktige lokasjonen til pluviometeret, og ikke for de omkringliggende områdene. Det ble tatt utgangspunkt i IVF-kurver fordi Rambøll (2018, unpubl.), et samfunns rådgivningsfirma, tok utgangspunkt i IVF-kurver for kalkulering av dimensjonerende nedbør i forbindelse med en hydraulisk overflatemodell for bydel Åssiden (lokalisert 2 km fra Gulskogen) i Drammen.

I følge Rambøll sin rapport (2018, unpubl.), anbefalte Drammen kommune å bruke IVF-kurven for Asker nedbørstasjon i stedet for IVF-kurven for Marienlyst nedbørstasjon som utgangspunkt for kalkulering av nedbør. Asker er lokalisert i Akershus fylke og ligger omtrentlig 25 km fra

analyseområdet, mens Marienlyst ligger om lag 3 km øst fra Gulskogen. Begrunnelsen for anbefalingen er at regnmåleren på Marienlyst kun inneholder informasjon om småregn (Rambøll, 2018, unpubl.). I tillegg til dette har ikke nedbørstasjonen på Marienlyst vært aktiv siden 1995, og IVF-kurvene er derfor basert på nedbørhendelser frem til dette årstallet (Klimaservicesenter, u.å.-b). Nedbørstasjonen på Marienlyst har dermed ikke inkludert nedbørhendelser fra 1995 og frem til i dag, noe som ikke blir en realistisk fremstilling av fremtidig nedbør. I følge NOU (2015: 16) er det viktig at regnmåleren har vært aktiv over en lengre periode for at IVF-kurvene skal være nøyaktige. Dette er spesielt viktig når man skal ta i bruk IVF-kurver for gjentaksintervall større enn 50 år (NOU, 2015: 16). Pluviometeret i Asker har vært aktivt i 27 sesonger mellom 1983 og 2010. I følge Klimaservicesenter (u.å.-a) kan en periode på over 20 år regnes som lang.

Oppfyllingsverdiene i denne masteroppgaven er basert på IVF-kurvene for 2 års gjentaksintervall, 20 års gjentaksintervall, 100 års gjentaksintervall og 200 års gjentaksintervall. Et gjentaksintervall gir informasjon om sannsynligheten for at en viss nedbørshendelse inntreffer for et gitt år. For eksempel vil en nedbørshendelse med et 200 års gjentaksintervall, også kalt et 200-årsregn, gjennomsnittlig opptre én gang hvert 200. år (Hanssen-Bauer et al., 2015). Sannsynligheten for at en slik nedbørshendelse inntreffer er derfor 0,5 % for et gitt år (Hanssen-Bauer et al., 2015). Det er verdt å nevne at en nedbørshendelse med 200 års gjentaksintervall kan forekomme 2 år på rad, selv om sannsynligheten for dette er lav (Roald, 2013). Figur 35 viser at det er definert tre ulike sikkerhetsklasser for tre ulike flomstørrelser med ulike gjentaksintervall, som skal brukes for bygg som ligger i flomutsatte områder (Byggteknisk forskrift, 2017). Byggverkene som tilhører de ulike sikkerhetsklassene har ulike konsekvenser ved oversvømmelse (Byggteknisk forskrift, 2017). TEK17 er en forkortelse for byggteknisk forskrift, og er en veileder for tekniske krav til byggverk (Direktoratet for byggkvalitet, 2017).

Sikkerhetsklasse for flom	Konsekvens	Største nominelle årlige sannsynlighet
F1	liten	1/20
F2	middels	1/200
F3	stor	1/1000

Figur 35: Sikkerhetsklasser for bygninger i områder utsatt for overvann (Byggteknisk forskrift, 2017)

2 års gjentaksintervall har blitt brukt i denne masteroppgaven fordi det var ønskelig å inkludere forsøkninger med lave oppfylingsverdier. 20 års gjentaksintervall blir brukt fordi det tilsvarer sikkerhetsklasse F1 ifølge Byggteknisk forskrift (2017). Sikkerhetsklasse F1 tilsvarer byggverk med lite personopphold og som vil få små økonomiske og samfunnsmessige konsekvenser ved oversvømmelse som for eksempel garasjer, uthus og lignende bebyggelse (Byggteknisk forskrift, 2017). Ifølge (Pedersen & Bratlie, 2022) bør det planlegges for bortledning av overvann ved et 100-årsregn inkludert klimapåslag. Det er derfor valgt å inkludere 100 års gjentaksintervall i denne masteroppgaven, fordi Pedersen og Bratlie (2022) skriver at sikring av alle bygg mot et 200-årsregn med klimapåslag vil føre til en overinvestering i lavrisiko områder.

Det er videre valgt å ta i bruk 200 års gjentaksintervall fordi det tilsvarer F2 i TEK17. F2 tilsvarer byggverk med personopphold som for eksempel boliger, industribygg, skoler, barnehager og annen lignende bebyggelse (Byggteknisk forskrift, 2017). 200 års gjentaksintervall ble også brukt i Rambøll sin rapport (2018, upubl.). Forsøkninger som har en høyere oppfylingsverdi enn et gjentaksintervall på 200 år kan være sårbare mot alle typer bygninger som eksisterer innenfor studieområdet. Det er valgt å ikke inkludere 1000-årsregn som oppfylingsverdi fordi sikkerhetsklasse F3 tilsier «byggverk for sårbare samfunnsfunksjoner og byggverk der oversvømmelse kan gi stor forurensing på omgivelsene» (Byggteknisk forskrift, 2017), og slike byggverk er ikke lokalisert innenfor studieområdet.

I følge Dyrddal og Førland (2019) skal man legge til klimapåslag for dimensjonerende nedbør. Figur 36 viser at det bør legges til et klimapåslag på 50 % for gjentaksintervall som er større eller lik 50 år, med varighet på under én time. For gjentaksintervall som er mindre enn 50 år, bør det legges til et klimapåslag på 40% for varigheter under én time (Dyrddal & Førland, 2019).

	Dimensjonerende gjentaksintervall < 50 år	Dimensjonerende gjentaksintervall ≥ 50 år
≤ 1 time	40 %	50 %
>1 – 3 timer	40 %	40 %
>3 – 24 timer	30 %	30 %

Figur 36: Tabell over klimapåslag for gjentaksintervall større og mindre enn 50 år, og med ulik varighet (Klimaservicesenter, u.å.-b)

For å kunne kalkulere dimensjonerende nedbør er det nødvendig å velge nedbørvarigheter i tillegg til gjentaksintervall. Det ble derfor valgt å kalkulere dimensjonerende nedbør med nedbørvarigheter på 1 time, 3 timer, 12 timer og 24 timer, for å kunne undersøke hvilke varigheter som er best egnet til formålet med analysene. Tabell 2, 3, 4 og 5 viser verdier for dimensjonerende nedbør både med og uten klimapåslag for ulike gjentaksintervall. Hver tabell representerer ulike nedbørsvarigheter, der Tabell 5 viser dimensjonerende nedbør for varigheter på 1 time, mens de resterende tabellene viser dimensjonerende nedbør med varigheter på 3 timer, 12 timer og 24 timer. Verdiene for dimensjonerende nedbør med klimapåslag ble brukt som oppfyltingsverdier senere i analysen. Det er valgt å inkludere alle varighetene for å kunne sammenlikne forskjellene i dimensjonerende nedbør.

Tabell 2: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 24 timer varighet

Gjentaksintervall (år)	Dimensjonerende nedbør (mm)	Klimapåslag	Dimensjonerende nedbør med klimapåslag (dimensjonerende nedbør * klimapåslag)
2	57,9	1,3	75,3 mm
20	78,6	1,3	102,2 mm
100	90,7	1,3	117,9 mm
200	96,8	1,3	125,8 mm

Tabell 3: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 12 timer varighet

Gjentaksintervall (år)	Dimensjonerende nedbør (mm)	Klimapåslag	Dimensjonerende nedbør med klimapåslag (dimensjonerende nedbør * klimapåslag)
2	46,2	1,3	60,1 mm
20	68,3	1,3	88,8 mm
100	82,1	1,3	106,7 mm
200	88,1	1,3	114,5 mm

Tabell 4: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 3 timer varighet

Gjentaksintervall (år)	Dimensjonerende nedbør (mm)	Klimapåslag	Dimensjonerende nedbør med klimapåslag (dimensjonerende nedbør * klimapåslag)
2	25,9	1,4	36,3 mm
20	45,3	1,4	63,4 mm
100	57,3	1,4	80,2 mm
200	62,5	1,4	87,5 mm

Tabell 5: Dimensjonerende nedbør med klimapåslag: 1 time varighet

Gjentaksintervall (år)	Dimensjonerende nedbør (mm)	Klimapåslag	Dimensjonerende nedbør med klimapåslag (dimensjonerende nedbør * klimapåslag)
2	16,7	1,4	23,4 mm
20	35,6	1,4	49,9 mm
100	47,5	1,5	71,3 mm
200	52,6	1,5	78,9 mm

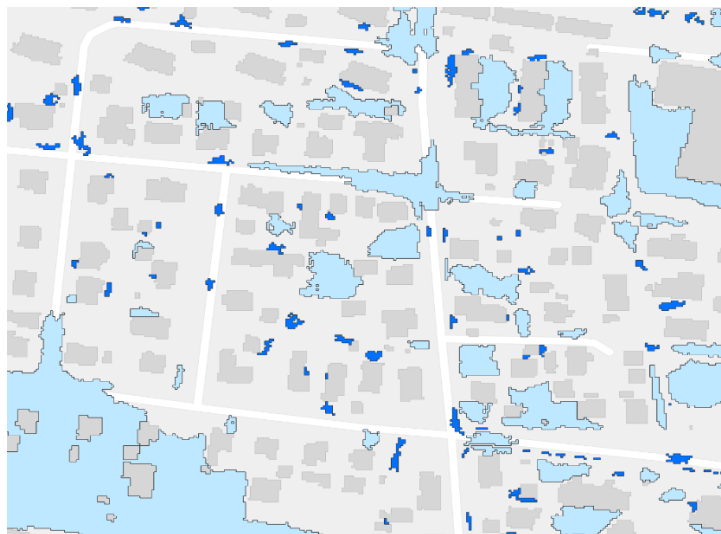
Tabellene viser at det er forskjell på dimensjonerende nedbør for varigheter med én time sett i forhold til varigheter på 24 timer. Det er valgt å bruke tall for dimensjonerende nedbør med klimapåslag med varighet på én time som oppfyllingsverdier til forsenkningene. Dette ble gjort fordi det skal fokuseres på korte og intense nedbørshendelser. Det ble også valgt å inkludere tall for dimensjonerende nedbør med klimapåslag med varighet på 24 timer som oppfyllingsverdier til forsenkningene, for å kunne visualisere forskjellene.

5.3.2.9 Symbolisering av utsatte bygg og sluk

For å kunne besvare problemstillingen ble det valgt å visualisere resultatene fra flomveis- og forsenkningsanalysene sammen med lokasjonene til bygg og sluk. I følge Balstrøm og Crawford (2018) kan bygninger som ligger innenfor eller inntil forsenkningspolygon være utsatt for flom. Dette er spesielt gjeldende for forsenkninger som har et volum større enn 1 m^3 (Balstrøm & Crawford, 2018). Det ble derfor valgt å fokusere på forsenkninger som hadde et volum større enn 1 m^3 i forbindelse med kartlegging av utsatte bygg, for å utelukke små forsenkninger som ikke hadde utgjort fare. I følge Balstrøm og Crawford (2018) kan små kartlagte forsenkninger blant annet brukes til å evaluere eksisterende lokasjoner på sluk i forhold til overvann. I forbindelse med sluk ble det derimot valgt å inkludere alle forsenkningsområdene uavhengig av kapasiteten. Det ble valgt å kartlegge utsatte bygg og sluk ved å bruke et romlig utvalg, og lage et eget temalag for de valgte objektene.

For forsenkningsområder ble alle sluk som samlokaliserte med forsenkningsområdene identifisert som *utsatt*. Alle bygg som var lokalisert i umiddelbar nærhet til forsenkninger med volum større enn 1 m^3 , ble kartlagt som *utsatt*. I forbindelse med dreneringslinjer ble alle bygg og sluk som lå innenfor fem meter fra dreneringslinjen identifisert som *utsatt*. I forbindelse med symbolisering av utsatte bygg og sluk for drenslinjer ble det kun tatt utgangspunkt i dreneringslinjene som var basert på terrengmodell 2 som inkluderte bygg, fortauskanter og underganger, og som representerte en situasjon med blokkerte kulverter, siden dette er den mest realistiske og farligste situasjonen i forbindelse med overvann. Aano et al. (2019) anbefaler å visualisere drenslinjer med en buffer på minimum fem meter på hver side av drenslinjen. Buffersonen ble også valgt på bakgrunn av usikkerhet knyttet til nøyaktighet på lokaliseringen av dreneringslinjen. Det er usikkerheter rundt den valgte verdien på buffersonen fordi det er vanskelig å predikere nøyaktig hvor vannet vil drenere ved en nedbørshendelse. Det ble forsøkt å legge på andre bufferverdier for å kartlegge utsatte bygg og sluk. I første omgang ble det valgt å legge på en bufferverdi på tre meter, noe som resulterte i få antall utsatte bygg og sluk. I andre omgang ble det valgt å legge på en buffer på 10 meter, noe som resulterte i et høyt antall kartlagte bygg og sluk.

Figur 37 viser forsenkningene som har et volum mindre enn 1 m^3 . Disse ble selektert bort i forbindelse med kartlegging av utsatte bygg, men ble beholdt ved kartlegging av utsatte sluk.



Figur 37: Forsenkninger med volum $< 1 \text{ m}^3$ (mørkeblå) og forsenkninger med volum $> 1 \text{ m}^3$ (lyseblå)

Det endelige datasettet er bestående av ulike dreneringslinjer og forsenkninger som er basert på ulike terrengmodeller med ulike oppløsninger og modifiseringer. I tillegg til dette er datasettet bestående av utsatte bygg og sluk som samlokaliserer med forsenkningsområder eller med buffersonen for dreneringslinjer.

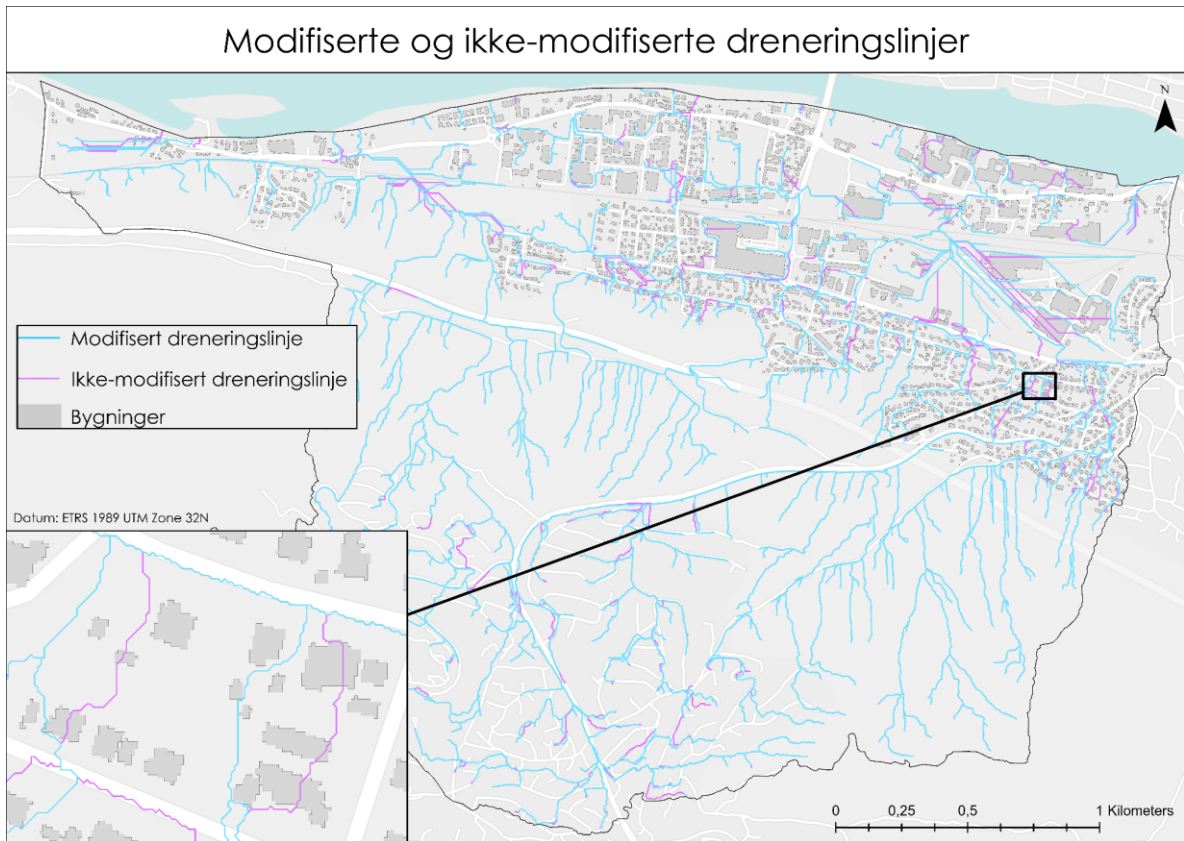
6 Resultat

For å kunne besvare problemstillingene ble det valgt å visualisere resultatene fra den hydrologiske analysen i kart og tabeller. Resultatene består av kart over dreneringslinjer og forsengkninger med ulike modifiseringer og oppløsninger, i tillegg til visualisering av utsatte bygninger og sluk innenfor fokusområdet. Det er inkludert tabeller for å få en oversikt over resultatene fra de ulike terrengmodellene, og for å kunne sammenlikne resultatene i diskusjonen. Første halvdel av kapittelet omhandler kart der analysene er basert på ulike terrengmodeller. Andre halvdel av kapittelet omhandler kart over overvann og utsatte bygg og sluk. Det er fokusområdet Gulskogen og omegn som er av interesse, men hele studieområdet er inkludert i kartene på grunn av kravet for hele nedbørfelt i hydrologiske analyser.

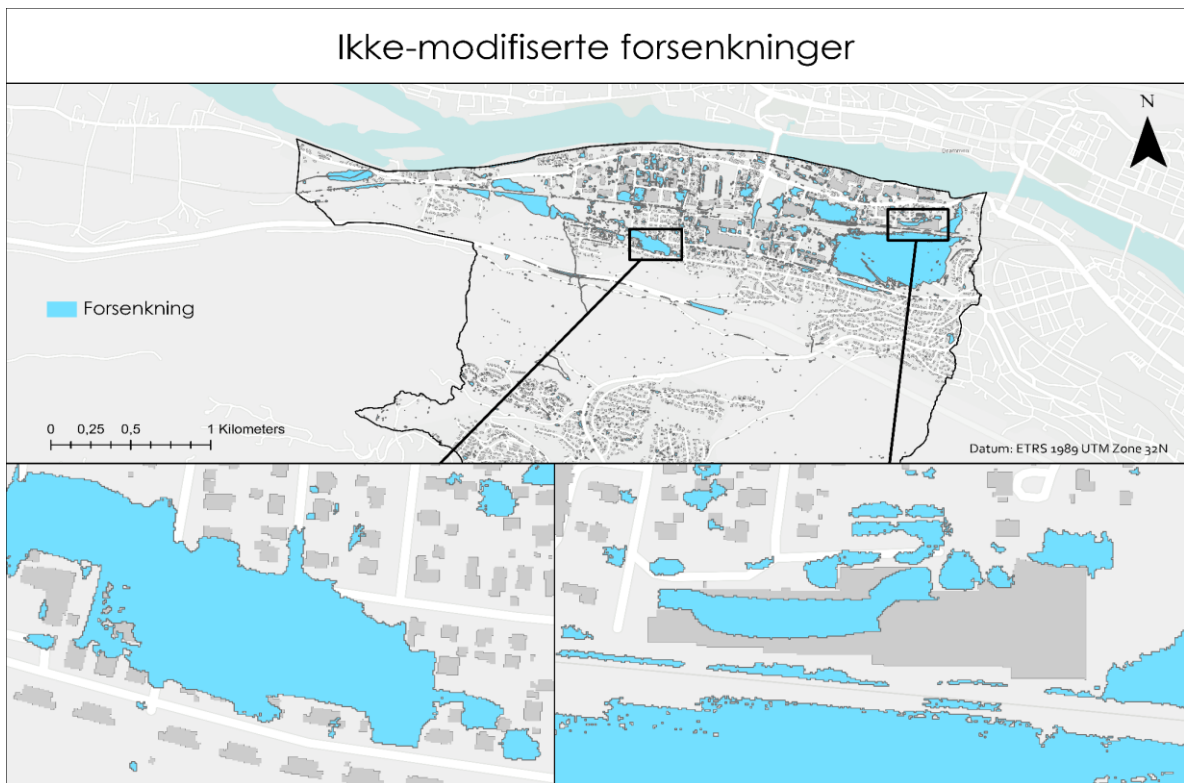
6.1 Modifiserte og ikke-modifiserte dreneringslinjer og forsengkninger

Kartet i Figur 38 viser forskjellige dreneringslinjer som er basert på to ulike terrengmodeller. Dreneringslinjene som er symbolisert som *Modifiserte dreneringslinjer* er basert på en modifisert terrengmodell, også kalt *terrengmodell 3* i Tabell 1. Dreneringslinjene som er symbolisert som *Ikke-modifiserte dreneringslinjer* er derimot basert på en terrengmodell som ikke er modifisert, altså *terrengmodell 1*. Det er derfor ikke selve dreneringslinjene som er modifiserte, men terrengmodellen de baseres på. Figur 38 viser et eksempel på forskjellene mellom dreneringslinjene som er basert på en modifisert terrengmodell versus en ikke-modifisert terrengmodell. De *ikke-modifiserte dreneringslinjene* renner gjennom bygningene, mens de *modifiserte dreneringslinjene* renner rundt bygningene.

Figur 39 viser kartlagte forsengkninger, der forsengkningsmodellen har blitt basert på en terrengmodell som ikke var modifisert, *terrengmodell 1*. Kartet viser to forskjellige utsnitt som viser eksempler på at forsengkningene har blitt lokalisert innenfor bygningspolygonene.



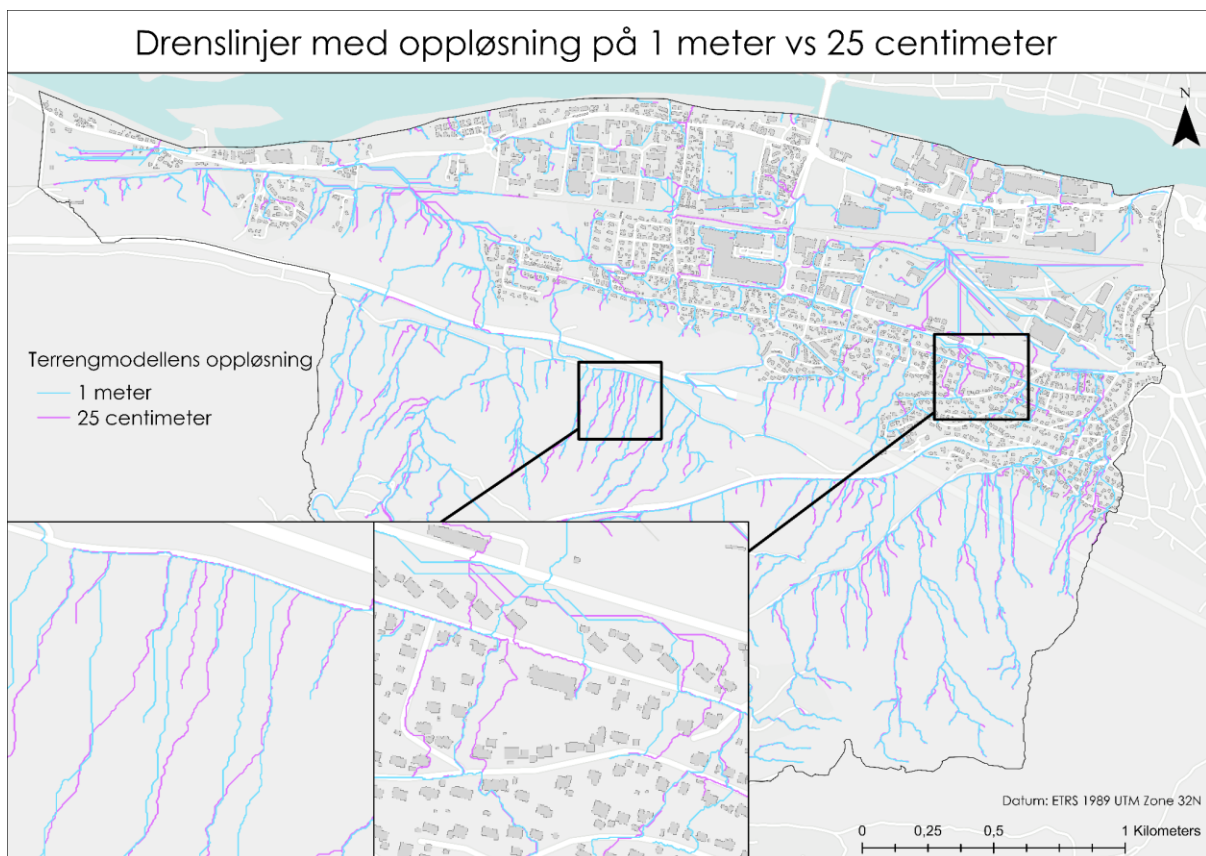
Figur 38: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på to ulike DTM. Blå linjer representerer dreneringslinjer fra modifisert DTM, mens lilla linjer representerer dreneringslinjer fra ikke-modifisert DTM



Figur 39: Kart som viser forsenkninger som er basert på en DTM som ikke er modifisert. Bygningspolygonene er representert i grå.

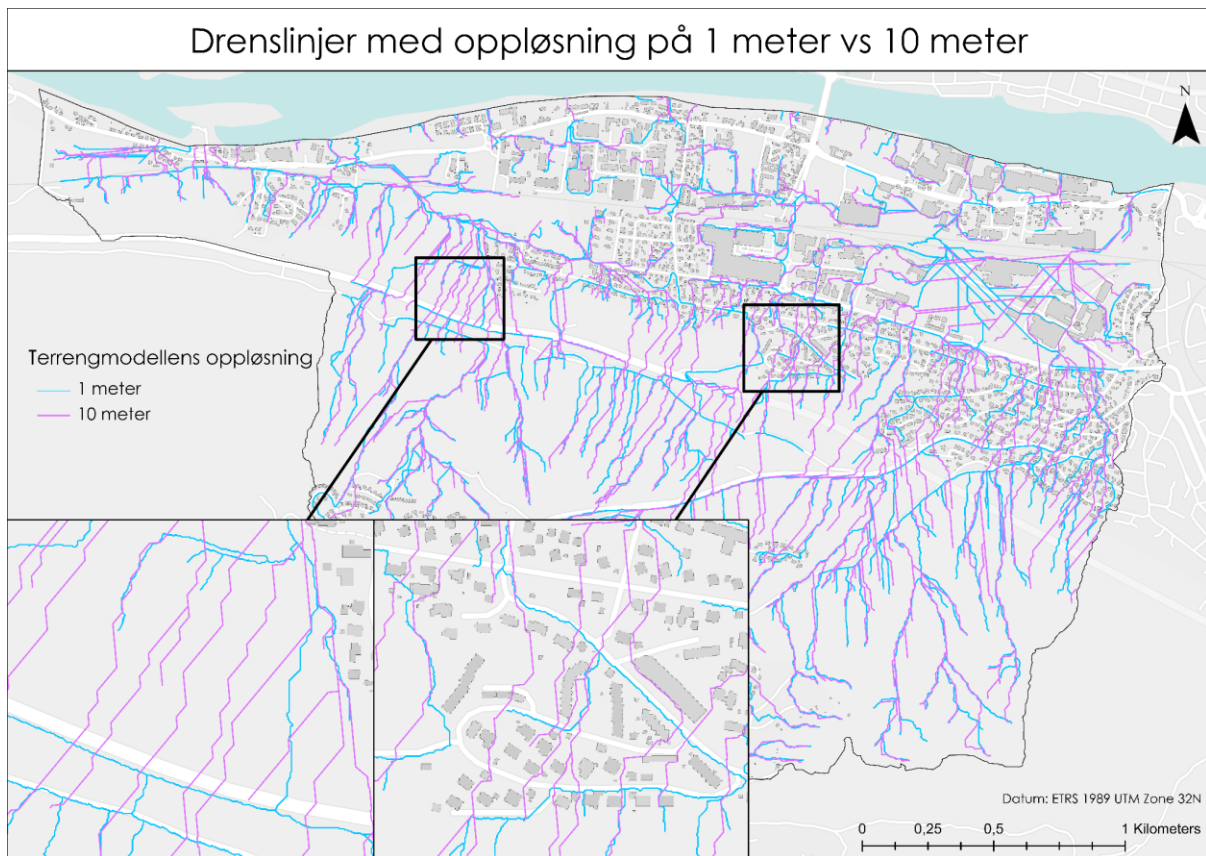
6.2 Dreneringslinjer og forsenkninger basert på terrengmodeller med ulik oppløsning

Kartene vist nedenfor viser dreneringslinjer og forsenkninger som er basert på tre ulike terrengmodeller med ulik oppløsning, også kalt *terrengmodell 3*, *terrengmodell 5* og *terrengmodell 6* i Tabell 1. De ulike terrengmodellene har oppløsning på 1 meter, 25 centimeter og 10 meter. Alle terrengmodellene som har blitt brukt i analysene for kart i Figur 40 og Figur 41 var modifiserte.



Figur 40: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på DTM med ulik oppløsning. Blå dreneringslinjer er basert på DTM med 1 meter oppløsning, mens lilla dreneringslinjer er basert på DTM med 25 cm oppløsning

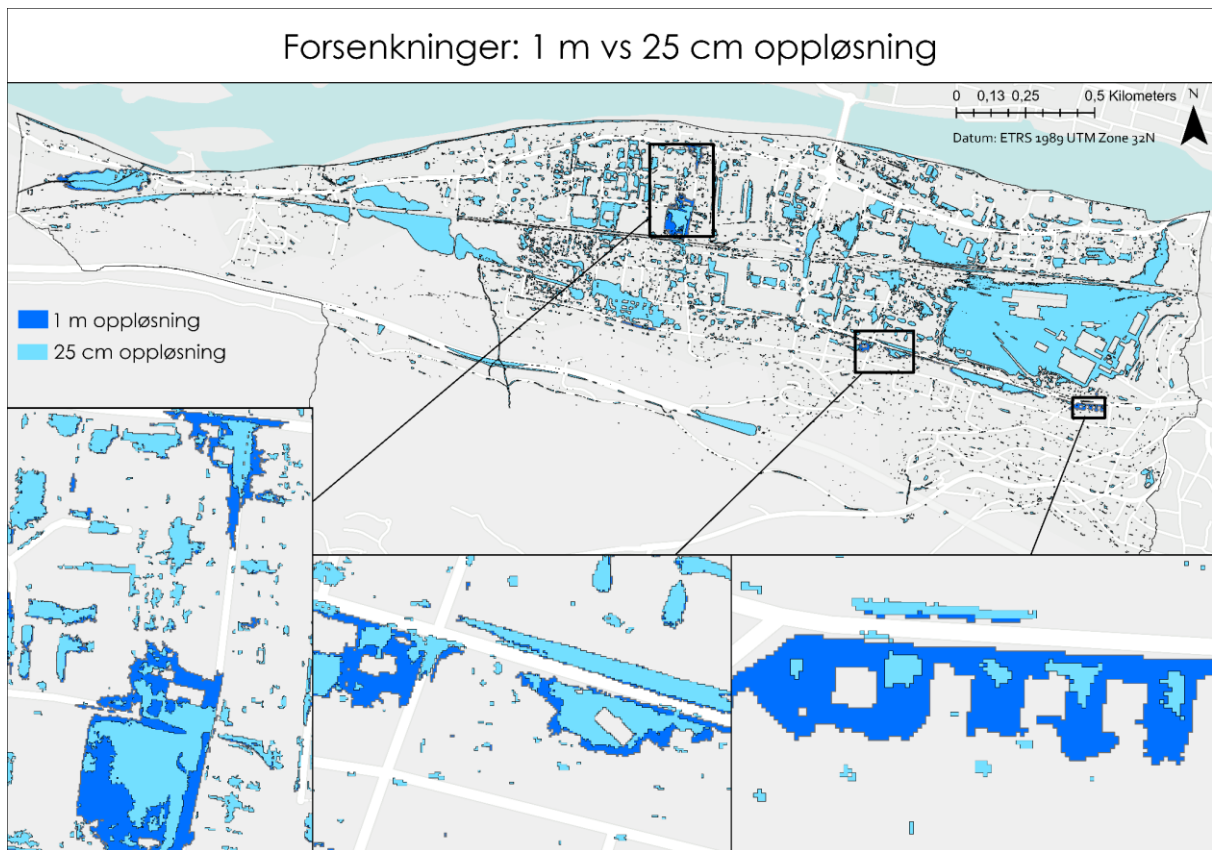
Kartet i Figur 40 viser to utsnitt som viser forskjellene mellom dreneringslinjene basert på 1-meter terrengmodell og 25-centimeter terrengmodell. Dreneringslinjene har ulike dreneringsløp noen steder i kartet, samtidig som de overlapper andre steder i kartet. Ingen av dreneringslinjene renner gjennom bygningene.



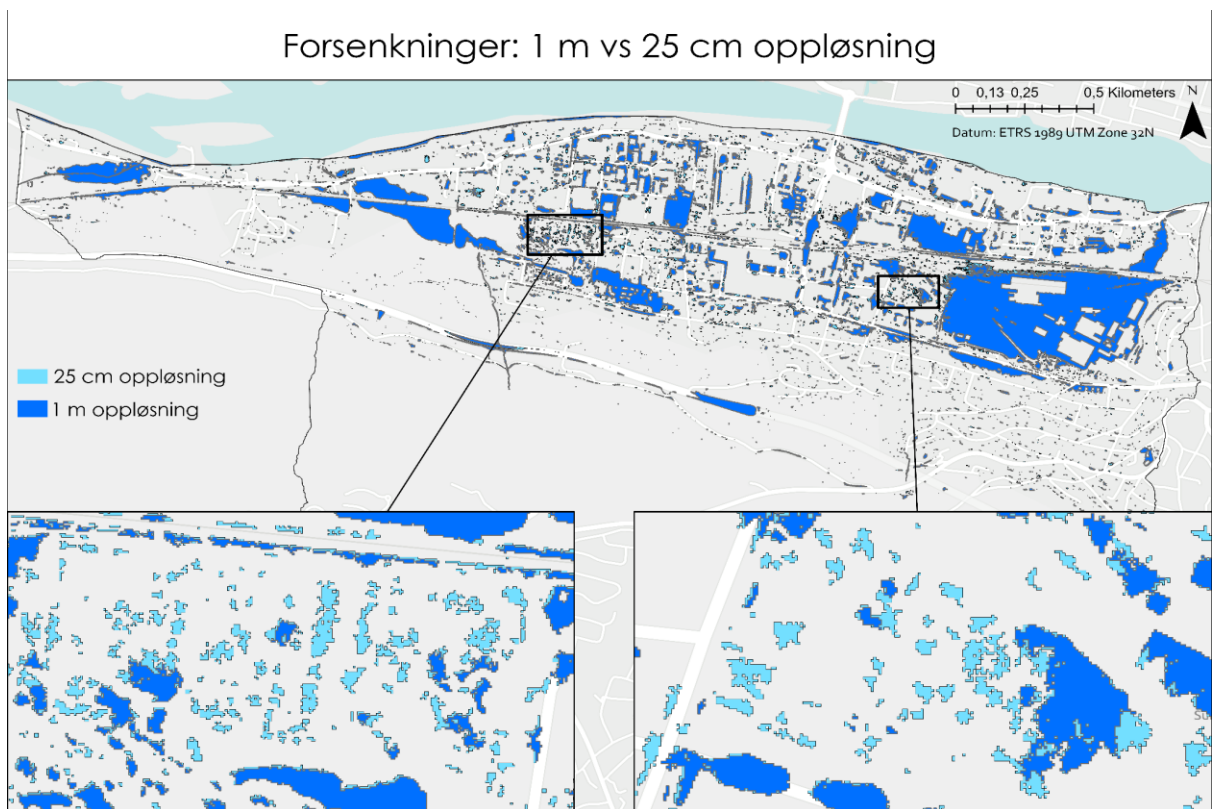
Figur 41: Kart som viser dreneringslinjer som er basert på DTM med ulik oppløsning. Blå dreneringslinjer er basert på DTM med 1 meter oppløsning, mens lilla dreneringslinjer er basert på DTM med 10 meter oppløsning

Kartet i Figur 41 viser to utsnitt som viser forskjellene mellom dreneringslinjene som er basert på terrengmodell med 1 og 10 meter oppløsning. Utsnittene viser flere områder der dreneringslinjene ikke overlapper. Ingen av dreneringslinjene renner gjennom bygningene.

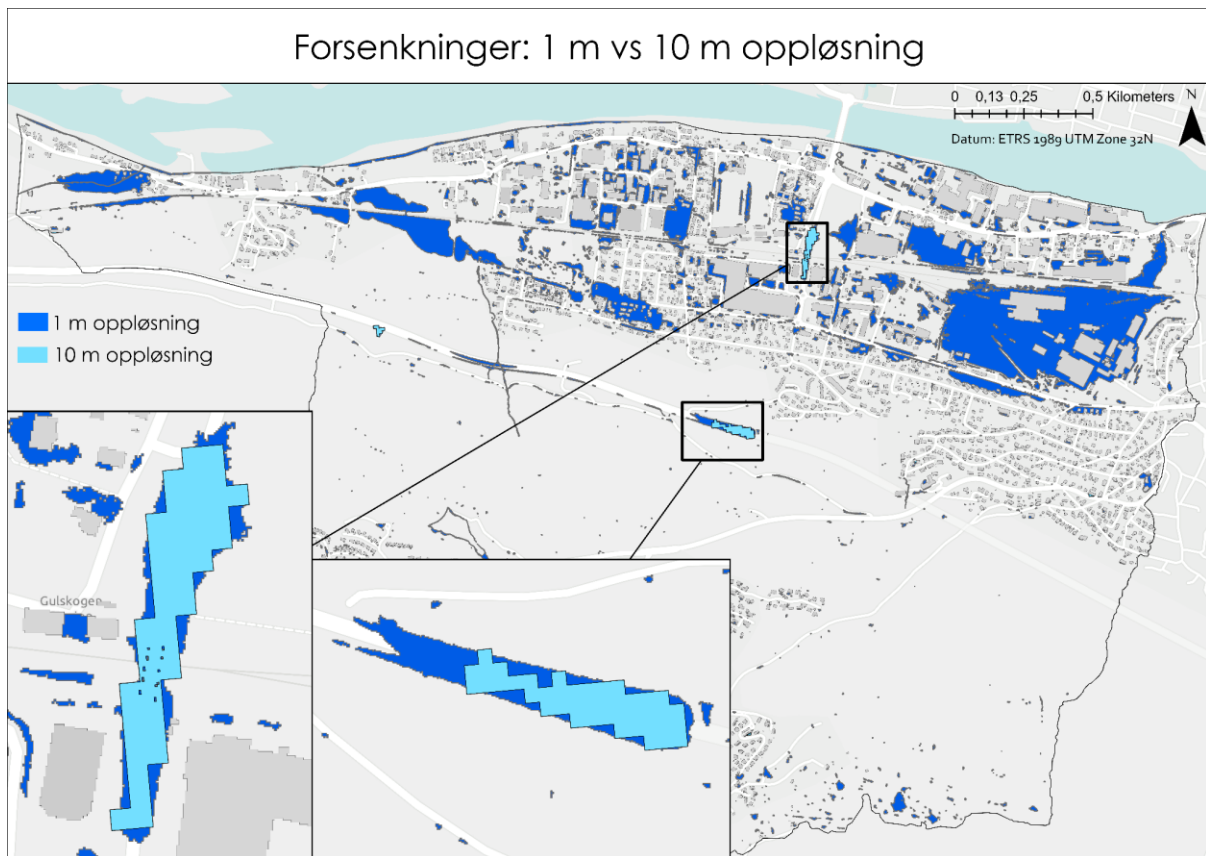
Kart i Figur 42, Figur 43 og Figur 44 viser forsenkninger som ble basert på terrengmodeller med ulike oppløsninger. Terrengmodellene som har blitt brukt var modifiserte med hevede fortauskanter og bygninger. Resultatene fra analysene er visualisert i tre forskjellige kart. Kart i Figur 42 har forsenkningene som ble basert på en terrengmodell med 25 cm oppløsning som det øverste kartlaget, mens kart i Figur 43 har forsenkningene som ble basert på terrengmodell med 1 meter som det øverste kartlaget. Det ble valgt å symbolisere resultatene på denne måten for å kunne visualisere forskjellene mellom de ulike forsenkningene. Kart i Figur 44 har visualisert forskjellene mellom forsenkninger som er basert på en terrengmodell med oppløsning på 1 meter og forsenkninger som er basert på en terrengmodell med oppløsning på 10 meter.



Figur 42: Kart som viser forsengkninger som er basert på ulike DTM. Forsenkninger basert på 25 cm oppløsning er øverste kartlag.



Figur 43: Kart som viser forsengkninger som er basert på ulike DTM. Forsenkninger basert på 1 m oppløsning er øverste kartlag.



Figur 44: Kart som viser forsenkninger som er basert på ulike terrengmodeller med 1 meter og 10 meter oppløsning

Figur 42 viser utsnitt av tre områder som visualiserer forskjellene mellom de ulike forsenkningene. Forsenkningene som er basert på en terrengmodell med oppløsning på 1 meter har større areal enn forsenkningene som er basert på en terrengmodell med oppløsning på 25 centimeter. Kart i Figur 43 viser to utsnitt som viser at det er flere forsenkninger med oppløsning på 25 cm enn det er forsenkninger på 1 m. De resterende forsenkningene overlapper, eller har små forskjeller. Figur 44 viser derimot to utsnitt som viser lokasjonen til de største forsenkningene som ble kartlagt ved å bruke en terrengmodell med oppløsning på 10 meter. Disse forsenkningene er lokalisert i samme område som forsenkningene som er basert på 1-meter terrengmodell. Kartet viser at det er kartlagt flere forsenkninger som er basert på 1-meter terrengmodell enn det er kartlagt forsenkninger som er basert på 10-meter terrengmodell.

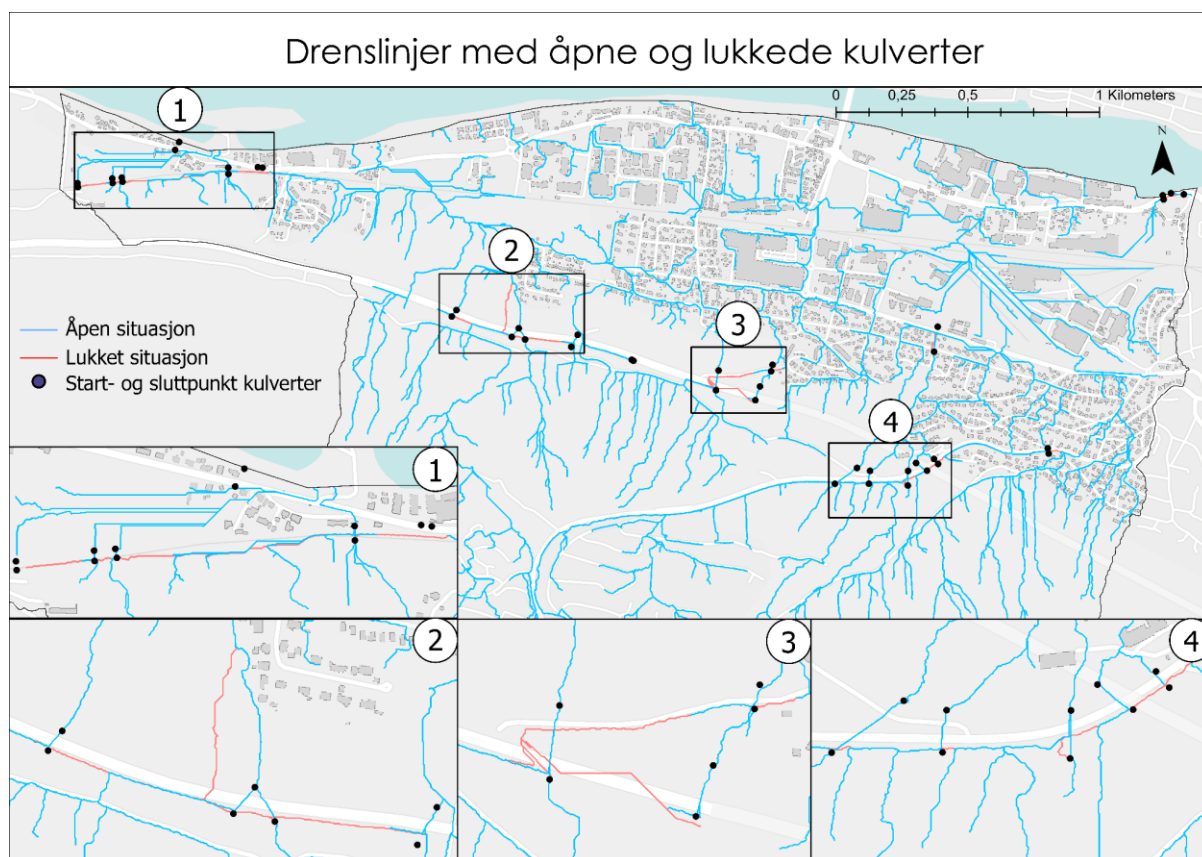
Som vist i kartene ovenfor ble det kartlagt ulikt antall forsenkninger avhengig av hvilke terrengmodeller modellen ble basert på. Tabell 6 viser at antall forsenkninger med oppløsning 25 centimeter er 5194 innenfor fokusområdet, mens antall forsenkninger basert på 1-meter terrengmodell er 1901 innenfor fokusområdet. Antall forsenkninger med oppløsning på 10 meter er 16 innenfor fokusområdet.

Tabell 6: Tabell over antall kartlagte forsenkninger ved bruk av terrengmodeller med ulike oppløsninger

	DTM 25 cm oppløsning	DTM 1 m oppløsning	DTM 10 m oppløsning
Antall kartlagte forsenkninger	5194	1901	16

6.3 Dreneringslinjer med åpne og lukkede kulverter

Figur 45 viser to ulike dreneringslinjer som er basert på to ulike situasjoner med åpne og lukkede kulverter. Dreneringslinjene som representerer en åpen situasjon er basert på terrengmodell 4 i Tabell 1, mens dreneringslinjene som representerer en lukket situasjon er basert på en modifisert terrengmodell som ikke har senket kulverter.



Figur 45: Kart over dreneringslinjer som representerer en åpen situasjon (blå dreneringslinjer) og en lukket situasjon (rød dreneringslinjer). Punktene symboliserer start- og slutt punkt for kulvertene.

Kartet viser utsnitt av områdene der dreneringsløpene går ulike veier. Det er synlig at dreneringslinjene som er symbolisert som *åpen situasjon* drenerer gjennom kulvertene, mens dreneringslinjene som er symbolisert som *lukket situasjon* tar en alternativ rute.

6.4 Utsatte bygg

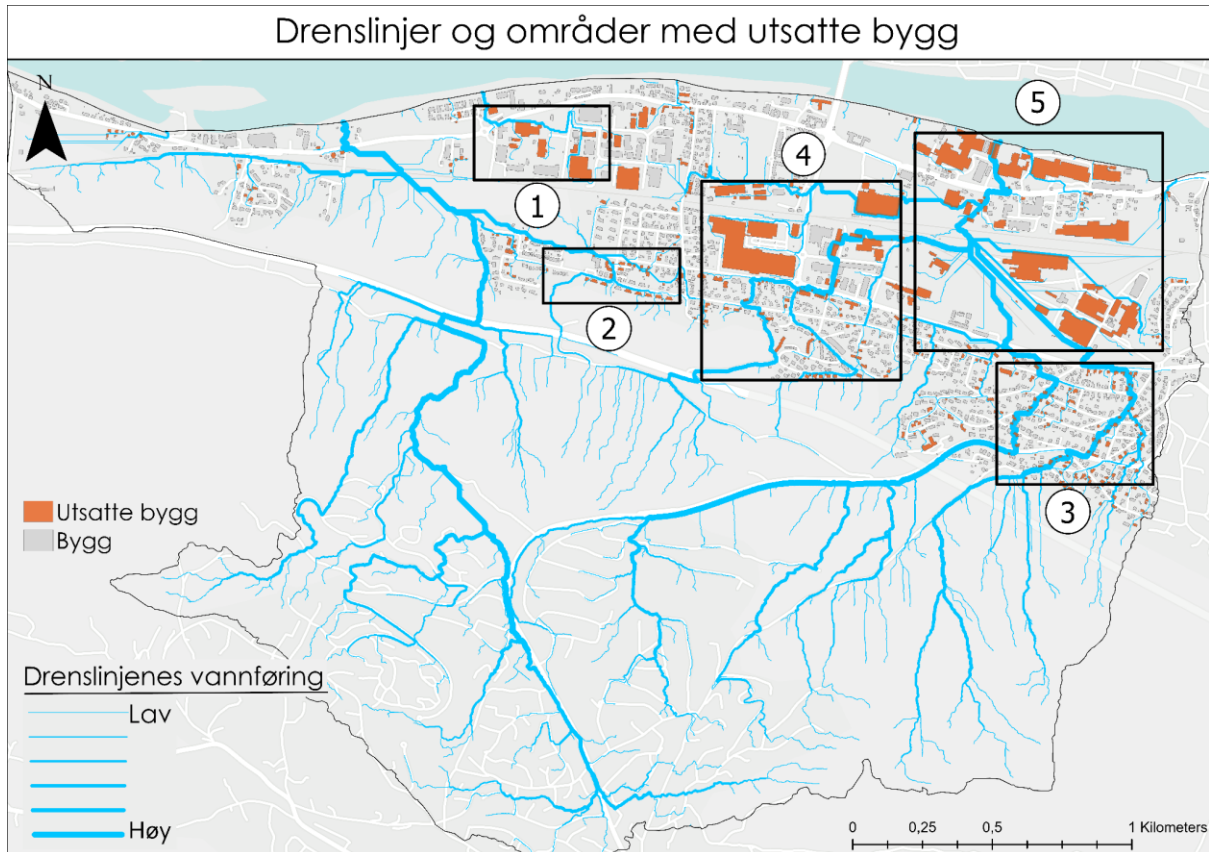
Tabell 7 viser antall bygg som er utsatt for overvann ved bruk av ulike oppløsninger på terrengmodellene. Ved å ta utgangspunkt i resultatene for kartlagte dreneringslinjer basert på 1-meter terrengmodell var det 30 færre bygg som ble kartlagt som utsatt med 25-centimeter terrengmodell og 225 flere bygg som ble kartlagt som utsatt med 10-meter terrengmodell. I forbindelse med kartlagte forsøkninger basert på 1-meter terrengmodell ble det kartlagt 435 flere utsatte bygg med 25-centimeter terrengmodell og 773 færre utsatte bygg med 10-meter terrengmodell. Alle forsøkningene, uavhengig av volum, har blitt inkludert i beregningene i Tabell 7.

Tabell 7: Tabell over antall utsatte bygg for dreneringslinjer og forsøkninger basert på ulike terrengmodeller

	Dreneringslinjer				Forsøkninger		
	25 cm oppløsning	1 meter oppløsning	10 meter oppløsning	Åpen situasjon (1 m)	25 cm oppløsning	1 m oppløsning	10 m oppløsning
Antall utsatte bygg	431	461	687	466	1215	780	7

6.4.1 Dreneringslinjer og utsatte bygg

Kartene nedenfor viser hvilke bygg som er utsatt for overvann innenfor fokusområdet. Områdene som er mest utsatt for overvann i forbindelse med dreneringslinjer er visualisert i Figur 46. Det er tatt utgangspunkt i dreneringslinjene med mest vannføring for å kartlegge hvilke bygg og områder som er mest utsatt.



Figur 46: Kart over dreneringslinjer og områder med utsatte bygg. Utsatte bygg er visualisert i oransje. Dreneringslinjene er visualisert i blå, der tykkelsen på dreneringslinjen representerer mengde vannføring.

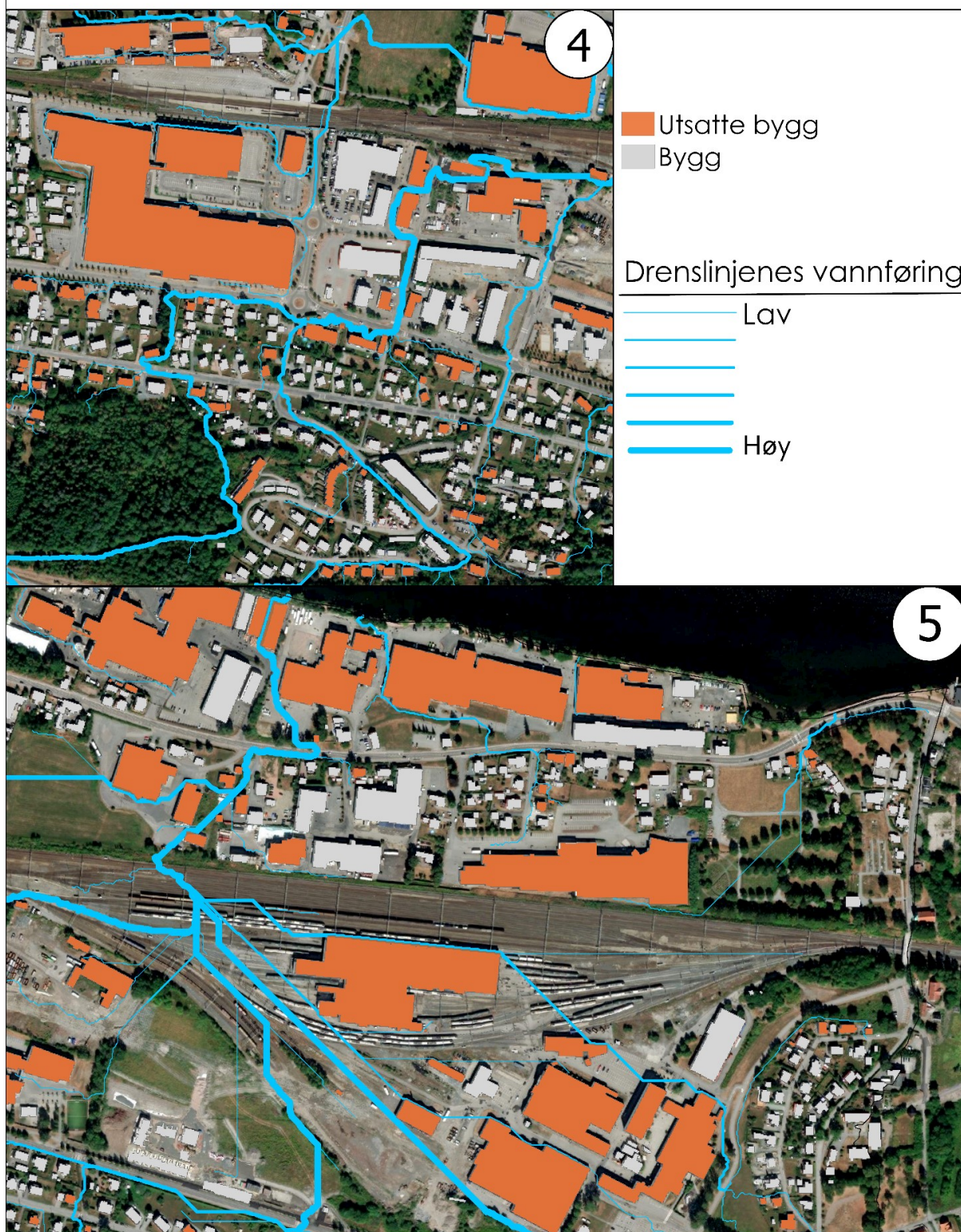
Kartet i Figur 46 er et oversiktskart som viser fem ulike områder der ansamlingen av utsatte bygg er størst. Område 1 er et industrielt område nord-vest for Gulskogen senter. Område 2 er et boligområde på Gulskogen Vest. Område 3 er boligområder ved Strømsgodset. Område 4 er Gulskogen kjøpesenter og omkringliggende områder, og område 5 er Sundland og deler av Gulskogen Nord. Disse områdene er visualisert med høyere detaljeringsgrad i kart i Figur 47 og Figur 48.

Utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3



Figur 47: Kart over utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3

Utsatte bygg innenfor område 4 og 5



Figur 48: Kart over utsatte bygg innenfor område 4 og 5

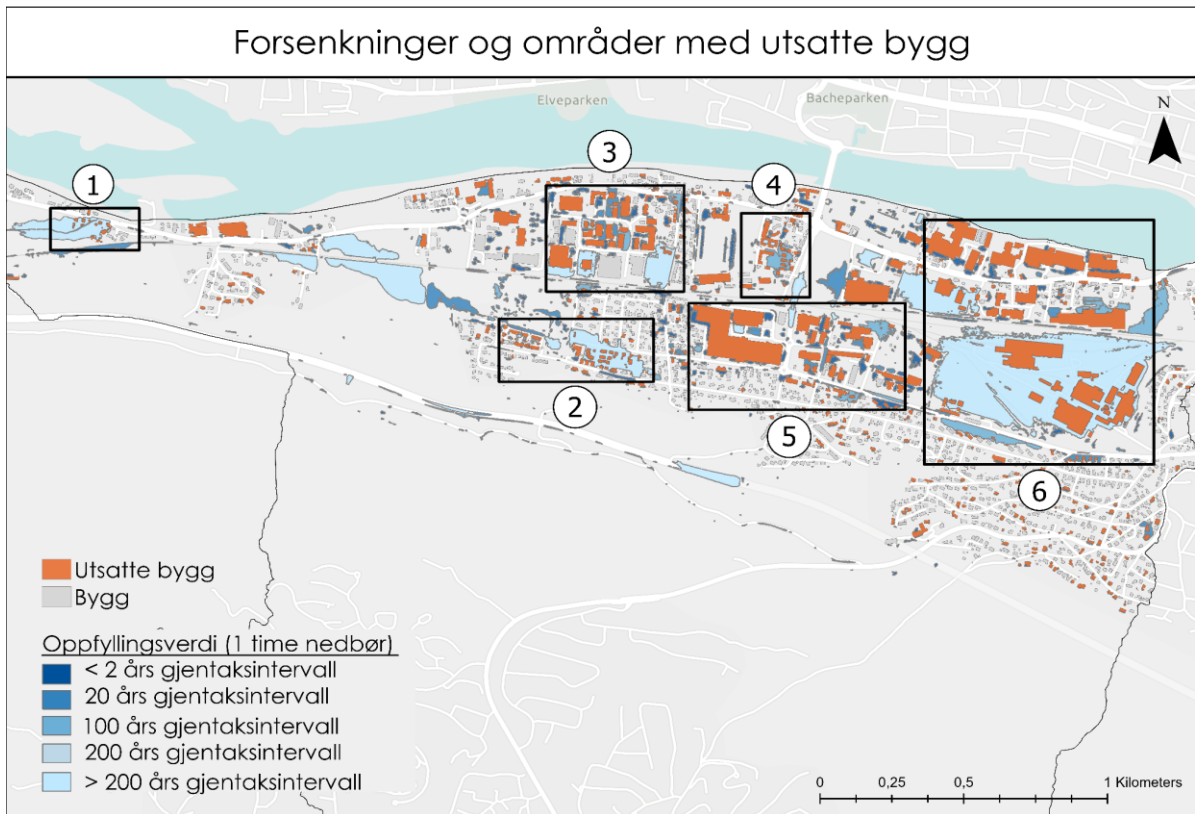
Oversiktskartet i Figur 46 viser at det er kartlagte to dreneringslinjer med høy vannføring gjennom boligområdene i område 3. Byggene som er lokalisert i nærheten av disse dreneringslinjene er kartlagt som utsatt. Dreneringslinjene går videre mot Sundland, der de forgrener seg sammen med en dreneringslinje som går forbi Gulskogen kjøpesenter før de drenerer ut i Drammenselva. Jernbaneverkstedet og de andre byggene som ligger på Sundland, i tillegg til de industrielle byggene som ligger i nærheten av disse dreneringslinjene er kartlagt som utsatte bygg. Det går en dreneringslinje fra motorveien som drenerer nedover mot Drammenselva gjennom Gulskogen Vest, som renner i nærheten av boligfelt. Disse er også kartlagt som utsatte bygg, men er ikke tatt med som eksempelområde på grunn av mindre vannføring i den tilhørende dreneringslinjen sett i forhold til de andre dreneringslinjene.

6.4.2 Forsenkninger og utsatte bygg

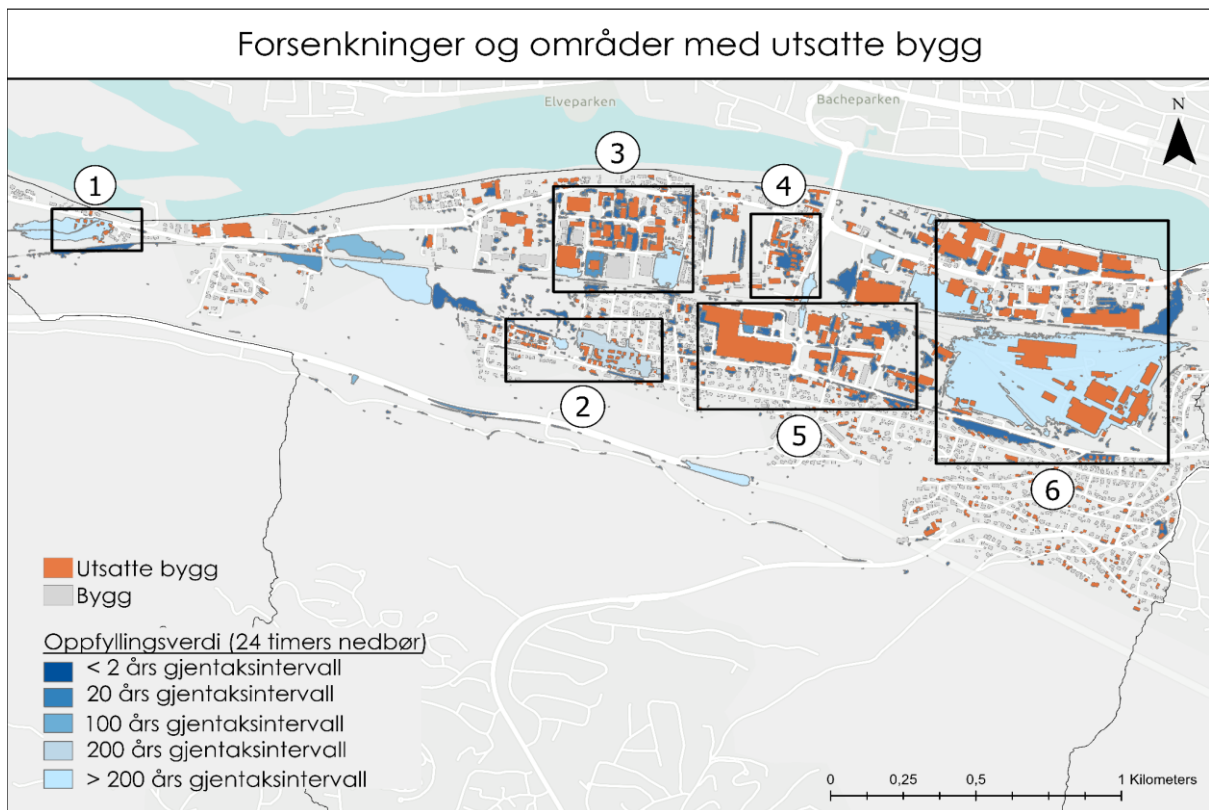
Kartene nedenfor viser forsenkninger og utsatte bygg. Utsatte bygg tilsvarende bygg som er lokalisert innenfor én eller flere forsenkninger. Det er tatt utgangspunkt i større forsenkninger for å kartlegge hvilke bygg og områder som er mest utsatt. Det er kun tatt utgangspunkt i forsenkninger som har et volum større enn 1 m^3 for disse beregningene. Antall forsenkninger som har et større volum enn 1 m^3 innenfor fokusområdet er 936. Det er flere av forsenkningene som har en oppfyllingsverdi tilsvarende større enn 200 års gjentakintervall. Oppfyllingsverdiene til disse forsenkningene er beskrevet under kartene.

Kart i Figur 49 viser seks ulike områder der ansamlingen av utsatte bygg er størst. Disse er blir mer forklart i Figur 51 og 52. Område 1 er et område på Pukerud, mens område 2 er et boligfelt på Gulskogen Vest. Område 3 er et industrielt område nord-vest for Gulskogen kjøpesenter. Område 4 er et område med boliger nord for Gulskogen kjøpesenter, mens område 5 er Gulskogen kjøpesenter samt kommersielle bygg øst for kjøpesenteret. Område 6 omfatter Sundland og industrielle områder på Gulskogen Nord.

Figur 49 viser utsatte bygg og forsenkninger som har en oppfyllingsverdi som tilsvarende en nedbørshendelse med varighet på én time. Kart i Figur 50 viser derimot utsatte bygg og forsenkninger som har en oppfyllingsverdi som tilsvarende en nedbørshendelse med varighet på 24 timer. Kartene viser at noen av forsenkningene har forskjellig symbologi, avhengig av hvilken nedbørvarighet som blir brukt. Tallene for oppfyllingsverdi er tidligere forklart i avsnitt 5.3.2.8.

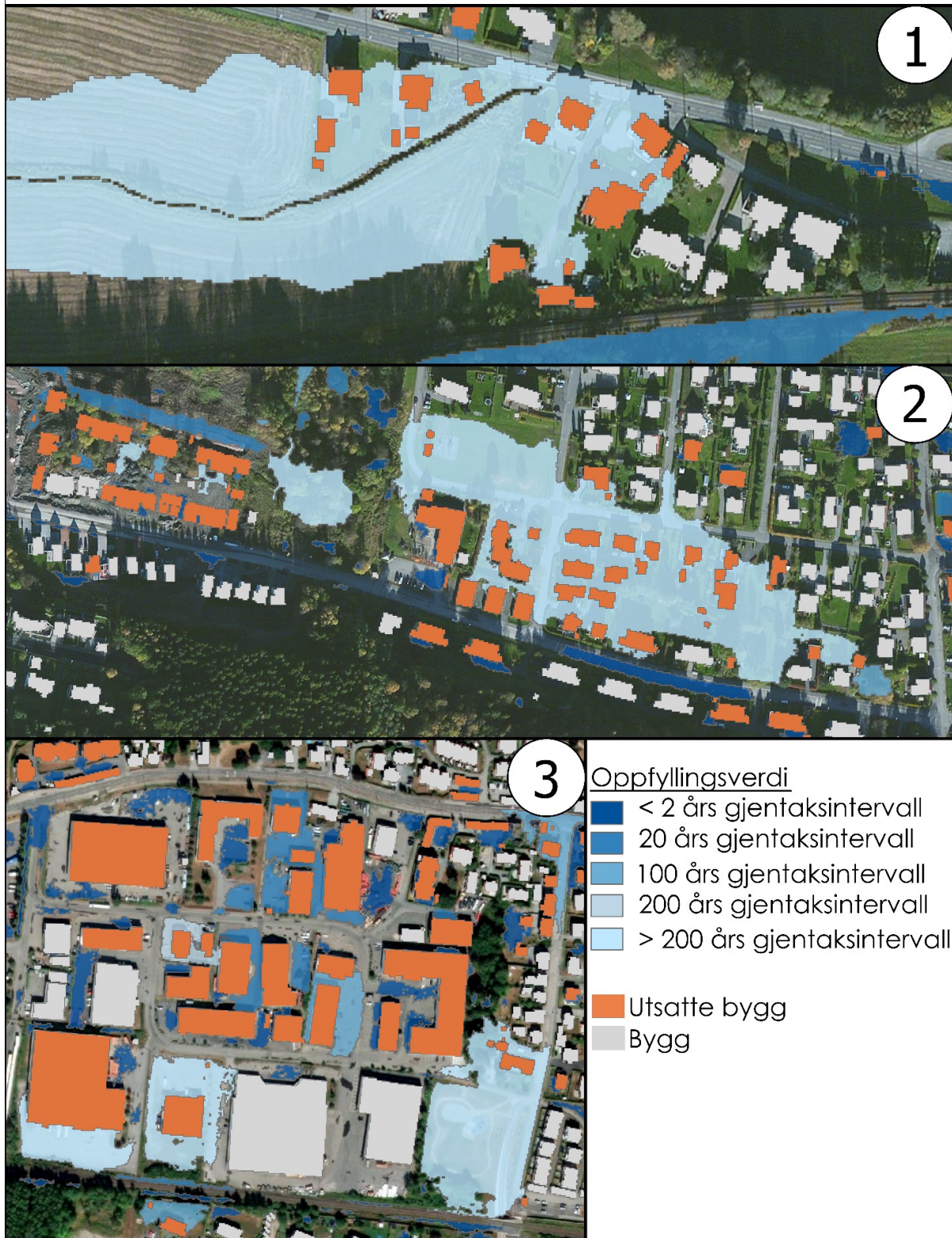


Figur 49: Kart over forsenkninger og områder med utsatte bygg. Oppfyllingsverdiene er basert på en nedbørhendelse med varighet på 1 time



Figur 50: Kart over forsenkninger og områder med utsatte bygg. Oppfyllingsverdiene er basert på en nedbørhendelse med varighet på 24 timer

Utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3








Figur 51: Utsatte bygg innenfor område 1, 2 og 3 i forbindelse med forsøkninger

Utsatte bygg innenfor område 4, 5 og 6



Oppfyllingsverdi

-  < 2 års gjentaksintervall
-  20 års gjentaksintervall
-  100 års gjentaksintervall
-  200 års gjentaksintervall
-  > 200 års gjentaksintervall

-  Utsatte bygg
-  Bygg

Figur 52: Utsatte bygg innenfor område 4, 5 og 6 i forbindelse med forsenkninger

Figur 51 viser fem større forsenkninger der oppfyllingsverdiene er større enn et 200 års gjentaksintervall. Oppfyllingsverdien til forsenkningen i område 1 er 161 mm. Oppfyllingsverdien for den største forsenkningen i område 2 er 123 mm, mens den mindre forsenkningen har en oppfyllingsverdi på 241 mm. Oppfyllingsverdien til de nederste forsenkningene fra venstre til høyre i område 3 er 162 mm, 85 mm og 220 mm. I kartet i Figur 52 er det kartlagt fem forsenkninger der oppfyllingsverdiene er større enn et 200 års gjentaksintervall. Område 4 og område 5 viser én del av samme forsenkning. Denne forsenkningen har en oppfyllingsverdi på 323 mm. Oppfyllingsverdien til forsenkningen ved Gulskogen senter er 83 mm, mens oppfyllingsverdien til den mindre forsenkningen ved jernbanen er 169 mm. Oppfyllingsverdien til den største forsenkningen i område 6 er 232 mm, mens den mindre forsenkningen på oversiden av jernbanelinjene har en oppfyllingsverdi på 168 mm.

Det er kartlagt forsenkninger i store deler av fokusområdet, men det er kun forsenkninger som ligger i nærheten av bygg som blir fokusert på i dette kartet. De mest utsatte byggene og områdene er lokalisert i industrielle områder eller i boligfelt. Det ble totalt kartlagt 519 utsatte bygg som ligger i forsenkningsområder som har et volum større enn 1 m³.

6.5 Utsatte sluk

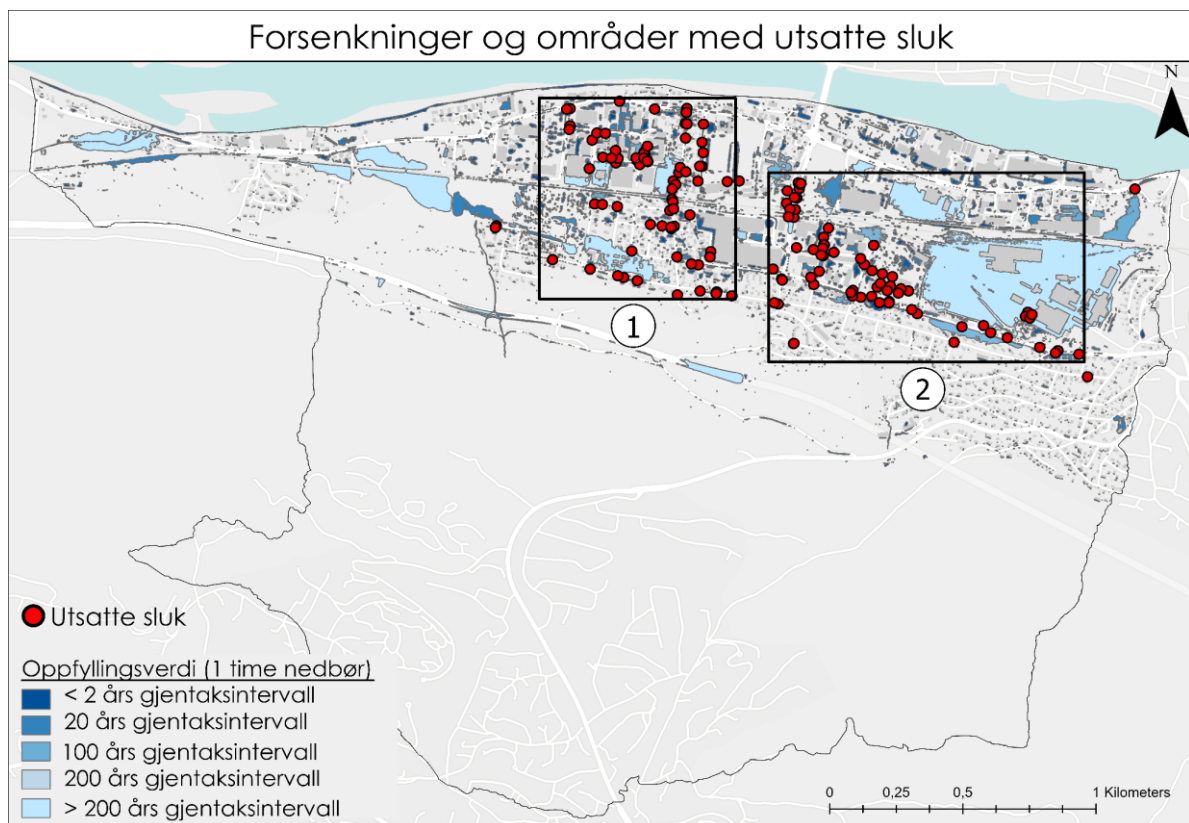
Kartene nedenfor viser hvilke sluk som er blitt kartlagt som *utsatt* for overvann for forsenkninger og dreneringslinjer. Tabell 8 viser antall utsatte sluk for dreneringslinjer og forsenkninger som er basert på ulike terrengmodeller. For dreneringslinjer ble det kartlagt 182 utsatte sluk med 25-cm terrengmodell, 178 utsatte sluk med 1-meter terrengmodell og 110 utsatte sluk med 10-meter terrengmodell. For forsenkninger med det kartlagt 184 utsatte sluk med 25-cm terrengmodell, 150 utsatte sluk med 1-meter terrengmodell og 12 utsatte sluk med 10-meter terrengmodell.

Tabell 8: Tabell over antall utsatte sluk ved dreneringslinjer og forsengkninger, basert på ulike terrengmodeller

	Dreneringslinjer				Forsenkninger		
	25 cm oppløsning	1 meter oppløsning	10 meter oppløsning	Åpen situasjon	25 cm oppløsning	1 m oppløsning	10 m oppløsning
Antall utsatte sluk	182	178	110	177	184	150	12

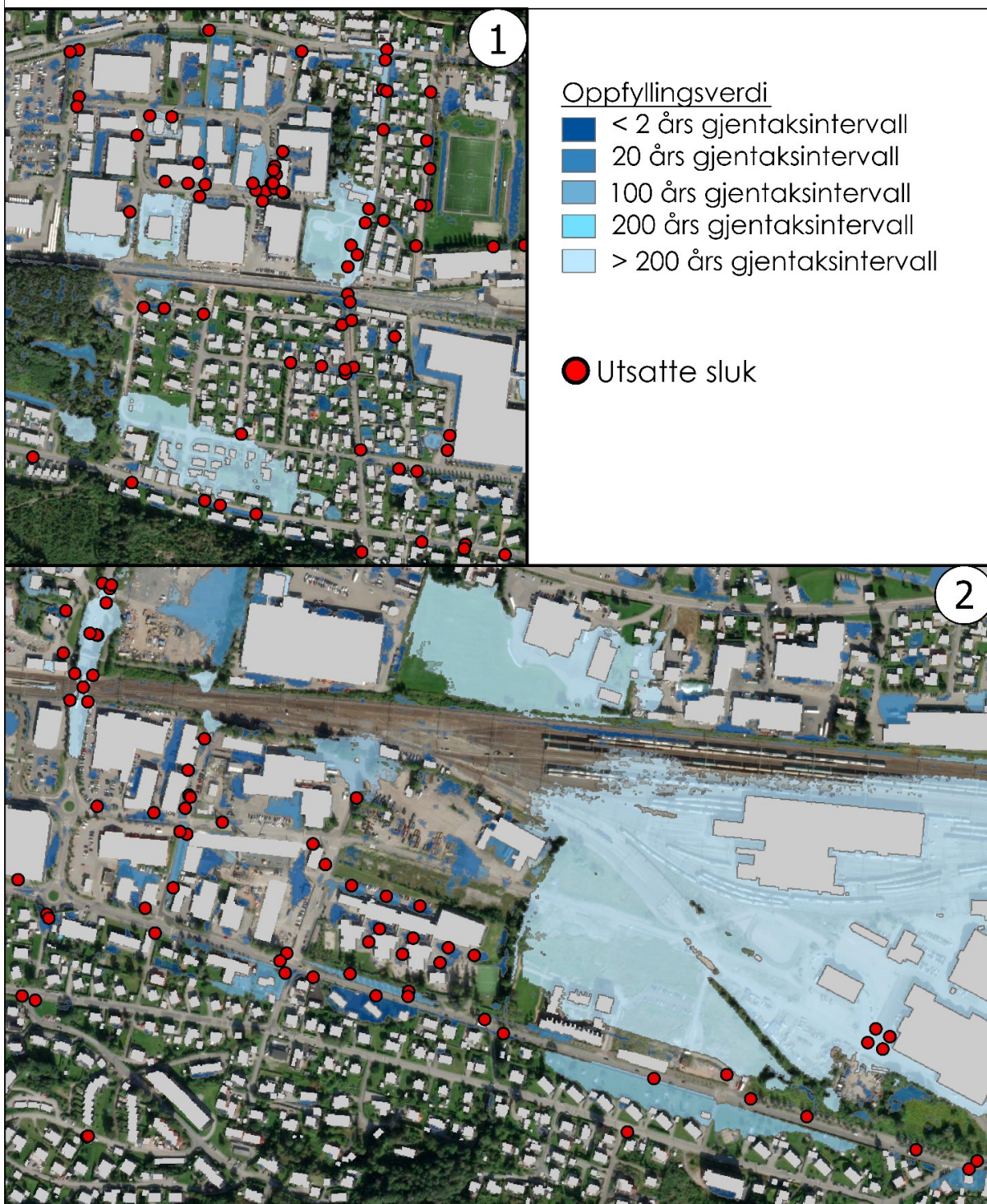
6.5.1 Forsenkninger og utsatte sluk

Kart i Figur 53 viser to områder der det er kartlagt flest utsatte sluk i forbindelse med lokasjon av forsengkninger. Disse områdene er visualisert nærmere i Figur 54. Slukene som er kartlagt som *utsatt* er lokalisert innenfor en forsenkning. Det er kun visualisert forsengkninger som har et volum større enn 1 m³. Område 1 er et industrielt område nord-vest for Gulskogen kjøpesenter, mens område 2 er område øst for Gulskogen kjøpesenter som er bestående av kommersielle bygg og boliger.



Figur 53: Kart over forsengkninger og områder med utsatte sluk

Utsatte sluk innenfor område 1 og 2

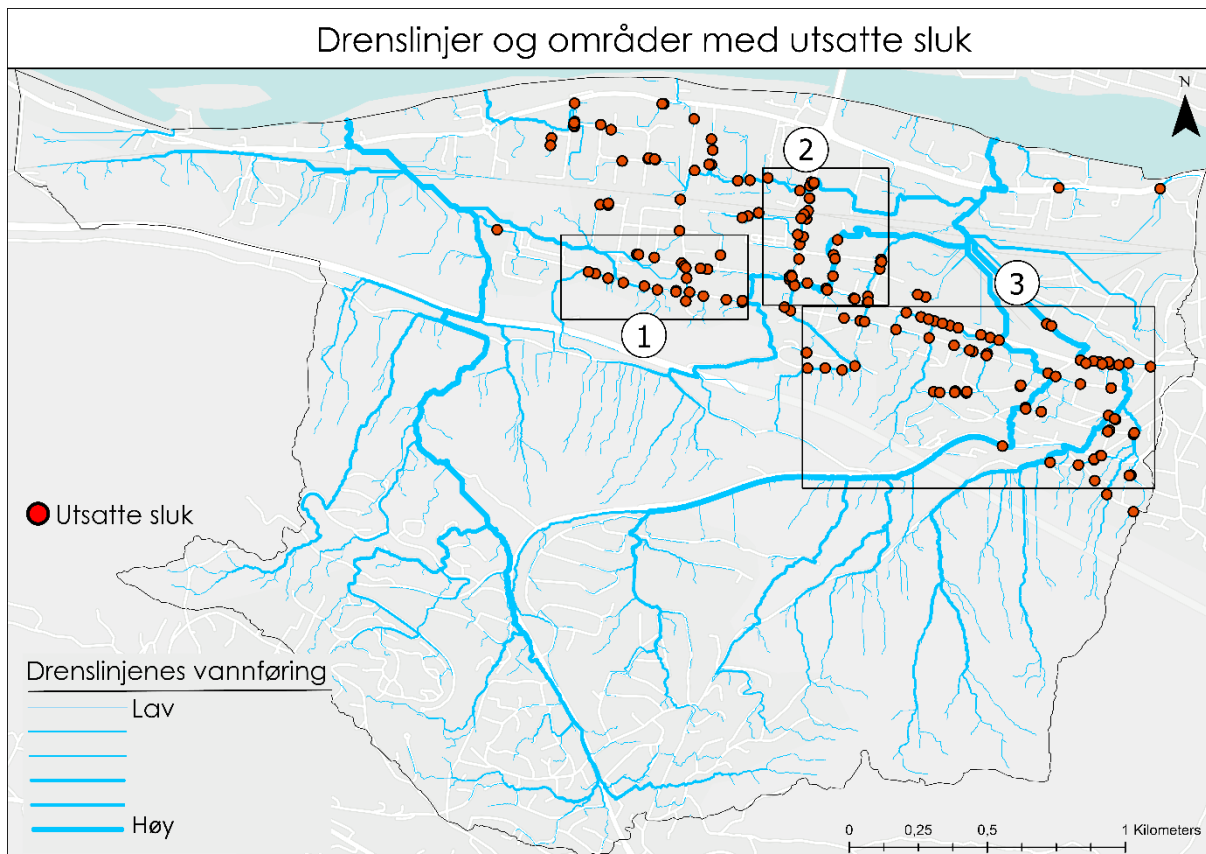


Figur 54: Kart over utsatte sluk i område 1 og 2

Det ble kartlagt 114 utsatte sluk i Figur 54. Som vist i kartet er de fleste av de utsatte slukene i område 1 lokalisert i industrielle områder, eller langs veiene ved boligområder. For område 2 er de fleste utsatte slukene kartlagt veiene langs kommersielle bygg, eller i nærheten av boligområder.

6.5.2 Dreneringslinjer og utsatte sluk

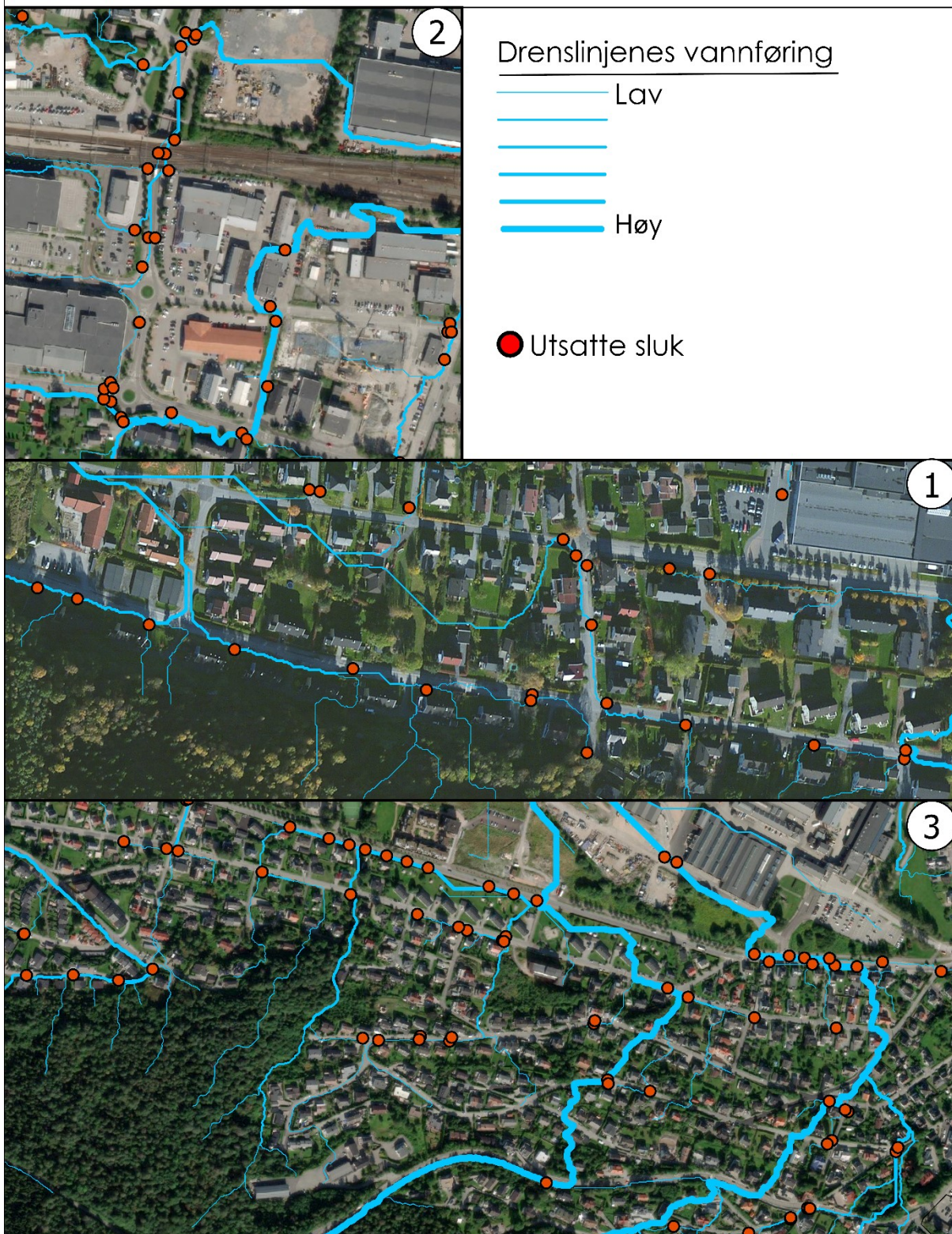
Kart i Figur 55 viser hvilke sluk som ligger innenfor 5 meter fra en drenslinje. Det er ikke tatt hensyn til vannføringen på drenslinjen når det er kartlagt utsatte sluk, men slukene som ligger i nærheten av en drenslinje med høy vannføring ble mer vektlagt enn et sluk som ligger i nærheten av en drenslinje med lav vannføring. Som skrevet i Tabell 8 og visualisert i Figur 55 ble det kartlagt totalt 178 utsatte sluk i forbindelse med dreneringslinjer.



Figur 55: Kart over dreneringslinjer og områder med utsatte sluk

Kart i Figur 55 viser tre områder der ansamlingen av utsatte sluk er størst. Område 1 er et område ved Gulskogen Vest, område 2 er området nord for Gulskogen kjøpesenter, mens område 3 er Strømsgodset og deler av Sundland. Figur 56 viser disse områdene mer detaljert.

Utsatte sluk innenfor område 1, 2 og 3

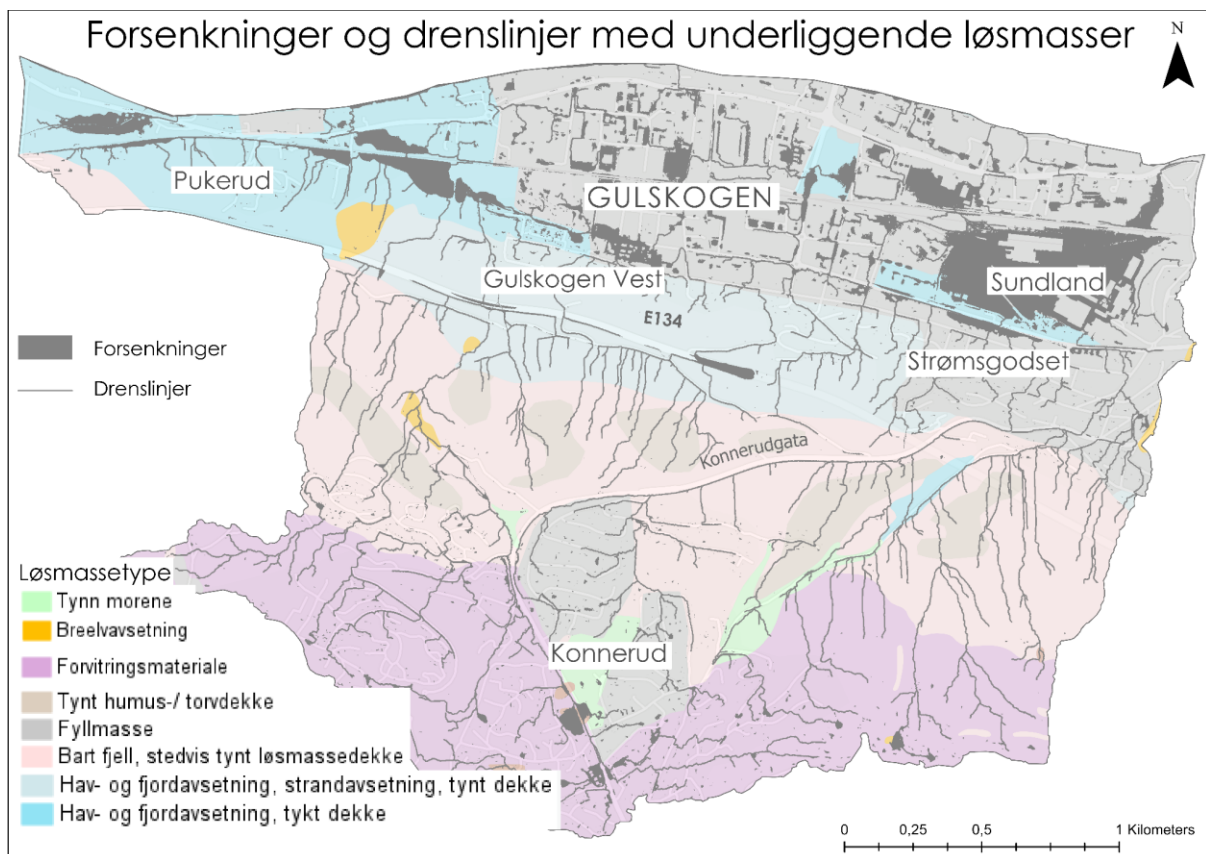


Figur 56: Kart som viser utsatte sluk og dreneringslinjer innenfor område 1, 2 og 3

Figur 56 viser at det er kartlagt en del utsatte sluk ved Strømsgodset, samt langs veiene som befinner seg mellom Strømsgodset og bortover mot Gulskogen Vest. I tillegg til dette er det en større ansamling av utsatte sluk i områdene rundt Gulskogen kjøpesenter. Det er også kartlagt noen utsatte sluk ved det industrielle området nord-vest for Gulskogen kjøpesenter.

6.6 Overvannsområder med tilhørende løsmasser

Kart i Figur 57 viser kartlagte forsenkninger og drenslinjer i studieområdet, og de underliggende løsmasstypene. Kartet viser at flesteparten av forsenkningene er lokalisert i områder som er bestående av fyllmasse eller hav- og fjordavsetninger. Kartet viser at drenslinjene er lokalisert innenfor områder med ulike løsmasstyper.



Figur 57: Kart over forsenkninger og underliggende løsmasser i studieområdet. Bakgrunnskart hentet fra GeoNorge

7 Diskusjon

For å kunne besvare problemstillingen: *Er kartlegging av dreneringslinjer og forsenkninger en nyttig måte å identifisere utsatte bygninger og sluk innenfor Gulskogen i Drammen?* er det nødvendig å diskutere resultatene fra analysene. Delkapittel 7.2 beskriver ulike risikoområder for overvann sett i sammenheng med andre faktorer, som underliggende løsmasser og sammenligning med tidligere kartlegging. Resultatene viser utsatte bygg og sluk i forbindelse med dreneringslinjer og forsenkninger, og gir en indikasjon på hvilke bygg og hvilke sluk som er utsatte for påvirkning av overvann i forhold til fremtidige klimaendringer. For å kunne besvare underproblemstillingen: *Hvilken påvirkning vil modifisering og oppløsning av terrengmodell ha for hydrologisk modellering av studieområdet?* ble det valgt å sammenlikne resultatene fra ulike terrengmodeller og undersøke årsaker til eventuelle forskjeller og likheter, i tillegg til å presentere eksempler på dette. Andre del av diskusjonskapittelet vil derfor diskutere betydningen både modifisering og valg av oppløsning på terrengmodellen vil ha på resultatene av en hydrologisk analyse. Diskusjonskapittelet avsluttes med refleksjoner rundt metodene som har blitt brukt i de hydrologiske analysene, etterfulgt av eksempler på feilkilder i kartlagte forsenkninger og drenslinjer.

7.1 Utsatte bygg og sluk

Kartlegging av dreneringslinjer og forsenkningsområder indikerer hvilke sluk som er viktige i forbindelse med overvann. Slukene bidrar til drenering av overvann, og kartleggingen indikerer hvilke sluk som har størst behov for rensing av løv, kvast eller is før en nedbørshendelse. I tillegg til dette kan kartleggingen av dreneringslinjer og forsenkninger bidra til å identifisere områder som har behov for bedre overvannshåndtering, eksempelvis sluk, og hvor de bør plasseres. Kartleggingen kan derfor bidra til å forbedre overvannshåndteringen for studieområdet. Forsenkningene med lav oppfyllingsverdi kan ansees som problematiske fordi de raskt kan fylles med vann, og vil drenere videre over til neste forsenkning - forsenkningen nedstrøms vil dermed være utsatt for enda mer vann enn det som opprinnelig kommer fra dets lokale nedbørfelt (Balstrøm & Crawford, 2018; Di Salvo et al., 2017). I forbindelse med lokasjonene til eksisterende sluk, er det hensiktsmessig at de samlokaliseres med forsenkninger for å kunne drenere overvannet bort fra gatene. Hvis vannet fra forsenkningene med lav

oppfyllingsverdi hadde blitt drenert av sluk før det drenerte videre til neste forsenkning, ville konsekvenser nedstrøms for forsengkningen trolig vært mindre. Det vil også være større sannsynlighet for at de utsatte slukene vil bli blokkerte av sedimenter og kvast, på grunn av sedimenttransport i drenslinjene. Det er nødvendig å undersøke de utsatte slukene videre i felt, for å undersøke det omkringliggende området og unngå at blokkering av sluk bidrar til ytterligere skader.

Resultatene har vist at byggverk som er utsatt for overvann kan illustreres ved kartlegging av dreneringslinjer og forsengkingsområder. Ifølge Balstrøm (2022) kan bygninger som ligger innenfor et forsengkingsområde med volum større enn 1 m³ være utsatt for overvannsskader – da noen mer enn andre. Bygninger som ligger fullstendig innenfor et forsengkingsområde kan være mer utsatt sett i motsetning til bygninger der kun deler av bygget overlapper med forsengkingspolygonen (Balstrøm, 2022). Hvis oppfyllingsverdien til en forsenkning er høy, vil det være usannsynlig at forsengkningen utgjør en reell fare for bygg om man kun ser på nedbøren innenfor dets lokale nedbørfelt, fordi den ikke vil fylles. Dette støttes oppunder Di Salvo et al. (2017) som konkluderer med at de farligste flomsonene er forsengkninger med blant annet lav oppfyllingsverdi eller områder med høy observasjon av tidligere flommer. På en annen side kan mulig drenering fra andre forsengkninger bidra til å fylle forsengkningen, som nevnt tidligere (Balstrøm, 2022). Det kan derfor være nødvendig å undersøke lokasjonene til de kartlagte forsengkningene for å undersøke om de kan være utsatte for drenering fra andre forsengkninger, i tillegg til å undersøke byggene individuelt for å se om byggene er dimensjonert for fremtidig overvann.

Bygg som er lokalisert innenfor et forsengkingsområde og som har trapp ned til en kjeller eller en sokkelleilighet, vil være ekstra utsatt for overvannsskader (Balstrøm, 2022). Dette er fordi vann kan fylle opp trappeoppgangen, noe som kan føre til konsekvenser for innbo (Balstrøm, 2022). På grunn av dette bør byggverk som er lokalisert i nærheten av en dreneringslinje eller forsenkning undersøkes, og eventuelle tiltak bør vurderes hvis det viser seg at bygningene ikke er sikret for overvann. Ny bebyggelse bør heller ikke plasseres i en drenslinje eller en forsenkning, med mindre det planlegges å innføre grundige tiltak for fremtidig overvann for området, eller om de nye bygningene og anlegg blir utformet slik at sikkerhet blir oppnådd tilstrekkelig (Drammen kommune, 2021).

Metodene som har blitt brukt i denne oppgaven kan brukes i sammenheng med byplanlegging, spesielt for boligutvikling og overvannshåndtering i urbane områder. Forsenkningene har en definert oppfyllingsverdi, noe som kan være samfunnsnyttig informasjon i forbindelse med infrastruktur, bygninger og sikkerhet. Oppfyllingsverdiene gir en indikasjon på hvilke forsenkninger som vil bli fylt opp med vann ved ulike nedbørsscenario, og hvilke områder som er utsatt for overvann. I følge Balstrøm og Crawford (2018) kan metodene for å utføre hydrologiske modelleringer i GIS brukes av planleggere i kommunen til å kartlegge mulige problemområder som kan forårsake flomskader nedstrøms i et nedbørsfelt. Balstrøm og Crawford (2018) mener også at en slik kartlegging kan brukes i forkant av eventuell innleie av profesjonelle eksperter innenfor modellering, for å diskutere mulige overvannstiltak og planlegging i forbindelse med overvann. I tillegg til dette understreker Di Salvo et al. (2017) at inngangsdataen som blir brukt til slike modeller er lett tilgjengelige, spesielt i kommunen. Dette understreker at metodene som har blitt brukt i denne oppgaven er brukervennlige, både på grunn av de ferdigstilte geoprosesseringsmodellene men også på grunn av kravet om lite inngangsdata.

Drammen kommune skal oppleve befolkningsvekst og byutvikling i årene som kommer (NOU 2015:16; Statistisk sentralbyrå, u.å.). Resultatene fra analysene kan brukes til å kartlegge hvor det bør gjøres ekstra tiltak for overvann i forbindelse med fremtidig nedbør, spesielt hvis det planlegges for boligutvikling eller annen bystruktur i sårbare områder. Det er allikevel verdt å nevne at metodene brukt i denne masteroppgaven inneholder flere usikkerhetsmomenter som vil bli diskutert videre i diskusjonskapittelet. Dette må tas til betraktning hvis lignende metoder skal brukes i fremtidige prosjekter.

7.2 Risikoområder for bygg og sluk

Resultatene viser sluk og bygg kartlagt som *utsatte* i forbindelse med overvann. Ved å sammenlikne utsatte bygg og sluk for henholdsvis drenslinjer og forsenkningsområder, er det synlig at det er flere områder som er kartlagt som risikoområder. Nedenfor vil det undersøkes om de kartlagte forsenkningene og drenslinjene vil utgjøre en reell fare for bygg og sluk. Overflatens egenskaper er en faktor til mengde overvann og overflateavrenning som oppstår i et område (Knighton, 1998). Det er derfor valgt å inkludere en vurdering angående arealbruk og underliggende løsmasser for å vurdere om de utsatte områdene i denne kartleggingen blir påvirket positivt eller negativt i forbindelse med avrenning og/eller infiltrasjon.

Problemområdene fra kartleggingen vil også sammenlignes med problemområdene som er presentert i «Veileder for overvannshåndtering i Drammen» (Drammen kommune, 2015b). Dette for å kunne undersøke om lokaliseringen av dreneringslinjer og forsengkninger er plassert i de samme områdene eller om det er forskjeller mellom kartleggingene, og gi en bekreftelse eller avkreftelse på om kartleggingen gjort i denne oppgaven gir realistiske resultat. Det vil også inkluderes en evaluering angående fremtidig utbygging, hvis dette er gjeldende for området.

7.2.1 Sundland

Sundland blir referert som område 5 i Figur 48, område 6 i Figur 52 og område 2 i Figur 54. Bygningene og slukene som har blitt kartlagt som *utsatte* ligger innenfor fem meter fra drenslinjen eller overlapper med forsengkningene som er kartlagt i området. Oppfyllingsverdien på forsengkningen som er lokalisert på Sundland er 232, og tilsvarer større enn 200-årsregn. Verdien tilsvarer et nedbør med høyt gjentakintervall, noe som indikerer fare for bygg lokalisert innenfor forsengkningen – hvis vann fra forsengkningene oppstrøms drenerer til denne forsengkningen. Som vist i Figur 54 ble det ikke kartlagt høyt antall utsatte sluk, noe som indikerer at det bør plasseres flere sluk eller grøntarealer innenfor risikoområdene slik at overvannet kan håndteres.

Som vist i Figur 4 er Sundland lokalisert i et område med få høydeforskjeller, noe som bidrar til oppsamling av overvann. Figur 57 viser at forsengkningene og drenslinjene er lokalisert i områder som består av fyllmasse og hav- og fjordavsetninger. Som nevnt tidligere har silt og leire lav permeabilitet, noe som kan indikere at overvann i dette området ikke har høy infiltrasjonsevne (Sulebak, 2007, s. 298-319). Sundland er et område med industriområder og impermeable overflater, noe som også er synlig på ortofoto i Figur 48. Asfalterte områder bidrar til avrenning i forbindelse med overvann. På grunn av løsmassetypene og arealbrukstypene på Sundland er byggverkene og slukene i dette området ekstra utsatte for overvann. Figur 1 viste at Sundland var et område på Gulskogen som var utsatt for overvann ved ekstremnedbør, noe som gjenspeiles i denne kartleggingen. I motsetning til Figur 1 er dreneringslinjen i Figur 48 kartlagt noe til venstre for flomveien, mens forsengkningen er lokalisert i omtrentlig samme område som risikoområdet i Figur 1. Forskjellene i kartleggingene av drenslinjer kan skyldes ulike årsaker – hvilke programmer som har blitt brukt samt oppløsningen og modifiseringen av terrengmodellen. Ut ifra Figur 1 har kartet inkludert bekkeinntak i kartleggingen, noe masteroppgavens analyse ikke har tatt stilling til. Drenslinjene og forsengkningensområdene

kartlagt i denne masteroppgaven vil derfor visualisere løpet vannet vil ta hvis bekkeinntakene og kulvertene blir blokkerte.

7.2.2 Gulskogen vest

Gulskogen Vest blir referert som område 2 i Figur 47 og Figur 51 og som område 1 i Figur 56. Den største forsenkningen har en oppfyllingsverdi på 123 mm, noe som tilsvarer større enn 200-årsregn. Figur 3 og Figur 57 illustrerer at Gulskogen Vest er et område som er bestående av tettbebyggelse og grøntområder, og løsmassene er hovedsakelig bestående av fyllmasse og hav- og fjordavsetninger. Løsmassetyperne bidrar til økt fare for overvann på grunn av lav infiltrasjonsevne. På en annen side bidrar grøntarealene til mindre fare for overvann. Området oppstrøms for Gulskogen Vest har høy helningsgrad og drenslinjene kan derfor ha høy hastighet, og derav høy sedimenttransport og erosjonsevne. Byggene og slukene som er lokalisert i nærheten av drenslinjene har derfor blitt kartlagt som utsatt.

Gulskogen Vest er kartlagt tidligere som et problemområde for overvann i «Veilederen for overvann» (Drammen kommune, 2015b). Dette gjenspeiler masteroppgavens funn, der det i dette området er lokalisert en større forsenkning i et boligfelt samt flere drenslinjer som går gjennom boligfeltet. Drenslinjene inn til risikoområdet er kartlagt på ulike lokasjoner for Figur 1 og kartleggingen gjort i denne oppgaven, mens forsenkningen er lokalisert omtrentlig i samme område som risikoområdet i Figur 1. Dette grunnet i bruk av ulike program og modifiseringer som nevnt ovenfor. Som vist i Figur 49 er det kartlagt flere større forsenkninger samt drenslinjer i jordbruksarealet vest for boligfeltene. Dette jordbruksarealet er kartlagt som fremtidig boligbebyggelse i kommuneplanen til Drammen kommune (2015a). I forbindelse med ny utbygging i dette området bør det tas hensyn til de kartlagte dreneringslinjene og forsenkingsområdene, slik at en forhindrer fremtidige skader og påvirkning fra overvann.

7.2.3 Gulskogen og omkringliggende områder

Gulskogen senter og omkringliggende områder blir referert som område 4 i Figur 48, område 4 og 5 i Figur 52, område 3 i Figur 54, og område 2 i Figur 56. Det er kartlagt én forsenkning i undergang under jernbanen som har en høy oppfyllingsverdi på 323. Denne forsenkningen kan ikke fylles utelukkende fra nedbør innen nedbørfeltet, men kan få tilrenning fra andre forsenkninger. Uavhengig om forsenkningen blir fylt kan oppsamling av vann nederst i undergangen skape konsekvenser for bilister og trafikanter. Det er derfor viktig at slukene i

dette området er rensket for blokkering før nedbørshendelser, slik at det ikke oppstår farlige situasjoner for bilister i undergangen. Denne undergangen blir også referert til som et risikoområde i forbindelse med oversvømmelse i Figur 1. Boligområdet nord for Gulskogen senter, referert som område 4 i Figur 52, er kartlagt som utsatt for oversvømmelse i forbindelse med forsenkninger. Forsenkningene har lave oppfyllingsverdier og vil fylles med vann ved nedbørshendelser med lave gjentaksintervall.

Figur 54 viser at det ikke er kartlagt sluk som samlokaliserer med forsenkningene i dette området, noe som kan indikere at det bør plasseres flere sluk eller annen overvannshåndtering innenfor boligområdet. I følge Figur 3 og Figur 57 består Gulskogen senter og de omkringliggende områdene av industriområder, åpne områder og tettbebyggelse. Ifølge kommuneplanen for Drammen kommune (2015a) er områdene nord for jernbanen kartlagt som fremtidig kombinert bebyggelse og anleggsformål. I forbindelse med dette bør det tas hensyn til forsenkningene som er kartlagt i disse områdene og dreneringslinjene som drenerer gjennom næringsbebyggelsen nord for Sundland, og gjennom området nord for Gulskogen senter. Dette for å forhindre fremtidig skade på bygg og anlegg.

7.2.4 Pukerud

Område 1 i Figur 51 omfatter et område på Pukerud. Det er kartlagt en forsenkning som strekker seg over et jordbruksområde og et boligfelt. Forsenkningen har en oppfyllingsverdi på 161. Byggene som er plassert innenfor forskningsområdet har blitt kartlagt som utsatt for overvann. Det er kartlagt flere drenslinjer som går gjennom boligfeltet men det er valgt å ikke vektlegge disse på grunn av lav vannføring, derav lav konsekvens for bygg. Figur 3 og Figur 57 viser at Pukerud er bestående av dyrket mark, skogsarealer, og åpne områder der løsmassetypen er hav- og fjordavsetning. Det er ikke kartlagt utsatte sluk innenfor forskningsområdet på grunn av at den er lokalisert på et jordbruksareal. Selv om slukene ikke korrelerer med de kartlagte drenslinjene og forskningsområdene, er det ikke sikkert sluk er nødvendig i disse områdene på grunn av overflatens evne til å infiltrere vann. I følge kommuneplanen til Drammen kommune (2015a) er det planlagt fremtidig boligbebyggelse på Pukerud. I følge denne kartleggingen bør det tas hensyn til de kartlagte flomveiene som er lokalisert i området i forbindelse med utbyggingen.

7.2.5 Industrielt område

Det industrielle området nord for Gulskogen er kartlagt som utsatt i forbindelse med forsenkninger. Det er kartlagt mange forsenkninger i dette området som har lav oppfyllingsverdi, samt noen forsenkninger som har høyere verdi. Bygningene som er lokalisert i området er kartlagt som utsatt for overvann, spesielt de som er plassert innenfor de større forsenkningene. Kartet i Figur 54 viser at det er flere forsenkninger som ikke har tilhørende sluk. Figur 3 og Figur 57 viser at området er bestående av fyllmasse og industrielle områder, mens Figur 4 viser at området har svært lite helning. Det er hovedsakelig asfaltering eller impermeable overflater i områdene rundt de industrielle bygningene. Disse områdene er derfor spesielt utsatt for overvann, og det er derfor viktig at vannet blir drenert bort i disse områdene. På grunn av lav oppfyllingsverdi på forsenkningene er de utsatte slukene viktig for drenering av overvannet, siden forsenkningene fyller seg raskt opp med vann. Hvis slukene i disse områdene ikke er rensket for blokkering, eller at det ikke er et tilstrekkelig antall sluk, vil dette skape problemer for de nærliggende byggene ved at overvannet ikke blir håndtert.

7.2.6 Strømsgodset

Det er to områder ved Strømsgodset som er kartlagt som utsatt i forbindelse med dreneringslinjer. Det er to dreneringslinjer med høy vannføring som drenerer gjennom flere boligområder. Figur 57 og Figur 3 viser at Strømsgodset hovedsakelig består av fyllmasse og bart fjell med boligområder og skogsområder. Løsmassene for dette området har lav infiltrasjonsevne, noe som bidrar til økt avrenning. På grunn av at dreneringslinjene har høy vannføring vil alle nærliggende bygninger og sluk være utsatte for overvann. Det er kartlagt svært få forsenkninger i dette området. Som vist i bratthetskartet i Figur 4 er Strømsgodset beliggende i en åsside med helning. Dette kan være en årsak til at det har blitt kartlagt få forsenkninger her - vannet vil drenere nedover åssiden.

7.3 Oppløsning av terrengmodell

For å kunne besvare problemstillingen: *Hvilken påvirkning vil modifisering og oppløsning av terrengmodell ha for hydrologisk modellering?* ble det valgt å sammenligne resultatene fra de hydrologiske analysene som var basert på terrengmodeller med ulike oppløsninger. I følge Saksena og Merwade (2015) vil nøyaktigheten til flomsonekartlegging øke for desto høyere oppløsning på terrengmodellen. Analysene utført i masteroppgaven viser at oppløsningen på terrengmodellen er en viktig faktor for å få korrekte hydrologiske resultat. På en annen side viser resultatene at det var betydelig mindre forskjeller mellom 1-meter terrengmodell og 25-centimeter terrengmodell enn mellom 1-meter terrengmodell og 10-meter terrengmodell. Sett i forhold til kartlagte drenslinjer med 1-meter terrengmodell ble det kartlagt 30 færre bygg samt fire flere sluk med 25-cm terrengmodell og 226 flere utsatte bygg og 68 færre sluk med 10-meter terrengmodell. En motsigende men lignende trend framtrådte ved kartlagte forsengkninger der 25-cm terrengmodell kartla 435 flere utsatte bygg og 34 flere sluk mens 10-m terrengmodell kartla 773 færre utsatte bygg og 138 færre sluk sett i forhold til terrengmodellen med 1 meter oppløsning. Nedenfor blir det presentert spesifikke eksempler fra resultatene, og mulige årsaker til forskjellene og likhetene mellom resultatene fra de ulike terrengmodellene.

7.3.1 Generering av drenslinjer basert på terrengmodell med ulike oppløsninger

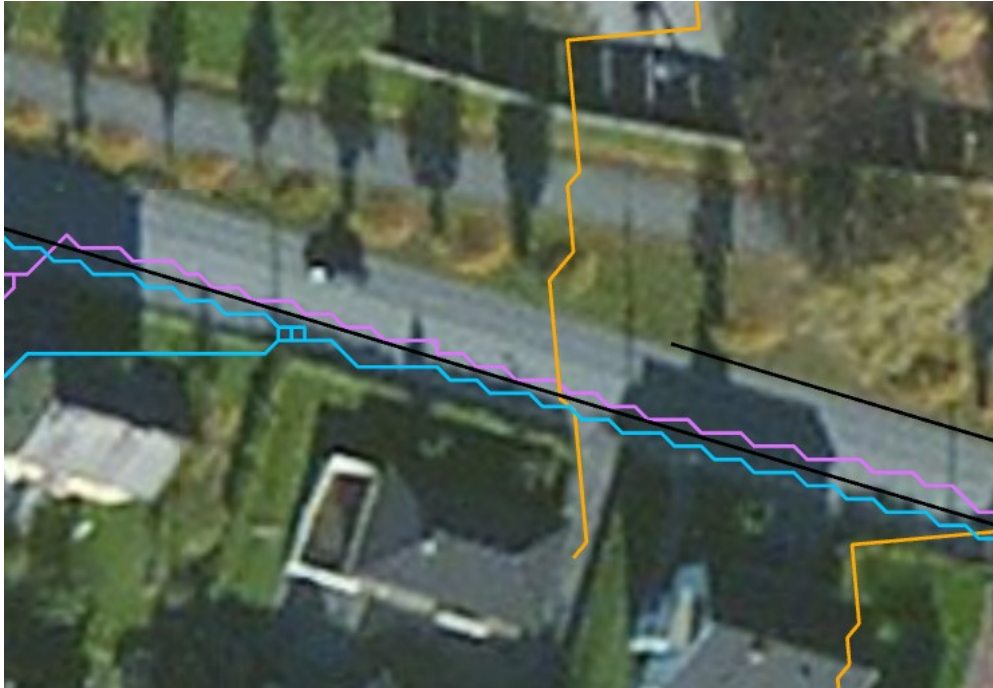
Geoprosesseringsmodellene i denne oppgaven er hovedsakelig basert på terrengmodeller som inngangsdata, og det ble derfor valgt å undersøke hvilken påvirkning ulik oppløsning på terrengmodellen vil gi resultatene. Resultatet i Figur 40 og Figur 41 viste at det var forskjeller i dreneringsløpene til de ulike drenslinjene generert fra terrengmodeller med ulik oppløsning. Figur 58 viser et utsnitt over kartlagte dreneringslinjer som er basert på 25-centimeter DTM, 1-meter DTM og 10-meter DTM. Utsnittet viser at drenslinjene for 25-cm DTM og 1-m DTM har noenlunde samme dreneringsløp, i motsetning til drenslinjene for 10-m DTM som tok en alternativ rute. En terrengmodell med en finere oppløsning vil bestå av flere piksler enn en terrengmodell med grovere oppløsning, og vil derfor angi dreneringsretning til et høyere antall piksler (Hengl & Evans, 2009, s. 46; Rød, 2015, s. 240-241). Dette kan være en av årsakene til at de genererte dreneringslinjene fra 10-m terrengmodell er mindre nøyaktige enn dreneringslinjene basert på 25-cm eller 1-m terrengmodell.

Resultatene viser at terrengmodellene med fin oppløsning registrerer høydeforskjeller og menneskelige konstruksjoner, som for eksempel fortauskanter, i større grad enn en grovere terrengmodell. I følge Murphy et al. (2008) vil LiDAR DTM med høy oppløsning fange opp grøftekanter ved siden av veier og jernbane. Dette er tilfelle i Figur 58 som viser at drenslinjene for 25-cm terrengmodell og 1-m terrengmodell har registrert forsenkninger i grøftekantene langs veiene, og drenerer derfor i disse løpene i motsetning til drenslinjene for 10-m terrengmodell som drenerer over veien.



Figur 58: drenslinjer basert på 10 m terrengmodell (oransje), drenslinjer basert på 1 m terrengmodell (blå) og drenslinjer basert på 25 cm terrengmodell (rosa).

Dette var også gjeldende for områdene med implementerte fortauskanter. Terrengmodellen med oppløsning på 10 meter registrerte ikke at det er lokalisert en forhøyet blokkering langs veien, og drenerte derfor over veien i stedet for langs fortauskanten, som vist i Figur 59. De resterende terrengmodellene registrerte forhøyningen og drenerte langs fortauskantene. Dette stemmer overens med Longley et al. (2015, s. 327-328) som brukte en terrengmodell på 30 meter oppløsning til å kartlegge et elvenettverk i Orange County i USA. Terrengmodellen til Longley et al. (2015, s. 327-328) ble ikke påvirket av menneskelige konstruksjoner, og kartla derfor drensløpet i det historiske elveløpet i stedet for det reelle løpet. Dette kan sees i sammenheng med dette oppgaven der terrengmodellen med 10-m oppløsning ikke lyktes med å representere fortauskanter på grunn av lav oppløsning.



Figur 59: Drenslinjer basert på 10-m terrengmodell (oransje), drenslinjer basert på 1-m terrengmodell (blå) og drenslinjer basert på 25-cm terrengmodell (rosa). Svart linje representerer fortauskant.

7.3.2 Generering av forsenkninger basert på terrengmodeller med ulike oppløsninger

Terrengmodellen med 25 cm oppløsning genererte mange forsenkninger med lite areal og kapasitet, sett i forhold til terrengmodellen med 1 meter. Tabell 6 viser at det ble generert 5194 forsenkninger med 25 centimeter oppløsning, og 1901 forsenkninger med 1 meter oppløsning og 16 forsenkninger med 10 meters oppløsning. Terrengmodellen med 10 meters oppløsning genererte 16 forsenkninger, der 3 av disse var større enn én til få piksler. Som vist i Figur 44 samlokaliserte to av disse forsenkningene med forsenkninger som ble kartlagt fra de andre terrengmodellene, mens de resterende forsenkningsområdene ikke ble kartlagt.

En årsak til at det har blitt generert flere forsenkninger med en terrengmodell med finere oppløsning kan være grunnet i flere antall piksler, sett i motsetning til grovere modeller med færre piksler. Dette grunner i at terrengmodeller med høy oppløsning vil oppfatte terrengvariasjoner og terrenghelning i større grad (Hengl & Evans, 2009). Innenfor én meter kan det være lokalisert en forsenkning som kun terrengmodellen med 25 cm oppløsning registrerte fordi den er bestående av et høyere antall piksler. En negativ side ved å kjøre en hydrologisk analyse på en terrengmodell med 25 cm oppløsning, er at prosesseringstiden er høyere og det tar opp mer lagringsplass enn å kjøre den samme analysen på en grovere terrengmodell (Hengl & Evans, 2009). Studieområdet i denne oppgaven var lite, noe som

resulterte i noenlunde lav prosesseringstid for alle terrengmodellene. Dette er likevel et viktig poeng hvis modelleringene hadde blitt utført på større nedbørfelt.

En annen årsak til at det har blitt kartlagt flere forsenkninger i terrengmodellen med finere oppløsning kan være på grunn av dens vertikale nøyaktighetsverdi. Høydemodellens vertikale nøyaktighetsverdi bestemmer minimum dybde på forsenkningene som skal kartlegges (Balstrøm & Crawford, 2018; Maksimović et al., 2009). Terrengmodellen med 1 meter oppløsning hadde en vertikal nøyaktighetsverdi på 10 cm, mens terrengmodellene med 25 cm og 10 m oppløsning hadde en vertikal nøyaktighetsverdi på henholdsvis 5 cm og 3 m. Forskjellene i vertikale nøyaktighetsverdier utgjorde forskjell ved antall forsenkninger som ble kartlagt. Den høye vertikale nøyaktighetsverdien er trolig en av hovedårsakene til at det ble kartlagt få forsenkninger med terrengmodellen med 10 meters oppløsning. Dette viser at de kartlagte forsenkningene fra de andre terrengmodellene trolig har en dybde på mindre enn 3 meter. Flere av de kartlagte forsenkningene fra 1-m DTM og 25-cm DTM hadde et areal som var mindre enn 10 x 10 meter, noe som muligens ikke ble fanget opp av terrengmodellen med 10 meters oppløsning. Dette støttes oppunder Bratlie (2015) sin påstand om at terrengmodellens oppløsning påvirker resultatet i hydrologiske modelleringer i stor grad. Resultatene viste også at det ikke bør brukes terrengmodeller med grovere oppløsning enn 1 meter, på grunn av stor usikkerhet rundt resultatet som vist med terrengmodellen på 10 meter hvor det ikke var en tilstrekkelig representasjon av terrenget.

Det ble ikke fokusert på små forsenkninger med volum mindre enn 1 m³ i denne oppgaven i forbindelse med utsatte bygg. Selv om det ble kartlagt flere utsatte bygg med 25 cm oppløsning, vil det ikke nødvendigvis være flere bygg som er utsatt for overvann i virkeligheten. I følge Balstrøm og Crawford (2018) kan forsenkninger som har volum på mer enn 1 m³ bidra til skader på bygninger. De kartlagte forsenkningene som er mindre enn 1 m³ vil derfor ikke nødvendigvis gi belastning på byggene som befinner seg i nærheten. I forbindelse med kartlegging av utsatte sluk kunne det ha blitt brukt terrengmodell med 25 cm oppløsning, for å kunne kartlegge sluk som samlokaliserte med små forsenkninger. En mulig konsekvens at dette kunne vært at det ble kartlagt "risikoområder" for områder med veldig lav vannoppsamling, spesielt for forsenkningsområder som kun er bestående av én eller få antall piksler, og derav en vannoppsamling på 25 x 25 cm. I virkeligheten vil ikke disse utgjøre en reell fare i forbindelse med overvann, sett i sammenheng med relevansen til denne oppgaven. Et eksempel på dette er Figur 60 som viser bygg og sluk som er kartlagt som *utsatt* på grunn av den kartlagte forsenkningen som ligger i umiddelbar nærhet til konstruksjonene.



Figur 60: (a) Liten forsenkning (blå) med tilhørende utsatt bygg (oransje, og (b) liten forsenkning (blå) og tilhørende utsatt sluk (rosa).

De små forsenkningene fra terrenngmodellen med oppløsning på 25 cm ble derfor ikke brukt som analysegrunnlag i forbindelse med kartlagte utsatte sluk i denne oppgaven. Å kartlegge små forsenkninger kan derimot være nyttige for andre studier. Balstrøm og Crawford (2018) skriver at kartlegging av små forsenkninger kan bidra med informasjon til kommunene, i forbindelse med kartlegging av veier eller sykkelfelt som er ekstra utsatt for vannoppsamling. Opach et al. (2021) brukte kartlagte små forsenkninger for å se på hvordan vannoppsamlinger ville påvirke tilgjengeligheten til fotgjengere i Trondheim.

Figur 43 viser små forskjeller mellom lokasjonene og størrelsene til forsenkningene som har blitt generert med 1-meter DTM og 25-centimeter DTM, med unntak av noen forsenkningsområder. Figur 42 viser at noen av forsenkningene som ble generert med terrenngmodellen med 1 meters oppløsning var større i areal enn forsenkningene for 25 centimeter oppløsning. Ogania et al. (2019) sammenliknet ulike terrenngmodeller med ulike oppløsninger for å undersøke om oppløsning hadde påvirkning på generering av flomsonekart. Et av resultatene til Ogania et al. (2019) var at terrenngmodellene med grovere oppløsning ofte predikerte større flomsoner enn terrenngmodellene med høyere oppløsning. Dette var også tilfelle for en studie utført i USA, som konkluderte med at terrenngmodeller med lav oppløsning overdriver flomsoneene (Saksena & Merwade, 2015). Dette stemmer overens med resultatene som vist i Figur 42. Ogania et al. (2015) undersøkte terrenngmodeller med oppløsning på 1 meter, 5 meter og 10 meter. Forsenkningene som ble kartlagt i denne oppgaven som var basert på 10 meter DTM var ikke tilstrekkelige, og det ble derfor valgt å kun fokusere på sammenligningen mellom 1 meter og 25 centimeter terrenngmodell i stedet.

Valg av oppløsning på terrengmodellen avhenger av analysens formål. Skal det lages et regionalt kart over drenslinjer og forsenkningsområder, bør det brukes en terrengmodell med grovere oppløsning på grunn av lavere prosesseringstid og lite behov for høy detaljeringsgrad (Hengl & Evans, 2009). Bratlie (2015) skriver at 10-meter DTM kan brukes på landskapsnivå for å utføre grove analyser, men for å kunne identifisere flomveier på eiendomsnivå er det nødvendig med en oppløsning på 1 meter. Det er også nødvendig å modifisere modellen slik at flest mulig menneskelige konstruksjoner blir inkludert, slik at det hydrologiske resultatet gjenspeiler en realistisk situasjon. Hvis det skal utføres hydrologiske modelleringer for små kommuner, vil det ikke nødvendigvis være tilgjengelig høydedata med 25 centimeter oppløsning. Resultatene viser at 1-meter terrengmodell kan brukes som inngangsdata, noe som støttes oppunder Bratlie (2015) - hvis det tilrettelegges for feilkilder i forbindelse med implementering av fortauskanter og muligens overdrivelse av flomsoneer. Som nevnt tidligere var det heller ikke behov for kartlegging av små forsenkninger i denne analysen, noe som støtter under påstanden om at 1-meter DTM er tilstrekkelig.

7.4 Modifisering av terrengmodell

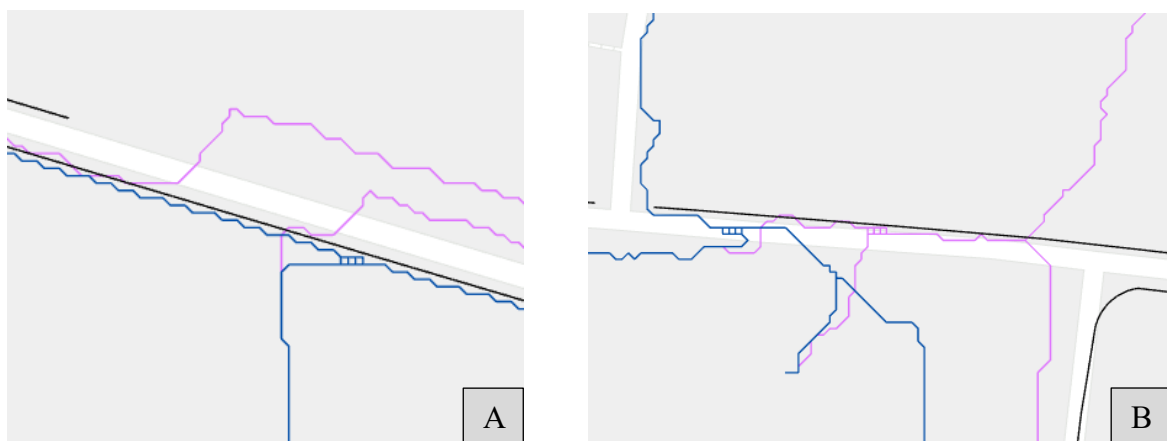
Modifisering har i masteroppgavens analyse vist seg å være nødvendig i forbindelse med hydrologisk modellering for å få et mest mulig realistisk strømningsmønster som følger terrenget i virkeligheten. Dette støttes oppunder Murphy et al. (2008) som skriver at terrengmodeller ikke vil registrere bygninger, underganger eller andre menneskelige strukturer, og at det derfor er nødvendig å modifisere terrengmodeller til bruk i hydrologiske analyser. I følge Rød (2015, s. 18) er det viktig at representasjoner er virkelighetsnære, slik at det kan trekkes korrekte konklusjoner. Ved å basere hydrologiske modeller på terrengmodeller som er modifiserte, og derav mer virkelighetsnære enn ikke-modifiserte terrengmodeller, kan konklusjoner angående utsatte områder for overvann ha et mer hydrologisk korrekt grunnlag. Det er også verdt å nevne at nødvendigheten til modifisering av en høydemodell bør sees i sammenheng med den hydrologiske analysens formål, og kjennetegn ved studieområdet. En terrengmodell som omfatter et ruralt område har ikke like mye behov for modifisering som et urbant område som Drammen, på grunn av mindre menneskelige strukturer. For å undersøke viktigheten av modifisering vil påvirkningen ulike modifiseringsprosesser har hatt på resultatene bli diskutert i avsnittene nedenfor. De ulike modifiseringsprosessene bestod av implementering av bygninger, fortauskanter, vannområder, underganger, kulverter og stikkrenner.

7.4.1 Implementering av bygninger og vannområder

Implementering av bygninger i terrengmodellen var en viktig faktor for å få vann til å drenere rundt bygningene, og for at forsenkningene skulle få riktige oppfyllingsverdier (Balstrøm & Crawford, 2018). Figur 38 og Figur 39 viste kartlagte drenslinjer og forsenkninger som var baserte på en terrengmodell uten hevede bygg. Her gikk drenslinjene gjennom bygningene, og forsenkningene var lokalisert både delvis og fullstendig innenfor bygningspolygonene. Det kan derfor konkluderes med at denne modifieringsprosessen var svært viktig for at resultatet skulle bli realistisk, fordi det påvirket vannet til å drenere rundt bygningene. I forbindelse med kartlegging av forsenkninger var fjerning av vannområder fra FKB en viktig prosess da vannområdene ikke skulle bli kartlagt som forsenkningsområder.

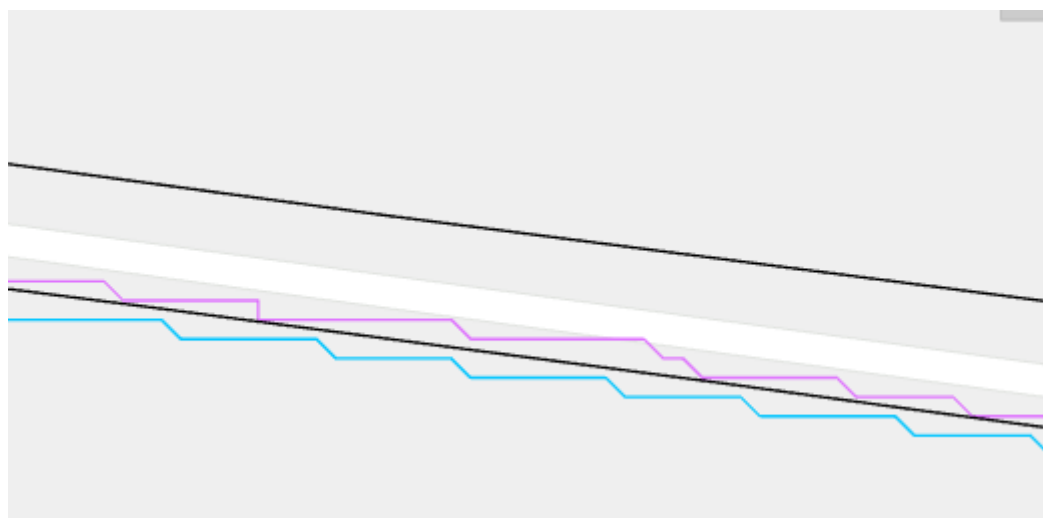
7.4.2 Implementering av fortauskanter

De modifiserte terrengmodellene hadde implementert fortauskanter i tillegg til bygningspolygoner. Fortauskantene ble representert som linjer, noe som påvirket strømningsmønsteret på dreneringslinjene. Figur 61 viser eksempler på hvordan drenslinjene ble påvirket ved lokasjonene til fortauskantene. Figurene viser at terrengmodellen ikke registrerte at det var en forhøyet overflate på andre siden av fortauskanten, altså selve fortauet, for terrengmodellen med 1 meters oppløsning. Fortauskanten fungerte som et hinder fra begge sider, selv om det kun var én side med helning. Den modifiserte drenslinjen ble hindret i å drenere over linjen, selv fra fortauskanten og ned til veien. Figur 61 (a) viser at drenslinjen fra ikke-modifisert terrengmodell drenerte fra fortauskanten og ned til veien, noe som kan være realistisk strømming. Figur 61 (b) viser derimot at drenslinjen fra ikke-modifisert terrengmodell drenerte fra veibanen og over fortauskanten, noe som er et mindre realistisk strømningsmønster på grunn effekten til fortauskanten. Resultatene stemmer overens med Meesuk et al. (2015), som skrev i sin studie at fortauskanter påvirker strømningsmønsteret til drenslinjer ved å avlede eller blokkere vannet.



Figur 61: Drenslinjer basert på modifisert terrengmodell med fortauskanter (blå), og drenslinjer basert på original terrengmodell (rosa). Svart linje representerer fortauskant, mens hvit linje representerer vei. Område (a) og (b) viser to ulike eksempler på forskjellige drensløp.

Terrengmodellen med oppløsning på 1 meter hadde et annerledes drensløp ved fortauskantene, enn terrengmodellen med oppløsning på 25 centimeter. Ut ifra resultatene i Figur 62 kan man se at terrengmodellen med oppløsning på 25 centimeter oppfattet at det er et forhøyet område på andre siden av kanten, og at vannet derfor vil drenere i selve veien, og ikke på andre siden av fortauskanten.



Figur 62: To ulike dreneringsveier som drenerer på hver sin side av fortauskanten. Lilla representerer 25 cm oppløsning, blå representerer 1 meter oppløsning.

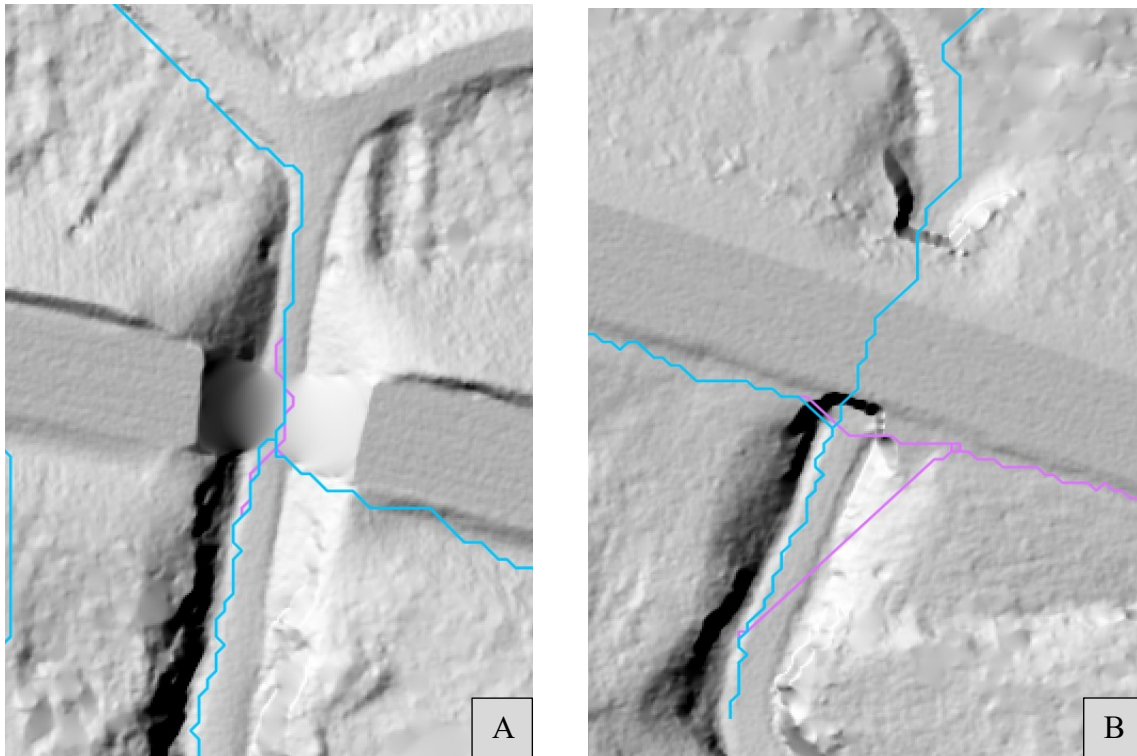
Høyere oppløsning på terrengmodellen gjør at små terrengforskjeller og dermed noen menneskelige konstruksjoner representeres (Hengl & Evans, 2009). Dette kan være en av årsakene til at forskjellene mellom drensløpene for de to ulike terrengmodellene som brukt i Figur 62 er relativt små, sett i forbindelse med områdene rundt fortauskantene. Begge terrengmodellene har høy oppløsning – 1 m og 25 cm, noe som resulterte i at begge terrengmodellene oppfattet terrengvariasjonene. På en annen side viser resultatene at

implementeringen av fortauskanter er en nødvendig prosess, men at det bør gjøres på en annen måte hvis man skal bruke en oppløsning på 1 meter eller grovere, slik at selve fortausfeltet også bli hevet med samme verdi som fortauskanten. Dette for å få et realistisk strømningsmønster der vannet drenerer i veien, i stedet for fortauet.

Resultatene viser at implementeringen av små menneskelige konstruksjoner kan bidra til å endre drensløp. I etterkant av oppgaven er det tydelig at det burde blitt implementert andre menneskelige strukturer, som for eksempel vegdekkekant og trafikkøykant eller andre FKB data. Det kan ansees som en usikkerhet at det ikke ble implementert andre konstruksjoner enn fortau, bygg, undergang, stikkrenner og kulverter, da resultatene har vist at modifisering er en nødvendig prosess. Dette kunne muligens ha påvirket resultatene ytterligere. I tillegg til dette er det usikkerheter knyttet til valg av høydeverdier for fortauskantene, noe som var nevnt i delkapittel 4.2. Det er mulig at høydeverdien ble satt for høyt, noe som muligens kan ha påvirket drenslinjene. Det er verdt å nevne at resultatet kunne ha vært annerledes hvis fortauskantene ble hevet med sin reelle høyde, noe som ikke var mulig for denne oppgaven da informasjon om høyden ikke var tilgjengelig.

7.4.3 Implementering av underganger

Det ble valgt å implementere underganger i terrengmodellene. Dette på bakgrunn av at tidligere studier påpeker at dette er nødvendig slik at vannet kan drenere under konstruksjonene (Meesuk et al., 2015; Murphy et al., 2008). For dette studieområdet ble det kartlagt seks underganger, basert på visuelle observasjoner fra ortofoto og fjellskygge. I følge Polat og Uysal (2015) vil terrengmodeller bli filtrert slik at menneskeskapt konstruksjoner blir ekskludert. Figur 63 viser to forskjellige underganger, én der motorveien over undergangen har blitt filtrert bort i forkant av geoprosesseringen (a) og én der undergangen var manuelt implementert i terrengmodellen (b). I følge Meesuk et al. (2015) vil den filtrerte dataen erstatte høydeverdiene fra høydekonstruksjoner med interpolerte høydeverdier fra den underliggende bakken. Dette er også tilfelle i Figur 63 (a) der veien over undergangen har fått tildelt interpolerte høydeverdier basert på den underliggende bakken der undergangen er lokalisert.



Figur 63: viser dreneringslinjer som går under eller rundt to forskjellige underganger; undergang (a) og undergang (b). Blå linje representerer en drenslinje basert på en modifisert terrengmodell. Lilla linje representerer en drenslinje basert på en original terrengmodell.

Figur 63 (a) viser at drenslinjene generert fra ikke-modifisert terrengmodell drenerte gjennom tre av de kartlagte undergangene selv om de ikke var implementert i høydemodellen. For de resterende undergangene var det kun dreneringslinjen fra den modifiserte terrengmodellen som drenerte gjennom konstruksjonene, mens drenslinjen fra den ikke-modifiserte terrengmodellen fant alternative veier. Dette er visualisert i Figur 63 (b). Selv om noen av veiene ovenfor undergangene hadde gjennomgått en filtreringsprosess, var implementering av underganger en nødvendig prosess for å få realistisk vannstrømning for de resterende undergangene. Implementering av underganger kan være en mer viktig modifiseringsprosess hvis studieområdet er bestående av flere underganger. I denne kartleggingen var det kartlagt få antall underganger, noe som ikke bidro til store endringer i drensløpene nedstrøms. Hvis studieområdet var bestående av et større antall underganger og eventuelt broer, ville dette vært viktigere for å sikre et hydrologisk korrekt resultat.

7.4.4 Implementering av kulverter og stikkrenner

Det ble implementert kulverter og stikkrenner i én av høydemodellene på samme måte som underganger. Dette ble gjort for å undersøke hvor vannet vil drenere hvis kulverter og stikkrenner er åpne, for deretter å sammenlikne dreneringsløpene med en situasjon der kulvertene og stikkrennene er blokkerte. Ifølge Murphy et al. (2008) og Viréhn (2014) kan implementering av kulverter i hydrologisk modellering bidra til informasjon angående planprosjekter som kan ha innvirkning på vannveier, og fremheve mulige konsekvenser. Resultatene i Tabell 7 og Tabell 8 viste at det ikke var store forskjeller på antall utsatte bygg med lukkede kulverter og antall utsatte bygg med åpne kulverter. I den åpne situasjonen vil vannet drenere gjennom kulvertene og ut på andre siden av konstruksjonen. I en lukket situasjon vil vannet drenere gjennom områder med lavest mulig motstand, fordi kulverten er blokkert av sedimenter og materialer. Kartleggingen av drenslinjer ved en åpen situasjon indikerte mulige problempunkt, og løpene til alternative flomveier ved en situasjon der kulverter og stikkrenner er blokkerte.

Det ble kartlagt fem flere utsatte bygg og ett mer utsatt sluk ved en åpen situasjon enn ved en lukket situasjon. Årsaken til dette er at ledningsnettets ikke var inkludert i kartleggingen, noe som resulterte i at vannet drenerte fritt nedstrøms for kulverten. Studieområdet er av urban karakter, og er derfor bestående av et komplisert ledningsnett. I virkeligheten vil vannet drenere inn i ledningsnettets ved sluk, kummer eller bekkeinntak. Derfor vil den åpne situasjonen i kartet i Figur 45 ikke representere en fullstendig realistisk åpen situasjon. Implementering av kulverter og stikkrenner i terrengmodellen kunne derfor vært en viktigere prosess for områder uten komplisert ledningsnett, da vannet ikke drenerer videre inn i ledningsnettets nedstrøms for kulvertene. I tillegg til dette ble ikke dimensjoneringen til kulvertene og stikkrennene inkludert i analysene. Det hadde vært mulig å inkludere dimensjoneringen for kulvertene ved å bruke den rasjonelle formel (Pedersen & Bratlie, 2022). Det ble valgt å utelate dette fordi det skulle fokuseres på vannets opprinnelige strømningsmønster ved en normalsituasjon, sett i forhold til en situasjon med blokkerte kulverter. Dimensjoneringen av kulvertene kunne blitt brukt til å kalkulere maksimal mengde vannføring kulverten tåler før vannet tar alternative vannløp.

Det er usikkerhet knyttet til stadfestingen av stikkrennene. Som vist i avsnitt 4.2.1 var punktlaget som representerte stikkrenner lokalisert noe feil i kartet. Vektoriseringen av stikkrennepunktene ble gjort manuelt ved å tegne opp en linje med start- og slutt punkt i forkant og etterkant av stikkrennen, ved å undersøke fjellskyggen av det underliggende terrenget. Fremstillingen av

fjellskygge kan inneholde usikkerheter, da nedsenkning i terrenget kan oppfattes som en terrenghøyde på grunn av reversering av dybdepersepsjon – for eksempel at en dal kan oppfattes som en terrenghøyde (Rød, 2015, s. 225). Implementeringen av kulverter og stikkrenner kan ha blitt påvirket av subjektivitet, både på grunn av manuell opptegning av linjene og eventuelle kulverter og stikkrenner som har blitt oversett under kartleggingen. Denne usikkerheten kunne vært unngått hvis de opprinnelige stikkrennepunktene fra kommunen hadde vært symbolisert som linjer med klare endepunkter.

7.5 Usikkerhet med metodene

Det er flere usikkerhetsmomenter ved de hydrologiske modelleringene som har blitt brukt i denne oppgaven, noe som er viktig å poengtere da usikkerheter i kartlegging av overvannsområder kan ha påvirket kartleggingen av utsatte bygg og sluk. Zhang og Goodchild (2002) nevner at analyseprosessen vil innebære usikkerhetsmomenter fra datainnsamling til geoprosessering og bruk av data, noe som har vært tilfelle i analyseprosessen til denne masteroppgaven. Videre skriver Zhang og Goodchild (2002) at det er svært usannsynlig at en kompleks geografisk verden kan reduseres til en modell uten usikkerhetsmomenter. Delkapittel 7.5 går derfor gjennom usikkerhet ved den hydrologiske modelleringen, for deretter å gi eksempler på feilkilder fra kartleggingen. Dette gjøres for å undersøke om metodene gir tilstrekkelige resultat og kan vise hvilke bygg og sluk som er utsatte ved intense nedbørshendelser.

7.5.1 Oppfyllingsverdier

I forbindelse med fremtidige klimaendringer vil intensitet og hyppighet på nedbørshendelser øke (Hanssen-Bauer et al., 2015). Ifølge Hanssen-Bauer et al. (2015, s. 112) er det usikkerhet rundt nedskalerte nedbørsverdier fra klimamodeller, og om disse representerer realistisk korttidsnedbør i Norge. Som nevnt i avsnitt 5.3.2.8 er oppfyllingsverdiene til forsenkningene basert på IVF-kurvene for Asker for ulike gjentaksintervall. I forbindelse med IVF-kurvene er det spesielt stor usikkerhet knyttet til dimensjonerende nedbørstall som er basert på gjentaksintervall ved 200 år (Klimaservicesenter, u.å.-a). Siden oppfyllingsverdiene for forsenkningene blant annet er basert på et 200 års gjentaksintervall, vil disse tallene inneholde usikkerhet. Det er også vanskelig å predikere nøyaktige nedbørsmengder i forbindelse med fremtidige nedbørshendelser.

Som nevnt innledningsvis kan fremtidig nedbør forekomme intenst og kortvarig i smale og lokale geografiske soner (Borga et al., 2011; Hanssen-Bauer et al., 2015). Som nevnt i innledningen ble det målt 70 mm i løpet av 40 minutter under stormen Frida i 2012 på en personlig nedbørmåler (Beldring et al., 2012). Denne nedbøren ble ikke registrert på den lokale nedbørstasjonen i Drammen fordi nedbøren kom i en smal sone som ikke omfattet området rundt nedbørstasjonen. Det er derfor en mulighet at lokale pluviometre ikke inneholder informasjon om slike nedbørshendelser, og kan derfor ikke predikere fremtidige hendelser med hundre prosent sikkerhet. Det er mulig at oppfyllingsverdiene som har blitt kalkulert for forsenkningene i denne oppgaven er for lave, sett i forbindelse med fremtidige intense nedbørshendelser. Det kan hende at det er bedre å ta utgangspunkt i en ekte nedbørshendelse, slik Rambøll (2018, unpubl.) gjorde i sin rapport, for å få mer realistiske tall.

Figur 49 og Figur 50 viser at oppfyllingsverdiene har blitt påvirket av valg av varighet på dimensjonerende nedbør. Figur 50 viser at noen av forsenkningsområdene har blitt kartlagt slik at de representerer et annet gjentaksintervall ved 24 timers varighet sett i forhold til én time varighet. Det er derfor knyttet usikkerheter til valg av varighet på dimensjonerende nedbør, da det ikke står spesifisert hvilken nedbørsvarigheter en skal ta utgangspunkt i. Et eksempel er en forsenkning som representerer et større enn 200-årsregn ved 1-times nedbør, men representerer 100-årsregn ved 24 timers varighet, noe som indikerer et mer sannsynlig utfall.

7.5.2 Infiltrasjon og løsmasser

De hydrologiske modellene som har blitt brukt i denne masteroppgaven er svært forenklet, og de naturlige prosessene som forekommer i terrenget har blitt representert som matematiske likninger (Vatne, 2013, s. 42). Modellen tar utgangspunkt i at alt vann vil renne som overvann, men det er mange andre faktorer som spiller en rolle i forbindelse med drenering. I følge Sulebak (2007, s. 309-310) vil vegetasjon, arealbruk, jordtype samt helning og lengde påvirke overflateavrenning. Et eksempel på dette kan være avrenning på asfalt sammenliknet med avrenning i skogen. I studieområdet er det store områder med asfalt, i tillegg til at løsmassetypen består av fyllmasse og leire/silt, noe som har lav permeabilitet (Sulebak, 2007, s. 305). Impermeable overflater har høyere avrenning enn permeable overflater, samt at sannsynligheten for oppsamling av vann er høyere for tette overflater (Di Salvo et al., 2017). Andre områder i studieområdet er bestående av skogsområder eller grøntarealer. Grøntarealer vil forsinke overvannet, og bidra til lokal overvannshåndtering ved at overvannet får magasineringsmuligheter og hastigheten til overvannsavrenningen vil derfor avta (Parsasyrat

& Jamali, 2015). Overflatens egenskaper til å infiltrere vann bør derfor være en faktor i forbindelse med kartlegging av utsatte områder for overvann, fordi områder med impermeable flater er mer utsatt for overvann enn områder med høy infiltrasjonskapasitet.

Flere av løsmassetypene i studieområdet er eroderbare, noe som bør tas hensyn til i planleggingen i forbindelse med sedimenttransport (Selby, 1993, s. 107-122). Ved høy helning vil det oppstå Hortons overflateavrenning fordi vannet vil drenerer nedover terrenget og dermed ikke rekker å infiltreres i jorden (Knighton, 1998, s. 68). Det er derfor større sannsynlighet for at overvann oppsamler seg i flate områder, enn i et område med høy helning siden vannet vil drenerer. I motsetning til dette vil områder med høy helning være utsatt for høy avrenning, og dermed høyere erosjonsfare (Sulebak, 2007, s. 310). Dette bør derfor også inkluderes som faktor i hydrologisk modellering, fordi økt avrenning kan gi større skader enn lav avrenning derav større fare for bygg som ligger i nærheten til drenslinjer med høy avrenning.

Det er verdt å nevne at løsmassekart inneholder usikkerheter fordi de opptrer på liten målestokk. Dette er en av årsakene til at Balstrøm og Crawford (2018) ikke har inkludert infiltrasjonsevnen til løsmassene inn i modellen. Dette er også en av årsakene til at det kun ble utført en visuell og overfladisk vurdering av løsmassene sett i forbindelse med risikoområdene i denne kartleggingen. For å inkludere slike faktorer på en mer korrekt måte bør det brukes andre programmer som tar hensyn til slike hydrologiske faktorer, som for eksempel MIKE. Det er også verdt å nevne at disse faktorene ikke er inkludert i oppgavens modeller fordi modellene kun skal gi et grovt resultat over mulige områder som er utsatt for overvann, i tillegg til at modellen kan brukes av personer uten ekspertise innenfor hydrologi.

7.5.3 Usikkerhet rundt generering av dreneringslinjer

De kartlagte drenslinjene gir en indikasjon på hvor de største korridorene med vann blir transportert i terrenget (Balstrøm, 2022). Dreneringslinjene gir derimot ikke informasjon om bredden på flomveiene, hastighet på vannføringen eller nøyaktig vannmengde som vil bli transportert. I tillegg til dette er flomveier og elver dynamiske (Knighton, 1998, s. 3), og endringer som blir gjort oppstrøms i nedbørfeltet kan påvirke flomløpet nedstrøms. Dette er gjeldende for både menneskelig aktivitet i forbindelse med utbygging eller mangel på vedlikehold, men også i forbindelse med blokkering i drenslinjene forårsaket av sedimenter, velte trær, søppel og andre materialer som kan forekomme ved intense nedbørshendelser. Dette betyr at de kartlagte drenslinjene ikke nødvendigvis er det reelle løpet vannet vil ta ved

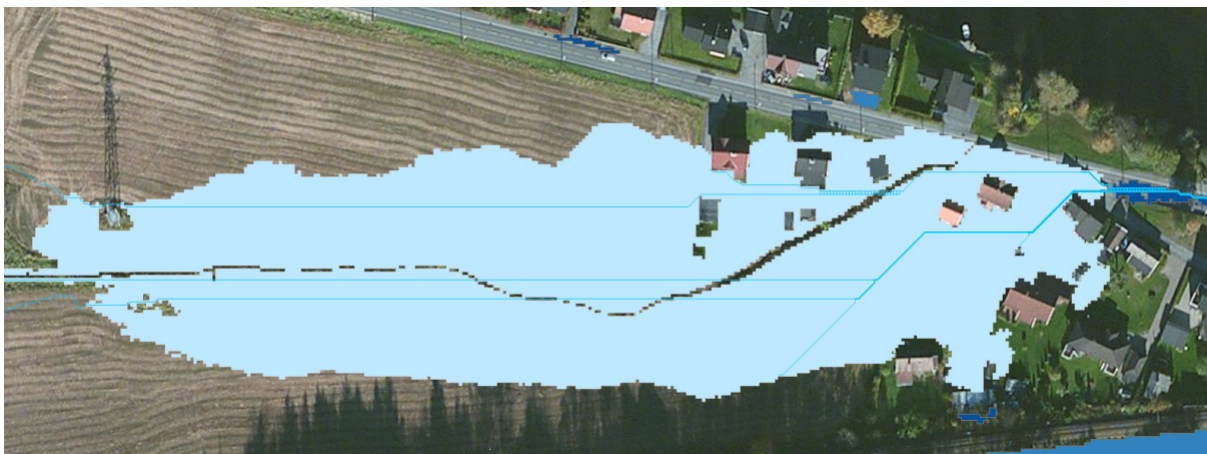
en kraftig nedbørshendelse, på grunn av andre faktorer oppstrøms som kan påvirke drensløpet. Selv om det er kartlagt en forsenkning eller en drenslinje i et område, så er det ikke gitt at vannet vil akkumulere eller dreneres i akkurat disse områdene. Det er også vanskelig å konkludere med at drenslinjene er korrekte uten at resultatene er kvalitetssikret. I følge Zhang og Goodchild (2002) kan usikkerhet også innebære mangel på informasjon, noe som fremkommer i disse eksemplene – mangler på hydrologiske faktorer i modelleringen.

I denne masteroppgaven ble det valgt å inkludere en fem meter buffersoner rundt dreneringslinjene for å markere bygg og sluk som er innenfor faresonen for flomveier. Som nevnt i 5.3.2.9 ble verdien basert på Pedersen og Bratlie (2022) som hadde valgt fem meter buffer i forbindelse med flomveier. I følge Hanssen-Bauer et al. (2015) skal fremtidig vannføring i små vassdrag øke med 20%. Dette kan føre til at drenslinjene som er kartlagt med lav vannføring, kan potensielt være farligere enn antatt hvis nedbørsmengdene øker i stor grad. Det kan derfor være en mulighet for at bygg og sluk som befinner seg utenfor buffersonen til drenslinjene kan være utsatt for overvann. Det samme gjelder bygg og sluk som befinner seg i umiddelbar nærhet til forsenkningsområder. Denne kartleggingen har inkludert samme bufferverdi for alle kartlagte drenslinjer, uavhengig av vannføring. Som nevnt tidligere vil vannveier med høy vannføring vil gjøre mer skade enn vannveier med lav vannføring på grunn av høyere sedimenttransport og erosjonsevne. Den valgte buffersonen i denne kartleggingen kan derfor være for lav. En alternativ måte å bestemme buffersonen for faresone på kan derfor være å implementere ulike buffersoner for ulike drenslinjer basert på mengde vannføring i de ulike drenslinjene – eksempelvis større buffersoner for drenslinjer med høy vannføring og omvendt. På denne måten kan byggene som er mer utsatt for påvirkning fra overvann bli fremhevet.

En annen usikkerhet i forbindelse med den hydrologiske analysen er valg av terskelverdier for klassifiseringen av dreneringslinjene. Denne oppgaven baserte klassifiseringen av drenslinjene på hydrologiske kalkuleringer for Trondheim kommune. Denne masteroppgaven baserte klassifiseringene på tallene til Meiforth (2013), noe som kan ha ført til usikkerheter på grunn av forskjeller i geografisk lokasjon og størrelser på nedbørfeltene, for henholdsvis Trondheim og Drammen. I masteroppgavens analysen ble det valgt å utelate terskelverdiene fra tabellen til Bratlie (2015), som var basert på observasjoner fra stormen Frida i Nedre Eiker kommune. Valget ble basert på detaljeringsgraden til klassifiseringene, og relevansen til formålet med denne analysen. Selv om klassifiseringene til Bratlie (2015) er basert på et område som ligger

geografisk nært studieområdet var detaljeringsgraden for høy i sammenligning med formålet med analysen. Nesten alle bygningene innenfor studieområdet ble kartlagt som utsatt når denne klassifiseringen ble brukt. Denne klassifiseringen bør brukes hvis formålet til analysen er på eiendomsnivå med krav om høy detaljeringsgrad i forbindelse med kartlegging av flomveier, slik at de minste flomveiene blir kartlagt.

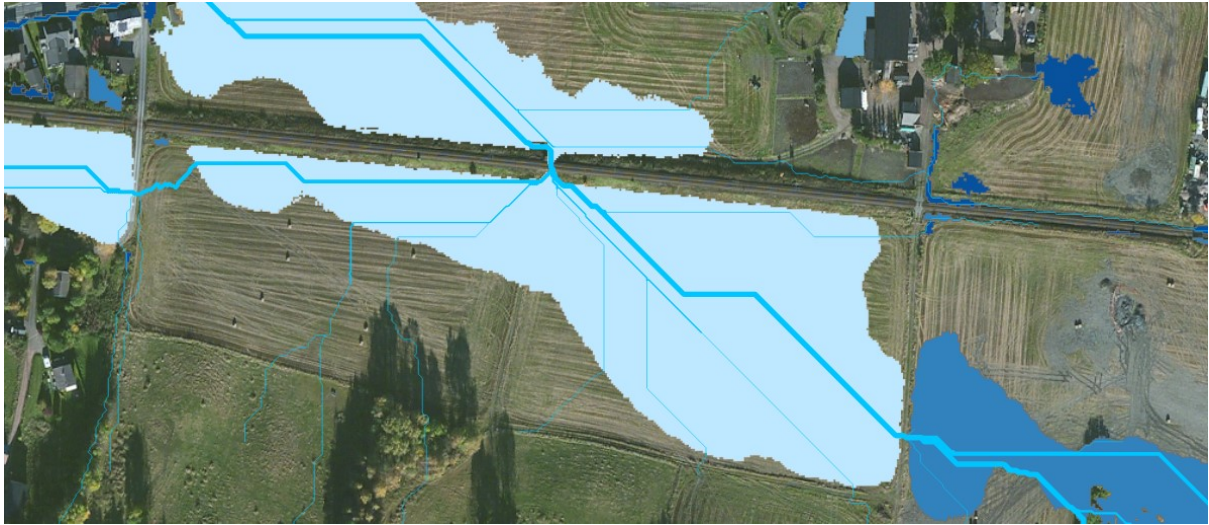
I forbindelse med generering av flomveier ble det valgt å bruke D8 algoritmen. Som nevnt av Vatne (2013, s. 42) er hydrologiske modelleringer basert på matematiske forenklede likninger, og i denne sammenhengen bidrar dette til at vannet kun vil renne i åtte forskjellige retninger. I virkeligheten vil ikke vannet begrenses ved å kun ha åtte forskjellige dreneringsretninger, noe som kan bidra til usikkerhet knyttet til generering av drenslinjer. Som tidligere nevnt kan D8 algoritmen påvirke genereringen av dreneringslinjene ved at det blir dannet urealistiske strømningsmønstre for flate områder. Som vist i Figur 55 er det synlig at noen av dreneringslinjene har blitt generert som rette linjer. Områdene der det har blitt generert flest rette drenslinjer er Pukerud, Gulskogen Vest og Sundland. Figur 64 viser at området ved Pukerud er bestående av rette drenslinjer over et jordbruksareal. Figuren viser at drenslinjene har lav vannføring, og skadepotensialet fra dreneringslinjene kan derfor ansees som lavt. Området har derimot blitt kartlagt som sårbart i forbindelse med forsenkninger, på grunn av at det er lokalisert en større forsenkning i et område som påvirker flere bygg. Figur 64 viser at de rette drenslinjene er lokalisert innenfor forsenkningen.



Figur 64: Utsnitt over forsenkning og drenslinjer ved Pukerud

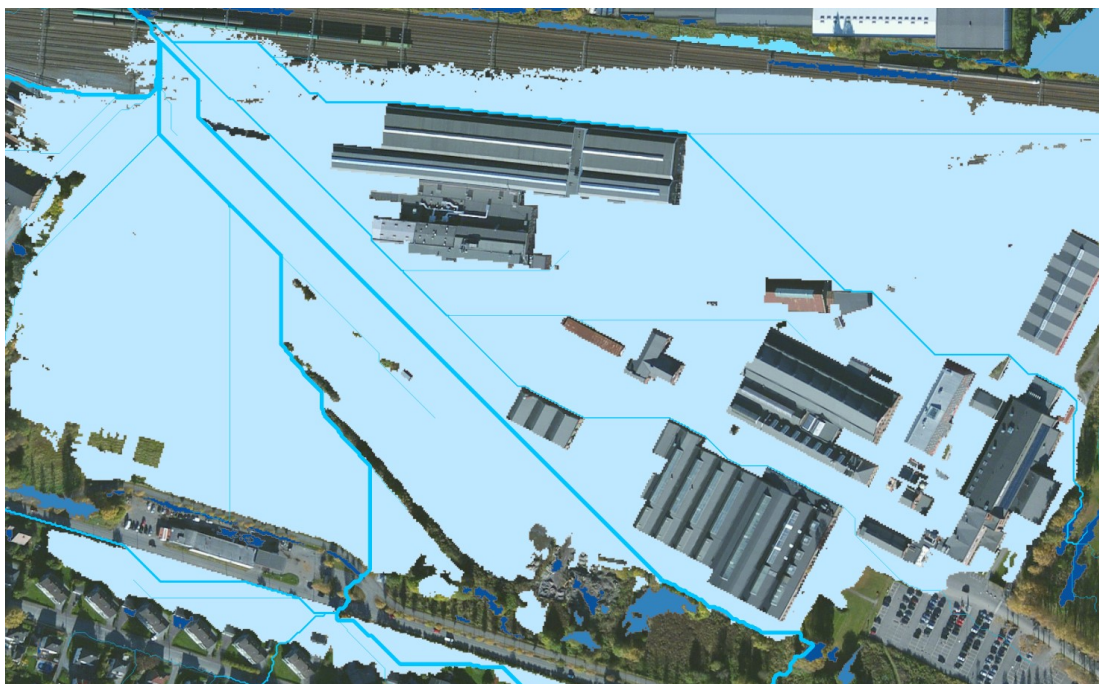
Et annet område som er bestående av rette dreneringslinjer er et jordbruksområde ved Gulskogen Vest. Figur 65 viser at dreneringslinjene er lokalisert innenfor en forsenkning, og har urealistiske strømningsmønstre på grunn av rette linjer. Det er ingen bygg eller sluk i

umiddelbar nærhet til risikoområdene, noe som betyr at dette området ikke utgjør en stor fare for overvann i forhold til bygg eller sluk.



Figur 65: Utsnitt av en forsenkning og drenslinjer ved jordbruksarealet vest for Gulskogen Vest

Figur 66 viser at området ved Sundland er bestående av flest genererte rette drenslinjer. Sundland er som nevnt et jernbaneverksted og er dermed bestående av jernbanelinjer, godstog og andre menneskeskapte konstruksjoner. Det er et flatt område med mange åpne flater, noe som gjør at nøyaktige dreneringslinjer kan være vanskelig å predikere for dette området. Siden hele dette området er angitt som et forsenkningsområde, vil mesteparten av området være utsatt for overvann uavhengig av hvor drenslinjen vil drenere.

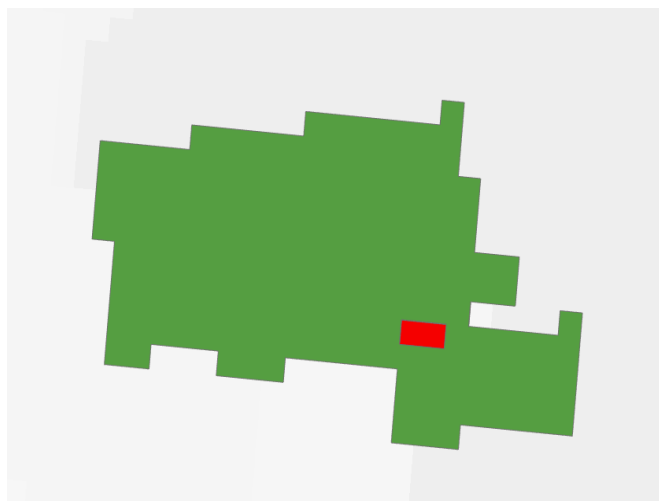


Figur 66: Utsnitt av en forsenkning og drenslinjer lokalisert på Sundland

Resultatene viser at områdene der det er lokalisert rette drenslinjer er også bestått av større forsengkninger. Eksemplene vist i figurene ovenfor bekrefter at alle drenslinjer som går gjennom forsengkninger vil bestå av rette linjer i stedet for et realistisk strømningsmønster. I følge Balstrøm (2022) kan dreneringslinjer som går gjennom forsengkninger få merkelige strømningsmønstre, fordi de viser dreneringsveien når forsengkningen er fylt. Hvis nedbørfeltet over studieområdet var stort i areal og kun bestående av flate områder, ville det vært lønnsomt å bruke en algoritme som inkluderer flerveisstrømning for å unngå rette drenslinjer, for å kunne se nøyaktig hvor vannet vil drenere. I denne kartleggingen ble det ikke generert rette drenslinjer utenfor forsengkningens områder. Dette er årsaken til at de genererte drenslinjene har blitt godkjent, i tillegg til at Balstrøm (2022) skriver at det er vanlig at dreneringslinjer fremstilles som rette linjer når de er lokalisert innenfor en forsengkning. Bygningene og slukene som er lokalisert innenfor forsengkningene vil uansett bli kartlagt som *utsatt* på grunn av forsengkningene, uavhengig av nøyaktig plassering av drenslinjene.

7.5.4 Usikkerhet ved generering av forsengkninger

I forbindelse med kartlagte forsengkningens områder, har det blitt kartlagt flere bygg som er utsatte for flom. Selv om byggene har blitt kartlagt som utsatte, er det ikke sikkert at alle forsengkningene vil bidra til skader på byggene da det ikke er gitt at vann vil samle seg i de kartlagte områdene. Etter forsengkningens analyse ble det synlig at noen av de kartlagte forsengkningene var lokalisert innenfor bygningspolygonene. Årsaken til dette var at noen av bygningspolygonene var bestående av hull, som videre ble registrert som forsengkningens piksler. Det er antatt at hullene ble generert på grunn av rasteriseringen av bygningspolygonene som ble utført tidligere i analysen. I følge Zhang og Goodchild (2002) kalles slike feilkilder for prosesseringsfeil, og oppstår ofte i konverteringen fra vektor data til raster data. På grunn av at bygningene ble hevet med 30 meter, fikk disse forsengkningene høye oppfyllingsverdier. For å fjerne disse forsengkningene ble de gjeldende bygningspolygonene redigert, slik at hullene ble tettet, og geoprosesseringsmodellen ble kjørt på nytt. Figur 67 viser et eksempel på en forsengkning som er kartlagt innenfor en bygningspolygon.



Figur 67: forsenkning (rød) som er lokalisert innenfor en bygningspolygon (grønn)

Etter denne prosessen var det fortsatt noen forsenkninger som ble lokalisert innenfor en bygningspolygon. I følge Maksimović et al. (2009) kan forsenkninger oppstå innenfor en bygningspolygon på grunn av objekter på hustak eller andre lignende årsaker. Maksimović et al. (2009) løste dette problemet ved å ha temalaget med forsenkningspolygoner over temalaget med bygningspolygoner, for å kunne identifisere og fjerne alle forsenkninger som befinner seg innenfor en bygningspolygon. Det ble valgt å bruke samme metode som Maksimović et al. (2009) for å fjerne de resterende forsenkningene som var lokalisert innenfor bygningspolygon.

Etter forsenkningsanalysen ble det oppdaget noen kartlagte forsenkninger som ikke var realistiske, eller som ikke nødvendigvis vil fylles opp med vann. Eksempler på slike forsenkninger blir presentert nedenfor. Figur 68 viser en kartlagt forsenkning i begynnelsen av Strømsåstunnelen. Denne forsenkningen hadde en oppfyllingsverdi på 564 mm, noe som er et høyt tall i forbindelse med dagens nedbør og fremtidig nedbør. Forsenkningen er lokalisert ved inngangspartiet til en tunnel med helning. GIS oppfattet dette området som en forsenkning fordi den registrerte fjellsiden der inngangspartiet til tunnelen var lokalisert som en blokkering. Forsenkning kan derfor registreres som en feilkilde, fordi vannet ikke vil samle seg her i virkeligheten på grunn av drenering på innsiden av tunnelen. Eksempelet viser at det er nødvendig å undersøke det underliggende terrenget til kartlagte forsenkninger eller dreneringslinjer, slik at man kan identifisere feilkilder. Forsenkninger eller drenslinjer som ikke er realistiske i forbindelse med terrenget bør ekskluderes fra resultatet eller vektlegges i liten grad.



Figur 68: Forsenkning ved Strømsåstunnelen

Figur 69 viser et annet eksempel på forsenkninger som ikke er realistiske. Figur 69 viser forsenkninger som ble kartlagt i omrisset rundt vannområdene. Tidlig i forsenkningsanalysen ble vannområder fra FKB subtrahert fra terrengmodellen, slik at vannområdene ikke skulle oppfattes som forsenkninger. Selv om data for vannområdene ble fjernet, ble det fortsatt registrert forsenkninger i utkanten av vannområdene. Disse forsenkningsområdene kan derfor oppfattes som en del av vannområdene, på grunn av mulig erosjon fra vannet. Forsenkningene kan derfor identifiseres som feilkilder. Disse feilkildene er av lav karakter og lett å identifisere, men er verdt å nevne i forbindelse med fremtidig kartlegging.



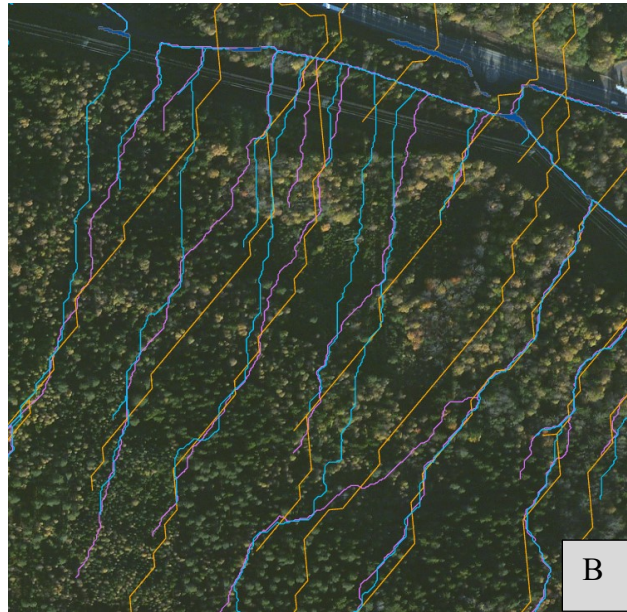
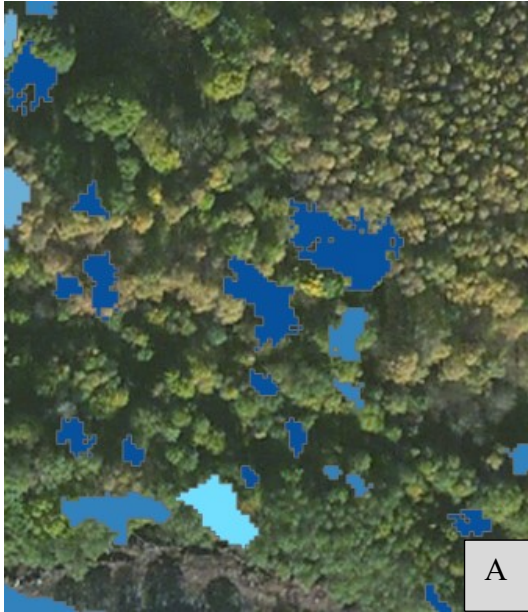
Figur 69: Lyseblå polygon representerer vannområder. Mørkeblå representerer kartlagt forsenkning.

Et tredje eksempel er vist i Figur 70 der forsenkningene er lokalisert i nærheten av jernbanelinjene. Figur 70 viser at forsenkningene er lokalisert i inn- og utgangen på en undergang for fotgjengere som går under jernbanen. Det er blitt kartlagt to forsenkninger i hver ende av undergangen, med oppfyllingsverdier på 255 mm og 169 mm. På samme måte som forsenkningen ved Strømsåstunnelen registrerte GIS at det var en blokkering, og at vannet ikke har mulighet til å strømme gjennom undergangen. For å unngå slike problemer i fremtidige analyser burde undergangene ha blitt implementert i terrengmodellen ved å brenne linjer som representerer start- og slutt punkt for undergangen inn i terrengmodellen. Dette har blitt gjort i studien til Meiforth (2013). Det ble valgt å utelate denne modifieringsprosessen fra analysen på grunn av tidsbegrensning, i tillegg til få antall underganger innenfor studieområdet. Dette er det eneste eksempelet innenfor studieområdet der det ble kartlagt forsenkninger ved inn- og utgang i en undergang.



Figur 70: Utsnitt over to forsenkninger lokalisert ved inn- og utgang i en undergang under jernbanen

Figur 71 viser eksempler på kartlagte forsenkninger og drenslinjer som er lokalisert i skogsområder. I følge Bratlie Bratlie (2013) kan lasermålingene som terrengmodellen har blitt basert på, inneholde feil i områder med tett vegetasjon, spesielt i områdene rundt bekker. Forsenkningene og drenslinjene som har blitt kartlagt i områder med tykk vegetasjon bør derfor ikke vektlegges på grunn av usikkerheter rundt lasermålingene for disse områdene. Forsenkningene og drenslinjene som har blitt kartlagt i skogsområder med høyt vegetasjonsdekket bør derfor ikke brukes som sikkert grunnlag i forbindelse med overvannsplanlegging.



Figur 71: Forsenkninger lokalisert i skogsområder (a) og drenslinjer lokalisert i skogsområder (b)

8 Avslutning

8.1 Konklusjon

Er kartlegging av drenslinjer og forsengkninger en nyttig måte å identifisere utsatte bygg og sluk innenfor Gulskogen i Drammen?

Denne oppgaven har brukt ulike hydrologiske metoder for å generere drenslinjer og forsengkningssområder i GIS. Metodene som har blitt brukt til kartleggingen har vist å inneholde usikkerheter i alle ledd, fra datainnsamling til resultat – blant annet feil i rasterisering av bygningspolygon, usikkerhet rundt dreneringsalgoritmen D8 og symbolisering av resultat. Samtidig har resultatene vist at kartlegging av drenslinjer og forsengkninger kan gi en indikasjon på hvilke bygg som kan bli rammet av overvann innenfor studieområdet. Kartleggingen indikerte også hvilke sluk som er mest utsatt for blokkering, i tillegg til hvilke områder som har behov for flere sluk eller annet overvannshåndtering. Allikevel er det flere metoder som er utelatt fra oppgaven, noe som illustrer kompleksiteten angående hydrologisk modellering.

Klimaendringer og fortetting i urbane områder kan føre til økt forekomst og konsekvens av overvann, noe som gjør denne oppgaven dagsaktuell i forbindelse med kartlegging av mulige risikoområder. Ved å kartlegge dreneringslinjer og forsengkninger i terrenget kan man bidra til å forhindre flomskader ved å innføre tiltak der det er nødvendig, eller angi flomsoner for å forhindre utbygging i utsatte områder (Pedersen & Bratlie, 2022). Modellene i denne studien bruker inngangsdata som er offentlig tilgjengelig samt lett anvendelig for brukere i det offentlige samt private, sett i forhold til andre hydrologiske modeller som krever mer ekspertise og avanserte datasett. Det er viktig å understreke at kartleggingen er en grov forenkling av virkeligheten sett i forbindelse med urbane dreneringsforhold, og må derfor kun brukes til overordnede formål.

Hvilken påvirkning kan modifisering og oppløsning av terrengmodell ha for korrekt hydrologisk modellering av studieområdet?

Modifisering av terrengmodell har vist seg å være viktig i forbindelse med hydrologisk modellering. Resultatene har vist at implementeringen av bygninger samt fjerning av vannområder har påvirket resultatene i stor grad, og er en nødvendig modifisering. Implementering av fortauskanter har også vist seg å påvirke resultatene for terrengmodellene med høy oppløsning, men ikke for 10-meter terrengmodell. Implementeringen av underganger og kulverter ville påvirket resultatene i større grad hvis studieområdet var bestående av flere slike strukturer. Resultatene har vist at hvis terrengmodellen som brukes til hydrologiske modelleringer ikke blir modifisert, vil ikke resultatene være hydrologisk korrekte.

Oppløsning av terrengmodellen har også vist seg å være en viktig faktor for korrekt hydrologisk modellering. Valg av oppløsning bestemmer hvor detaljert terrengmodellen oppfatter terrengvariasjonene, noe som ble vist i resultatene. Terrengmodellen med 10 meter-oppløsning genererte kartlagte drenslinjer som ikke fulgte det underliggende terrenget, mens de kartlagte forsenkningene var unøyaktige og svært grove. I motsetning til dette viste resultatene at drenslinjer og forsenkninger basert på terrengmodellene med 25-centimeter oppløsning og 1-meter oppløsning bestod av flere likheter. Det ble derfor konkludert med at 25-centimeter oppløsning bør brukes for områder som har tilsvarende tilgjengelig data, men at 1-meter terrengmodell kan brukes for resterende områder hvis det tas hensyn til usikkerhetene som ble nevnt i oppgaven – mulige overdrivelser av flomsoner og lavere antall kartlagt forsenkninger, i tillegg til noe mindre oppfattelse av terrengvariasjoner.

8.2 Forslag til videre arbeid

Modellene som har blitt brukt i denne masteroppgaven har vist seg å inneholde usikkerheter, spesielt i forbindelse med hydrologiske faktorer. Det hadde derfor vært interessant å inkludert vektraster for infiltrasjon eller ruhet, for deretter å se hvilken påvirkning dette ville hatt på resultatene. Det hadde også vært interessant å inkludere overflateavrenning fra andre forsenkninger og drenslinjer, og deretter sett på hvilke forsenkninger som vil bli påvirket av dette i størst grad.

For å validere metodene som har blitt brukt hadde det vært nyttig og sammenlignet resultatene med registrerte skadedata fra kommunen, både i forhold til lokasjonene til de kartlagte forsenkningene og drenslinjene men også i forhold til tidligere skadede bygg. For at kartleggingen av utsatte bygg og sluk skal være mer realistiske burde også bufferverdien rundt drenslinjene undersøkes i større grad. Dette er også gjeldende for tallene knyttet til klassifisering av kartlagte drenslinjer spesielt for nedbørfeltene tilhørende Gulskogen, slik at grunnlaget for klassifiseringen blir basert på korrekte tall.

Referanser

- Albă, C. D., Zamfir, A. G. & Boengiu, S. (2018). Urban hydrography and Bluespots map of Craiova (Romania). *Journal of the Geographical Institute "Jovan Cvijic", SASA*, 68(3), 321-332.
- Al-Muqdad, S. W., Merkel, B. J. (2011). Automated watershed evaluation of flat terrain. 3(12), 892.
- American Society for Photogrammetry. (2014). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), A1-A26. https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2015/01/ASPRS_Positional_Accuracy_Standards_Edition1_Version100_November2014.pdf
- Balstrøm, T. (2022). *Model bluespots to map flood risk*. Esri. <https://learn.arcgis.com/en/projects/model-bluespots-to-map-flood-risk/>
- Balstrøm, T. & Crawford, D. (2018). Arc-Malstrøm: A 1D hydrologic screening method for stormwater assessments based on geometric networks. *116*, 64-73.
- Beldring, S., Sakshaug, H. & Eken, M. (2012). *Flom og stor vannføring forårsaket av ekstremværet Frida august 2012* (NVE Rapport 31). Norges vassdrag- og energidirektorat.
- Borga, M., Anagnostou, E., Blöschl, G., Creutin, J.-D. (2011). Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. *14*(7), 834-844.
- Bratlie, R. (2015). Beregning av flomveier med eksempler på bruk i kommunal forvaltning. *Kart og Plan*, 75(1), 24-34.
- Bratlie, R. (2013, 29. april). GIS finner flomveiene. *Vannforeningen*, s. 272-277. https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2013_875979.pdf
- Bridge, J., S. (2003). *Rivers and Floodplains: Forms, Processes, and Sedimentary Record*. Blackwell Publishing.
- Byggteknisk forskrift. (2017). *Byggteknisk forskrift (TEK17) med veiledning (7-2)*. Direktoratet for byggkvalitet.
- Chauve, A., Durrieu, S., Bretar, F., Pierrot-Deseilligny, M. & Puech, W. (2007). Processing full-waveform lidar data to extract forest parameters and digital terrain model:

- validation in an alpine coniferous forest. Workshop on " Forests and Remote sensing: Methods and Operational Tools" (ForestSat)
- Chen, J., Hill, A. A. & Urbano, L. D. (2009). A GIS-based model for urban flood inundation. *373(1-2)*, 184-192.
- Di Salvo, C., Ciotoli, G., Pennica, F. & Cavinato, G. P. (2017). Pluvial flood hazard in the city of Rome (Italy). *13(2)*, 545-553.
- Direktoratet for byggkvalitet. (2017). *Veiledning om tekniske krav til byggverk*. Direktoratet for byggkvalitet. <https://dibk.no/regelverk/byggteknisk-forskrift-tek17/>
- Doswell, C. A. (2015). Hydrology, floods and droughts: Flooding. I *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2. utg., s. 201-208).
- Drammen kommune. (2015a). *Drammen kommune: Kommuneplanens arealdel 2014-2025*. Drammen kommune. <https://www.drammen.kommune.no/globalassets/tjenester/arealplan-kart-og-geodata/dokumenter/gjeldende-kommuneplaner/drammen/plankart.pdf>
- Drammen kommune. (2015b). *Kommuneplanens arealdel 2014-2036: Veileder for overvannshåndtering i Drammen*. Drammen kommune. https://www.drammen.kommune.no/globalassets/tjenester/arealplan-kart-og-geodata/dokumenter/gjeldende-kommuneplaner/drammen/vedlegg-16_-overvann.pdf
- Drammen kommune. (2021, 2. februar). *Bestemmelser og retningslinjer*. Drammen kommune. <https://www.drammen.kommune.no/tjenester/arealplan-kart-seksjonering-oppmaaling/kommuneplaner-retningslinjer/planbeskrivelsen/7.-bestemmelser-og-retningslinjer/>
- Dyrrdal, A. V. & Førland, E. J. (2019). Klimapåslag for korttidsnedbør. *Anbefalte Verdier For Norge (Climate Surcharge for Short-Term Precipitation. Recommended Values for Norway)*, 25.
- Esri. (u.å.-a). *Con (Spatial Analyst)*. Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/con-.htm>
- Esri. (u.å.-b). *Flow Direction*. Esri. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/flow-direction.htm>
- Esri. (u.å.-c). *Hillshade function*. Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/hillshade-function.htm>
- Esri. (u.å.-d). *How Fill works*. Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-fill-works.htm>

- Esri. (u.å.-e). *How Flow Accumulation works*. Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm>
- Esri. (u.å.-f). *Minus (Spatial Analyst)*. Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/minus.htm>
- Esri. (u.å.-g). *Snap Pour Point*. Esri. Hentet 9. november 2021 fra <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/snap-pour-point.htm>
- Esri. (u.å.-h). *Watershed (Spatial Analyst)*. Esri. Hentet 9. november 2021 fra <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-analyst/watershed.htm>
- Esri. (u.å.-i). «*What is ModelBuilder?*». Esri. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.7/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- Gruber, S. & Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. 33, 171-194.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E., Roald, L., Børsheim, K., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S. & Sorteberg, A. (2015). *Klima i Norge 2100* (2). Miljødirektoratet. https://img4.custompublish.com/getfile.php/3777025.2344.tduaevvcew/Klimarapport2100_kunnskapsgrunnlagKlimatilpassing2015.pdf?return=www.sjf.no
- Hengl, T. & Evans, I. S. (2009). Mathematical and digital models of the land surface. 33, 31-63.
- Heywood, I., Cornelius, S. & Carver, S. (2011). *An Introduction to Geographical Information Systems* (4. utg.). Pearson Education Limited.
- Johansen, J. A. & Moldekleiv, H. J. S. (2016). *Utprøving av metodikker for modellering av overvann i et urbant område ved bruk av ArcGIS, MIKE21 og MIKE FLOOD* [Norwegian University of Life Sciences, Ås].
- Johnsen, R. (2014, 13. mai). «Frida» kunne ha kostet oss liv. *Dagsavisen, Fremtiden*. <https://www.dagsavisen.no/fremtiden/nyheter/drammen/2014/05/13/frida-kunne-ha-kostet-oss-liv/>
- Jones, R. (2002). Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences*, 28(9), 1051-1060.
- Klimaservicesenter. (u.å.). *Hjelp til valg av IVF*. Klimaservicesenter. Hentet 10. februar 2022 fra <https://klimaservicesenter.no/kss/vrdata/ivf-veiledning>
- Klimaservicesenter. (u.å.). *Nedbørintensitet (IVF-verdier)*. Klimaservicesenter. Hentet 4. februar 2022 fra <https://klimaservicesenter.no/ivf?locale=nb&locationId=SN26890>

- Klimaservicesenter (2022, april). *Klimaprofil Buskerud*. Norsk klimaservicesenter.
<https://klimaservicesenter.no/kss/klimaprofiler/buskerud>
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes: A New Perspective*. Arnold.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J. & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems* (4. utg.). Wiley.
- Maksimović, Č., Prodanović, D., Boonya-Aroonnet, S., Leitao, J. P., Djordjević, S. & Allitt, R. (2009). Overland flow and pathway analysis for modelling of urban pluvial flooding. *47*(4), 512-523.
- Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M. I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell, E., Lonnoy, J. B. R., Matthews, T. K., MAycock, T., Waterfield, O., Yelekci, R. Y. & Zhou, B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. (Sixth Assessment Report)*. C. U. Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>
- Meesuk, V., Vojinovic, Z., Mynett, A. E. & Abdullah, A. F. (2015). Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations. *75*, 105-117.
- Meiforth, J. (2013). Modelling flood streams for urban planning in Trondheim, Norway. *UniGIS professional. Hentet, 23*, 2017.
- Miljødirektoratet. (2021, 16. august). *Overvann*. Miljødirektoratet.
<https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/vann-hav-og-kyst/overvann/>
- Murphy, P. N., Ogilvie, J., Meng, F. R. & Arp, P. (2008). Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *22*(12), 1747-1754.
- Murtnes, D. (2016). *Urbane flomveier: generering av drenslinjer for området Solumstrand i Drammen ved bruk av ArcGIS* [Norwegian University of Life Sciences, Ås].
- NGU. (u.å.). *Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase*. NGU.
https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/
- Norem, H., Flesjø, K., Sellevold, J., Lund, M. R. & Viréhn, P. L. E. (2016). *Overvannshåndtering og drenering for veg og jernbane* (NIFS Rapport 28). N. v.-o. energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_28.pdf
- NOU 2015:16. (2015). *Overvann i byer og tettsteder - Som problem og ressurs*. Klima- og miljødirektoratet.
<https://www.regjeringen.no/contentassets/e6db8ef3623e4b41bcb81fb23393092b/no/pdfs/nou201520150016000dddpdfs.pdf>

- NTB. (2012a, 8. august). *Skader for minst 150 millioner etter «Frida»*. VG.
<https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/KdzLe/skader-for-minst-150-millioner-etter-frida>
- NTB. (2012b, 8. august). *Skader for minst 150 millioner etter uværet Frida*. E24.
<https://e24.no/naeringsliv/i/4qrOmR/skader-for-minst-150-millioner-etter-uvaeret-frida>
- NVE. (2020). *Nedbørfelt (REGINE)*. NVE. Hentet 7. april
 fra <https://www.nve.no/kart/kartdata/vassdragsdata/nedborfelt-regine/>
- O'Callaghan, J. F. & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 28(3), 323-344.
- Ogania, J., Puno, G., Alivio, M., Taylaran, J. G. (2019). Effect of digital elevation model's resolution in producing flood hazard maps. 5(1), 95-106.
- Olsen, M. H., Hopland, A. A., Myrabø, S., Viréhn, P., Glad, P. A., Almenningen, O. E. & Traae, E. (2015). *Flom- og skredhendelsen Frida på Sørlandet 2012* (124). N. v.-o. energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2015/rapport2015_124.pdf
- Opach, T., Navarra, C., Rød, J. K. & Neset, T.-S. (2021). Pedestrian Routing and Perspectives: WayFinder's Route down the Lane—Come on with the Rain. 10(6), 365.
- Parsasyrat, L. & Jamali, A. A. (2015). The effects of impermeable surfaces on the flooding possibility in Zarrin-Shahr, Isfahan Municipal Watershed. 5(1), 28-38.
- Pedersen, T. B. & Bratlie, R. (2022). *Rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar: Korleis ta omsyn til vassmengder?* (NVE Veileder nr. 4). Norges vassdrags- og energidirektorat. https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_04.pdf
- Polat, N. & Uysal, M. (2015). Investigating performance of Airborne LiDAR data filtering algorithms for DTM generation. 63, 61-68.
- Qin, C., Zhu, A. X., Pei, T., Li, B., Zhou, C. & Yang, L. (2007). An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. 21(4), 443-458.
- Rambøll. (2018). Bydel Åssiden i Drammen: Terrengmodell overvann. Upublisert rapport.
- Roald, L. A. (2013). *Flom i Norge*. Tom & Tom.
- Rustad, M. E. & Hjarðar, H. K. (2020, 24. oktober). Kappløpet mot klimaendringene. E24.
<https://e24.no/naeringsliv/i/rgAJlw/kapploepet-mot-klimaendringene>
- Rød, J. K. (2015). *GIS: Verktøy for å forstå verden*. Fagbokforlaget.

- Saeed, M., Li, H., Ullah, S., Rahman, A.-u., Ali, A., Khan, R., Hassan, W., Munir, I. & Alam, S. (2021). Flood Hazard Zonation Using an Artificial Neural Network Model: A Case Study of Kabul River Basin, Pakistan. *Sustainability*, 13(24), 13953.
- Saksena, S. & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *530*, 180-194.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes* (2. utg.). Oxford University Press.
- Statistisk sentralbyrå. (u.å.). *Kommune Drammen (Viken)*. Statistisk sentralbyrå.
<https://www.ssb.no/kommunefakta/drammen>.
- Sulebak, J. R. (2007). *Landformer og prosesser: En innføring i naturgeografiske tema* (2. utg.). Fagbokforlaget.
- Vatne, G. (2013). Klima og flom - i fortid og framtid. I L. M. Bye, H. Lein & J. K. Rød (Red.), *Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge* (s. 33-50). Akademika forlag.
- Viréhn, P. L. E. (2014). *Water on devious ways: a GIS analysis* [NTNU].
- Weitkamp, C. (2005). LiDAR: introduction. I *Laser remote sensing* (s. 19-54). CRC Press.
- Xiaoye, L. (2008). Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in physical geography*, 32(1), 31-49.
- Yang, P., Ames, D. P., Fonseca, A., Anderson, D., Shrestha, R., Glenn, N. F., Cao, Y. (2014). What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?, *58*, 48-57.
- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C. & Zhang, J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. *100*, 65-71.
- Zhang, H., Yao, Z., Yang, Q., Li, S., Baartman, J. E., Gai, L., Yao, M., Yang, X., Ritsema, C. J. & Geissen, V. (2017). An integrated algorithm to evaluate flow direction and flow accumulation in flat regions of hydrologically corrected DEMs. *151*, 174-181.
- Zhang, J. & Goodchild, M. (2002). *Uncertainty in Geographical Information*. Taylor & Francis.
- Aano, A. H., Mora, R. Z. O., Lawrence, D. & Skaugen, T. (2019). Bruk av registrerte overvannskader for validering av beregnede vannveier og overvannansamlinger (bluespots).

